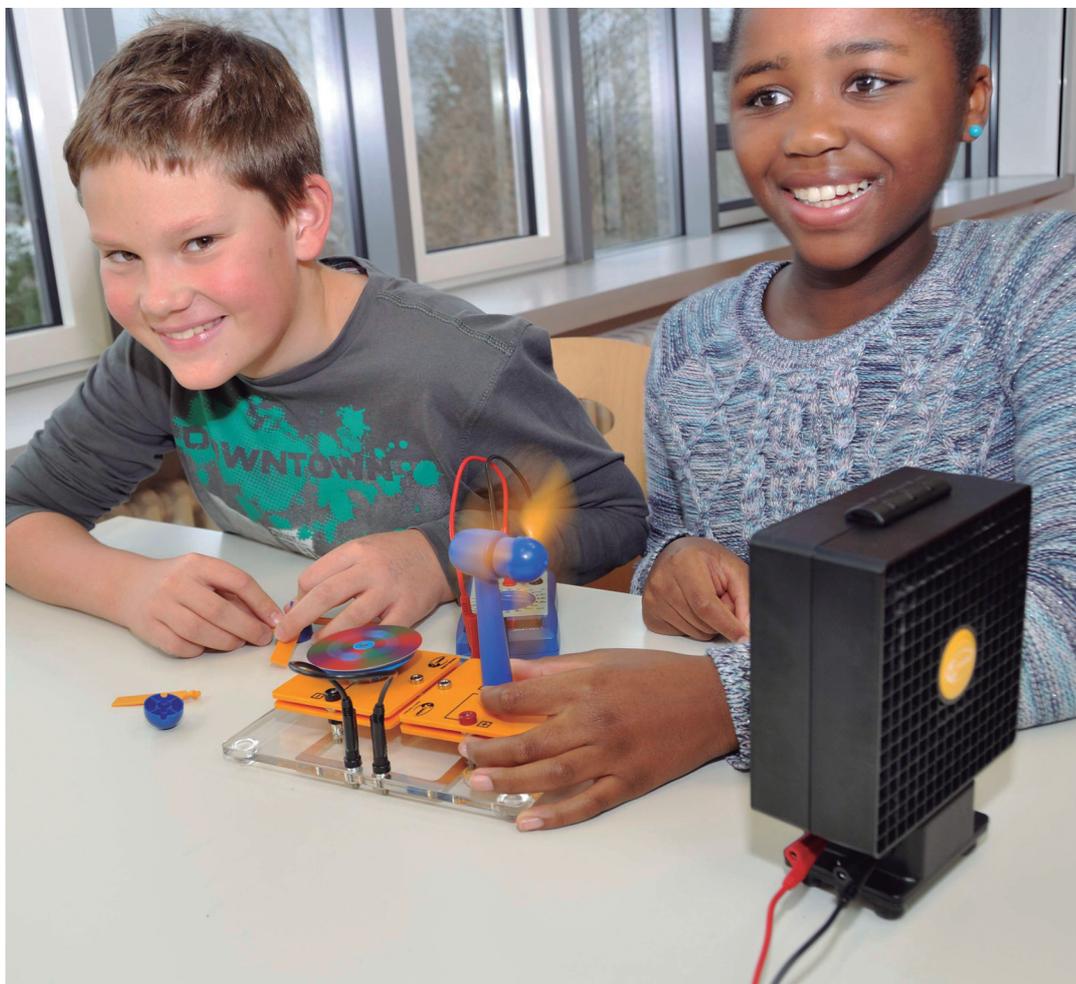


leXsolar-Wind Ready-to-go



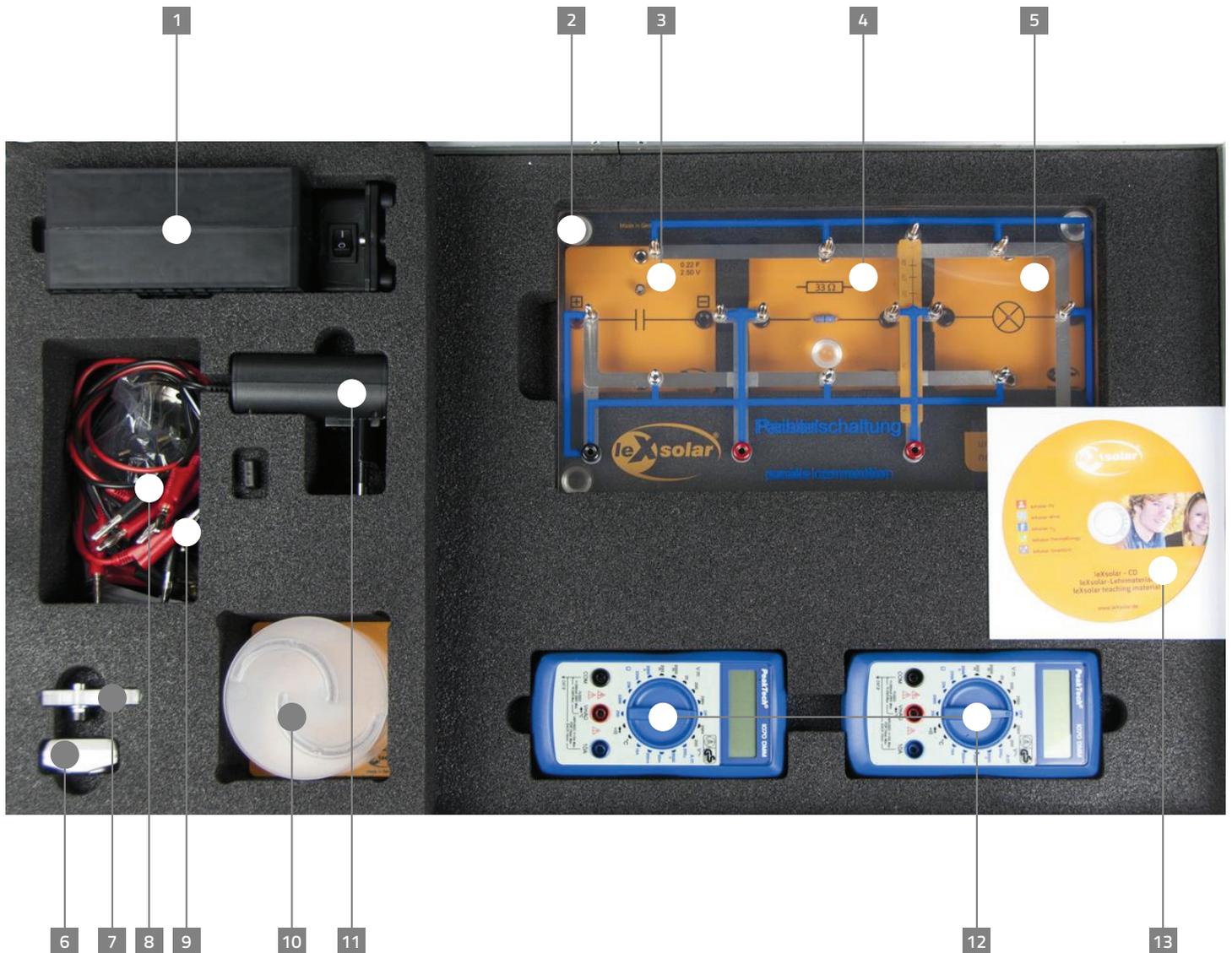
Lehrerheft

Layout diagram leXsolar-Wind Ready-to-go 2.0

Item-No.1405

Bestückungsplan leXsolar-Wind Ready-to-go 2.0

Art.-Nr.1405



- 1 1400-19 leXsolar Wind machine
1400-19 leXsolar Windzeuger
- 2 1100-19 leXsolar-Base unit
1100-19 leXsolar-Grundeinheit groß
- 3 1400-07 Capacitor module 220 mF, 2.5V
1400-07 Kondensatormodul 220 mF, 2.5 V
- 4 1100-22 Resistor module
1100-22 Widerstandsmodul
- 5 1100-26 Light bulb module
1100-26 Glühlampenmodul
- 6 L2-06-027 Anemometer
L2-06-027 Windgeschwindigkeitsmesser
- 7 1400-16 Stator for anemometer
1400-16 Windmesser-Ständer

- 8 2xL2-06-012/013 Test lead black/red 25 cm
2xL2-06-012/013 Messleitung schw./rot 25 cm
- 9 L2-06-014/015 Test lead black/red 50 cm
L2-06-014/015 Messleitung schw./rot 50 cm
- 10 1400-01 Savonius rotor module
1400-01 Savoniusrotormodul
- 11 2105-00 Power supply
2105-00 Stromversorgungsgerät
- 12 2xL2-06-011 Digital multimeter
2xL2-06-011 Digitalmultimeter
- 13 L3-03-016 leXsolar-CD
L3-03-016 leXsolar-CD

Version number
Versionsnummer

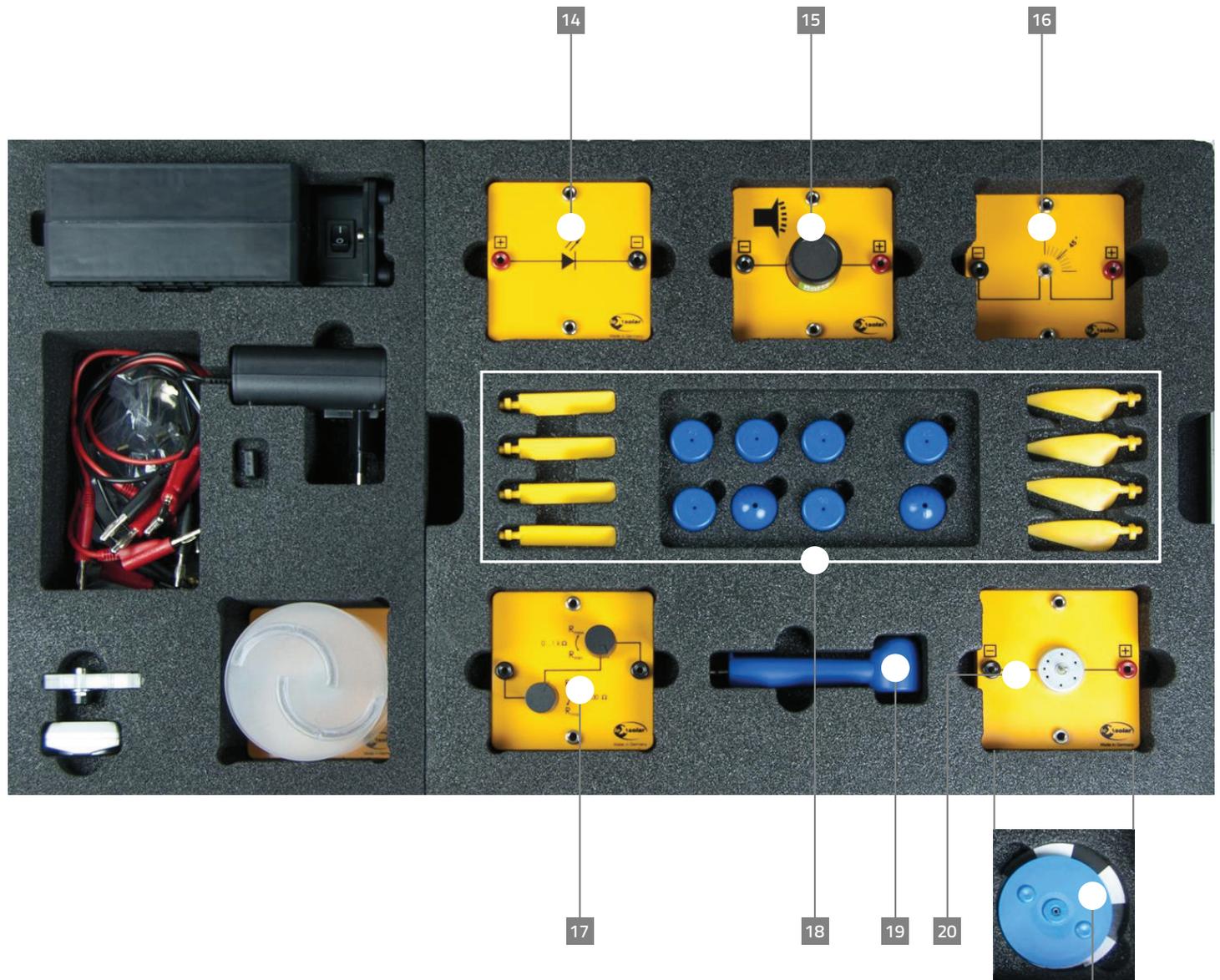
L3-03-133_24.09.2014

Layout diagram leXsolar-Wind Ready-to-go 2.0

Item-No.1405

Bestückungsplan leXsolar-Wind Ready-to-go 2.0

Art.-Nr.1405



- | | |
|--|---|
| <p>14 1400-08 LED-module 2mA, red
1400-08 LED-Modul 2 mA, rot</p> <p>15 1100-25 Buzzer module
1100-25 Hupenmodul</p> <p>16 1400-22 Wind turbine module with 19
1400-22 Windturbinenmodul mit 19</p> <p>17 1100-23 Potentiometer module
1100-23 Potentiometermodul</p> <p>18 1400-12 leXsolar-Wind rotor set
(8 blades, 6 hubs, 2 caps)
1400-12 leXsolar-Windrotoren
(8 Flügel, 6 Naben, 2 Kappen)</p> | <p>19 Wind turbine with 16
Windturbine mit 16</p> <p>20 1100-27 Motor module without gear
1100-27 Motormodul ohne Getriebe</p> <p>21 1100-28 Color discs with mount Set 1
1100-28 Farbscheiben Set 1</p> |
|--|---|

leXsolar Wind-Ready-to-go

Lehrerheft

Inhalt

I. Wissenschaftliche Grundlagen	6
1 <i>Wie entsteht Wind?</i>	6
1.1 <i>Globale Betrachtung von Winderscheinungen</i>	6
1.2 <i>Einflüsse auf lokale Windverhältnisse</i>	7
2 <i>Windenergie im Wandel der Zeiten</i>	8
2.1 <i>Die Anfänge der Windenergienutzung – Rotoren mit vertikaler Drehachse</i>	8
2.2 <i>Erste Windkraftanlagen in Europa</i>	9
2.3 <i>Windenergieerzeugung ab 1900</i>	10
3 <i>Physikalisch-Technische Grundlagen der Windenergienutzung</i>	11
3.1 <i>Überblick über Strömungsmechanik</i>	11
3.2 <i>Arten verschiedener Windkraftanlagen</i>	12
3.3 <i>Physikalische Betrachtungen zur Windkraftanlage</i>	15
3.3.1 <i>Leistung und Wirkungsgrad des Windrotors</i>	16
3.3.2 <i>Auftrieb am Rotorblatt</i>	20
3.4 <i>Getriebe- und Generatortechnik</i>	23
3.5 <i>Leistungsbegrenzung am Windrotor</i>	25
4 <i>Fakten zur Windkraftnutzung</i>	27
II. Handhabung der Experimentiergeräte leXsolar-Wind	29
1 <i>Bezeichnungen der Bauteile</i>	29
2 <i>Hinweise zur Handhabung</i>	32
2.1. <i>Messung der Windgeschwindigkeit (Erweiterung Windgeschwindigkeitsmesser):</i>	32
2.2. <i>Einsetzen und Wechseln der Rotorblätter</i>	32
3 <i>Diagramme zu den Experimenten</i>	33
3.1. <i>Windgeschwindigkeit bei konstanter Spannung am Winderzeuger</i>	33
3.2. <i>Windgeschwindigkeit bei konstantem Abstand vom Winderzeuger</i>	33
3.3. <i>Dichte der Luft (abhängig von der Raumtemperatur)</i>	34
III. Musterlösungen der Experimente	35
<i>Experiment 1.1</i>	37
<i>Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (phänomenologisch)</i>	37
<i>Experiment 1.2</i>	39
<i>Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (Spannungsmessung)</i>	39
<i>Experiment 1.3</i>	42
<i>Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (Leistungsmessung)</i>	42
<i>Experiment 2.1</i>	46

<i>Anlaufwindgeschwindigkeit an einer Windkraftanlage</i>	46
Experiment 2.2	49
<i>Vergleich der Anlaufwindgeschwindigkeit zwischen Savonius- und Dreiblattroter</i>	49
Experiment 3.1	52
<i>Veränderung der Generatorspannung durch Zuschalten eines Verbrauchers</i>	52
Experiment 3.2	55
<i>Veränderung der Generatorspannung durch Zuschalten verschiedener Verbraucher</i>	55
Experiment 4	58
<i>Untersuchung der Windgeschwindigkeit hinter dem Rotor</i>	58
Experiment 5.1	61
<i>Energiebilanz an einer Windkraftanlage</i>	61
Experiment 5.2	64
<i>Berechnung des Wirkungsgrades einer Windkraftanlage</i>	64
Experiment 6	67
<i>Speicherung elektrischer Energie</i>	67
Experiment 7.1	71
<i>Energieumwandlungen an einer Windkraftanlage</i>	71
Experiment 7.2	73
<i>Untersuchungen an Farbscheiben mithilfe einer Windkraftanlage</i>	73
Experiment 8.1	77
<i>Vergleich von Savoniusrotor und Dreiblattroter (phänomenologisch)</i>	77
Experiment 8.2	80
<i>Vergleich von Savoniusrotor und Dreiblattroter (Spannungsmessung)</i>	80
Experiment 8.3	83
<i>Vergleich von Savoniusrotor und Dreiblattroter (Leistungsmessung)</i>	83
Experiment 9.1	87
<i>Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotern (phänomenologisch)</i>	87
Experiment 9.2	90
<i>Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotern (Spannungsmessung)</i>	90
Experiment 9.3	94
<i>Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotern (Leistungsmessung)</i>	94
Experiment 10	98
<i>Kennlinien einer Windkraftanlage</i>	98
Experiment 11.1	102
<i>Einfluss der Windrichtung (phänomenologisch)</i>	102
Experiment 11.2	104
<i>Einfluss der Windrichtung (Spannungsmessung)</i>	104
Experiment 11.3	107
<i>Einfluss der Windrichtung (Leistungsmessung)</i>	107
Experiment 12.1	110
<i>Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (phänomenologisch)</i>	110
Experiment 12.2	112
<i>Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (Spannungsmessung)</i>	112
Experiment 12.3	115

<i>Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (Leistungsmessung)</i>	115
<i>Experiment 12.4</i>	119
<i>Anlaufgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Anstellwinkel</i>	119
<i>Experiment 13.1</i>	124
<i>Einfluss der Flügelform (phänomenologisch)</i>	124
<i>Experiment 13.2</i>	126
<i>Einfluss der Flügelform (Spannungsmessung)</i>	126
<i>Experiment 13.3</i>	128
<i>Einfluss der Flügelform (Leistungsmessung)</i>	128
IV. Literaturverzeichnis	131

I. Wissenschaftliche Grundlagen

Grundlage für die Untersuchungen am Windrotor sind wesentliche Kenntnisse zu Aufbau und Funktionsprinzip von Windkraftanlagen. Dabei spielt auch die historische Entwicklung dieser Anlagen eine bedeutende Rolle. In diesem Kapitel stehen Aufbau, Funktionsweise von und physikalische Vorgänge an Windkraftanlagen, die Entwicklung der Windenergie in Deutschland und weltweit, sowie geographische Aspekte von Wind im Mittelpunkt. Zu Beginn wird die Windentstehung näher erläutert.

1 Wie entsteht Wind?

Die Nutzung von Wind als Energiequelle macht eine Untersuchung von Ursachen der Windentstehung notwendig. Wie entsteht Wind? Welche Erscheinungen nehmen auf den Verlauf und die Stärke des Windes Einfluss? In welchen Gebieten sind die Windgeschwindigkeiten besonders hoch? Wo können Windkraftanlagen effektiv eingesetzt werden? Solche und ähnliche Fragen sollen im nächsten Abschnitt beantwortet werden.

1.1 Globale Betrachtung von Winderscheinungen

Die komplexen Windphänomene sollen hier nur stark vereinfacht skizziert werden. Ursprung sämtlicher Winderscheinungen ist die Sonne, da sie die Luftmassen in der Atmosphäre erwärmt. Verschiedene Bereiche der Erde werden unterschiedlich stark erwärmt, was zum Beispiel von der Erdumlaufbahn, der Neigung der Erdachse, aber auch von der Beschaffenheit der beleuchteten Fläche (Meer oder Kontinent) oder der Luftfeuchtigkeit in einzelnen Gebieten abhängt. Es entstehen also Bereiche unterschiedlicher Temperatur. Eine solche Wärmeverteilung für die Erde ist zum Beispiel in Abbildung 1-1 dargestellt.

Durch die unterschiedlichen Temperaturen ändert sich der Luftdruck lokal und es entstehen Gebiete hohen und niedrigen Druckes¹. Der Druckunterschied wird durch eine Bewegung der Luftmassen vom Ort des höheren zum Ort geringeren Druckes ausgeglichen. Diese Luftbewegung zwischen einem Hoch- und einem Tiefdruckgebiet nennt man Wind.

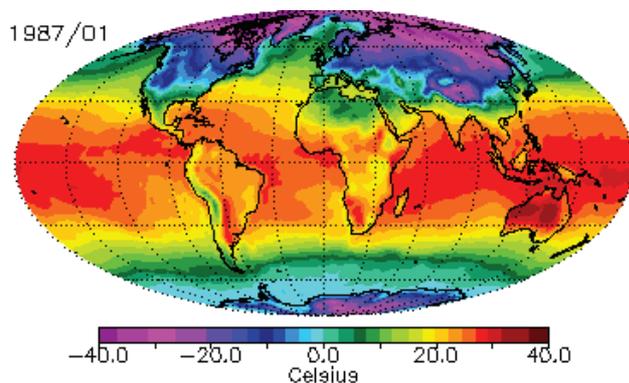


Abbildung 1-1 Temperaturverteilung der Erde (Januar 1987)

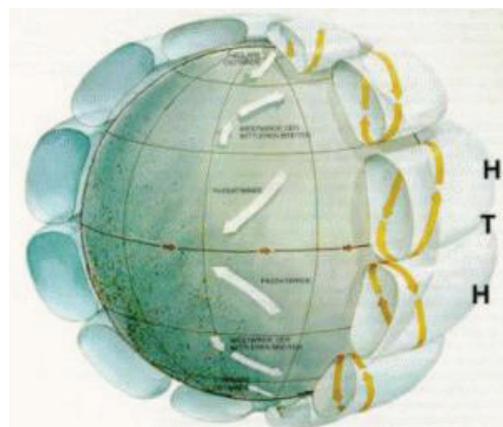


Abbildung 1-2 Globale Luftströmungen

¹ Die genaue Entstehung von Hoch- und Tiefdruckgebieten ist in „Meteorologie und Klimatologie“ nachzulesen (Malberg, 2007).

Eine wichtige globale Windbewegung führt von einem Hoch über dem Äquator (warme Gebiete) zu einem Tief über den Polen (kühlere Gebiete). Wegen der Rotationsbewegung der Erde verlaufen diese Winde allerdings nicht geradlinig vom Äquator zum Nord- oder Südpol. Sie werden abgelenkt, auf der nördlichen Halbkugel in Richtung Osten und südlich in Richtung Westen. Dies führt zum bekannten Jetstream. Ursache des Verlaufs dieser Luftbewegung ist der sogenannte Coriolis-Effekt².

Er bewirkt aber nicht nur die Bewegung des Jetstreams an sich, sondern er erzeugt bei den in ein Tiefdruckgebiet einströmenden Luftmassen auch lokale Wirbelwinde, sogenannte Zyklone und Antizyklone, die dazu führen, dass die Windrichtung sich von Zeit zu Zeit ändert. Diese Unbeständigkeit ist für die Planung von Windkraftanlagen von Bedeutung. Allerdings nehmen nicht nur die globalen Luftmassenbewegungen, wie sie hier beschrieben wurden Einfluss auf die Windgeschwindigkeit und damit den Betrieb solcher Anlagen, sondern auch regionale Gegebenheiten am Standort einer Windkraftanlage.

1.2 Einflüsse auf lokale Windverhältnisse

Es spielen für die Untersuchung der Windverhältnisse regionale Eigenschaften eine wesentliche Rolle. Je nach Bodenbeschaffenheit, der Nähe des Standortes zu Bebauungsflächen, einem Gebirgszug oder zur Meeresküste variiert die Windgeschwindigkeit. Betrachtet man die Übersichtskarte Europas (siehe Abbildung 1-3)³, so wird deutlich, dass in den Küstenregionen, über den Meeren und in Hochgebirgen hohe Windgeschwindigkeiten vorherrschend sind. Die Errichtung von Windkraftanlagen ist also nicht überall lukrativ. Auf Meeresflächen erreicht die durchschnittliche Windgeschwindigkeit ausreichend große Werte. Aber auch auf dem Festland, zum Beispiel in Mittelgebirgen oder auf freien Landflächen ist sie ausreichend groß, sodass die Windenergienutzung lohnenswert ist.

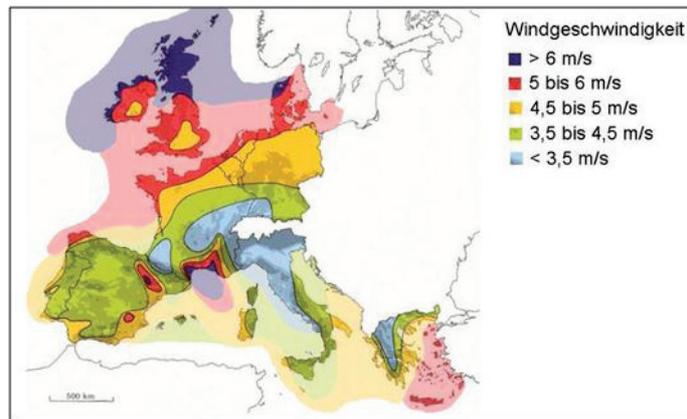


Abbildung 1-3 Durchschnittliche Windgeschwindigkeiten in Europa

Eine Windkraftanlage arbeitet bei einer Windgeschwindigkeit von 8 m/s bis 10 m/s am effektivsten, startet aber bereits bei circa 4 m/s. Die Nutzung ist also bereits bei geringen Windgeschwindigkeiten möglich, auch wenn dabei nicht die volle Leistung und damit auch nicht der maximale Wirkungsgrad der Anlage erreicht werden kann. In einigen Bereichen Europas ist die Stromerzeugung durch Windenergie also sinnvoll nutzbar, ein kontinuierlicher Betrieb ist allerdings in den wenigsten Gebieten möglich, da die Windgeschwindigkeiten am konkreten Standort teilweise sehr stark variieren können⁴ (Bundesverband Windenergie e.V.). Wenn

² Diese Erscheinung soll hier nicht näher erläutert werden. Genaue Abläufe sind nachzulesen in „Meteorologie und Klimatologie“. (Malberg, 2007)

³ Es handelt sich um durchschnittliche Windgeschwindigkeiten. Es werden lokale Faktoren, allerdings nicht die Nähe zu Bebauungsflächen und andere kleingliedrige regionale Unterschiede in der Darstellung berücksichtigt.

⁴ In Abbildung 1-3 sind Durchschnittsgeschwindigkeiten gegeben, das heißt im mit $v = 5$ m/s bezeichneten Gebiet können zeitweise Windstille (0 m/s) oder starker Wind (12 m/s) auftreten.

man die historische Entwicklung betrachtet, wird deutlich, dass die Windkraftnutzung dennoch für die Menschen von Bedeutung war und ist.

2 Windenergie im Wandel der Zeiten

Die Nutzung von Wind als Energiequelle ist keine Erfindung der Neuzeit. Schon vor circa 3000 Jahren wurden einfache Windräder gebaut um sich fortzubewegen, Körner zu mahlen oder andere mechanische Arbeiten zu verrichten. In Europa entwickelte man allerdings erst im Mittelalter Windmühlen und nutzte den Wind als Energiequelle aus. Diese Mühlen wurden mit einigen Unterbrechungen bis hin zu den heutigen modernen Windkraftanlagen weiterentwickelt. Welche Völker sich als erste mit der Nutzung des Windes auseinandersetzten und wie sich die verschiedenen Anlagen seither verändert haben, soll nun genauer beschrieben werden.

2.1 Die Anfänge der Windenergienutzung – Rotoren mit vertikaler Drehachse

Die erste Nutzung des Windes als Energiequelle liegt schon sehr weit zurück. Schon einige Jahrhunderte vor Christus konnten die Menschen die Energie des Windes für ihre Arbeiten einsetzen. Die ersten Windräder wurden nach Vermutung der Historiker im Orient circa 1700 v.Chr. erbaut. Sie bestanden aus geflochtenen Matten, die durch den Wind bewegt wurden und so eine Drehbewegung erzeugten, mit der schließlich Mahlsteine im unteren Bereich der Mühle bewegt werden konnten (Abbildung 2-1). Allerdings konnte mit diesem Bautyp nur eine Energienutzung erfolgen, wenn der Wind aus einer bestimmten Richtung blies. Um diesem Problem zu entgehen, entwickelte man in China schon ungefähr um 1000 nach Christus Windräder mit umklappenden Flügeln, die unabhängig von der Richtung des Windes arbeiteten.

Bei all diesen Formen einfacher Windräder spielten der Luftwiderstand und die daraus resultierende Kraft für die Windnutzung die entscheidende Rolle. Wegen der damit verbundenen sehr großen Reibung durch die Luft war die erzeugte Leistung allerdings relativ gering.

Windkraftanlagen, die eine vertikale Drehachse besitzen, haben nach Entwicklung der ersten Bockwindmühlen in Europa viele Jahrhunderte später an Bedeutung verloren, da mit den neuen Windmühlen bessere Wirkungsgrade erzielt werden konnten. Dennoch wurden einige

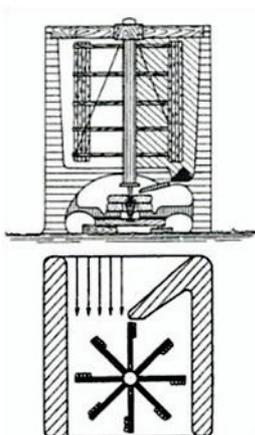


Abbildung 2-1 Persische Windmühle

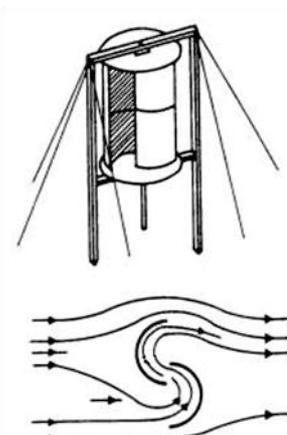


Abbildung 2-2 Savonius-Rotor

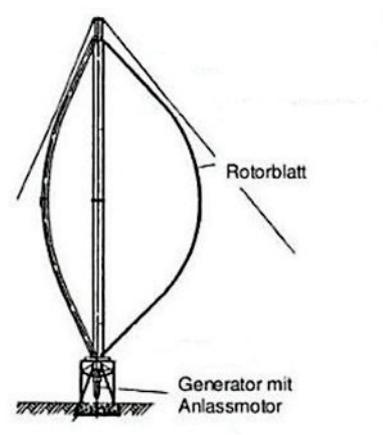


Abbildung 2-3 Darrieus-Rotor

Formen von Vertikalachsen-Windrädern weiterentwickelt. Im Jahre 1924 entwickelte der Finne Sigurd Savonius einen Rotor mit vertikaler Drehachse, der schließlich auch Savoniusrotor genannte wurde (Abbildung 2-2). Dieser arbeitet nach ähnlichen Prinzipien, wie die bis dahin erfundenen Anlagen, unterscheidet sich aber zu den persischen Windrädern, die nur eine bei fester Windrichtung die Energie des Windes nutzen können. Der Savoniusrotor ermöglicht Energieerzeugung unabhängig von der Richtung des Windes. Im Jahre 1929 entwickelte man eine etwas komplexere Form eines solchen Windrades und machte sich zusätzlich zum Widerstand auch den Auftrieb am Windrad zunutze. Der entstandene Rotor wurde nach seinem Erfinder Darrieus benannt (siehe Abbildung 2-3). Aufgrund des immer noch relativ schlechten Wirkungsgrades sind diese Formen von Rotoren heute allerdings weniger von Bedeutung.

2.2 Erste Windkraftanlagen in Europa

Als erste Windkraftanlagen in Europa entwickelten sich im 13. und 14. Jahrhundert die sogenannten Bockwindmühlen (siehe Abbildung 2-4). Diese hatten bereits eine horizontale Antriebsachse und verbreiteten sich schnell in England, Frankreich, Deutschland, Polen und etwas später auch in Russland. Bockwindmühlen sind drehbar gelagert (durch den sogenannten Bock mit Zapfen) und konnten so dem Wind nachgeführt werden. Im 17. und 18. Jahrhundert entwickelte man in den Niederlanden die Holländerwindmühle (Abbildung 2-5), die auf einem ähnlichen Prinzip beruht, bei der allerdings der Hauptkörper fest steht und sich lediglich die Turmspitze, meist ein Holzaufbau, mit dem Windrad drehen kann. Dies war besonders für den Antrieb von Maschinen innerhalb der Mühle wichtig, denn diese sollten schließlich auch bei drehendem Wind kontinuierlich weiterarbeiten. Durch das Drehen der Turmspitze mussten sie außerdem nicht mehr gemeinsam mit der Mühle bewegt werden, sondern konnten fest im Inneren der Mühle eingebaut werden.

In Amerika entwickelte sich im 19. Jahrhundert noch eine weitere Form der Windmühle, das sogenannte „Westermill“. Es besteht aus einem Gitterturm, an dem eine Flügelrosette aus 20 Blechschaufeln angebracht ist (Abbildung 2-6). Man nutzte diese Anlagen, um Brauchwasser für Lokomotiven oder Trinkwasser an die Erdoberfläche zu pumpen. Bei dieser Form der Windkraftanlage wird die Windrichtungsnachführung bereits automatisch durchgeführt, sodass dieses System nahezu unverändert in einigen Bereichen Amerikas und Australiens noch heute eingesetzt wird.



Abbildung 2-4
Bockwindmühle



Abbildung 2-5
Holländerwindmühle



Abbildung 2-6
Westermill

2.3 Windenergieerzeugung ab 1900

Nach dem ersten Weltkrieg entwickelten einige Wissenschaftler aus den Erfahrungen mit Propellern aus Militär- und Zivilflugzeugen Theorien und Prototypen zur Nutzung von Windenergie. Im Jahre 1920 fand Albert Betz heraus, dass man dem Wind maximal 59% seiner kinetischen Energie „entziehen“ (d.h. mithilfe einer Windkraftanlage umwandeln) kann⁵. Außerdem entwickelte er einige Regeln für die Konstruktion von Rotorblättern, um eine optimale Leistungsentnahme aus dem Wind zu ermöglichen. Diese Regeln und Grundsätze sind auch heute noch von Bedeutung. Mit Beginn des zweiten Weltkrieges wurde die Entwicklung unterbrochen. Danach zeigte sich erneut Interesse an der Nutzung von Wind als Energiequelle. Neue Ideen wurden geboren. In Dänemark entwickelte man den ersten Asynchrongenerator und beschäftigte sich mit Leistungsbegrenzung⁶. In Deutschland wurde der erste Prototyp einer Windkraftanlage mit Pitch-Regelung⁷ erbaut. Aber in den 60er Jahren verlebte diese Entwicklung durch die Lieferung von günstigem Öl aus dem Orient. Die Suche nach regenerativen Energieträgern erschien nicht mehr lukrativ genug. Nach den Ölkrisen gegen Ende der 70er Jahre kam es erneut zum Umdenken und man forschte wieder an verschiedenen Anlagen zur Nutzung des Windes als Energiequelle, sodass schließlich Anfang der 80er Jahre einige kleine dänische Firmen begannen, Windkraftanlagen mit einem Rotordurchmesser von 12 bis 15 Metern zu bauen. Diese wurden bis heute stetig weiterentwickelt und man erreicht nun bereits Rotordurchmesser von 80 oder 100 Metern und eine Leistung von mehreren Megawatt. Die Windkraftanlagen wurden und werden immer effizienter.

Um einen möglichst störungsfreien und effizienten Betrieb zu ermöglichen, arbeitet man aktuell am Ausbau sogenannter Offshore-Windparks (Windparks auf freier See). Diese haben eine höhere Auslastung, da die Windgeschwindigkeiten weniger stark schwanken und insgesamt etwas größer sind als an Land. Allerdings sind die Kosten für solche Anlagen im Vergleich zu herkömmlichen Windparks wesentlich größer. Die Verankerung der Turmkonstruk-



Abbildung 2-7
Albert Betz



Abbildung 2-8 Offshore-Windpark

⁵ Die Überlegungen und Berechnungen die Betz durchgeführt hat, sind in 3.3.1 skizziert dargestellt.

⁶ Leistungsbegrenzung bezeichnet einige Verfahren, die die Windkraftanlage bei zu starkem Wind vor Zerstörung bewahren soll. Zwei grundlegende Funktionsweisen werden in Abschnitt 3.5 näher erläutert

⁷ Das Prinzip der Pitchregelung, welches zur Leistungsbegrenzung am Windrotor eingesetzt wird, ist im Abschnitt 3.5 näher beschrieben.

tion am Meeresboden ist kompliziert und technisch anspruchsvoll. Außerdem muss der erzeugte Strom möglichst ohne große Verluste vom Meer ans Festland befördert werden. Diese und weitere Aspekte erschweren den Aufbau von Offshore-Windparks erheblich, treiben aber ebenfalls die Forschung in diesem Bereich der Energieerzeugung weiter voran.

3 Physikalisch-Technische Grundlagen der Windenergienutzung

Die physikalische Betrachtung von Windenergieanlagen beruht auf den Grundlagen der Strömungslehre. Zu Beginn dieses Kapitels soll kurz die Thematik der strömenden Stoffe (Fluide) allgemein physikalisch beleuchtet werden. Anschließend wird genauer auf physikalische Vorgänge und technische Gegebenheiten einer Windkraftanlage eingegangen.

3.1 Überblick über Strömungsmechanik

Eine Luftströmung ist durch mehrere physikalische Größen gekennzeichnet. In einem Gas sind Dichte, Druck und Viskosität mit der Bewegung der einzelnen Luftbestandteile verknüpft. Sollen die Bewegungen einzelner Moleküle der Luftströmung untersucht werden, so ist die Geschwindigkeit der Teilchen die charakterisierende Größe. Mathematisch beschreibt man diese durch ein Vektorfeld $\vec{v}(\vec{r})$.

Um Strömungen von Gasen (Luft) oder Flüssigkeiten anschaulich darzustellen und die möglichen Bahnen einzelner Moleküle zu verdeutlichen, nutzt man Stromlinienbilder. Eine einzelne Stromlinie beschreibt dabei die theoretische Bewegung eines Teilchens im Medium. Betrachtet man einen Ortspunkt, an dem sich genau ein Molekül befindet, so kann man durch Anlegen einer Tangente an die Stromlinie die Richtung der Geschwindigkeit bestimmen, in die sich das Teilchen bewegt, wenn es sich an diesem Punkt befindet. Strömungen, bei denen sich alle Teilchen in die gleiche Richtung bewegen und die Geschwindigkeit in allen Bereichen (nahezu) gleich groß ist, nennt man laminare Strömungen. Der Abstand der Stromlinien ist dann im Verlauf nahezu gleich groß oder ändert sich gleichmäßig und alle Linien verlaufen in die gleiche Richtung. Abbildung 3-1 zeigt den Strömungsverlauf einer laminaren Strömung um eine senkrechte Platte. Durch die konstante Geschwindigkeit und die vorhersagbare Richtung der Bewegung lassen sich für diese Art von Strömungen noch genaue Bahnen der einzelnen Teilchen angeben.

Direkt hinter der senkrechten Platte verläuft die Strömung allerdings nicht mehr laminar. Es entstehen Verwirbelungen durch das Einströmen in den „leeren“ Raum hinter der Platte. Es entsteht ein turbulenter Strömungsverlauf. Hierbei bilden sich im Fluid Wirbel, an denen die

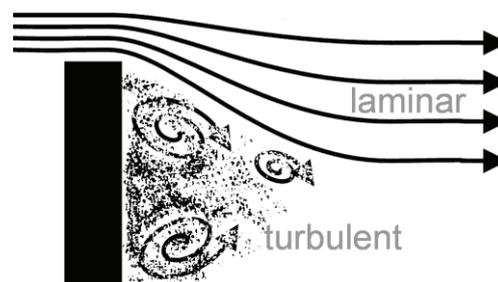


Abbildung 3-1 Schematische Darstellung von Strömungsabläufen

genaue Position der Teilchen nicht mehr bestimmt werden kann. Mathematisch ist eine Beschreibung dann nicht mehr möglich. Die Untersuchung von Wirbelerscheinungen und turbulenter Strömungen ist heutzutage noch ein umfassendes Forschungsgebiet, welches in der Technik und besonders auch in der Windenergietechnik eine Rolle spielt. Entstehende Turbulenzen erzeugen am Windrotor eine erhöhte Lautstärke durch die heftige Luftbewegung und sie führen zu größerer Luftreibung am Rotorblatt. Der Rotorflügel wird also stärker gebremst und erbringt so weniger Leistung. Man versucht aus diesem Grund solche Turbulenzen zu vermeiden.

Grundlage der genauen mathematischen Beschreibung einer Strömung in Flüssigkeiten oder Gasen stellen die Navier-Stokes-Gleichungen dar, die allerdings als nichtlineare Differentialgleichungen (noch) nicht analytisch gelöst werden können. Prinzipiell stellen sie lediglich die Newtonsche Bewegungsgleichung⁸ eines strömenden Mediums dar und beschreiben ganz allgemein die Bewegung der einzelnen Teile im Fluid. Diese wird durch folgende Gleichung beschrieben

$$\rho \vec{a} = -\text{grad } p + \eta \Delta \vec{v}.$$

Die Dichte des Gases wird mit ρ , der Druck mit p und die Viskosität mit η bezeichnet. Durch $-\text{grad } p$ wird ein Beitrag zur Beschleunigung beschrieben, der aus den Druckunterschieden im Fluid resultiert. Die Viskosität ist ein Maß für die innere Reibung eines strömenden Mediums. Sie wird auch als Zähigkeit bezeichnet und gibt an wie stark sich die einzelnen Teilchen im Medium gegenseitig beeinflussen⁹. Der Term $\eta \Delta \vec{v}$ resultiert aus der Reibung innerhalb der strömenden Luft, welche zusätzlich von der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums abhängt (Meschede, 2004). Aus der Betrachtung und eingeschränkten Lösung dieser komplexen Differentialgleichung können einige Erkenntnisse über das Verhalten strömender Stoffe gewonnen werden (wenn auch die vollständige analytische Lösung nicht gegeben ist). Diese stellen die Grundlagen für die Fluidmechanik dar, die bei Bau und Betrieb von Windkraft- oder anderen Strömungsanlagen von entscheidender Bedeutung ist. Auf verschiedene Arten von Windkraftanlagen soll im folgenden Kapitel näher eingegangen werden.

3.2 Arten verschiedener Windkraftanlagen

Man unterscheidet Windkraftanlagen nach ihrer Drehachse. Es wird zwischen horizontaler oder vertikaler Drehachse unterschieden.

Anlagen mit vertikaler Drehachse

Wie in Kapitel 2.1 bereits erläutert, hatten die ersten zur Energienutzung gebauten Windräder eine vertikale Drehachse. Die bekanntesten Vertreter dieser Form sind der Savonius-, der Darrieus- und der sogenannte H-Rotor (siehe Abbildung 3-2, Abbildung 3-3, Abbildung 3-4). Sie werden auch in Kombinationen hergestellt, da beispielsweise ein Darrieus-Rotor nicht von allein startet. Er wird aus diesem Grund oft mit einem Savonius-Rotor gekoppelt.

Für die Erzeugung elektrischer Energie sind diese Arten von Windrotoren aktuell nicht von Bedeutung, denn sie erreichen nur relativ geringe Wirkungsgrade. Allerdings gibt es

⁸ Die Newtonschen Bewegungsgleichungen beschreiben die Kräfte, die auf ein Medium wirken. Die Kraft auf ein bestimmtes Teilchen (bzw. die darauf wirkende Beschleunigung) ergibt sich aus der Summe aller angreifenden Kräfte, die im Medium auf dieses Teilchen wirken.

⁹ Man könnte sie auch als „Fließfähigkeit“ eines Stoffes bezeichnen. Sie ist für Honig zum Beispiel wesentlich größer als für Wasser oder Benzin

durchaus Firmen, wenn auch wenige, die sich mit der Entwicklung, Verbesserung und Herstellung von Vertikalachsenanlagen beschäftigen. Dabei steht besonders der H-Rotor (auch Darrieus-H-Rotor genannt) im Vordergrund, denn er erreicht im Vergleich zu anderen Typen vertikaler Windkraftanlagen noch einen relativ hohen Wirkungsgrad. Die Rotorblätter haben meist einen tragflächenförmigen Querschnitt und arbeiten nach dem Auftriebsprinzip. H-Rotoren haben den Vorteil, dass man sie nicht dem Wind nachführen muss und eignen sich daher vor allem für Gebiete, in denen sich die Windrichtung oft und schnell ändert (beispielsweise für Gebirgsregionen). Moderne Anlagen dieser Art erreichen bereits Nennleistungen von 20 Kilowatt und ihr Wirkungsgrad ist größer als bei anderen Vertikalachsrotoren.

Der Savoniusrotor findet hauptsächlich im privaten Umfeld als Stromerzeuger seinen Platz. Kleine Anlagen können eine Nennleistung von ungefähr 2,5 Kilowatt erreichen. Sie lassen sich außerdem ohne große Schwierigkeiten kostengünstig selbst herstellen und sind damit als Stromzufuhr für den Garten gut geeignet. Außerdem laufen sie bereits bei geringen Windgeschwindigkeiten an, was die bessere Nutzung im privaten Bereich untermauert. Einige Firmen, hauptsächlich aus den Niederlanden, stellen Savoniusrotoren her. Allerdings werden für private Zwecke inzwischen auch eher H- oder Darrieus-Rotoren hergestellt, denn sie erfordern einen wesentlich geringeren Materialaufwand und erzielen bessere Wirkungsgrade.



Abbildung 3-2
Mehrfacher Savonius-Rotor



Abbildung 3-3
Moderner Darrieus-Rotor



Abbildung 3-4
H-Rotor

Anlagen mit horizontaler Drehachse

Den Hauptteil der Energieversorgung bilden Windkraftmaschinen mit horizontaler Drehachse. An diese Achse wird ein Rotor angebracht, der im Allgemeinen aus mehreren Rotorblättern besteht. Üblich sind Rotoren mit zwei oder drei Rotorblättern, allerdings werden auch Einblattrotoren getestet.

Man charakterisiert die verschiedenen Arten solcher Windrotoren nach der Schnelllaufzahl. Diese wird mit λ bezeichnet und errechnet sich als Quotient aus der Blattspitzengeschwindigkeit (auch Umfangsgeschwindigkeit genannt) und der Windgeschwindigkeit in ausreichender Entfernung vor dem Rotorblatt (Bundesverband Windenergie e.V.). Da die Geschwindigkeit der Blattspitzen v_U über

$$v_U = \omega \cdot r = 2\pi \cdot n \cdot r$$

direkt mit dem Radius des Rotors in Verbindung steht (ω ist die Winkelgeschwindigkeit und n die Drehzahl des Rotors), kann man schon aus der jeweiligen Konstruktion eine Aussage über die Größe der Schnelllaufzahl formulieren und diese auch für gegebene Turbinen be-



Abbildung 3-5 Dreiblattrotor



Abbildung 3-6 Zweiblattrotor



Abbildung 3-7 Einblattrotor

rechnen. Je länger die einzelnen Blätter des Rotors sind, desto größer ist die Schnelllaufzahl. Da die Umfangsgeschwindigkeit von der Drehzahl des Rotors abhängt, gilt ebenso: Je größer die Rotordrehzahl (und damit auch die Winkelgeschwindigkeit ω), desto größer ist ebenfalls die Schnelllaufzahl. In Abbildung 3-8 ist eine Darstellung des Leistungsbeiwertes¹⁰ in Abhängigkeit von der Schnelllaufzahl für verschiedene Rotoren gegeben.

Die zur Winderzeugung momentan genutzten Windkraftanlagen mit zwei oder drei Rotorblättern arbeiten mit $\lambda = 5 \dots 8$. Rotoren, deren Schnelllaufzahl oberhalb dieser Werte liegen, werden seltener gebaut, denn die Umfangsgeschwindigkeit ist bei diesen Anlagen sehr groß und es kommt zu einer erhöhten Geräuschbelastung durch den Windrotor.

Deshalb sollte die Blattspitzengeschwindigkeit Werte von 80 bis 90 m/s nicht überschreiten. Ein-Blatt-Rotoren werden sich wahrscheinlich aus diesem Grund und wegen des erhöhten Materialverschleißes, der durch den unruhigen Lauf des einzelnen Rotorblattes zustande kommt, nicht durchsetzen. Es kann zu einer starken Unwucht führen, wenn Flügel und Gegengewicht bei solch einer Anlage nicht exakt aufeinander abgestimmt sind. Sie haben allerdings den Vorteil, dass sie auch bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten noch zuverlässig arbeiten können. Andere Arten von Windkraftanlagen werden dann abgeschaltet, um nicht zerstört zu werden.

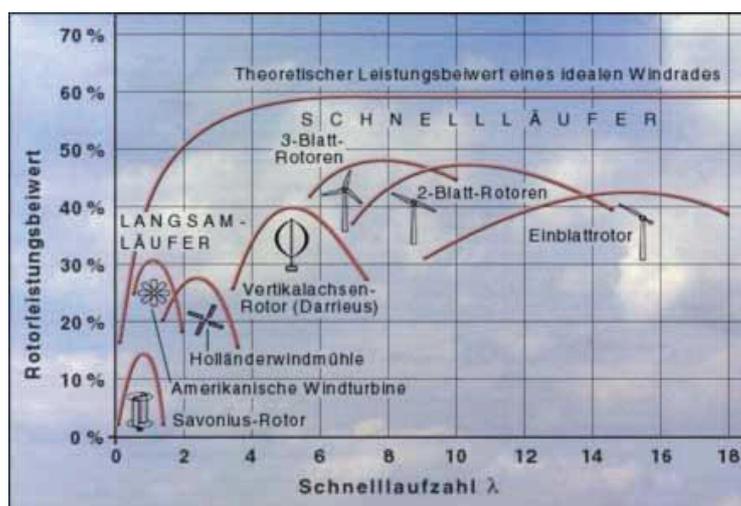


Abbildung 3-8 Vergleich der Leistungsbeiwerte verschiedener Rotoren

¹⁰ Der Leistungsbeiwert ist ein Maß für die Nennleistung, d.h. die effektiv nutzbare Leistung einer Windkraftanlage. Eine genaue Beschreibung dieser Kenngröße findet sich im Kapitel 3.3.1

Da Anlagen mit horizontaler Achse den wesentlichen Anteil an der Erzeugung von Energie einnehmen, beschränken sich die folgenden Kapitel hauptsächlich auf deren Untersuchung.

3.3 Physikalische Betrachtungen zur Windkraftanlage

Es sollen in diesem Kapitel vor allem die Grundlagen zu Windkraftanlagen mit drei Rotorblättern dargestellt werden, da diese den Hauptanteil im Stromversorgungsnetz darstellen. Allerdings können viele Aspekte äquivalent auf andere Anlagen übertragen werden. Die Windkraftanlage setzt sich aus mehreren Teilen zusammen, die in Abbildung 3-9 dargestellt sind. Der Rotor ist über die Nabe drehbar gelagert und ermöglicht die Umwandlung von Energie aus dem Wind. Er formt einen Teil der kinetischen Energie des Luftstromes, der durch ihn strömt in Rotationsenergie um. Die daraus resultierende Drehbewegung treibt über die Nabe und ein sich anschließendes Getriebe (siehe Abbildung 3-10) den Generator an, der schließlich diese Rotationsenergie in elektrische Energie umwandelt. Einige Anlagen werden aber auch ohne Getriebe gebaut und der Rotor ist direkt mit dem Generator verbunden. Im Allgemeinen nutzt man zur Erzeugung von elektrischer Energie Drehstromgeneratoren. Einige Produktionsformen arbeiten mit Synchron-, andere mit Asynchronmaschinen. Darauf soll im Kapitel 3.4 genauer eingegangen werden.

Die erzeugte elektrische Energie kann nun entweder gespeichert werden, um eine bestimmte Anlage zu betreiben (Inselssystem) oder man speist die vorhandene Energie in das öffentliche Stromnetz ein. Inselssysteme werden beispielsweise auf Bohrinseln oder in unzugänglichen Gebirgsregionen aufgebaut (meist Windenergie- und Solaranlagen in Kombination), da der Transport von Strom in solche Gebiete oft nur schwer möglich ist. Durch diese Systeme kann eine unabhängige Energieversorgung gewährleistet werden. Die Einspeisung in das öffentliche Netz stellt keine Alleinversorgung von Haushalten dar, sondern eher eine Ergänzung zu anderen Formen der Energiegewinnung, da die Windstärke stark schwanken kann und so ein Betrieb mit kontinuierlich hoher Leistung nicht möglich ist.

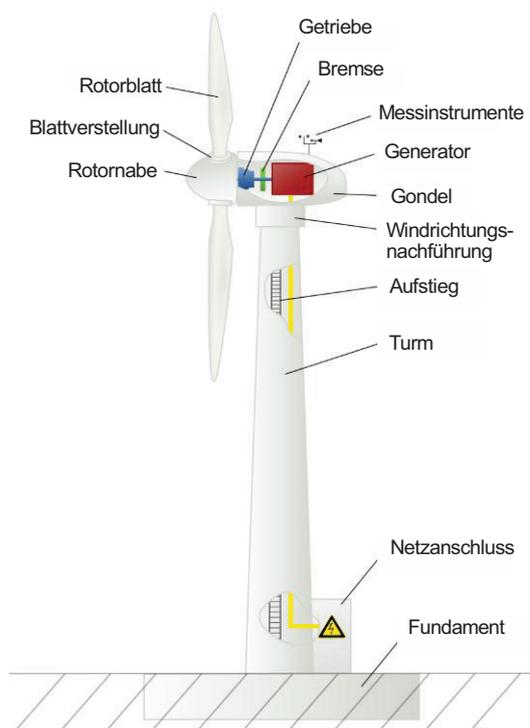


Abbildung 3-9 Aufbau einer Windkraftanlage

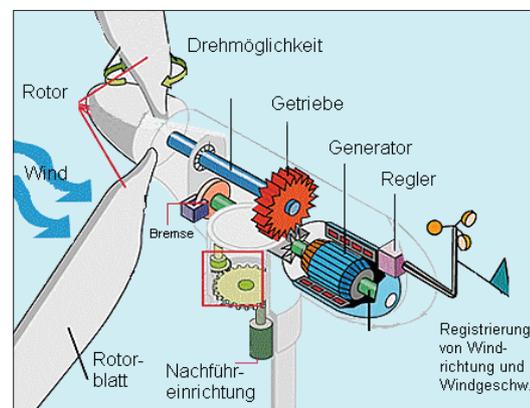


Abbildung 3-10 Aufbau einer Windkraftanlage

Welche physikalischen und technischen Vorgänge an einer Windkraftanlage ablaufen, wird in den folgenden Kapiteln näher beschrieben.

3.3.1 Leistung und Wirkungsgrad des Windrotors

Um den Wirkungsgrad einer Windkraftanlage zu ermitteln und damit die erzeugte Leistung der Anlage zu bestimmen, sind einige Vorüberlegungen zur Energie der Luftströmung vor und dem Verhalten von Luftströmungen am Windrotor notwendig. Im Folgenden soll die Berechnung des Wirkungsgrades durch drei wesentliche Schritte, die einzelne Aspekte näher beleuchten, dargestellt werden.

Energie der Luftströmung vor dem Rotor

Um die Leistung eines Windrotors zu bestimmen wird die kinetische Energie der Luftströmung benötigt, die diese vor der Windkraftanlage besitzt. Man betrachtet dazu ein zylinderförmiges Volumen ($V = \pi r^2 l$) vor dem Rotor (siehe Abbildung 3-11), sodass sich die kinetische Energie der Luft zu

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2$$

ergibt. Die Masse des Luftvolumens berechnet sich aus dem Volumen und der Dichte ρ der Luft mit $m = \rho \cdot V$. Des Weiteren bezeichnet r den Radius des Rotors und l die Länge der Luftsäule vor dem Rotor. Die Windgeschwindigkeit v wird als konstant (im betrachteten Volumen) angenommen. Vor dem Windrotor verläuft die Strömung also (annähernd) laminar, was auch dem realen Sachverhalt entspricht. Die Leistung des Windes P_{Wind} ergibt damit

$$P_{\text{Wind}} = \dot{E} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v^2.$$

Der Luftmassenstrom $\dot{m} = \rho \dot{V}$ ist also durch den Volumenstrom durch den Rotor gekennzeichnet und wird mit $\dot{m} = \rho \cdot A \cdot v_{\text{Wind}}$ berechnet. Die Leistung des Windes kann also durch

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

berechnet werden. Sie vergrößert sich mit zunehmender Windgeschwindigkeit sehr stark. (Quaschnig, 2007) Aber auch die Dichte der Luft und die Größe des Rotors haben einen Einfluss auf die Energie der Luft an einer Windkraftanlage. Da die Dichte auch von Druck und Temperatur abhängt, sind weitere Einflussfaktoren erkennbar. Mit zunehmender Temperatur nimmt die Dichte der Luft ab und mit steigendem Druck nimmt sie zu. Ein Diagramm mit verschiedenen Werten für die Dichte der Luft ist auf Seite 34 gegeben. Bei der Planung von Windkraftanlagen auf dem Festland Europas nimmt man für die Dichte einen bestimmten Wert an ($\rho = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)¹¹, obwohl sich die Temperatur der Luft ständig ändert. Für die Planung der Windkraftanlage ist allerdings ein fester Wert erforderlich. Entsprechend der Durchschnittstemperatur und des durchschnittlichen Luftdrucks kann dieser Standardwert für den entsprechenden Standort variiert werden. Anknüpfend an die Beschreibung der Luft vor dem Rotor, wird nun der Einfluss des Rotors diskutiert.

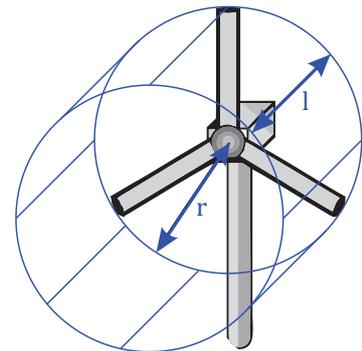


Abbildung 3-11 Luftvolumen vor dem Rotor

¹¹ Dieser Wert entspricht trockener Luft bei Normaldruck auf Meereshöhe bei einer Temperatur von 15°.

Einfluss des Rotors auf die Energie der Luftströmung

Bisher wurde ausschließlich die Luft vor dem Windrotor betrachtet. Der Windrotor selbst hat noch keinen Einfluss auf die Luftströmung. Auch die angegebene Leistung entspricht ausschließlich der des Windes ohne Einfluss einer Windturbine. Auf eine entsprechende Fläche bezogen, ändert sich allerdings die Leistung des Windes, wenn dieser durch eine Turbine strömt. Wird so die Energie des Windes mithilfe eines Rotors genutzt, so muss natürlich die Bauweise des Rotors berücksichtigt werden. Hier soll ein Flügelrad betrachtet werden, das eine horizontale Drehachse besitzt. Aber wie kann man die Nutzung des Windes nun beschreiben?

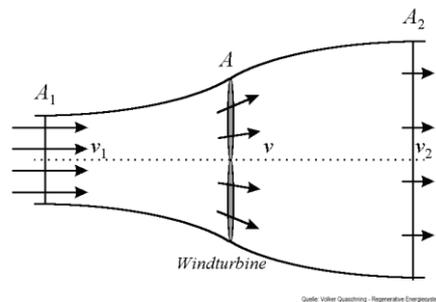


Abbildung 3-12 Luftströmung am Rotor

Der Rotor entnimmt der Luft Energie, indem er die Geschwindigkeit der Luftströmung von v_1 vor dem Rotor auf v_2 nach dem Rotor abbremst. Die entnommene Energie kann durch die Anlage teilweise in elektrische umgewandelt werden¹². Allerdings muss wegen der Kontinuitätsgleichung der Massenstrom \dot{m} der Luft vor und nach dem Windrotor konstant sein¹³. Die Dichte der Luft ändert sich während des Durchgangs durch den Rotor nicht signifikant. Damit muss eine Änderung des Volumenstromes vorliegen. Dieser berechnet sich durch

$$\dot{V} = A \cdot v = A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2.$$

Da \dot{V} =konstant und $v_2 < v_1$, muss also $A_2 > A_1$ sein. Der konzentrierte, enge Luftstrom vor der Turbine verbreitert sich daher nach Durchdringen des Flügelrades. Um die Energie zu berechnen, die durch den Windrotor genutzt wird, benötigt man die sogenannte mittlere Windgeschwindigkeit v , die durch $v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$ berechnet werden kann. Diese mittlere Windgeschwindigkeit entspricht etwa der Geschwindigkeit des Windes, die direkt am Windrotor gemessen werden könnte. Somit kann nun die Leistung berechnet werden, die der Windrotor tatsächlich nutzt. Die zur Verfügung stehende Leistung der Windanlage ergibt sich zu

$$P_N = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot (v_1 - v_2)^2.$$

Man nimmt genau die Geschwindigkeitsdifferenz der Geschwindigkeit vor und hinter dem Rotor als „genutzte Geschwindigkeit“ an. Aufgrund der vorangegangenen Betrachtungen ergibt sich der Massenstrom durch die Turbine zu

$$\dot{m} = \frac{1}{2} \rho A \cdot (v_1 + v_2)$$

¹² Bei alten Windrädern wurde die Energie des Windes in mechanische Energie umgewandelt. Diese wurde dann zum Beispiel zum Zerkleinern von Körnern oder zum Sägen von Holz verwendet.

¹³ Der Rotor ändert also nicht die Menge der Luft, die durch ihn strömt.

und somit ist

$$P_N = \frac{1}{4} \rho A \cdot (v_1 + v_2)(v_1 - v_2)^2.$$

Leistungsbeiwert, Betz'scher Leistungsbeiwert und Wirkungsgrad einer Windkraftanlage

Um die Effektivität einer Windenergieanlage weiter zu untersuchen, wird der Leistungsbeiwert $c_P = \frac{P_N}{P_0}$ errechnet. Dabei ist P_0 gerade die Energie des Windes ohne Einfluss der Windturbine und damit ist

$$c_P = \frac{\frac{1}{4} \rho A \cdot (v_1 + v_2)(v_1 - v_2)^2}{\frac{1}{2} \rho A \cdot v_1^3} = \frac{(v_1 + v_2)(v_1 - v_2)^2}{2 \cdot v_1^3}$$

$$c_P = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right)$$

Die durch den Windrotor nutzbare Leistung hängt also nur vom Verhältnis der Windgeschwindigkeiten vor und hinter dem Flügelrad ab. Die Windkraftanlage arbeitet umso besser, je stärker sie die Luft beim Durchgang durch die Turbine bremsen kann. Die Geschwindigkeit v_2 muss also möglichst gering sein, denn je größer der Leistungsbeiwert ist, desto mehr Energie wird der Windenergieanlage zur Verfügung gestellt.

Albrecht Betz untersuchte verschiedene Theorien zur Windkraftnutzung. Unter anderem untersuchte er auch den theoretischen Leistungsbeiwert und fand heraus, dass dieser einen festen Wert nicht überschreitet. Seine Überlegungen dazu werden im Folgenden näher erläutert.

Ausgangspunkt der Untersuchung ist die allgemeine Formulierung des Leistungsbeiwertes

$$c_P = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right).$$

Um den maximal möglichen Leistungsbeiwert zu bestimmen, muss die Ableitung der Funktion $c_P(v_1, v_2)$ gebildet werden. Dabei ist v_1 die Windgeschwindigkeit vor dem Rotor. Sie wird als konstant angenommen, da die Windkraftanlage keinen Einfluss auf diese Größe hat. Es wird also lediglich die Ableitung $c'_P = \frac{d}{dv_2} c_P$ gebildet und gleich Null gesetzt um den maximalen Wert für c_P zu bestimmen. Dabei wird die Produktregel genutzt.

$$c'_P = \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{2}{v_1^2} v_2 \cdot \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) + \frac{1}{v_1} \cdot \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) \right) = 0$$

Um möglichst einfach v_2 zu bestimmen, bei dem der Leistungsbeiwert maximal wird, wird in der Gleichung $\frac{1}{v_1^3}$ ausgeklammert.

$$c'_P = \frac{1}{2v_1^3} (-2v_1v_2 - 2v_2^2 + v_1^2 - v_2^2)$$

$$c'_P = -3v_2^2 - 2v_1v_2 + v_1^2$$

$$c'_P = v_2^2 + \frac{2}{3}v_1v_2 - \frac{1}{3}v_1^2$$

Die entstehende quadratische Gleichung kann nun mithilfe der Lösungsformel gelöst werden.

$$v_{2(1,2)} = -\frac{1}{3}v_1 \pm \sqrt{\frac{1}{9}v_1^2 + \frac{1}{3}v_1^2}$$

$$v_{2(1,2)} = -\frac{1}{3}v_1 \pm \sqrt{\frac{4}{9}v_1^2}$$

$$\underline{\underline{v_{2(1)} = \frac{1}{3}v_1}}$$

$$v_{2(2)} = -v_1$$

Es ergibt sich also, dass der Leistungsbeiwert genau dann einen Extrempunkt besitzt, wenn die Windgeschwindigkeit hinter dem Rotor genau ein Drittel der vorherigen Geschwindigkeit beträgt. Die zweite Lösung v_2^2 ist physikalisch nicht sinnvoll um ein Maximum zu finden, denn dies würde bedeuten, dass die Windgeschwindigkeit hinter dem Rotor ihre Richtung genau entgegengesetzt zur vorherigen ändert. Ein Rotor kann einen solchen Vorgang allerdings nicht durchführen. Betrachten wir also weiterhin den Fall $v_{2,\text{Ext}} = \frac{1}{3}v_1$. Mathematisch ist noch eine Untersuchung der zweiten Ableitung notwendig, um festzustellen, dass der Leistungsbeiwert tatsächlich maximal wird.

$$c_p'' = \frac{d^2}{dv_2^2} c_p$$

$$c_p'' = \frac{1}{2v_1^3} (-6v_2 - 2v_1)$$

Setzt man nun das errechnete $v_{2,\text{Ext}}$ in diese Gleichung ein, so ergibt sich

$$c_p'' = \frac{1}{2v_1^3} \left(-6 \cdot \frac{1}{3}v_1 - 2v_1 \right)$$

$$c_p'' = -\frac{4v_1}{2v_1^3} = -\frac{2}{v_1^2} < 0$$

Da $c_p''(v_{2,\text{Ext}}) < 0$ existiert an der Stelle $v_{2,\text{Ext}} = v_{2,\text{max}}$ ein Maximum für c_p . Damit kann der maximale Leistungsbeiwert berechnet werden.

$$c_{P,\text{max}} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{9} \right) \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \right)$$

$$\underline{\underline{c_{P,\text{max}} = \frac{16}{27} \approx 0,59}}$$

Eine Windkraftanlage kann also maximal einen Leistungsbeiwert von $c_p = 0,59$ annehmen. Dieser Wert wird genau dann erreicht, wenn die Geschwindigkeit hinter dem Rotor genau $v_2 = \frac{1}{3}v_1$ beträgt, beziehungsweise $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$ ist. Man erreicht dieses Optimum bei realen Windenergieanlagen nicht, da der Maximalwert nur mathematisch errechnet ist und keine leistungsmindernden Faktoren (wie Strömungsturbulenzen oder Reibungseffekte) berücksichtigt. Diese treten allerdings an jeder realen Anlage auf.

Man bezeichnet diesen Wert $c_{P,\text{max}}$ auch als Betz'schen Leistungsbeiwert ($c_{P,\text{Betz}}$). Albrecht Betz ist einer der wichtigsten deutschen Forscher im Bereich der Windenergie und seine Erkenntnisse sind auch heute noch für die Planung und Konstruktion von Windkraftanlagen von Bedeutung. Dieser Maximalwert gilt uneingeschränkt für alle Windkraftanlagen und ist unabhängig vom Aufbau der Anlage, der Form der Rotorblätter oder anderen Unterscheidungsmerkmalen von Windrotoren.

Man definiert nun den Wirkungsgrad η einer Windkraftanlage als das Verhältnis ihrer Leistung P_N zur maximal nutzbaren Leistung P_{id} des Windes:

$$\eta = \frac{P_N}{P_{id}} = \frac{P_N}{c_{P, \text{Betz}} \cdot P_0} = \frac{c_P}{c_{P, \text{Betz}}}$$

Der Wirkungsgrad der Windnutzung hängt vor allem von der unterschiedlichen Beschaffenheit und Form der Windturbine bzw. der einzelnen Rotorblätter, deren Länge und dem Gesamtdurchmesser ab. Auf einige Aspekte soll im Folgenden eingegangen werden.

3.3.2 Auftrieb am Rotorblatt

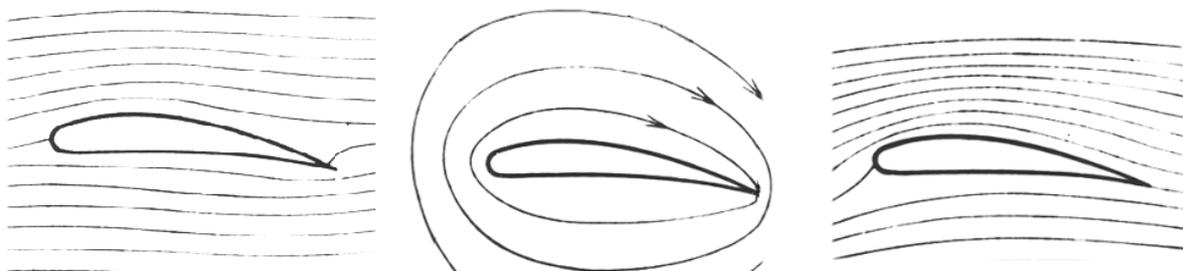
Im Verlauf der Geschichte hat sich auch die Form der Rotorblätter immer wieder gewandelt. Zu Beginn der Entwicklung wurden flache Formen für die Rotorblätter genutzt, wie zum Beispiel beim Westernmill. Damit lässt sich allerdings kein sehr hoher Wirkungsgrad erreichen. Man versuchte später Auftriebskräfte an den Rotorblättern zu nutzen und versuchte dementsprechend die Form des einzelnen Blattes zu optimieren. Alle Anlagen, die die Gesetzmäßigkeiten des Auftriebs nutzen, nennt man sogenannte Auftriebsläufer. Die Auftriebskräfte sind am größten, wenn tragflächenförmige Profile zum Einsatz kommen.

Kraftwirkungen

Wird ein Tragflächenprofil von einem Luftvolumen umströmt, so kommt es an diesem zu Kraftwirkungen durch Auftrieb und Reibung. Die strömende Luft bewegt sich oberhalb des Tragflügels schneller als die Luftmenge unterhalb. Ursache dieser Erscheinung liegt in der Querschnittsform der Rotorblätter begründet, die zusätzlich zur umgebenden laminaren Strömung, eine leichte Zirkulationsströmung zulässt. Diese Zirkulationsströmung bewirkt die Geschwindigkeitsänderung der Luft zwischen Ober- und Unterseite der Tragfläche. Durch die unterschiedliche Geschwindigkeit verringert sich an der Oberseite der Druck (höhere Strömungsgeschwindigkeit) und unterhalb vergrößert er sich durch die langsamer strömende Luft. Dieser Druckunterschied am Tragflächenprofil führt zu einer Kraftwirkung auf den Körper, der Auftriebskraft. Für ein Flügelprofil infinitesimaler Breite dr wird sie durch

$$dF_A = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \cdot t \cdot dr \cdot c_A(\alpha)$$

berechnet. Dabei bezeichnet ρ die Dichte der Luft, c die Geschwindigkeit des umströmenden Mediums und t die Profiltiefe. Die Größe $c_A(\alpha)$ wird als Auftriebsbeiwert bezeichnet und ist eine experimentell bestimmte Größe. Sie hängt vor allem vom Anstellwinkel des Flügelprofils gegenüber der Horizontalen ab. Die Auftriebskraft ist je nach Flügelprofil für einen bestimmten Winkel α maximal. Über- oder unterschreitet der Anstellwinkel den Wert maximalen Auftriebs, so nimmt der Auftriebsbeiwert ab und damit auch die Auftriebskraft, denn es kommt zu vermehrter Wirbelbildung hinter dem Tragflügel. Die Reibung des Tragflügels mit der Luft



Laminare Strömung um das Tragflächenprofil

Schematische Darstellung der Zirkulationsströmung

Resultierendes Stromlinienbild als Zusammenspiel beider Erscheinungen

Abbildung 3-13 Stromlinienbild eines Tragflächenprofils

nimmt zu. Die so vergrößerte Reibungskraft wird auch als Widerstandskraft bezeichnet. Sie wirkt der Flügelströmung entgegen und hemmt damit den Auftriebseffekt am Tragflächenprofil. Man berechnet die Widerstandskraft (für ein Tragflächenprofil infinitesimaler Breite) mit

$$dF_W = \frac{\rho}{2} \cdot c^2 \cdot t \cdot dr \cdot c_W(\alpha).$$

Vergleichbar mit dem Auftriebsbeiwert wird die Widerstandskraft mit einem Widerstandsbeiwert charakterisiert, welcher ebenfalls vom Anstellwinkel der Tragfläche abhängt. Um maximalen Auftrieb zu erreichen, muss die Widerstandskraft klein, die Auftriebskraft möglichst groß sein. Es ist also notwendig ein Optimum zwischen Auftriebs- und Widerstandskraft zu finden, um dem Wind die maximale Leistung entnehmen zu können. Man beschreibt diese Zusammenhänge mithilfe der Gleitzahl

$$\varepsilon(\alpha) = \frac{F_A}{F_W} = \frac{c_A(\alpha)}{c_W(\alpha)}.$$

Sie stellt das Verhältnis der Auftriebskraft zur Widerstandskraft dar und hängt über Auftriebsbeiwert c_A und Widerstandsbeiwert c_W vom Anstellwinkel des Blattes ab. Aus diesen Überlegungen folgt nun, dass die Gleitzahl möglichst groß sein muss um einen großen Auftrieb und damit eine effektive Windenergienutzung zu ermöglichen. Je größer die Gleitzahl, desto effektiver arbeitet die Windkraftanlage. Profile, die eine große Auftriebskraft bewirken, können eine Gleitzahl von $\varepsilon = 60$ erreichen.

Geschwindigkeitsverteilung

Allerdings ist die Strömungsgeschwindigkeit c der Luft um das Rotorblatt nicht konstant. Sie entspricht nicht der Windgeschwindigkeit, die in der Umgebung der Windkraftanlage vorliegt. Einen entscheidenden Beitrag zu Geschwindigkeit der strömenden Luft um das Rotorblatt liefert die Umfangsgeschwindigkeit, die durch die Drehbewegung zustande kommt. Diese ist meist sogar um ein Vielfaches größer als die Windgeschwindigkeit. Das Verhältnis dieser beiden Geschwindigkeiten (Wind- und Umfangsgeschwindigkeit) beschreibt die Schnelllaufzahl¹⁴ λ . Bei Windkraftanlagen mit drei Rotorblättern liegt λ zwischen 7 und 8, das heißt die Umfangsgeschwindigkeit der Blattspitzen ist rund achtmal größer als die Windgeschwindigkeit.

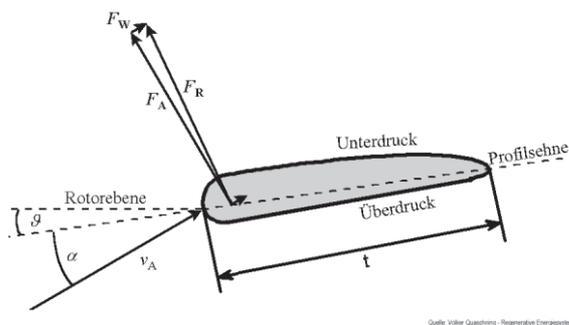


Abbildung 3-14 Kräfte am Rotorblatt

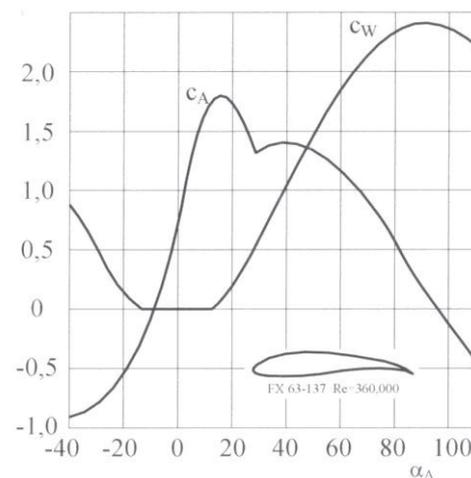


Abbildung 3-15 Auftriebs- und Widerstandsbeiwert in Abhängigkeit des Anströmwinkels

¹⁴ In Abschnitt 3.2 ist wurde die Schnelllaufzahl bereits eingeführt und erläutert.

keit¹⁵. Es kommt zur Superposition der Geschwindigkeiten am Windrotor. Mathematisch gesehen werden sie vektoriell addiert. Die Umfangsgeschwindigkeit ändert durch die Drehbewegung in jedem Moment ihre Richtung, die Windrichtung ist aber im Allgemeinen konstant. Um sich den Wind als Energieerzeuger also optimal nutzbar zu machen, muss die Rotorebene so ausgerichtet sein, dass sie gerade senkrecht zu Windrichtung liegt. Betrachtet man nun ein Rotorblatt im Querschnitt, so ergibt sich folgende schematische Darstellung.

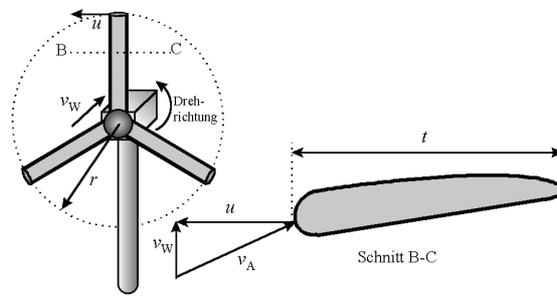


Abbildung 3-16 Geschwindigkeiten am Rotorblatt

Die Anströmgeschwindigkeit v_A setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, der konstanten Windgeschwindigkeit (v_W) und der mit dem Abstand von der Drehachse zunehmenden Umfangsgeschwindigkeit (u). Die Windgeschwindigkeit hat nahe der Nabe den größten Einfluss auf die resultierende Strömungsgeschwindigkeit, da die Umfangsgeschwindigkeit geringer ist. Nach außen hin dominiert der Einfluss der Umfangsgeschwindigkeit. Es verändert sich die resultierende Geschwindigkeit und damit auch der optimale Anströmwinkel. Das Rotorblatt muss also aus Teilprofilen bestehen, die die jeweilige Strömungsgeschwindigkeit ideal zur Winderzeugung nutzbar machen.

Profilformen am Rotorblatt

Nahe der Nabe ist die Umfangsgeschwindigkeit des Rotors geringer, die Luft strömt langsamer am Rotorblatt entlang und erzeugt so eine geringe Auftriebskraft. Um diese zu vergrößern, kann die Profiltiefe vergrößert werden, wodurch allerdings auch die Widerstandskraft zunimmt. Daneben kann auch der Auftriebsbeiwert verändert werden, indem die Form des Profils geändert wird. Dickere und längere Profile ermöglichen einen größeren Unterschied der Strömungsgeschwindigkeiten an Ober- und Unterseite des Rotorblattes, da durch die veränderte Form die Zirkulationsströmung verstärkt wird. Der Druckunterschied erhöht sich und die Auftriebskraft ist größer als bei schmalen Profilen. Diesen Strömungseffekt kann man in der Nähe der Nabe gut nutzbar machen, da die Umfangsgeschwindigkeit geringer ist. Weiter zur Blattspitze nimmt die Strömungsgeschwindigkeit zu. Es ist sinnvoll nun die Widerstandskomponente zu minimieren, indem man die Rotorblätter flacher und dünner gestaltet. Es wird die Widerstands- aber auch die Auftriebskraft verringert.

Aus diesen Betrachtungen ergibt sich folgende besonders günstige Form der Rotorblätter: Die einzelnen Blätter sind eher flach und schmal geformt, werden allerdings zur Nabe hin dicker und breiter. Dies kommt auch den Betrachtungen zur Festigkeit der Rotorblätter entgegen, denn sie werden an der Nabe durch die sogenannte „Knickbelastung“ am stärksten beansprucht. Das breitere und dickere Profil führt damit nicht nur zum vergrößerten Auftrieb, sondern auch zur erhöhten Stabilität des Rotors. Ein solches Rotorblatt einer Windkraftanlage mit variierenden Profilen im Querschnitt ist in Abbildung 3-17 dargestellt. Die angegebenen Buchstaben- und Zahlenkombinationen bezeichnen verschiedene Standard-Profil-

¹⁵ An den Blattspitzen kann es zu Geschwindigkeiten von bis zu 70-90 m/s kommen. Im Vergleich dazu liegt die Windgeschwindigkeit bei starkem Wind (Windstärke 6 bis 7) nur bei ca. 10-15 m/s.

formen, wie sie beispielsweise auch im Flugzeugbau eingesetzt werden. Sie beschreiben die konkrete Querschnittsform an einer bestimmten Stelle des Flügels genauer und sind für die Herstellung eines Rotorblattes von Bedeutung.

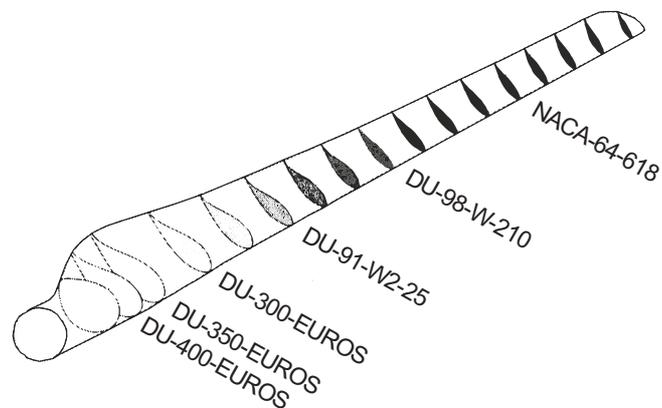


Abbildung 3-17 Rotorblatt mit Profilquerschnitten

Um den Windrotor mit einer größeren Windgeschwindigkeit betreiben zu können, werden hohe Türme gebaut, um die Rotoren möglichst weit vom Boden entfernt zu betreiben. So wird die umgebende Luft weniger stark durch äußere Einflüsse, wie Hügel, Häuser oder ähnliches abgebremst und Reibungserscheinungen der Luft am Erdboden werden vermindert. Moderne Windkraftanlagen haben deshalb eine Nabenhöhe von ungefähr 60 bis 80m.

3.4 Getriebe- und Generortechnik

Um die Windkraft für die Erzeugung elektrischer Energie zu nutzen, braucht man neben den beschriebenen Rotorblättern, und damit des kompletten Flügelrades, noch weitere mechanische und elektrische Maschinen und Anlagen. Die Drehbewegung wird über ein Getriebe¹⁶ an den Generator übersetzt, der durch die angeregte Drehbewegung eine elektrische Spannung erzeugt. Es wird also die Rotationsenergie des Rotors in elektrische Energie umgewandelt, die nun direkt in das Energienetz eingespeist werden kann¹⁷. Die üblichen Generortypen für Windkraftanlagen sind Drehstromgeneratoren. Diese ähneln im prinzipiellen Aufbau dem einfachen Wechselstromgenerator. Dabei dreht sich eine Spule innerhalb eines Dauer- oder Elektromagneten und erzeugt einen Induktionsstrom, welcher über Schleifkontakte dem Verbraucher zugeführt werden kann. Eine andere Möglichkeit besteht darin, einen stromdurchflossenen Leiter drehbar innerhalb einer kreisförmigen Spule zu bewegen und so am Stator eine Spannung zu induzieren. Die Übertragung des Stromes durch Schleifkontakte wird dabei vermieden. Im Unterschied zu einfachen Wechselstromgeneratoren werden bei Drehstromgeneratoren im Spulenring drei Spulen jeweils um 120° versetzt angeordnet. Es kommt zur Überlagerung von drei Wechselstromsignalen, deren Phasenverschiebung jeweils 120° beträgt. Ein solcher Generator, bei dem sich der Magnet innerhalb des Spulenringes bewegt, wird Synchrongenerator genannt (siehe Abbildung 3-18). Er wird in großen Windkraftanlagen (ab etwa 1 Megawatt Nennleistung) eingesetzt, da der Wirkungsgrad dieser Maschinen hoch ist.

¹⁶ Auf die verschiedenen Getriebearten soll hier nicht eingegangen werden. Vergleiche dazu (Malberg, 2007) Seite 74 ff

¹⁷ Für einige Generortypen muss die erzeugte, unregelmäßige Spannung auch erst synchronisiert werden um ins Energieversorgungsnetz eingespeist werden zu können, sonst würden am Verbraucher starke Spannungsschwankungen auftreten.

Allerdings ist die Netzeinspeisung schwierig zu realisieren, da man eine zusätzliche Einrichtung zur Synchronisation mit dem Netz benötigt.

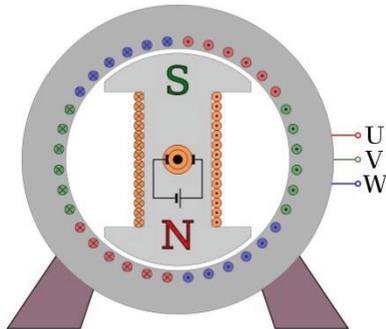


Abbildung 3-18 Schematische Darstellung eines Synchrongenerators

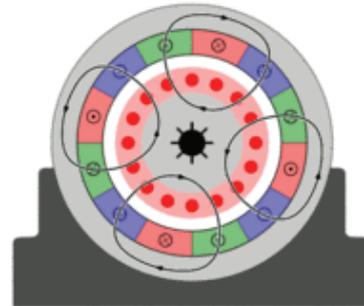


Abbildung 3-19 Schematische Darstellung eines Asynchrongenerators

Eine andere Form des Drehstromgenerators ist der Asynchrongenerator. Hierbei bewegt sich ein Käfig mit wenigen Windungen als Läufer in einem Stator aus mehreren Elektromagneten (also Spulen), wie in Abbildung 3-19 dargestellt. Der Läufer ist kurzgeschlossen, es fließt also ein Strom, der wiederum in die äußeren Spulen des Elektromotors eine Spannung induziert. Er hat gegenüber dem Synchrongenerator einen schlechteren Wirkungsgrad, kann aber ohne weiteres an das Stromnetz angekoppelt werden. Komplexe Synchronisationssysteme werden nicht benötigt und der Aufbau in Windkraftanlagen ist damit kostengünstiger. Man nutzt diese Generatorart hauptsächlich für mittelgroße Anlagen bis ein Megawatt Nennleistung.

3.5 Leistungsbegrenzung am Windrotor

Um Schäden an einer Windkraftanlage durch sehr starken Wind oder Sturm zu verhindern, wurden Schutzkonzepte entwickelt. Die beiden gängigen prinzipiellen Abläufe sollen im Folgenden kurz dargestellt werden.

Stall-Regelung

Das Prinzip der Stall-Regelung basiert auf dem natürlichen, bei jedem umströmten Körper auftretenden Effekt der Wirbelbildung durch Strömungsabriss. Man setzte dieses Konzept bereits in den 80er Jahren ein. Das Rotorblatt des Flügelrades ist dabei fest mit der Nabe verbunden (in einem bestimmten festen Neigungswinkel bezüglich der Rotorebene) und die Drehzahl wird durch Nutzung eines Asynchrongenerators (zur Umwandlung in elektrische Energie) konstant gehalten. Betrachtet man die Windgeschwindigkeiten als vektorielle Größen am Rotorblatt, so ergibt sich für eine konstante Umfangsgeschwindigkeit, wie sie hier vorliegt, ein bestimmter Winkel zwischen der Umfangs- und der anströmenden, resultierenden Geschwindigkeit. Liegt die Windgeschwindigkeit im üblichen Bereich (etwa 10 bis 12 m/s), so wird das Stromlinienprofil des einzelnen Blattes umströmt und führt zum gewünschten Auftrieb. Überschreitet sie allerdings einen bestimmten Wert, so entstehen hinter dem Rotorblatt Wirbel, die durch das Ablösen der Strömung vom Flügel zustande kommen. Die resultierende Geschwindigkeit trifft dann so steil auf das Rotorblatt, dass eine laminare Umströmung nicht mehr möglich ist. Der Flügel wird durch die Wirbelbildung abgebremst,

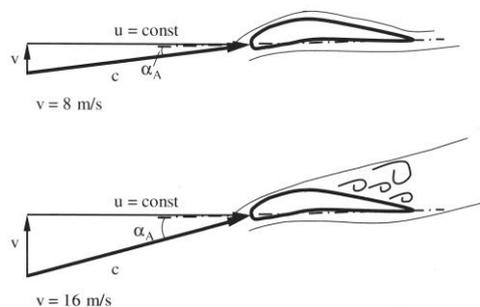


Abbildung 3-20 Strömungsverhalten bei Stall-Regelung

verringert damit die Leistung des Winderzeugers und schützt ihn so vor Zerstörung. Allerdings kommt es auch bei kurzzeitigen Böen zu solchen Erscheinungen und es wirkt während des Übergangs zwischen laminarer und abgelöster Strömung ein größeres Drehmoment auf das Getriebe, was zu erhöhtem Verschleiß am Antriebsstrang führt. Um diesen Effekt des häufigen Wechsels zu vermindern, kann der Ablösevorgang auch manuell herbeigeführt werden, indem man die Spitzen des Flügels steiler in den Wind dreht und so die Wirbelbildung bei zu hoher Windgeschwindigkeit manuell erzeugt wird (siehe Abbildung 3-21).

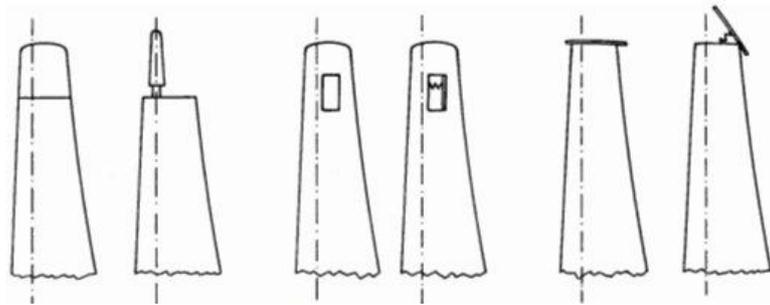


Abbildung 3-21 Varianten von Bremsklappen bei Stall-geregelten Windkraftanlagen

Pitch-Regelung

Ein zweites Konzept zur Leistungsbegrenzung beruht auf der Verstellung der Rotorblätter. Ausgangspunkt ist wieder das einzelne Rotorblatt und die entsprechende Geschwindigkeit der Luftströmung. Auch bei diesem Konzept soll die Drehzahl konstant gehalten werden, um eine einfache Einspeisung in das Verbrauchernetz zu gewährleisten. Das Rotorblatt wird abhängig von der jeweils vorherrschenden Windgeschwindigkeit verdreht. Je größer die Windgeschwindigkeit ist, desto größer ist der Winkel zwischen Umfangs- und resultierender Geschwindigkeit. Durch Drehen des Rotorblattes wird das Profil genau so ausgerichtet, dass es durch die resultierende Geschwindigkeit ideal umströmt wird. Es sollen möglichst wenig Turbulenzen am Tragflügel auftreten (siehe Abbildung 3-22). Bei größerer Windgeschwindigkeit wird das Rotorblatt also steiler in den Wind gestellt, um durch die Luftströmung optimalen Auftrieb zu erzeugen und damit die Leistung der Windkraftanlage für einen breiten Bereich von Windgeschwindigkeiten konstant zu halten. Erst bei sehr hoher Windgeschwindigkeit (ab etwa 25 m/s) muss die Anlage vollständig abgeschaltet werden (eingestellter Winkel von 90°). (Bundesverband Windenergie e.V.)

Der Vorteil dieses Konzeptes gegenüber der Stall-Regelung ist eine effizientere Leistungsnutzung durch die Anlage. Die Pitch-Regelung ermöglicht es ab einer gewissen Windgeschwindigkeit die Leistung der Windkraftanlage nahezu konstant zu halten, während diese durch die Wirbelbildung bei der Stall-Regelung wieder abnimmt und so nur in einem engen Spektrum Maximalwerte erreicht werden können (siehe dazu Abbildung 3-23). Allerdings hat die Pitch-Regelung einen entscheidenden Nachteil: Sie ist kostenaufwändiger. Es wird ein Mechanismus benötigt, der die Windgeschwindigkeit misst und das Rotorblatt entsprechend dieser Geschwindigkeit in die gewünschte Position bringt. Dabei müssen große Verstellwinkel ermöglicht werden, da auch für große Windgeschwindigkeiten Wirbelbildung am Rotorblatt vermieden werden soll.

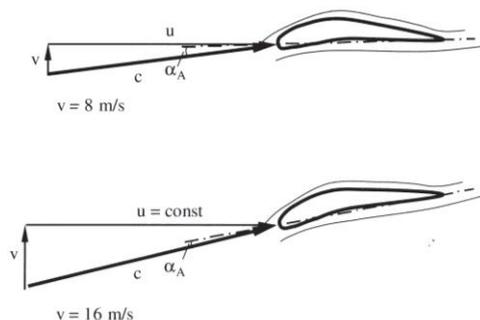


Abbildung 3-22 Strömungsverhalten bei Pitch-Regelung

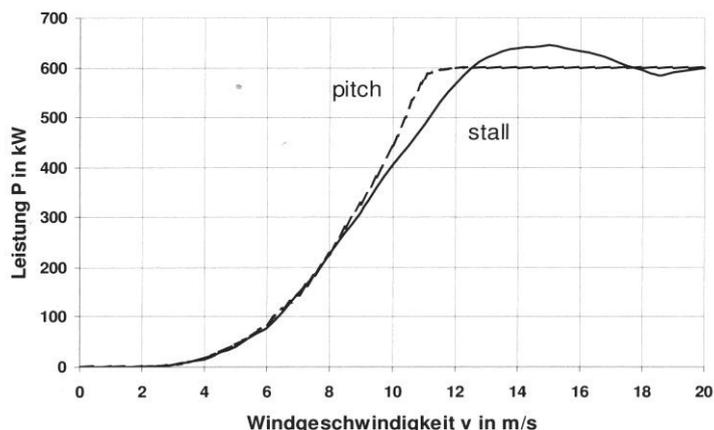


Abbildung 3-23 Vergleich der Leistung zwischen Anlagen mit Pitch- oder Stallregelung

Beide Konzepte stellen Möglichkeiten des Schutzes vor Zerstörung dar und ermöglichen außerdem eine effiziente Nutzung der Windenergie (insbesondere die Pitch-Regelung). Je nach Standort (konstante oder böige Winde), Kostenrahmen und baulicher Größe einer Anlage wird individuell eine der Möglichkeiten für die Leistungsbegrenzung der Windkraftanlage gewählt. Voraussetzung für diese Betrachtungen, wie sie hier beschrieben sind, ist dabei immer eine konstante Umfangsgeschwindigkeit und damit eine beabsichtigte Einspeisung in das Verbrauchernetz. Bei drehzahlvariablen Anlagen muss gesondert untersucht werden, welche Methode sich als geeigneter erweist. Darauf soll hier allerdings nicht weiter eingegangen werden.

4 Fakten zur Windkraftnutzung

Mit dem Verbrauch fossiler Energieträger rücken seit mehreren Jahren sämtliche Methoden zur Nutzung erneuerbarer Energien in den Mittelpunkt wirtschaftlicher und politischer Betrachtungen. Die Windkraftnutzung nimmt dabei einen zentralen Stellenwert ein, denn sie kann in vielen Ländern weltweit, angepasst auf unterschiedliche Standorteigenschaften eingesetzt werden. Durch die stetige Weiterentwicklung von Windkraftanlagen, konnte die Windenergie ihren Anteil am Energiemix ständig vergrößern.

Weltweit wurden im Jahr 2010 circa 19% der benötigten elektrischen Energie über regenerative Energieträger erzeugt. Die Nutzung von Wasser als Energiequelle hat dabei den größten Anteil (76,4%), wird aber direkt von der Windenergienutzung (15,0%) gefolgt. (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), 2011) Betrachtet man die installierte

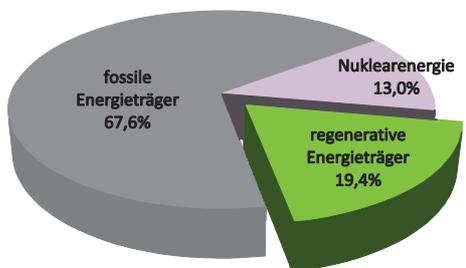


Abbildung 4-1 Anteil der verschiedenen Energieträger am weltweiten Energiehaushalt (2010)

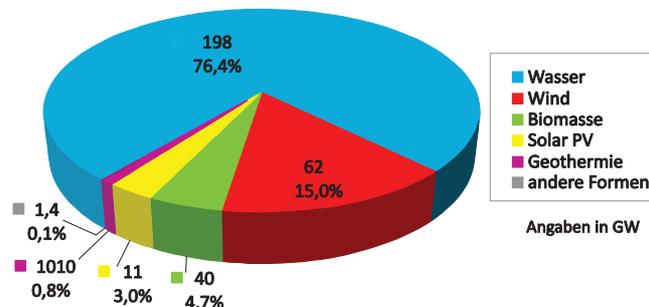


Abbildung 4-2 Anteile verschiedener Energiformen an der gesamten durch regenerative Energieträger zur Verfügung gestellten Energie (2010)

Leistung von Windkraftanlagen, so wird deutlich, dass in den letzten Jahren ein beträchtlicher Anstieg zu verzeichnen ist. Dies wird auch in einer detaillierteren Betrachtung der Entwicklungen in einzelnen Ländern deutlich (siehe Abbildung 4-5). In jedem Land kann ein signifikanter Anstieg der Windkraftnutzung verzeichnet werden. Besonders in China und den USA wurden in den letzten fünf Jahren sehr viele neue Anlagen in Betrieb genommen. Deutschland kann ebenfalls einen deutlichen Anstieg verzeichnen. Allerdings sind die Bestrebungen der Umstellung auf regenerative Energieträger schon seit längerer Zeit vorhanden, sodass kein ähnlich rasanter Anstieg zu verzeichnen ist. (Global Wind Energy Council (GWEC), 2011)

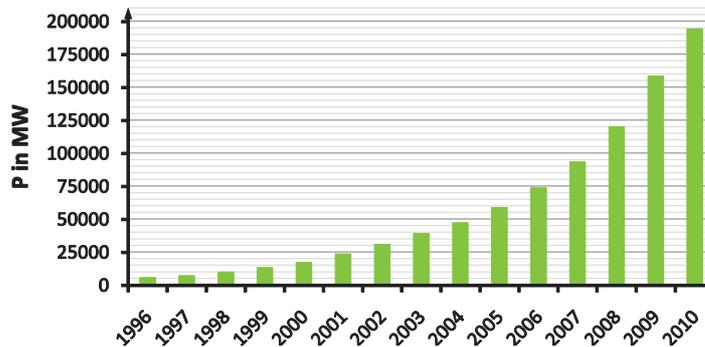


Abbildung 4-3 Weltweit kumulierte durch Windkraftanlagen erzeugte elektrische Leistung

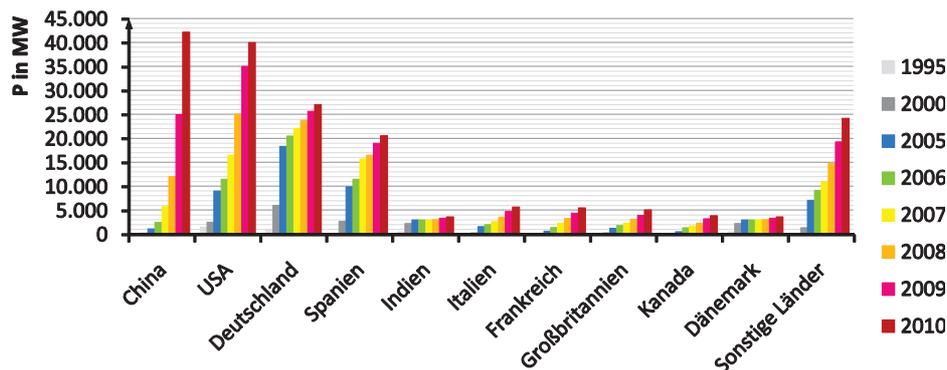


Abbildung 4-5 Durch Windkraftanlagen erzeugte elektrische Leistung in einzelnen Ländern für den Zeitraum 1995 bis 2010

Weltweit wird derzeit eine Leistung von circa 195 Gigawatt durch Windkraftanlagen erzeugt. Der größte Teil wurde 2010 noch in Europa zur Verfügung gestellt, direkt gefolgt von Asien und Nordamerika. Die starken Wachstumstendenzen in den asiatischen Ländern, allen voran in China, lassen auf eine Zunahme des asiatischen Anteils am weltweiten Gesamtenergiehaushalt erahnen. Ob sich diese Tendenzen in der bisherigen Weise fortsetzen, werden die nächsten Jahre und Jahrzehnte zeigen. Festzuhalten ist allerdings, dass die Nutzung von Windenergie auch in den kommenden Jahren stetig an Bedeutung gewinnen wird, denn sie bietet eine effiziente und relativ kostengünstige Möglichkeit ressourcenschonender Energieerzeugung. (Global Wind Energy Council (GWEC), 2011)

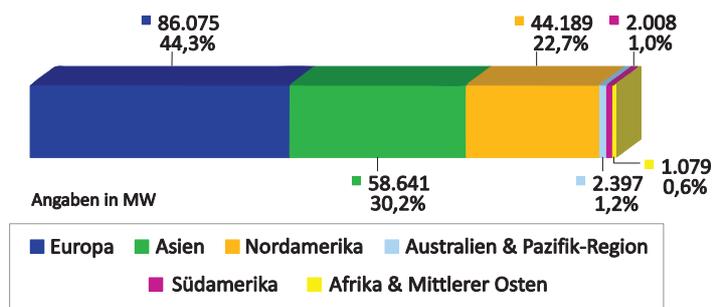
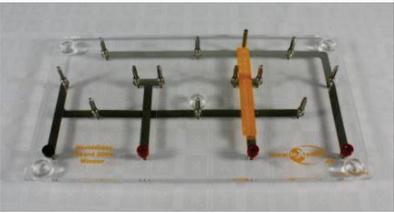
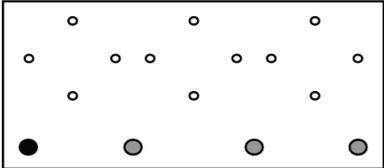
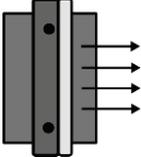
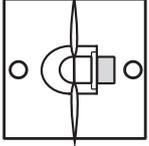
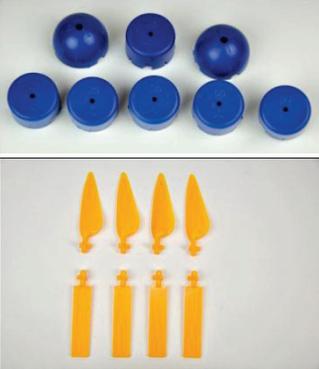
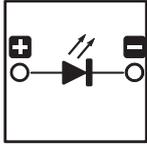
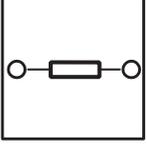
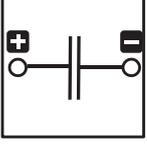
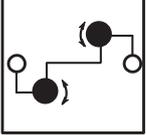
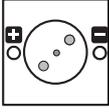
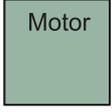
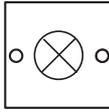
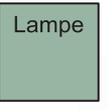


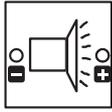
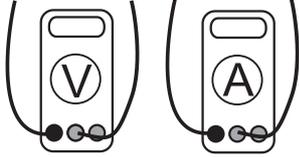
Abbildung 4-4 Durch Windkraftanlagen erzeugte elektrische Leistung auf den Kontinenten

II. Handhabung der Experimentiergeräte leXsolar-Wind

1 Bezeichnungen der Bauteile

Grundausrüstung von leXsolar-Wind		
Bauteil	Bezeichnung	Symbol im Versuchsaufbau
	Grundeinheit	
	Winderzeuger universal	
	Windgenerator auf Modulplatte	
	Naben (Dreifach-Einsatz, Vierfach-Einsatz, Winkel: 20°, 25°, 30°, 50°, 90°) + Rotorflügel (4x optimiertes Profil, 4x flaches Profil)	

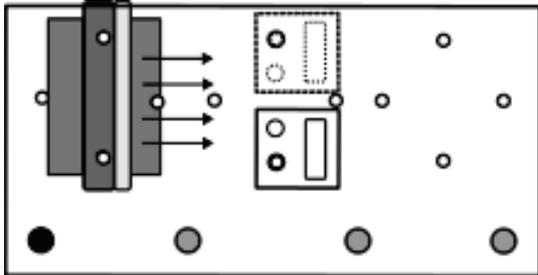
	<p>LED-Modul (Leuchtdiode)</p>	
	<p>Savoniusrotor (mit Generatormodul)</p>	
	<p>Widerstandsmodul $R = 33 \Omega$</p>	
	<p>Kondensatormodul $C = 220 \text{ mF}$</p>	
	<p>Potentiometermodul $R = 0 \Omega \dots 1,1 \text{ k}\Omega$</p>	
	<p>Motormodul (mit Drehschreiber und Farbscheiben)</p>	 oder 
	<p>Glühlampenmodul</p>	 oder 

	<p>Hupenmodul</p>	 oder 
	<p>Digitalmessgerät mit Messleitungen</p>	
	<p>Stromversorgungsgerät 3-12 V, 24 W</p>	
	<p>Windstärkemessgerät mit Halterung</p>	

2 Hinweise zur Handhabung

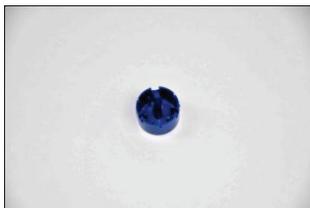
Bei der Durchführung der Experimente mit leXsolar-Wind sind einige Hinweise zum Umgang mit Geräten und Bauteilen zu beachten.

2.1. Messung der Windgeschwindigkeit (Erweiterung Windgeschwindigkeitsmesser):

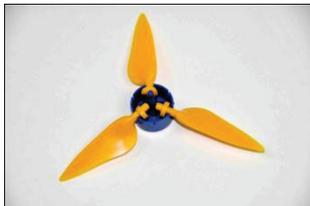


Um die Windgeschwindigkeit an der Stelle der Windturbine möglichst genau zu messen, wird die Modulplatte mit Windturbine von der Grundplatte entfernt. Anschließend wird der Halter für das Windstärkemessgerät wie abgebildet aufgesteckt. Für eine genauere Messung kann der Durchschnittswert zwischen linkem und rechtem Steckplatz gebildet werden.

2.2. Einsetzen und Wechseln der Rotorblätter



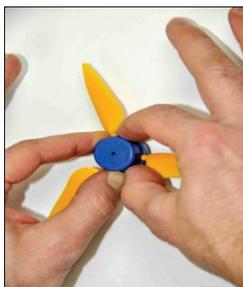
Zuerst wird eine Nabe mit dem gewünschten Anstellwinkel und der Flügelzahl ausgewählt (die Naben sind auf der Rückseite entsprechend beschriftet). Der Zweiflügel- und Vierflügel-Rotor kann mithilfe der Nabe mit 4 Einsätzen aufgebaut werden



Danach werden die Rotorblätter eingesetzt. Beim Einsetzen der Flügel ist darauf zu achten, dass diese mit der abgerundeten Seite nach oben in den Einsatz gelegt werden.



Nach dem Einsetzen der Flügel wird die Nabenkappe aufgesetzt und leicht festgedrückt.

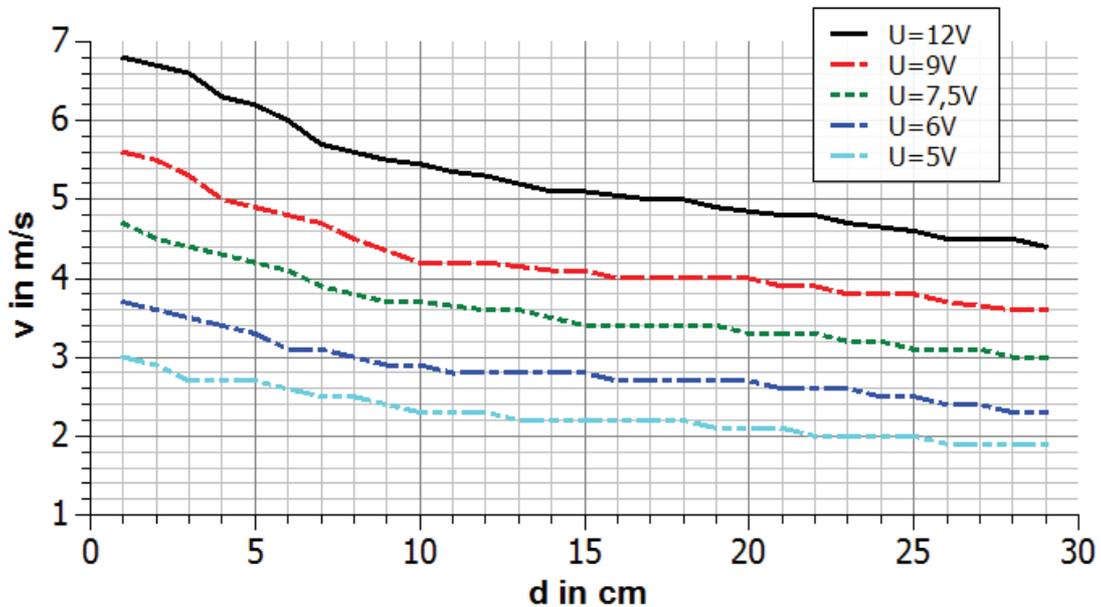


Zum Wechseln der Rotorblätter befindet sich eine kleine Nase am Kopf der Nabe. Wenn die Nabe auf einer festen Unterlage leicht aufgedrückt wird (siehe Foto), löst sich der Kopf und die Flügel können ausgetauscht werden.

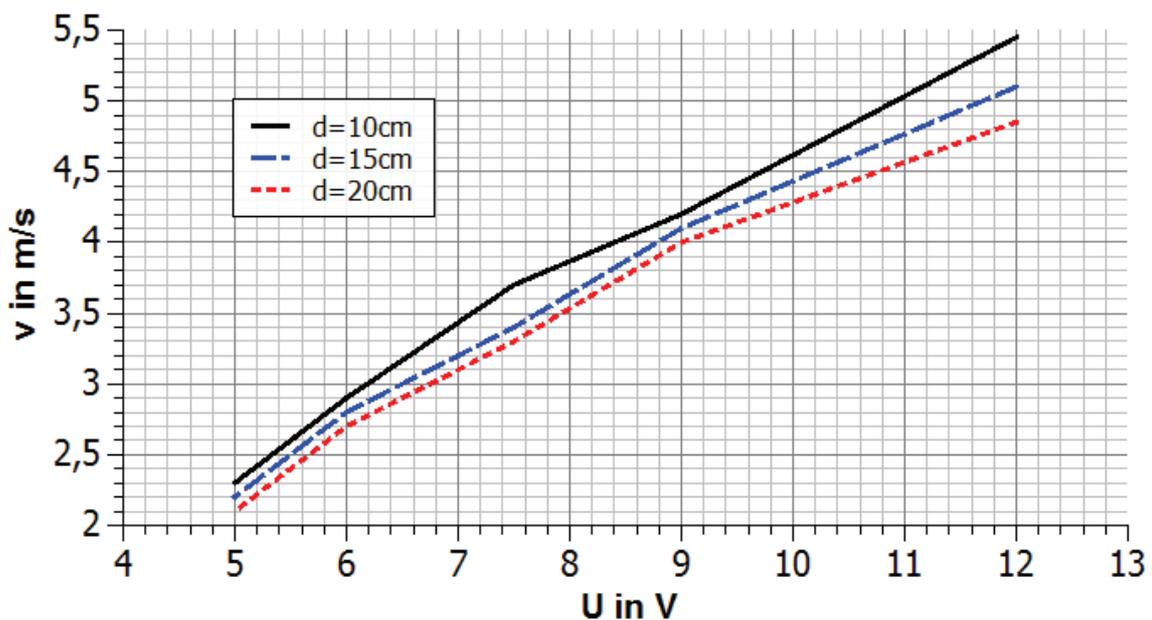
3 Diagramme zu den Experimenten

Im Folgenden werden die benötigten Diagramme gegeben, um für einzelne Experimente die Windgeschwindigkeit ermitteln zu können, falls die Erweiterung Windgeschwindigkeitsmesser nicht vorhanden ist.

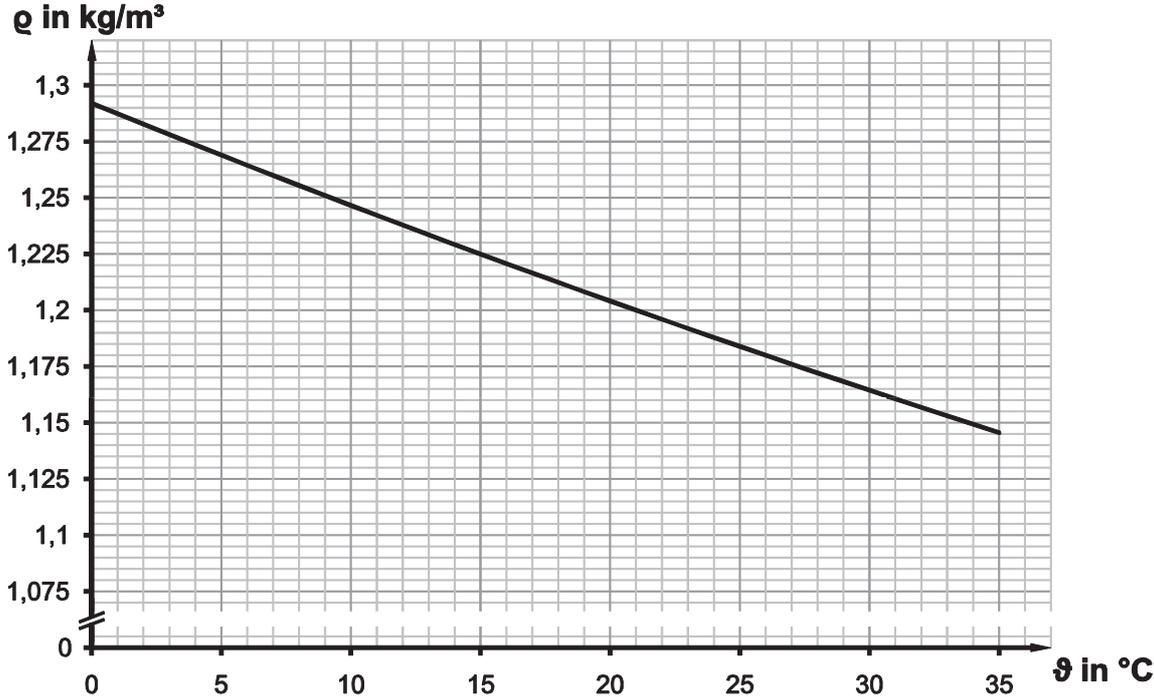
3.1. Windgeschwindigkeit bei konstanter Spannung am Winderzeuger



3.2. Windgeschwindigkeit bei konstantem Abstand vom Winderzeuger



3.3. Dichte der Luft (abhängig von der Raumtemperatur)



III. Musterlösungen der Experimente

Die ausgefüllten Formulare des Schülerheftes geben eine Darstellung von zu erwartenden Ergebnissen der Experimente und zeigen Antwortmöglichkeiten für die Fragestellungen der Auswertung. Die dargestellten Lösungen sind als Richtlinie zu verstehen. Jeder Lehrer sollte selbst entscheiden, welche Ergebnisse er von den Schülern fordert.

Als Hilfestellung für den Lehrer wurden zusätzliche Kommentare zu den jeweiligen Aufgaben in Klammern angegeben. Bei einigen Fragestellungen ist es außerdem notwendig, die Antworten auf einem weiteren Blatt zu ergänzen, wenn der zur Verfügung gestellte Platz nicht ausreicht.

Die Zuordnung der einzelnen Experimente zu den Klassenstufen variiert je nach Lehrplan., Details der Einsatzmöglichkeiten sind bei jedem Versuch angegeben. Für einige Experimente gibt es verschiedenen Altersgruppen angepasste Versuchsanordnungen. Der phänomenologische Teil der Versuche ist geeignet für jüngere Klassenstufen, die Versuche zur Leistungsmessung sind vor allem für ältere Schüler (ab Klasse 9) geeignet, da teilweise physikalische und mathematische Grundlagen vorausgesetzt werden. Die Anleitungen liegen alle als Word-Datei vor, sodass sie nach eigenem Ermessen geändert und angepasst werden können. Eine Aufteilung nach Klassenstufen ist in der folgenden Tabelle dargestellt.

Klassenstufe→ Experimente ↓	5-6	7	8	9	10	Sek 2
1.1	x					
1.2		x				
1.3			x	x (P)		
2.1			x	x		
2.2			x	x (P)		
3.1			x	x		
3.2			x	x		(x)
4.1				x (P)		(x)
5.1		x		x (P)		
5.2			x	x (P)		x
6		x		x (P)		
7.1	x	x				
7.2	x				(x)	
8.1	x	x				
8.2		(x)		x (P)		
8.3				x (P)		
9.1	x	(x)				
9.2		(x)		x (P)		
9.3		(x)	(x)	x (P)		x
10			x	x (P)		x
11.1	x					

11.2		x		x (P)		
11.3			(x)	x (P)		
12.1	x					
12.2		x		x(P)		
12.3			(x)	x(P)		
12.4		x		(x)	(x)	(x)
13.1	x					
13.2		x		x(P)		
13.3		(x)	x	(x)		

P... Experimente sind in einem Projekt zum Thema „Windenergie“ möglich.

Experiment 1.1

Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (phänomenologisch)

Inhalte des Experimentes:

Es wird die Geschwindigkeit der Luft verändert, indem die Spannung am Windgenerator variiert wird. An den Windgenerator ist das Leuchtdiodenmodul angeschlossen. Die Schüler sollen nun (qualitativ) untersuchen, welche Auswirkung die Änderung der Windgeschwindigkeit auf die Helligkeit der Diode hat. Dabei wird die Helligkeit in Abhängigkeit der Spannung am Winderzeuger untersucht und die Ergebnisse werden von den Schülern durch Ausmalen der entsprechenden Kästchenanzahl notiert. Im Anschluss an die experimentellen Untersuchungen vervollständigen die Schüler den Lückentext als Auswertung des Experimentes.

Erklärung der Ergebnisse

Bei großer Spannung am Winderzeuger (12V) kann eine hohe Windgeschwindigkeit gemessen werden. Verringert man die Spannung, so nimmt auch die Geschwindigkeit ab. Die Windturbine dreht sich bei größerer Windgeschwindigkeit schneller und der Generator erzeugt eine größere elektrische Spannung. In Folge dessen leuchtet die Leuchtdiode heller. Mit abnehmender Spannung am Winderzeuger ist also die Helligkeit der Leuchtdiode geringer, was aus der unterschiedlichen Windgeschwindigkeit am Flügelrad resultiert.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Das Experiment eignet sich besonders für den Anfangsunterricht in Physik bzw. für naturwissenschaftliche Grundlagenfächer in **den Klassenstufen 5 und 6**. Die Schüler erhalten einen Einblick in die Physik der Windenergie und lernen den Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Windenergienutzung spielerisch kennen. Das Experiment könnte als **Einführung in einen Themenkomplex** wie z.B. „Erneuerbare Energien“ oder „Energieversorgung“ dienen. Durch den einfachen Versuchsaufbau kann es ebenfalls eingesetzt werden, um den Schülern **erste Kenntnisse im physikalischen Experimentieren** zu vermitteln.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes:

- Beim Ausmalen der Kästchen sollen die Balken wie Skalen betrachtet werden. Leuchtet die Leuchtdiode gar nicht, so wird kein Kästchen ausgemalt, leuchtet sie nur schwach, so werden die untersten zwei Kästchen ausgemalt, usw. Darauf sollten die Schüler gegebenenfalls noch genauer hingewiesen werden.

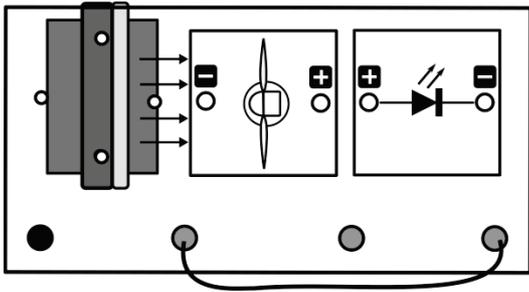


1.1 Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (phänomenologisch)

Aufgabe

Untersuche die Helligkeit einer Leuchtdiode, die durch einen Windgenerator betrieben wird.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeuger mit Stromversorgung (variabel)
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- LED-Modul
- Kabel

Vorbemerkung

Bei diesem Experiment kannst du untersuchen, wie sich der vom Windgenerator erzeugte Strom ändert, wenn die Windgeschwindigkeit verändert wird. Die Variation der Windgeschwindigkeit erfolgt durch Änderung der Spannung am Winderzeuger.

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Verändere die Spannung am Winderzeuger mithilfe einer variablen Spannungsquelle. Beginne bei 6V.
3. Beobachte, wie sich die Helligkeit der Leuchtdiode verändert und trage deine Beobachtungen in die Tabelle ein. Male dazu die entsprechende Anzahl an Feldern aus.

Auswertung

Spannung am Winderzeuger	6V	7,5V	9V	12V	Beispiel																										
Die Leuchtdiode leuchtet...	<table border="1" style="width: 100%; height: 100%;"> <tr><td style="width: 20px; height: 20px;"></td></tr> </table>						<table border="1" style="width: 100%; height: 100%;"> <tr><td style="width: 20px; height: 20px;"></td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 20px;"></td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 20px; background-color: #4a7ebb;"></td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 20px; background-color: #4a7ebb;"></td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 20px; background-color: #4a7ebb;"></td></tr> </table>						<table border="1" style="width: 100%; height: 100%;"> <tr><td style="width: 20px; height: 20px;"></td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 20px; background-color: #4a7ebb;"></td></tr> </table>						<table border="1" style="width: 100%; height: 100%;"> <tr><td style="width: 20px; height: 20px; background-color: #4a7ebb;"></td></tr> </table>						<table border="1" style="width: 100%; height: 100%;"> <tr><td style="width: 20px; height: 20px;"></td><td style="width: 20px;">hell</td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 20px;"></td><td style="width: 20px;">schwach</td></tr> <tr><td style="width: 20px; height: 20px; background-color: #808080;"></td><td style="width: 20px;">gar nicht</td></tr> </table>		hell		schwach		gar nicht
	hell																														
	schwach																														
	gar nicht																														

Vervollständige nun den angegebenen Text:

Bei größerer Spannung am Winderzeuger leuchtet die Leuchtdiode **heller**.

Je **größer** die Windgeschwindigkeit ist, desto heller leuchtet auch die LED.

Experiment 1.2

Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (Spannungsmessung)

Inhalte des Experimentes:

Es wird die durch die Windturbine erzeugte Spannung in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit an der Windkraftanlage untersucht. Für verschiedene Netzspannungen am Winderzeuger wird die Spannung an der Windturbine gemessen und deren Verhalten beobachtet. Die Schüler notieren sich Beobachtungen und Messwerte und tragen ihre Ergebnisse in das vorgegebene Koordinatensysteme ein. Anschließend ist das entstehende Diagramme noch zu beschreiben.

Erklärung der Ergebnisse

Je größer die Windgeschwindigkeit am Flügelrad der Windturbine ist, desto schneller dreht sich dieser. Die schnellere Drehung erzeugt im Generator eine größere Spannung. Mit abnehmender Netzspannung am Winderzeuger (geringere Windgeschwindigkeit) nimmt also auch die Spannung am Generator ab. Der Zusammenhang ist annähernd linear fallend. Mit zunehmender Windgeschwindigkeit nimmt die Spannung an der Windturbine zu. Hier kann ein linearer oder exponentieller Zusammenhang vermutet werden. Wegen zu weniger Messwerte kann dieser aber nicht zweifelsfrei bestätigt werden.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Das Experiment eignet sich besonders für die **Klassenstufen 7 und 8**. Dabei steht vor allem das **Messen der Spannung** als elektrische Größe und der **Umgang mit Messgeräten**, sowie das **Erstellen und die Interpretation von Diagrammen** im Vordergrund. Diese grundlegenden Fertigkeiten können am Beispiel einer Windkraftanlage geübt und gefestigt werden.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes:

- Beim Messen der Spannung sollte darauf geachtet werden, dass die Messwerte erst dann abgelesen und in die Tabelle eingetragen werden, wenn sich der angezeigte Wert am Messgerät nicht mehr ändert. Die veränderte Windgeschwindigkeit durch das Verschieben des Winderzeugers bewirkt dieses träge Verhalten des Windgenerators.
Es ist zu empfehlen, die Messung mit kleiner Netzspannung zu beginnen und diese dann zu erhöhen, da so eine schnellere Stabilisierung der Messwerte möglich ist.
- Wird die Windgeschwindigkeit beim Experiment selbst mithilfe des Windgeschwindigkeitsmessers bestimmt, sind die Hinweise auf Seite 32 zu beachten.



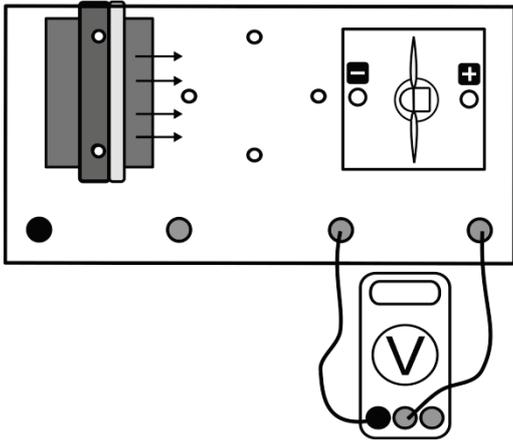
1.2 Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (Spannungsmessung)

Aufgabe

Untersuche die Spannung am Generator, wenn die Windgeschwindigkeit am Winderzeuger verändert wird.

Aufbau

Benötigte Geräte



- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung
- Windturbinenmodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- Kabel
- Spannungsmessgerät

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Verändere die Windgeschwindigkeit durch Variation der Netzteilspannung U_{netz} am Winderzeuger. Was kannst du am Spannungsmessgerät beobachten? Notiere deine Beobachtungen.
3. Miss nun die Spannung an der Windturbine U_{gen} für verschiedene Windgeschwindigkeiten und trage deine Werte in die Tabelle ein.
4. Die Werte für die Geschwindigkeit kannst du mit dem Windstärkemessgerät bestimmen oder aus dem entsprechenden Diagramm (siehe Seite 33) ablesen. Hinweise zur Messung der Windgeschwindigkeit findest du auf Seite **Fehler! Textmarke nicht definiert.**

Beobachtung

Je geringer die Spannung am Netzteil ist, desto geringer ist die Spannung.

Das bedeutet, je geringer die Windgeschwindigkeit, desto geringer ist die Spannung.

Messwerte

U_{netz} in V	12	9	7,5	6	5
v in m/s	6	4,7	3,9	3,0	2,4
U_{gen} in V	4,23	3,07	2,41	1,51	1,03

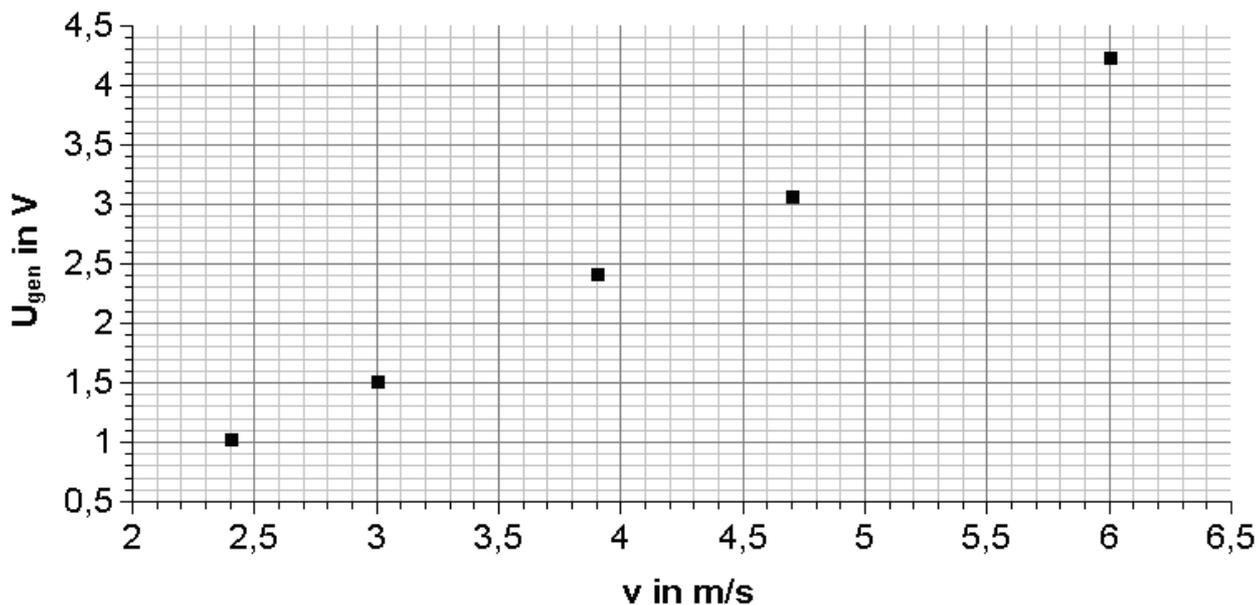


1.2 Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (Spannungsmessung)

Auswertung

1. Trage deine Messwerte in das vorgegebene Diagramm ein.
2. Beschreibe, wie sich die Spannung U_{gen} an der Windturbine ändert, wenn die Netzspannung am Winderzeuger verändert wird. Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Windgeschwindigkeit und der Spannung U_{gen} an der Windturbine?

1.



2.

Je größer kleiner die Spannung am Netzteil ist, desto geringer ist die Spannung, die an der Windturbine erzeugt wird.

Bei größerer Windgeschwindigkeit (größere Netzspannung) wird auch eine größere Spannung an der Windturbine erzeugt. (Ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Windgeschwindigkeit kann vermutet werden.)

Experiment 1.3

Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (Leistungsmessung)

Inhalte des Experimentes:

An den Windgenerator wird das Widerstandsmodul angeschlossen. Es werden Spannung und Stromstärke gemessen und die Messwerte in die vorgegebene Tabelle eingetragen. In der Auswertung wird die Leistung der Windkraftanlage berechnet und die Werte werden anschließend in die vorgegebenen Tabellen eingetragen. Die Schüler sollen die entstandenen Diagramme (qualitativ) beschreiben und anschließend mithilfe ihrer Ergebnisse mögliche Schlussfolgerungen für den Betrieb realer Windkraftanlagen formulieren.

Die Zusatzaufgabe ist zur Differenzierung gedacht und an die leistungsstärkeren Schüler gerichtet. Sie stellt den realen Zusammenhang zwischen Leistung einer Windkraftanlage und Windgeschwindigkeit dar. Die Schüler sollen versuchen, das Abnehmen der Leistung ab einem gewissen Schwellwert zu erklären.

Erklärung der Ergebnisse

Je größer die Windgeschwindigkeit am Flügelrad des Windgenerators ist, desto schneller dreht sich dieser. Die schnellere Drehung erzeugt im Generator eine größere Spannung. Dabei verringert sich der innere Widerstand des Generators, sodass die Stromstärke zunimmt. Es folgt eine Vergrößerung der Leistung bei größerer Windgeschwindigkeit. Dieser Zusammenhang kann weder eindeutig als linear noch als exponentiell bestimmt werden. Allerdings ist eine tendenzielle Zunahme feststellbar. Die Leistung der Windkraftanlage nimmt mit zunehmendem Abstand zwischen Winderzeuger und Windgenerator ab. Auch hier ist kein genauer mathematischer Zusammenhang, jedoch eine fallende Tendenz feststellbar. Bei realen Windkraftanlagen nimmt die Leistung bis zu einer bestimmten Windgeschwindigkeit stetig zu. Überschreitet diese allerdings einen bestimmten Wert, so nimmt die Leistung wieder ab. Eine kurze Erläuterung dieser Erscheinung soll hier als Lösung der Zusatzaufgabe angegeben werden:

Bis zur Windgeschwindigkeit des Schwellwertes wird das einzelne Rotorblatt der Windkraftanlage so umströmt, dass wenig Wirbel entstehen. Durch die zu hohe Windgeschwindigkeit am Flügelrad der Windkraftanlage kommt es am Rotorblatt zum Abreißen der Strömung und damit zu verstärkter Wirbelbildung am Rotorblatt. Ursache dessen ist die Überlagerung von Umfangs- und Windgeschwindigkeit bei der Drehbewegung des Rotors. Diese Wirbel bremsen das Flügelrad ab, es dreht sich langsamer und die Leistung wird verringert. (für genauere Informationen siehe auch Abschnitt 3.3.2 im Kapitel I (Wissenschaftliche Grundlagen))

Vom Schüler ist eine volle Beantwortung dieser Frage nicht zu erwarten. Je nach Kenntnisstand des Einzelnen können aber Teilabschnitte genannt werden.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Das Experiment eignet sich besonders für die **Klassenstufen 8 und 9**. Im jeweiligen Zusammenhang (z.B. im Rahmen einer Projektarbeit) ist aber auch eine **Nutzung in höheren Klassenstufen möglich**. Die Schüler festigen ihre Kenntnisse im **Umgang mit Messgeräten** (Stromstärke- und Spannungsmessgeräte) und üben sich in der **Interpretation von Diagrammen**. Im Experiment werden außerdem **grundlegende Kenntnisse zu Windkraftanlagen** vermittelt. Dabei stehen besonders der Zusammenhang

zwischen Windgeschwindigkeit und Leistung einer Windkraftanlage, sowie Schlussfolgerungen daraus auf Eigenschaften einer Windkraftanlage, wie z.B. Standort oder Turmhöhe im Vordergrund

Hinweise zur Durchführung des Experimentes:

- Beim Messen von Spannung und Stromstärke sollte darauf geachtet werden, dass die Messwerte erst dann abgelesen und in die Tabelle eingetragen werden, wenn sich der angezeigte Wert am jeweiligen Messgerät nicht mehr ändert. Die veränderte Windgeschwindigkeit durch das Verschieben des Winderzeugers bewirkt dieses träge Verhalten des Windgenerators.
- Wird die Windgeschwindigkeit beim Experiment selbst mithilfe des Windgeschwindigkeitsmessers bestimmt, sind die Hinweise auf Seite 32 zu beachten.

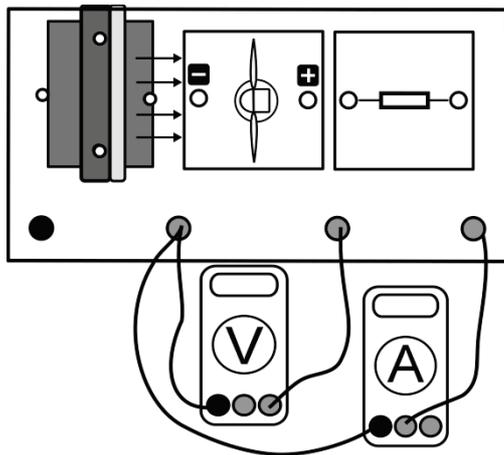


1.3 Abstandsabhängigkeit der Windgeschwindigkeit (Leistungsmessung)

Aufgabe

Untersuche die Leistung, die der Windgenerator liefert, wenn er durch einen festen Widerstand belastet wird.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- Widerstandsmodul
- Kabel
- Spannungsmessgerät
- Strommessgerät

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Miss in verschiedenen Abständen zum Winderzeuger jeweils Spannung und Stromstärke am Windgenerator und trage deine Messwerte in die Tabelle ein.

Messwerte

d in cm	5	10	15	20	25
v in m/s	6,2	5,45	5,1	4,85	4,6
U in V	2,18	2,05	1,93	1,74	1,50
I in mA	55,5	53,2	49,5	45,2	40,0
P in mW	120,99	109,06	95,535	78,648	60

Die Werte für die Geschwindigkeit kannst du mit dem Windstärkemessgerät bestimmen oder aus dem entsprechenden Diagramm (siehe Seite 33) ablesen.



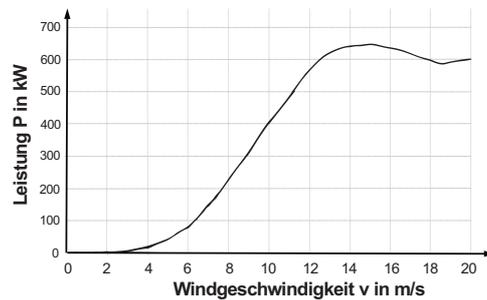
1.3 Abstandsabhängigkeit der Windgeschwindigkeit (Leistungsmessung)

Auswertung

1. Berechne für die entsprechenden Abstände die jeweilige elektrische Leistung. Trage die Wertepaare anschließend in die zugehörigen Diagramme ein.
2. Beschreibe den Zusammenhang zwischen Leistung und Windgeschwindigkeit am Windgenerator.
3. Welche Schlussfolgerungen können daraus für den Betrieb realer Windkraftanlagen gezogen werden?

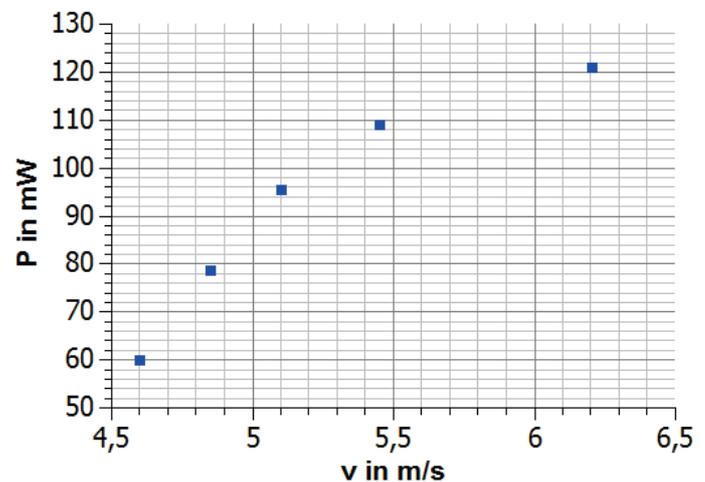
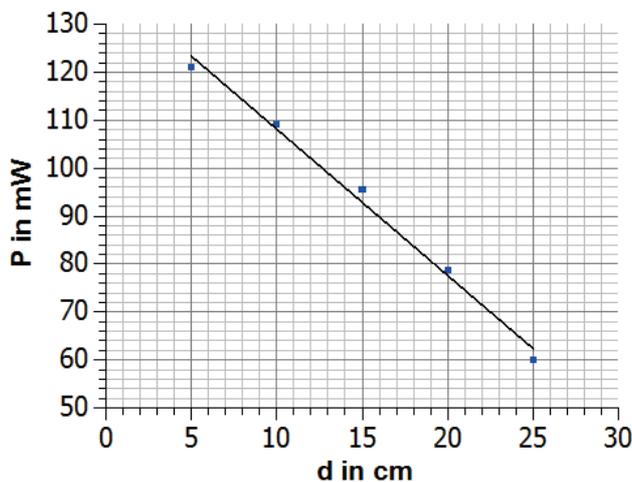
Zusatz:

Bei realen Windkraftanlagen, deren Rotorblätter fest an der Nabe befestigt sind, existiert der folgende Zusammenhang zwischen Leistung und Windgeschwindigkeit des Rotors.



Kannst du erklären, wieso die Leistung bei sehr hoher Windgeschwindigkeit wieder abnimmt?

1.



2.

Die Leistung am Windgenerator ist größer, wenn die Windgeschwindigkeit größer ist. Der Zusammenhang erscheint nicht linear. (Leistung und Windgeschwindigkeit sind nicht direkt proportional zueinander.)

3.

Reale Windkraftanlagen erreichen nur dann eine große Leistung, wenn die Windgeschwindigkeit ausreichend groß ist. Je kleiner die Windgeschwindigkeit an der Windkraftanlage ist, desto weniger Leistung kann durch sie erzeugt werden. (Der Wirkungsgrad einer Windkraftanlage ist kleiner, wenn die Windgeschwindigkeit gering ist)

Experiment 2.1

Anlaufwindgeschwindigkeit an einer Windkraftanlage

Inhalte des Experimentes:

In diesem Experiment wird das Startverhalten einer Windkraftanlage untersucht. Für verschiedene Spannungswerte, die am Winderzeuger eingestellt werden, beobachten die Schüler, ob die Windkraftanlage in einem bestimmten Abstand startet. Die Beobachtungen werden in die Tabelle eingetragen und die Anlaufwindgeschwindigkeit wird ermittelt. Mit Hilfe der Auswertung sollen die Ergebnisse mit den Messwerten an realen Windkraftanlagen, die z.B. im Internet zu recherchieren sind, verglichen werden. Sie sollen mithilfe der gegebenen Abbildung Aussagen über die Standortwahl von Windkraftanlagen in Europa treffen.

Erklärung der Ergebnisse

Eine Windkraftanlage arbeitet nicht bei jeder Windgeschwindigkeit. Erst ab einer bestimmten Startgeschwindigkeit (Anlaufwindgeschwindigkeit) ist ein Betrieb möglich. Die Trägheit durch Masse und magnetisches Feld im Generator verhindert bei zu geringer Windgeschwindigkeit das Starten der Anlage. Die Anlaufwindgeschwindigkeit soll von den Schülern mithilfe dieses Experimentes bestimmt werden.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Das Experiment eignet sich besonders für die **Klassenstufen 8 und 9** oder auch für den Einsatz in einem **Projekt zur Windenergie** in beliebigen Klassenstufen. Es beleuchtet die **Starteigenschaften einer Windkraftanlage**. Der Einsatz des Experimentes in Themengebieten wie z.B. „Energieversorgung“ ist zu empfehlen, da Einsatzbereiche und **Standortvoraussetzungen von Windkraftanlagen** in der Auswertung diskutiert werden können.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes:

- Der Startvorgang des Rotorblattes kann eher herbeigeführt werden, wenn der Rotor einen sanften Stoß bekommt. Dies kann vom Lehrer zugelassen werden. Andernfalls sollte er darauf hinweisen, dass der Startvorgang ohne Berührung des Rotorblattes untersucht werden soll.
- Wird die Windgeschwindigkeit beim Experiment selbst mithilfe des Windgeschwindigkeitsmessers bestimmt, sind die Hinweise auf Seite 32 zu beachten.
- Der Versuch kann statt mit einem Dreiblattrotor auch mit Zweiblatt-, Vierblatt- oder Savoniusrotor durchgeführt werden. Dabei sind gegebenenfalls die Spannungswerte anders zu wählen und der Abstand zu variieren.

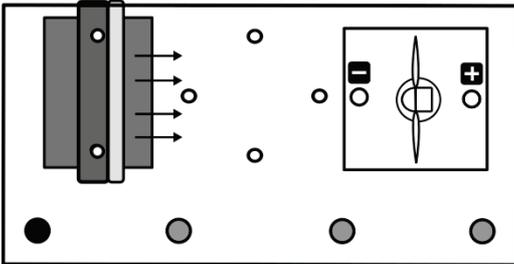


2.1 Anlaufgeschwindigkeit an einer Windkraftanlage

Aufgabe

Untersuche, wie groß die Windgeschwindigkeit sein muss, damit die Windkraftanlage starten kann.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul Stromversorgung
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)

Vorbemerkung

Eine Windkraftanlage beginnt erst ab einer genügend großen Windgeschwindigkeit sich zu drehen. Man nennt sie Anlaufwindgeschwindigkeit. Mithilfe dieses Experimentes kannst du untersuchen, wie groß die Anlaufgeschwindigkeit bei diesem Modell einer Windkraftanlage ist.

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Stelle verschiedene Spannungen U am Stromversorgungsgerät ein und beobachte die Windkraftanlage. Notiere deine Beobachtungen in der angegebenen Tabelle.
3. Ermittle die Windgeschwindigkeit, bei der die Windkraftanlage gerade so startet und notiere deinen Wert. (Entnimm den Wert dem entsprechenden Diagramm (siehe Seite 33) oder folge Schritt 4, wenn dir ein Windstärkemessgerät zur Verfügung steht)
4. Schalte den Winderzeuger ab, entferne den Windgenerator und starte den Winderzeuger wieder. Miss nun die Windgeschwindigkeit mithilfe des Windstärkemessgerätes im entsprechenden Abstand (Hinweise zur Durchführung siehe Seite 32).

Beobachtungen

Die Windkraftanlage...

U_{netz} in V	...startet	...startet nicht
3		x
4,5		x
6		x
7,5		x
9	x	
12	x	

→ Anlaufwindgeschwindigkeit:

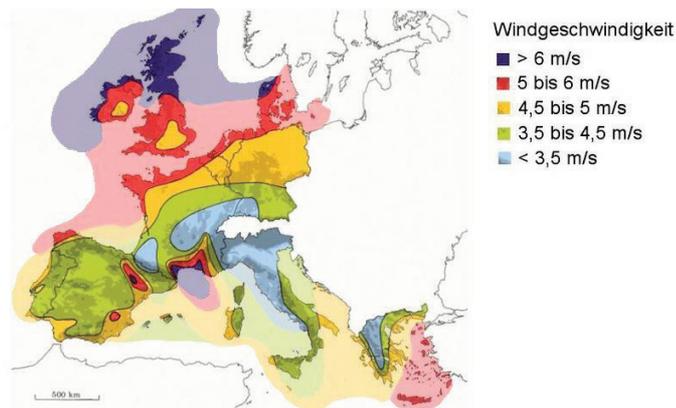
$$v_A = 4,0 \text{ m/s}$$



2.1 Anlaufgeschwindigkeit an einer Windkraftanlage

Auswertung

1. Welche Schlussfolgerungen kannst du aus diesen Erkenntnissen für den Betrieb von Windkraftanlagen ziehen?
2. Informiere dich über die Startgeschwindigkeiten realer Windkraftanlagen und vergleiche diese mit deinen ermittelten Werten. Kannst du Unterschiede erklären?
3. In der angegebenen Karte sind durchschnittliche Windgeschwindigkeiten in Europa dargestellt.



Quelle: <http://www.wind-energie.de/de/technik/entstehung/windpotential> (16.11.2010)

Begründe anhand dieser Darstellung, in welchen Gebieten Windkraftanlagen effizient einsetzbar sind. Wo ist die Nutzung von Windenergie weniger gewinnbringend?

Lösungen zu den Aufgaben

zu 1.:

Eine Windkraftanlage beginnt erst ab einer genügend großen Windgeschwindigkeit sich zu drehen. Der Betrieb von Windkraftanlagen ist also nur dann effizient, wenn an einem Standort genügend große Windgeschwindigkeiten über einen großen Zeitraum vorhanden sind.

zu 2.

Reale Windkraftanlagen starten bei Windgeschwindigkeiten von ca. 2-3 m/s (je nach Modell)
Das Modell der Windkraftanlage startet bei ca. 4-5 m/s. Die Startgeschwindigkeit ist also etwas höher als bei einer realen Anlage. Mögliche Gründe dafür könnten sein:

- keine optimale Form der Rotorblätter
- Reibung im Inneren des Motors ist zu groß
- Strömung des Winderzeuger zu verwirbelt

zu 3.

sinnvoll einsetzbar: Küstengebiete von Nord- und Ostsee, britische Inseln, frz. Mittelmeerküste, Dänemark: (dunkelblau bis rot) → Nutzung von Windenergie effizient (durchschnittl.

Windgeschwindigkeit von über 5 bis 6 m/s

und: nördl. Gebiete Deutschlands und Frankreichs, Gebiete am Mittelmeer (gelb bis grün)

→ Windenergienutzung möglich, aber weniger effizient

Experiment 2.2

Vergleich der Anlaufwindgeschwindigkeit zwischen Savonius- und Dreiblattrotor

Inhalte des Experimentes:

In diesem Experiment untersuchen die Schüler das Startverhalten einer Windkraftanlage mit verschiedenen Windrotoren. Es wird die Anlaufwindgeschwindigkeit eines Savoniusrotors mit der eines Dreiblattrotors verglichen. Dazu wird für einen festen Abstand zwischen Winderzeuger und Windrotor für verschiedene Spannungswerte am Winderzeuger untersucht, ob der Rotor startet. Anhand der Beobachtungen wird die Anlaufwindgeschwindigkeit bestimmt und anschließend verglichen. Aus den Ergebnissen treffen die Schüler Aussagen über den Einsatz der verschiedenen Rotoren. Im letzten Teil der Auswertung sollen die Schüler eine Rotorauswahl für die Nutzung im eigenen Zuhause treffen und diese sinnvoll begründen. Dabei sind kreative Antwortmöglichkeiten denkbar.

Erklärung der Ergebnisse

Eine Windkraftanlage arbeitet nicht bei jeder Windgeschwindigkeit. Erst ab einer bestimmten Startgeschwindigkeit (Anlaufwindgeschwindigkeit) ist ein Betrieb von Windkraftanlagen möglich. Zusätzlich zu Trägheit und Masse des Generators hat auch die Form eines Windrotors einen Einfluss auf das Startverhalten einer Windkraftanlage. Der Savoniusrotor arbeitet nicht nach dem Auftriebs- sondern nach dem Widerstandsprinzip. Die Luftströmung wird am Rotor abgebremst und die kinetische Energie der Luftströmung wird so an den Rotor übertragen und erzeugt eine Drehung. Bei relativ geringer Windgeschwindigkeit ist schon eine Drehung möglich, wenn auch langsamer als bei höherer Windgeschwindigkeit. Für den Auftrieb am Rotorblatt des Dreiblattrotors ist eine hohe Windgeschwindigkeit erforderlich, weshalb die Anlaufwindgeschwindigkeit eines Dreiblattrotors größer ist als die eines Savoniusrotors.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Das Experiment eignet sich in einem **Projekt zur Windenergie** oder zu alternativen Energien. Es eignet sich unter Umständen auch gut für den Einsatz im Unterricht der Klassenstufen 8 und 9, da diese meist das Thema „Energieversorgung“ umfangreich bearbeiten. Es wird das **Startverhalten und die Einsatzmöglichkeit verschiedener Rotoren** untersucht und anschließend diskutiert. Die Schüler üben sich durch die Begründung ihrer erschlossenen Antworten im **fachsprachlichen Argumentieren** eigener Aussagen.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes:

- Der Startvorgang des Rotorblattes kann eher herbeigeführt werden, wenn der Rotor einen sanften Stoß bekommt. Dies kann vom Lehrer zugelassen werden. Andernfalls sollte darauf hingewiesen werden, dass der Startvorgang ohne Berührung des Rotorblattes untersucht werden soll..
- Wird die Windgeschwindigkeit beim Experiment selbst mithilfe des Windgeschwindigkeitsmessers bestimmt, sind die Hinweise auf Seite 32 zu beachten.
- Für den Vergleich von Rotoren sind auch andere Kombinationen möglich, z.B. Drei- und Zweiblattrotor. Man sollte vorher allerdings untersuchen, wie stark sich die Startgeschwindigkeiten der einzelnen Rotoren im konkreten Fall unterscheiden.

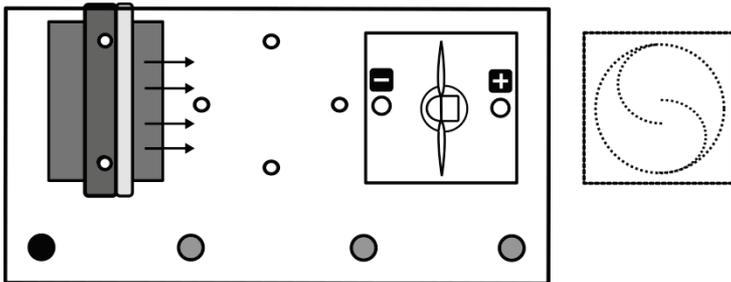


2.2 Vergleich der Anlaufgeschwindigkeit zwischen Savonius- und Dreiblattrotor

Aufgabe

Untersuche die Anlaufwindgeschwindigkeit eines Savoniusrotors und vergleiche sie mit der eines Dreiblattrotors.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- Savoniusrotor mit Generatormodul

Vorbemerkung

Eine Windkraftanlage beginnt sich erst ab einer genügend großen Windgeschwindigkeit zu drehen. Man nennt sie Anlaufwindgeschwindigkeit. Mithilfe dieses Experimentes kannst du untersuchen, wie groß diese Geschwindigkeit bei verschiedenen Arten von Windrotoren ist.

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung mit dem Dreiblattrotor auf.
2. Stelle verschiedene Spannungen U am Stromversorgungsgerät ein und beobachte die Windkraftanlage. Notiere deine Beobachtungen in der angegebenen Tabelle.
3. Entnimm den Dreiblattrotor und setze nun den Savoniusrotor an die gleiche Stelle wie vorher die Windturbine in den Versuchsaufbau ein und führe die gleiche Untersuchung noch einmal durch. Notiere ebenfalls deine Beobachtungen.
4. Ermittle die Windgeschwindigkeiten, bei denen die beiden Windrotoren gerade so starten und notiere die entsprechenden Werte. (Entnimm den Wert dem entsprechenden Diagramm (siehe Seite 33) oder folge Schritt 5, wenn dir ein Windstärkemessgerät zur Verfügung steht)
5. Schalte den Winderzeuger ab, entferne den Windgenerator und starte den Winderzeuger wieder. Miss nun die Windgeschwindigkeit mithilfe des Windstärkemessgerätes im entsprechenden Abstand (Hinweise zur Durchführung siehe Seite 32).



2.2 Vergleich der Anlaufgeschwindigkeit zwischen Savonius- und Dreiblattrotor

Beobachtungen

U in V	Der Dreiblattrotor...		Der Savoniusrotor...	
	...startet.	...startet nicht.	...startet	...startet nicht
3		x		x
4,5		x		x
6		x		x
7,5		x	x	
9	x		x	
12	x		x	
v_A	4,0 m/s		3,3 m/s	

v_A ... Anlaufwindgeschwindigkeit

Auswertung

- Vergleiche die beiden experimentell ermittelten Werte für die Anlaufgeschwindigkeit miteinander. Welcher der beiden Rotoren startet schon bei geringerer Windgeschwindigkeit?
- Überlege dir, welcher Windrotor für den Betrieb in Gebieten mit hoher, niedriger oder stark wechselnder Windgeschwindigkeit besser geeignet ist und begründe deine Entscheidung.
- Wenn du zu Hause eine Windkraftanlage bauen würdest, welchen Windrotor würdest du nutzen? Begründe deine Entscheidung.

1. $v_{A-Savonius} < v_{A-Dreiblattrotor}$
 Der Savoniusrotor startet bei einer geringeren Windgeschwindigkeit, als der Dreiblattrotor.

2.
 In Gebieten mit hohen Windgeschwindigkeiten eignen sich Dreiblattrotoren eher. In Gebieten niedriger oder stark wechselnder Windgeschwindigkeit könnten Savoniusrotoren sinnvoller sein, da die Startgeschwindigkeit geringer ist. (die Anlage muss so nicht immer wieder gestartet und gestoppt werden)
 (weitere mögl. Ergänzung: Wirkungsgrad aber bei Savoniusrotor geringer, Materialaufwand, wechselnde Windrichtung...)

3.
 kreative Antwortvarianten – mögliche Begründungsaspekte:

pro Dreiblatt	pro Savonius
- weniger Material erforderlich	- einfache Herstellung möglich
- besserer Wirkungsgrad (nutzt Auftrieb)	- startet schneller und arbeitet öfter
	- arbeitet bei versch. Windrichtungen

Experiment 3.1

Veränderung der Generatorspannung durch Zuschalten eines Verbrauchers

Inhalte des Experimentes:

Bei diesem Experiment untersuchen die Schüler, wie sich die Spannung am Generator ändert, wenn an diesen ein Widerstand angeschlossen wird. Dazu werden die Spannungswerte im Leerlauf und bei angeschlossenem Widerstand bestimmt und anschließend deren Differenz berechnet. Die Schüler versuchen diese Erscheinung anhand ihrer bisherigen Kenntnisse zu elektrischem Widerstand, Spannung und Strom zu erklären.

Erklärung der Ergebnisse

Wird ein Generator ohne Belastung, also im Leerlauf (ohne angeschlossenen Widerstand) betrieben, so liefert er eine bestimmte Spannung. Der anliegende Widerstand am Generator kann als unendlich groß betrachtet werden und es fließt (nahezu) kein Strom im Generator. Wird nun ein Widerstand (z.B. 30Ω) an den Generator angeschlossen, nimmt der Gesamtwiderstand am Generator ab. Es fließt ein Strom durch Widerstand und Generator. Dieser führt zur Selbstinduktion in den Spulen des Generators. Nach dem Lenzschen Gesetz ist die dadurch induzierte Spannung der Ursache ihrer Entstehung entgegen gerichtet und verringert die Generatorspannung. Der Generator wird also durch den geringeren Widerstand abgebremst und es entsteht eine Spannungsdifferenz zwischen dem Wert im Leerlauf und bei angeschlossenem Widerstand.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Das Experiment eignet sich besonders für die **Klassenstufen 8 und 9** im Themenbereich **elektromagnetischen Induktion**. Die Schüler sollen ihre vorhandenen **Kenntnisse zur Elektrizitätslehre** für die Begründung der Beobachtungen am Windgeneratormodell **anwenden**. Außerdem festigen die Schüler ihre Fähigkeiten im **Umgang mit Messgeräten** in einem übersichtlichen Versuchsaufbau.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes:

- Statt des Widerstandes kann als Verbraucher auch das Motormodul oder Hupen- bzw. Glühlampenmodul verwendet werden (wenn die Erweiterung „Messen ohne Messgeräte“ vorhanden ist).

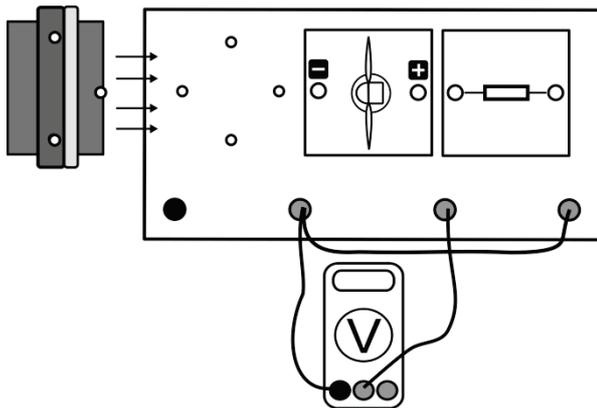


3.1 Veränderung der Generatorspannung durch Zuschalten eines Verbrauchers

Aufgabe

Untersuche, wie sich die erzeugte Generatorspannung ändert, wenn an den Generator ein Verbraucher (Widerstand) angeschlossen wird.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- Widerstandsmodul
- Kabel
- Spannungsmessgerät

Durchführung

1. Baue den Versuchsaufbau vorerst ohne das Widerstandsmodul auf.
2. Stelle am Stromversorgungsgerät eine Spannung von 12V ein und starte den Winderzeuger. Miss die Generatorspannung ohne angeschlossenen Widerstand (U_{Leerlauf}).
3. Stecke nun den Widerstand an den vorgesehenen Steckplatz und notiere deine Beobachtung. Miss anschließend die Spannung, die mit angeschlossenem Widerstand (U_{Last}) entsteht.

Beobachtungen

Der Rotor dreht sich langsamer, wenn ein Widerstand angeschlossen ist. An der Windkraftanlage wird eine geringere Spannung erzeugt, wenn ein Widerstand angeschlossen ist.

Messwerte

$$U_{\text{Leerlauf}} = 3,12\text{V}$$

$$U_{\text{Last}} = 1,58\text{V}$$

Experiment 3.2

Veränderung der Generatorspannung durch Zuschalten verschiedener Verbraucher

Inhalte des Experimentes:

Bei diesem Experiment wird die unterschiedliche Veränderung der Generatorspannung bei Anschließen verschiedener Verbraucher untersucht. Nacheinander werden Hupe, Lampe und Motor in den Steckplatz eingesteckt und die jeweilige Spannung wird gemessen. Die Leerlaufspannung wird ebenfalls bestimmt. In der Auswertung berechnen die Schüler die Spannungsdifferenzen und vergleichen diese. Die Beobachtung soll begründet und eine Aussage über die Widerstände der Verbraucher getroffen werden.

Erklärung der Ergebnisse

Im Leerlauf liefert ein Generator maximale Spannung und der angeschlossene Widerstand ist nahezu unendlich groß. Es fließt kein Strom durch den Generator. Wird einer der drei Verbraucher angeschlossen, so wird der Widerstand verringert und es fließt ein Strom durch Verbraucher und Generator. Aufgrund des fließenden Stromes kommt es durch Selbstinduktion in den Spulen des Generators zu einem Abbremsen und damit zur Verringerung der Generatorspannung. Je größer der angeschlossene Widerstand, desto kleiner ist die Spannungsdifferenz und auch der fließende Strom. Der Generator wird bei größerem Lastwiderstand weniger stark abgebremst als bei geringem Lastwiderstand. Im Beispiel verhalten sich die Widerstände folgendermaßen:

$$R_{\text{Leerlauf}} > R_{\text{Hupe}} > R_{\text{Motor}} > R_{\text{Glühlampe}}$$

Dabei ist allerdings noch zu beachten, dass der Widerstand der Bauelemente nicht konstant ist. Bei der Glühlampe ist er beim ersten Einstecken geringer und vergrößert sich, wenn die Glühlampe länger leuchtet.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Das Experiment eignet sich für die **Klassenstufen 8 und 9** im Themenbereich **elektromagnetischen Induktion** als experimentelle **Aufgabe mit erhöhtem Schwierigkeitsgrad**. Die Schüler sollen ihre Kenntnisse der elektromagnetischen Induktion und des elektrischen Widerstandes zur Begründung der Beobachtungen anwenden. Es wird insbesondere das **Verhalten von Widerständen im Gleichstromkreis** beleuchtet und untersucht. Die Schüler sollten in diesem Zusammenhang auch auf mögliche Fehlerquellen (z.B. die Änderung des Widerstandes der Verbraucher während der Messung) hingewiesen werden.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes:

- Das Glühlampenmodul sollte erst in die Steckplatte eingesteckt werden, wenn der Generator sich bereits dreht. Es ist sonst möglich, dass sich der Rotor nicht zu drehen beginnt.

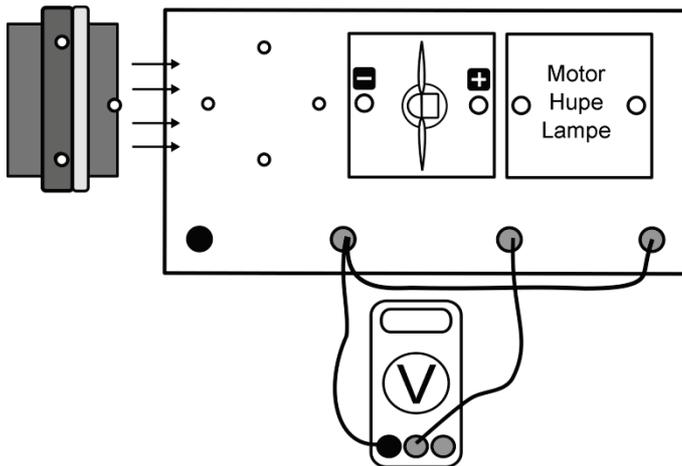


3.2 Veränderung der Generatorspannung durch Zuschalten verschiedener Verbraucher

Aufgabe

Untersuche, wie sich die erzeugte Spannung ändert, wenn an den Generator verschiedenartige Verbraucher angeschlossen werden.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- Hupe-modul
- Motormodul (mit Drehscheibe)
- Glühlampenmodul
- Kabel
- Spannungsmessgerät

Durchführung

1. Baue den Versuchsaufbau vorerst ohne ein Hupe-, Motor- oder Lampenmodul auf.
2. Stelle am Stromversorgungsgerät eine Spannung von 12V ein und starte den Winderzeuger.
3. Miss die Spannung am Generator, wenn kein Modul angeschlossen ist (U_{Leerlauf})
4. Stecke nun nacheinander Hupe, Motor mit Drehscheibe und Glühlampe an den vorgesehenen Steckplatz, notiere deine Beobachtungen und die jeweilige Spannung, die am Generator erzeugt wird.

Beobachtungen

Der Windgenerator dreht sich langsamer, wenn ein Verbraucher angeschlossen wird. Bei Anschluss der unterschiedlichen Module verringert sich die Generatorspannung unterschiedlich stark.

Messwerte

$$U_{\text{Leerlauf}} = 3,10\text{V}$$

$$U_{\text{Motor}} = 2,28\text{V}$$

$$U_{\text{Hupe}} = 2,91\text{V}$$

$$U_{\text{Glühlampe}} = 1,67\text{V}$$



3.2 Veränderung der Generatorspannung durch Zuschalten verschiedener Verbraucher

Auswertung

1. Welches Bauteil führt zur größten Änderung der Spannung am Generator, welches zur geringsten?
2. Erkläre das beobachtete Verhalten der Spannungen.
3. Welche Schlussfolgerungen kannst du daraus für die Widerstände der einzelnen Geräte ziehen? Vergleiche sie untereinander ($>$, $<$, $=$).

1.
Kleinste Änderung: Hupe

Größte Änderung: Glühlampe

2.
Durch Anschluss eines Verbrauchers wird der Stromkreis am Generator geschlossen.
Der Widerstand wird verringert. (denn im Leerlauf ist der Widerstand unendlich groß).
Im geschlossenen Stromkreis fließt ein Strom, der den Generator (durch Selbstinduktion) abbremst. Damit verringert sich die erzeugte Spannung.

3.
Je kleiner der Widerstand eines Bauteiles ist, desto größer ist der Strom, der durch dieses fließt. Durch den größeren Stromfluss ist die entstehende Spannungsdifferenz am größten. Die Glühlampe hat also den kleinsten Widerstand, die Hupe den größten (Achtung! Der Widerstand der Bauteile ist nicht konstant, die Änderungen werden hier vernachlässigt. Die Schüler müssen aber darauf hingewiesen werden.)

$$R_{\text{Leerlauf}} > R_{\text{Hupe}} > R_{\text{Motor}} > R_{\text{Glühlampe}}$$

Experiment 4

Untersuchung der Windgeschwindigkeit hinter dem Rotor

Inhalte des Experimentes:

Es soll untersucht werden, wie sich die Windgeschwindigkeit ändert, wenn Luft durch das Flügelrad eines Windrotors strömt. Das Verhältnis zwischen der Windgeschwindigkeit hinter dem Rotor mit und ohne Generator gibt Aufschluss über den Wirkungsgrad der Anlage. Dieses Verhältnis soll hier bestimmt werden. Dabei wird hinter dem Windrotor an den angegebenen Messpunkten mithilfe des Windstärkemessgerätes die Windgeschwindigkeit einmal mit und einmal ohne eingebauten Generator gemessen. In der Auswertung sollen die Schüler versuchen, die Ergebnisse zu erklären und das Verhältnis der Windgeschwindigkeiten berechnen, sowie ihren Wert mit dem idealen Verhältnis (nach Betz) vergleichen.

Erklärung der Ergebnisse

Die Luftströmung vor dem Rotor hat eine bestimmte kinetische Energie. Das Flügelrad entnimmt der strömenden Luft Energie und wandelt diese in Rotationsenergie und mithilfe des Generators in elektrische Energie um. Damit verringert sich die kinetische Energie der Luftströmung und die Windgeschwindigkeit ist nach dem Durchströmen der Windkraftanlage geringer. Je stärker die Luft durch die Windkraftanlage abgebremst wird, desto größer ist der Wirkungsgrad der Anlage.

Eine genauere Erklärung finden Sie in Abschnitt 3.3.1 von Kapitel I (Wissenschaftliche Grundlagen)

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Das Experiment eignet sich für den Einsatz im Physikunterricht der **Klassenstufe 9** bzw. für einen Lernbereich zum Thema „Energieversorgung“. Es beleuchtet die physikalischen Vorgänge am Flügelrad der Windkraftanlage und ermöglicht eine erste Einschätzung der Effizienz einer Windkraftanlage. In einem **Projekt oder Unterrichtsabschnitt zum Thema „Windenergie“ oder „Erneuerbare Energien“** bietet sich dieses Experiment für Schüler an, da insbesondere mit der Zusatzaufgabe Folgerungen aus dem Experiment auf reale Sachverhalte übertragen werden.

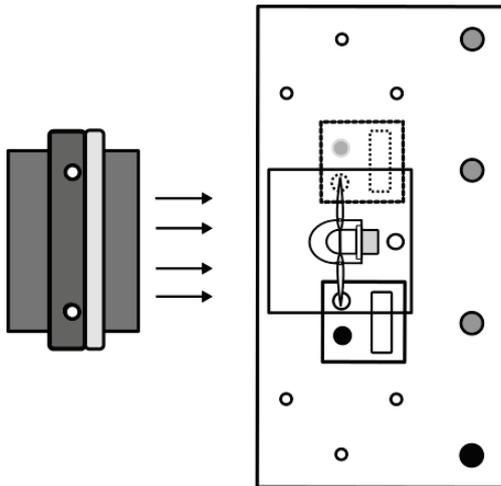


4. Untersuchung der Windgeschwindigkeit hinter dem Rotor

Aufgabe

Untersuche mithilfe des Windstärkemessgerätes die Windgeschwindigkeit hinter einem Windgenerator.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25°(Flügel: optimiertes Profil)
- Windstärkemessgerät mit Halter

Durchführung

1. Baue zunächst die Versuchsanordnung wie oben abgebildet auf. Die Grundeinheit ist bei diesem Versuch um 90° gedreht. Miss die Windgeschwindigkeit links und rechts vom Windgenerator, ohne den Windgenerator einzusetzen (v_{ohne}).
2. Wiederhole die Messung mit eingesetztem Windgenerator (v_{mit}). Das Windmessgerät sollte sich dabei hinter dem Windgenerator befinden.

Messwerte

	V_{ohne} in m/s	V_{mit} in m/s
links	4,85	3,8
rechts	4,5	3,8
\bar{v}	4,7	3,8

$$\frac{\bar{v}_{\text{mit}}}{\bar{v}_{\text{ohne}}} = \frac{3,8 \text{ m/s}}{4,7 \text{ m/s}} = 0,81$$



4. Untersuchung der Windgeschwindigkeit hinter dem Rotor

Auswertung

1. Berechne die mittlere Windgeschwindigkeit (arithmetisches Mittel der beiden Messwerte links und rechts) und berechne das Verhältnis der Windgeschwindigkeiten mit und ohne Windkraftanlage (siehe Tabelle).
2. Nenne eine Ursache für die Reduzierung der Windgeschwindigkeit durch die Windkraftanlage.
3. Albert Betz hat in den 1920er Jahren berechnen können, dass eine Windkraftanlage, die ideal arbeitet (d.h. die aus dem Wind die maximal mögliche Energie umwandelt), die Windgeschwindigkeit auf ein Drittel abbremsen kann.
Schätze ein, wie gut deine kleine Windkraftanlage diesem Wert nahe kommt oder wie weit sie davon entfernt ist.
Nenne auch mögliche Gründe dafür.

Zusatz: Erkläre mithilfe deiner Untersuchungen, warum in großen Windparks ein Mindestabstand zwischen den einzelnen Windkraftanlagen notwendig ist, um Leistungseinbußen zu vermeiden.

2.

- Abbremsen der Luftmoleküle durch Bewegung der Rotorblätter

- Die kinetischen Energie der Luft wird an der Windkraftanlage umgewandelt. Nach

Energieerhaltung verringert sich die kinetische Energie der Luft, d.h. die Windgeschwindigkeit

nimmt ab

3.

Das Verhältnis der Windgeschwindigkeiten ist bedeutend größer als der Idealwert.

(ca. 4:5, statt 1:3)

mögliche Gründe:

keine ideale Form der Rotorblätter, Wirkungsgrad des Generators ist nicht ideal,

starke Verwirbelung an den Rotorblättern der Anlage, Messung im Leerlauf

Zusatz:

Die Windkraftanlage reduziert die Windgeschwindigkeit und damit die Geschwindigkeit der Luftteilchen. Würde man eine weitere Anlage direkt hinter der Anlage betreiben, wäre dort die Windgeschwindigkeit geringer und es könnte nicht die optimale Leistung mithilfe der Windkraftanlage erzeugt werden. Wird allerdings der Abstand vergrößert, gleicht sich die Windgeschwindigkeit durch den Einfluss der umgebenden Luft (über, unter, rechts und links des Rotors) wieder der Geschwindigkeit vor dem ersten Rotor an. Eine zweite, dahinter in ausreichendem Abstand stehende Windkraftanlage kann die gleiche Leistung erzeugen, wie die erste.

Experiment 5.1

Energiebilanz an einer Windkraftanlage

Inhalte des Experimentes:

In diesem Experiment untersuchen die Schüler die Energieumwandlungen an einer Windkraftanlage quantitativ. Die Energie der Luftströmung vor dem Rotor wird bestimmt. Anschließend wird der Windrotor entsprechend der Darstellung in den Versuchsaufbau eingebaut und die Schüler messen Spannung und Stromstärke über einem festen Widerstand. Aus den Messwerten berechnet man die Nennleistung der Windkraftanlage und setzt diese zur kinetischen Energie des Windes ins Verhältnis. Der Quotient wird hier ϵ genannt und ist ein Maß für die Güte der Energieumwandlungen (also die Energiebilanz) an einer Windkraftanlage. Anschließend diskutieren die Schüler mögliche Ursachen für die Energieverluste an der Windkraftanlage

Erklärung der Ergebnisse

Die Windkraftanlage wandelt kinetische Energie der Luftströmung in Rotations- und durch den Generator anschließend in elektrische Energie um. Diese Energie kann schließlich dazu genutzt werden, elektrische Geräte zu betreiben. Für die Untersuchung der Energiebilanz werden die Nennleistung (elektrische Energie pro Zeiteinheit) und die Leistung des Windes (also kinetische Energie pro Zeiteinheit) ins Verhältnis gesetzt. Je größer dieser Wert ist, desto mehr Energie kann die Windkraftanlage umwandeln. Dieser Quotient kann nie den Wert 1 erreichen, da dann eine vollständige Umwandlung stattfinden würde und damit die Luft hinter dem Rotor keinerlei Energie haben dürfte. Sie müsste ruhen. Aufgrund der Erhaltung des Luftvolumens ist dies allerdings nicht möglich. Ausführliche Informationen finden Sie im Abschnitt 3.3.1 von Kapitel I (Wissenschaftliche Grundlagen).

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 7 bis 9** oder auch als Experiment eines **Projektes zur Windenergie**. Die Schüler vertiefen ihre Kenntnisse zu **Energieumwandlungen** und führen einfache Rechnungen zu elektrischer Energie und Leistung durch. Ihnen wird ein **Einblick in die Physik einer Windkraftanlage** ermöglicht und es können Aussagen über **Effektivität der Nutzung von Windkraftanlagen** und die Nutzung regenerativer Energien durch die Schüler getroffen werden. Der Einsatz in einem **Lernbereich zu „Energieversorgung“** bietet sich daher an. Es empfiehlt sich, einige Werte realer Windkraftanlagen oder anderer Anlagen zur regenerativen Energienutzung zu benennen und untereinander, sowie mit den Experimentergebnissen zu vergleichen.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes:

- Die Untersuchung der Energiebilanz kann auch mit anderen Rotoren durchgeführt werden. Es ist dann möglich, die Werte untereinander zu vergleichen.

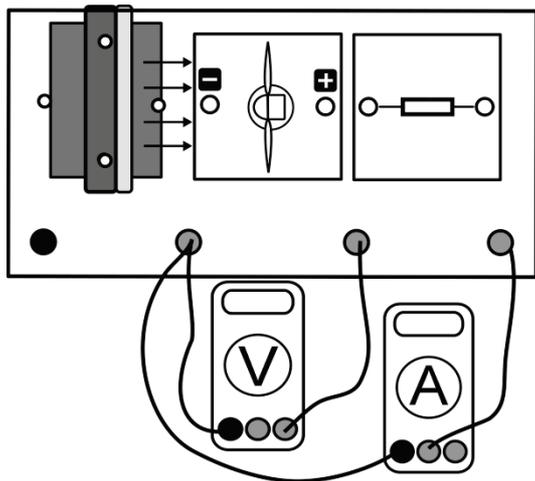


5.1 Energiebilanz an einer Windkraftanlage

Aufgabe

Untersuche experimentell die Energiebilanz der Windkraftanlage, wenn diese durch einen festen Widerstand belastet wird.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- Widerstandsmodul
- Kabel
- Spannungsmessgerät
- Strommessgerät

Vorbemerkung

Die Energiebilanz stellt einen Vergleich der kinetischen Energie der Luft (Windenergie) vor dem Rotor zur davon durch die Windkraftanlage genutzten Energie dar. Dazu wird der Quotient aus der durch die Windkraftanlage tatsächlich umgesetzten Leistung und der Leistung des Windes vor dem Rotor betrachtet. Wir nennen diesen Quotienten Leistungsbeiwert ε .

$$\varepsilon = \frac{P_N}{P_{Wind}}$$

Diese Größe macht eine Aussage darüber, wie viel Energie des Windes die Windkraftanlage tatsächlich in elektrische Energie umwandeln kann. Damit ist ε vergleichbar mit dem Wirkungsgrad einer Windkraftanlage, der in der Windenergie-technik aber anders definiert wird.

Durchführung

1. Baue den Versuch wie oben dargestellt auf, zunächst jedoch ohne Windgenerator. Stelle am Stromversorgungsgerät eine Spannung von 9V ein.
2. Nimm zuerst die Windgeschwindigkeit mit dem Windstärkemessgerät auf (ohne Windgenerator) oder ermittle den entsprechenden Wert aus dem gegebenen Diagramm (siehe Seite 33).
3. Füge anschließend den Windgenerator hinzu und miss den entsprechenden Spannungs- und Stromstärkewert.
4. Miss außerdem die Temperatur im Zimmer und den Durchmesser d des Rotors am Windgenerator, mit dem du die Angriffsfläche A berechnen kannst.



5.1 Energiebilanz an einer Windkraftanlage

Messwerte

$$v_{\text{Wind}} = 4,85 \text{ m/s}$$

$$\vartheta = 22^\circ$$

$$d = 13 \text{ cm}$$

$$U = 1,74 \text{ V}$$

$$\rightarrow \rho = 1,195 \text{ kg/m}^3$$

$$I = 45,2 \text{ mA}$$

Den Wert für die Dichte ρ der Luft kannst du mithilfe der Raumtemperatur ϑ dem entsprechenden Diagramm (siehe Seite 34) entnehmen.

Auswertung

- Berechne die Angriffsfläche des Windrotors für die strömende Luft und die Energie des Windes vor dem Windrotor.
(Windenergie $P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_{\text{Wind}}^3$, Angriffsfläche: $A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$)
- Berechne aus deinen Messwerten die Nennleistung der Windkraftanlage. (Nennleistung: $P_N = U \cdot I$) und berechne den Quotienten ϵ .
- Die Energie des Windes wird an der Windkraftanlage nicht vollständig umgewandelt. Wodurch kommt es zur Entwertung und damit dem „Verlust“ von Energie? In welche Energieformen wird dabei die Energie des Windes umgewandelt?

Lösungen zu den Aufgaben 1. und 2.

zu 1.:	
Angriffsfläche:	Windenergie
$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$	$P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_{\text{Wind}}^3$
$A = \frac{\pi}{4} \cdot 0,13^2 \text{ m}^2$	$P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot 1,195 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0133 \text{ m}^2 \cdot 4,85^3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3}$
<u>$A = 0,0133 \text{ m}^2$</u>	<u>$P_{\text{Wind}} = 0,91 \text{ W}$</u>
zu 2.	
Nennleistung:	Energiebilanz
$P_N = U \cdot I$	$\epsilon = \frac{P_N}{P_{\text{Wind}}}$
$P_N = 1,74 \text{ V} \cdot 0,045 \text{ A}$	$\epsilon = \frac{0,0783 \text{ W}}{0,91 \text{ W}}$
<u>$P_N = 0,0783 \text{ W}$</u>	<u>$\epsilon = 0,086 = 8,6\%$</u>

- durch Reibungsverluste an den Rotorblättern und Verwirbelungen hinter dem Windrotor \rightarrow Reibungskraft
 - Reibungsverluste an der Achse, im Getriebe und im Generator \rightarrow Reibungskraft

Experiment 5.2

Berechnung des Wirkungsgrades einer Windkraftanlage

Inhalte des Experimentes:

Bei diesem Experiment berechnen die Schüler den Wirkungsgrad des Windkraftanlagenmodells. Es wird die kinetische Energie der Luftströmung in vorgegebenem Abstand bestimmt. Dem Versuchsaufbau entsprechend werden außerdem Stromstärke und Spannung gemessen. In der Auswertung berechnen die Schüler mithilfe der angegebenen Formeln den Wirkungsgrad der Windkraftanlage. Abschließend informieren sie sich über den Wirkungsgrad realer Windkraftanlagen und vergleichen die Werte mit den selbst errechneten. Abweichungen versuchen sie zu erläutern.

Erklärung der Ergebnisse

Die Windkraftanlage wandelt kinetische Energie der Luftströmung in Rotations- und durch den Generator anschließend in elektrische Energie um, die dazu genutzt werden kann, elektrische Geräte zu betreiben. Der Wirkungsgrad, wie er hier berechnet wird, setzt die Nennleistung, die eine Windkraftanlage erzeugt, zur Idealleistung (die aus der maximal dem Wind entnehmbaren Energie resultiert) ins Verhältnis. Diese Idealleistung resultiert aus den Berechnungen, die Albert Betz durchgeführt hat (siehe Abschnitt 3.3.1 im Kapitel I). Dem Wind kann aus Gründen der Energieerhaltung nur maximal diese Energie durch eine Windkraftanlage entnommen werden. Die Berechnung des Wirkungsgrades erweist sich also als geeignet zur Charakterisierung einer Windkraftanlage.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 8 und 9** und für die **Sekundarstufe II**. Auch eine Nutzung in einem **Projekt zur Windenergie** ist sehr gut möglich. Es wird eine einfache Möglichkeit gegeben den **Wirkungsgrad** einer Anlage zu bestimmen und die Schüler üben sich dabei im **Umgang mit Messgeräten und Berechnungen**. Für die Sekundarstufe II kann als Erweiterung die Betz'sche Idealleistung mathematisch bestimmt werden.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes:

- Die Bestimmung des Wirkungsgrades kann auch mit anderen Rotoren durchgeführt werden. Es ist dann auch möglich, die Werte untereinander zu vergleichen. Mit dem Savoniusrotor müssten dabei die geringsten Werte erzielt werden.

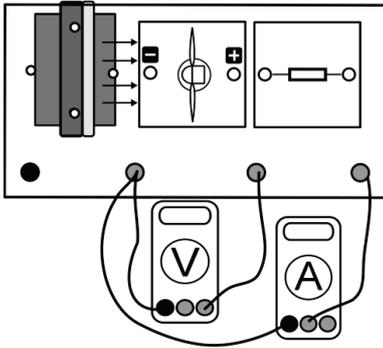


5.2 Berechnung des Wirkungsgrades einer Windkraftanlage

Aufgabe

Ermittle experimentell den Wirkungsgrad der Windkraftanlage, wenn diese durch einen festen Widerstand belastet wird.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- Widerstandsmodul
- Kabel
- Spannungsmessgerät
- Strommessgerät

Vorbemerkung

Die Energie des Windes kann durch eine Windkraftanlage nicht vollständig genutzt werden. Der Physiker Albert Betz berechnete den maximalen Leistungswert, den eine Windkraftanlage erreichen kann. Man nennt ihn Betz'schen Idealwert $P_{id,Betz}$. Er hängt von der Leistung des Windes ab und kann mit

$$P_{id,Betz} = c_{p,Betz} \cdot P_{Wind}$$

berechnet werden. Dabei ist $c_{p,Betz} = 0,593$ der Betz'sche Leistungsbeiwert, der für alle Windkraftanlagen gleich groß ist. Die Energie des Windes hängt wiederum von Windgeschwindigkeit, Rotorfläche und Dichte der Luft ab und kann durch folgende Gleichung berechnet werden:

$$P_{Wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v_{Wind}^3$$

Aus der Idealleistung und der experimentell bestimmten Nutzleistung kann nun der Wirkungsgrad der Windkraftanlage η bestimmt werden.

$$\eta = \frac{P_N}{P_{id,Betz}}$$

Durchführung

1. Baue den Versuch wie oben dargestellt auf, zunächst jedoch ohne Windgenerator. Stelle am Stromversorgungsgerät eine Spannung von 9V ein.
2. Nimm zuerst die Windgeschwindigkeit mit dem Windstärkemessgerät auf (ohne Windgenerator) oder ermittle den entsprechenden Wert aus dem gegebenen Diagramm (siehe Seite 33).
3. Füge anschließend den Windgenerator hinzu und miss den entsprechenden Spannungs- und Stromstärkewert.
4. Miss außerdem die Temperatur im Zimmer und den Durchmesser d des Rotors am Windgenerator, mit dem du die Angriffsfläche A berechnen kannst.



5.2 Berechnung des Wirkungsgrades einer Windkraftanlage

Messwerte

$$v_{\text{Wind}} = 4,85 \text{ m/s}$$

$$\vartheta = 22^\circ \quad \rightarrow \quad \rho = 1,195 \text{ kg/m}^3$$

$$d = 13 \text{ cm}$$

$$U = 1,74 \text{ V} \quad I = 45,2 \text{ mA}$$

Den Wert für die Dichte ρ der Luft kannst du mithilfe der Raumtemperatur ϑ dem entsprechenden Diagramm (siehe Seite 34) entnehmen.

Auswertung

- Berechne die Angriffsfläche des Windrotors für die strömende Luft und die Energie des Windes vor dem Windrotor. (Angriffsfläche: $A = \pi/4 \cdot d^2$)
- Berechne aus deinen Messwerten die Nennleistung der Windkraftanlage und anschließend mithilfe aller Ergebnisse den Wirkungsgrad der Windkraftanlage mithilfe der gegebenen Formeln. (Nennleistung: $P_N = U \cdot I$)
- Informiere dich über den Wirkungsgrad realer Windkraftanlagen und vergleiche dein Ergebnis mit den realen Werten. Nenne mögliche Gründe für die Unterschiede.

Lösungen zu den Aufgaben

zu 1.:		
Angriffsfläche:	Windenergie	Wirkungsgrad:
$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$	$P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v_{\text{Wind}}^3$	$\eta = \frac{P_N}{P_{\text{id}}}$
$A = \frac{\pi}{4} \cdot 0,13^2 \text{ m}^2$	$P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot 1,195 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,0133 \text{ m}^2 \cdot 4,85^3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3}$	$\eta = \frac{0,0783}{0,91}$
<u>$A = 0,0133 \text{ m}^2$</u>	<u>$P_{\text{Wind}} = 0,91 \text{ W}$</u>	<u>$\eta = 0,086$</u>
zu 2.:		
Nennleistung:	Idealleistung	
$P_N = U \cdot I$	$P_{\text{id}} = C_{P, \text{Betz}} \cdot P_{\text{Wind}}$	
$P_N = 1,74 \text{ V} \cdot 0,045 \text{ A}$	$P_{\text{id}} = 0,593 \cdot 0,91 \text{ W}$	
<u>$P_N = 0,0783 \text{ W}$</u>	<u>$P_{\text{id}} = 0,54 \text{ W}$</u>	
zu 3.:		
(aerodynamischer) Wirkungsgrad (nur bezogen auf Windrotor): 70-85%		
Wirkungsgrad (bezogen auf komplette Anlage mit Generator, Getriebe, Transformator): ca. 30%		
<u>mögliche Gründe für Abweichung:</u> durch nicht optimale Flügelform, nicht ausreichend laminare Strömung, viel kleinere Bauteile (andere Strömungsphänomene)		

Experiment 6

Speicherung elektrischer Energie

Inhalte des Experimentes:

Bei diesem Experiment untersuchen die Schüler die Speicherung von Energie durch einen Kondensator mithilfe einer Windkraftanlage. Zu Beginn wird der Kondensator aufgeladen, anschließend die Verbindung zwischen Windgenerator und Kondensator getrennt und schließlich mithilfe des aufgeladenen Kondensators die Leuchtdiode betrieben. In der Auswertung beschreiben und erklären die Schüler ihre Beobachtungen, finden Anwendungen des Speichervorganges im Alltag und treffen Aussagen über die Anwendung der Energiespeicherung im Zusammenhang mit Windenergie.

Erklärung der Ergebnisse

Durch die Drehung des Flügelrades erzeugt der Windgenerator eine Spannung, mit welcher der Kondensator aufgeladen wird. Nach einigen Sekunden ist er geladen und die Verbindung zwischen Windgenerator und Kondensator wird getrennt, um nicht eine sofortige Entladung durch den Windgenerator (der dann als Motor fungieren würde) zu erreichen. Die Verbindung zwischen Leuchtdiode und Kondensator wird geschlossen und die Leuchtdiode leuchtet hell auf.

Exkurs – Inselsysteme:

Besondere Anwendung der Energiespeicherung im Zusammenhang mit Windenergie findet man bei sogenannten Inselsystemen. Dabei wird die durch Windkraftanlagen erzeugte elektrische Energie in großen Akkumulatoren gespeichert, um dann verfügbar zu sein, wenn kein Wind zur Energieerzeugung vorhanden ist. Man kombiniert diese Systeme meist mit Photovoltaikanlagen, um auch die Sonne als Energiequelle zu nutzen. Sie sind unabhängig von jeglicher externer Stromversorgung und werden deshalb in Gebieten angewendet, in denen eine Versorgung durch Stromleitungen nur schwer möglich ist, wie z.B. auf Bohrinseln, in unzugänglichen Gebirgsregionen oder in Entwicklungsländern. Auch eine Privatnutzung solcher Inselsysteme als Ergänzung zum öffentlichen Stromnetz wäre denkbar, ist allerdings sehr kostenintensiv (Akkumulatoren und zusätzlich benötigte Umwandler sind teuer) und daher nicht verbreitet.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 7 bis 9** um verschiedene Formen von Energie und Energieumwandlungen darzustellen. Auch eine Anwendung in einem **Projekt zur Windenergie** oder zu regenerativen Energien ist möglich. Die Schüler wenden ihre **Kenntnisse zu Energieumwandlungen** auf die Erklärung des Experimentes an und es werden mögliche **Anwendungen der Energieerzeugung und Speicherung** durch Windkraftanlagen thematisiert. Die Bearbeitung in einem Lernbereich zu „Energieversorgung“ ist daher zu empfehlen.

Auch eine Nutzung des Experimentes in der **Sekundarstufe II** ist möglich, wenn die **Lade- und Entladekurve eines Kondensators** aufgenommen werden soll. Ein leicht veränderter Aufbau ermöglicht auch eine solche Untersuchung.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes:

- Es empfiehlt sich, den Kondensator nach dem Experiment wieder vollständig zu entladen, um beim nächsten Gebrauch gleiche Ausgangsvoraussetzungen zu erreichen.

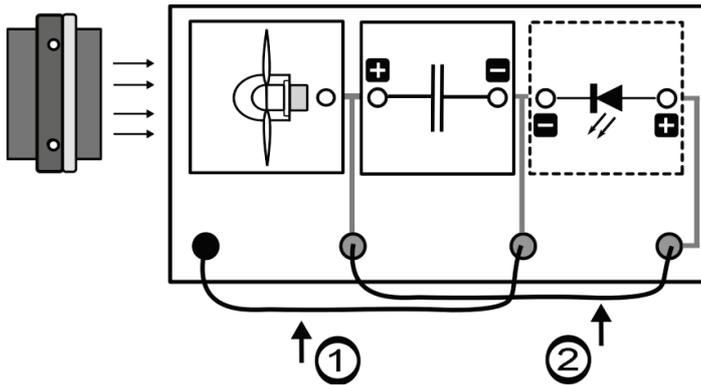


6. Speicherung elektrischer Energie

Aufgabe

Beobachte die Speicherung von elektrischer Energie durch einen Kondensator am Modell einer Windkraftanlage.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (9 V)
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- Kondensatormodul
- LED-Modul
- Kabel

Vorbemerkung

ACHTUNG! Beachte die Polaritäten beim Aufbau des Versuchs. (Minus an Minus und Plus an Plus)
Bei Versuchsbeginn ist die Diode noch dem Aufbau entnommen. Kabel 1 und Kabel 2 sind in den entsprechenden Buchsen angesteckt.

Durchführung

1. Baue den Versuch wie in der Versuchsanordnung vorgegeben auf, vorerst jedoch ohne LED.
2. Stelle die Stromversorgung auf 9V ein und starte den Winderzeuger. Der Kondensator wird aufgeladen, sobald sich der Windgenerator dreht.
3. Lade den Kondensator ungefähr eine Minute lang auf. Entferne danach das Kabel 1 von der Grundeinheit.
4. Schalte erst jetzt den Winderzeuger ab.
5. Stecke anschließend das LED-Modul auf die Grundeinheit und beobachte die Leuchtdiode.

Auswertung

1. Erkläre den Vorgang der Energiespeicherung, wie er bei diesem Experiment abläuft. Nenne auch alle Energieumwandlungen, die im Experiment ablaufen.
2. Nenne Beispiele, bei denen im Alltag Speicherung von Energie eine Rolle spielt. Durch welches elektrische Bauteil außer einem Kondensator kann Energie gespeichert werden?
3. Überlege dir, warum die Speicherung von elektrischer Energie, die durch Windkraftanlagen erzeugt wurde, besonders wichtig ist. Wo wären solche Speicher in Verbindung mit Windenergienutzung sinnvoll einsetzbar?



6. Speicherung elektrischer Energie

Auswertung

1.

Die kinetische Energie der Luftteilchen im Wind bewirkt eine Drehbewegung des Rotors. (Es kommt zur Umwandlung in Rotationsenergie). Die Drehbewegung des Rotors treibt den Generator an, der eine Spannung erzeugt. Es findet also eine Umwandlung in elektrische Energie statt. Die elektrische Energie wird im Kondensator gespeichert (Der Kondensator wird aufgeladen). Durch Trennen der Verbindung zwischen Kondensator und Generator verbleiben die elektrischen Ladungen im Kondensator. Die LED wird angeschlossen und es fließt ein Strom, der die LED zum Leuchten bringt. Elektrische Energie wird in Strahlungsenergie umgewandelt.

2.

Speicherung von Energie im Alltag:

z.B. Aufladen des Handys, Aufladen eines elektrischen Rasierers, elektrische Zahnbürste,...

elektrisches Bauteil:

Akkumulator: (kann durch elektrischen Strom wieder geladen werden, speichert Energie in Form von chemischer Energie)

Batterie: (Energie wird in Form von chemischer Energie gespeichert. Sie kann durch Anschluss eines Verbrauchers) in elektrische Energie umgewandelt werden.

3.

Wind ist nicht immer vorhanden, sondern es gibt auch windstille Zeiten. Deshalb ist Speicherung von Energie bei Nutzung von Windkraft sinnvoll. Besonders von Bedeutung könnte die Speicherung von Energie in Gebieten sein, in denen häufig hohe Windgeschwindigkeiten gemessen werden und eine Anbindung an das Versorgungsnetz nur schwer möglich ist. (z.B. auf Bohrinseln in Nordsee oder in schwer zugänglichen Gebirgsregionen).

(In der Energietechnik spricht man von sogenannten Inselssystemen)

Experiment 7.1

Energieumwandlungen an einer Windkraftanlage

Inhalte des Experimentes:

Bei diesem Experiment untersuchen die Schüler spielerisch die Energieerzeugung und -umwandlung an einer Windkraftanlage. Es werden eine Hupe und eine Glühlampe mithilfe einer Windkraftanlage betrieben. Die Schüler beschreiben ihre Beobachtungen und füllen zur Auswertung einen Lückentext aus.

Erklärung der Ergebnisse

Die Windkraftanlage wandelt die kinetische Energie der Luftströmung in elektrische Energie um, mit der schließlich elektrische Geräte betrieben werden. Man nutzt in diesem Experiment eine Hupe und eine Glühlampe.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 5 bis 7** im Anfangsunterricht in Physik oder in naturwissenschaftlichen Grundlagenfächern. Der Einsatz als Anfangsexperiment ist zu empfehlen. Die Schüler erlernen oder üben das **Vorgehen beim physikalischen Experimentieren** und das **Führen eines einfachen Protokolls**. Das Thema der Windenergienutzung wird den Schülern spielerisch vermittelt. Führt man das Experiment in Klasse 7 durch, kann man außerdem noch darüber sprechen, welche **Energieumformungen** im Experiment ablaufen.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Die Glühlampe sollte erst dann in den Versuchsaufbau eingesteckt werden, wenn der Winderzeuger bereits gestartet ist. Es ist sonst möglich, dass der Winderzeuger nicht startet und so die Glühlampe nicht leuchtet.

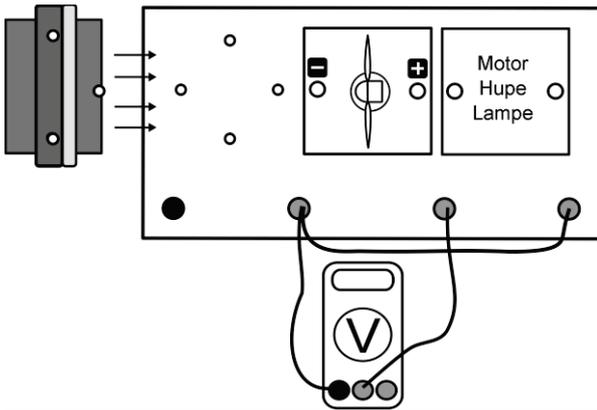


7.1 Energieumwandlungen an einer Windkraftanlage

Aufgabe

Nutze eine Windkraftanlage um eine Glühlampe zum Leuchten zu bringen und eine Hupe zu betreiben.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (12 V)
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- Glühlampenmodul
- Hupenmodul
- Kabel

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung mit der Hupe auf (auf Polarität achten!).
2. Stelle den Winderzeuger auf 12V ein und schalte die Stromversorgung an.
3. Tausche anschließend die Hupe durch die Glühlampe aus. Notiere deine Beobachtung.

Beobachtung

Die Windkraftanlage kann das Hupenmodul zum Hupen bringen.

Die Glühlampe leuchtet, wenn sie an den Windgenerator angeschlossen

wird. Die Helligkeit der Glühlampe nimmt aber nach dem Einstecken ab und der

Windrotor wird langsamer.

Auswertung

Vervollständige den folgenden Text.

Wind ist **Bewegung** von Luftmassen. Luft besteht aus Teilchen. Die Luftteilchen besitzen Bewegungs**energie**. Sie strömen an den **Rotorblättern** der Windkraftanlage vorbei. Der Windrotor entnimmt dem Wind Energie und wandelt diese in eine **Dreh- (oder Rotations-)**bewegung um. Am **Generator** wird dadurch eine Spannung erzeugt. Diese bewirkt, dass die Glühlampe **leuchtet** und **die Hupe** ein Geräusch erzeugt.

Experiment 7.2

Untersuchungen an Farbscheiben mithilfe einer Windkraftanlage

Inhalte des Experimentes:

Bei diesem Experiment erlernen die Schüler spielerisch den Umgang mit Experimentiergeräten, in diesem Fall ein Motor, der Farbscheiben drehen kann. Die Schüler untersuchen den Vorgang der Farbmischung, indem Scheiben mit verschiedenen Farbzusammenstellungen gedreht und die entstehenden Mischfarben untersucht werden. Im Anschluss an die Untersuchung soll das Schema zur Farbmischung vervollständigt werden.

Erklärung der Ergebnisse

Die Windkraftanlage bewirkt, dass sich der Motor mit den farbigen Scheiben zu drehen beginnt. Die drei Farben rot, grün und blau sind in verschiedenen Kombinationen auf den Farbscheiben zu sehen. Durch das Drehen der Farbscheiben mischen sich die vorhandenen Farbscheiben additiv, denn das Auge kann die Bewegung der Scheibe nicht mehr detailliert erfassen. Der Mensch sieht eine Mischfarbe. Dabei addieren sich idealerweise rot und blau zu magenta, grün und blau zu cyan, rot und grün zu gelb, sowie rot, blau und grün zu weiß. Dieses Ergebnis wird im Experiment allerdings nicht erreicht. Das jeweilige Erscheinen der Mischfarbe hängt sehr stark von der Beleuchtung ab. Bei einer Beleuchtung mit annähernd weißem Licht (z.B. direkte Sonne oder helle Glühlampe) werden die besten Ergebnisse ermöglicht.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 5 und 6** des Anfangsunterrichtes in Physik und naturwissenschaftlichen Grundlagenfächern. Der Einsatz als Anfangsexperiment ist zu empfehlen. Die Schüler erlernen oder üben das **Vorgehen beim physikalischen Experimentieren**, das **Führen eines einfachen Protokolls** und sie werden spielerisch mit dem Vorgang der Farbmischung vertraut gemacht. Es eignet sich auch für den Einsatz in anderen Klassenstufen, wenn das **Thema „Farben“** gesondert untersucht wird (z.B. in Klassenstufe 10 im Physikunterricht Sachsens).

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Bei Aufdrücken der Scheibe auf das Motormodul ist darauf zu achten, dass diese den Motor nicht von oben berührt. Der Motor wird sonst durch die Reibung abgebremst und die langsamere Bewegung führt zu einer schlechten Darstellung der Mischfarben.
- Nicht erwähnt wurde in diesem Experiment die Nutzung der zusätzlich beigefügten Farbscheiben. Es kann ebenfalls ein Versuch mit den anderen Scheiben bei gleichem Aufbau durchgeführt werden. Folgende Ergebnisse können mit den zusätzlichen Scheiben erzielt werden:

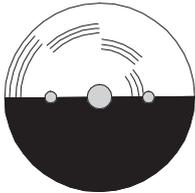


Die Scheibe erscheint außen rot und innen hellrot (rosa).
Wird eine Hälfte der Scheibe beschattet, so erscheint diese dunkler als die unbeschattete Seite.

Erklärung: Durch die Drehbewegung der Scheibe überlagern sich in der Mitte die roten und weißen Felder für den Betrachter additiv. Der Mensch nimmt eine Mischfarbe, in diesem Fall hellrot

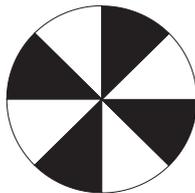
wahr. Außen bleibt die dunkle Farbe erhalten. Durch das Beschatten einer Seite der Scheibe wird diese weniger gut beleuchtet. Die Farbwahrnehmung des Menschen ist von der Reflexion von Licht am entsprechenden Objekt abhängig, solange dieses nicht selbstleuchtend ist. Deshalb wird die beschattete Seite dunkler wahrgenommen.

Die Scheibe erscheint innen heller und nach außen hin dunkler. Es erscheinen hell- bis dunkelgraue Kreise



Erklärung: Da die Scheibe nur zur Hälfte schwarz und in der anderen Hälfte weiß mit Anteilen schwarzer Bereiche dargestellt ist, kommt es zur Überlagerung. Unterteilt man die Scheibe in vier konzentrische Scheiben, so wird deutlich, dass im inneren Kreis der Anteil der weißen Farbe größer ist als in den äußeren Kreisen. Nach außen hin nimmt der Weißanteil ab und die Kreise erscheinen dunkler.

Die Scheibe erscheint grau. Je nach Beleuchtung variiert der Grauton zwischen hellgrau (bei guter Beleuchtung) und dunkelgrau (bei weniger guter Beleuchtung).



Erklärung: Durch Drehung der Scheibe überlagern sich weiße und schwarze Bereiche. Es entsteht eine Mischfarbe: grau. Je nach Beleuchtung nimmt der Mensch den entstehenden Farbton anders wahr. Bei heller Beleuchtung erscheint er heller, bei weniger guter Beleuchtung dunkler.

Bei langsamer Drehung scheint die Scheibe eine räumliche Tiefe zu besitzen. Dabei können verschiedene Objekte wahrgenommen werden, entweder ein nach innen zeigender "Vulkankrater" oder ein sich nach außen windender "Wurm".



Erklärung: Räumlichkeit entsteht nicht nur durch bikulares (mit zwei Augen) Sehen, sondern auch durch die monokular wirkende so genannte Bewegungsparallaxe. Diese wurde bei der Konstruktion der Scheibe genutzt. Der Effekt der Bewegungsparallaxe kann besonders bei Zug- oder Autobahnfahrten beobachtet werden. Weit entfernte Objekte bewegen sich scheinbar langsamer vom Betrachter weg als beispielsweise Bäume am Straßenrand.

Durch die unterschiedlichen Relativbewegungen der einzelnen Kreise der Scheibe entsteht ein räumliches Empfinden.

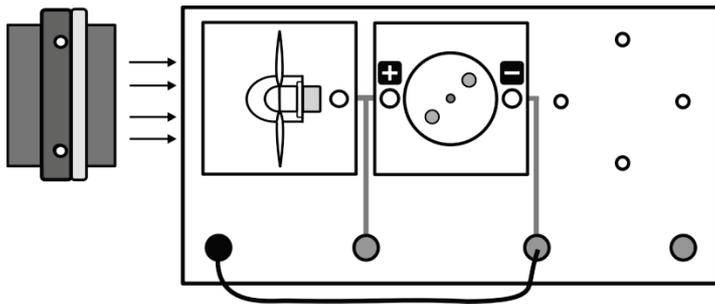


7.2 Untersuchungen an Farbscheiben mithilfe einer Windkraftanlage

Aufgabe

Nutze einen Windgenerator, um die Farbmischung mithilfe von Farbscheiben zu beobachten.

Aufbau



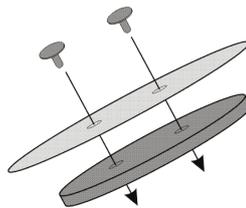
Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (12 V)
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- Motormodul mit Drehscheibe und Farbscheiben
- Kabel

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf und lege eine Farbscheibe auf den Motor. Befestige die Farbscheibe mit den blauen Clips nach folgender Anleitung:

Auf den Motor wird nun die Rotationsscheibe gesteckt. Bei den folgenden Experimenten wird dann jeweils nur eine andere Pappscheibe auf die Rotationsscheibe aufgesteckt. Gehalten wird die Pappscheibe durch zwei farbige Kunststoffclips.



Wenn nötig, kannst du zum Lösen der Clips von der Rotationsscheibe einen Stecker zu Hilfe nehmen. Drücke den Stecker dazu vorsichtig von unten gegen den Clip.

2. Stelle den Winderzeuger auf 12V ein und schalte die Stromversorgung an. Beobachte die sich drehende Farbscheibe.
3. Schalte die Stromversorgung ab, wechsele die Farbscheiben und führe den Versuch erneut durch.
4. Notiere deine Beobachtungen. Male dazu das Feld in der entsprechenden Farbe aus, die bei der Drehung entsteht und schreibe den Namen der Farbe auf.



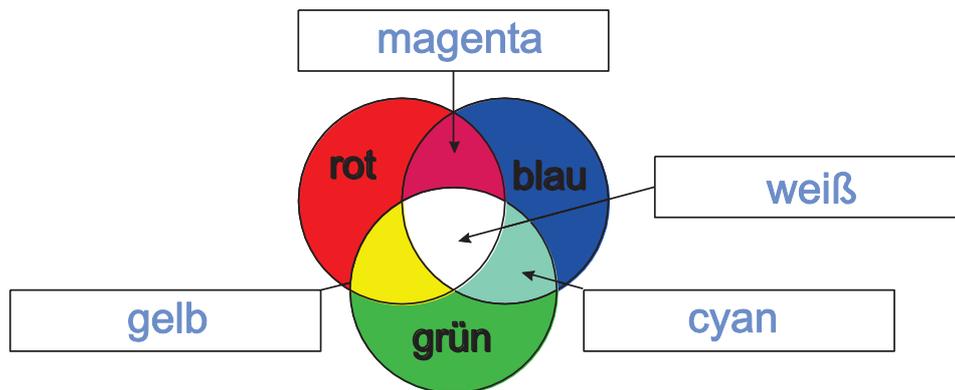
7.2 Untersuchungen an Farbscheiben mithilfe einer Windkraftanlage

Beobachtung

Scheibe grün-rot:		gelb	(hellbraun)
Scheibe rot-blau:		magenta	(dunkelrot)
Scheibe grün-blau:		cyan	(hellblau)
Scheibe grün-rot-blau:		weiß	(grau)

Auswertung

Male nun mithilfe deiner Beobachtung die Zeichnung zur Farbmischung aus. Kennzeichne auch die einzelnen Farbbereiche.



Experiment 8.1

Vergleich von Savoniusrotor und Dreiblattrotor (phänomenologisch)

Inhalte des Experimentes:

Bei diesem Experiment werden der Savoniusrotor und der Dreiblattrotor verglichen, indem beide Rotoren eine Leuchtdiode betreiben und deren Helligkeit untersucht wird. Dazu wird zuerst der Dreiblattrotor in den Versuchsaufbau eingebaut und das Aufleuchten der Leuchtdiode untersucht. Anschließend wird der Savoniusrotor eingebaut und wiederum das Aufleuchten untersucht. Der Lückentext ist auszufüllen und in der Auswertung beschreiben die Schüler Unterschiede zwischen den verschiedenen Rotoren und fertigen eine Skizze mit wesentlichen Bestandteilen beider Rotortypen an.

Erklärung der Ergebnisse

Der Dreiblattrotor dreht sich wesentlich schneller als der Savoniusrotor. Die am Generator erzeugte Spannung ist hoch und die Leuchtdiode beginnt zu leuchten. Am Savoniusrotor kann durch den Generator keine so hohe Spannung erreicht werden, dass die Leuchtdiode aufleuchtet, da er sich langsamer dreht als der Dreiblattrotor. Diese unterschiedlich schnelle Drehbewegung begründet sich in der Form und der Angriffsfläche der einzelnen Rotoren durch die Luft. Der Savoniusrotor hat eine große Angriffsfläche für den Wind und es kommt (aufgrund seiner Funktionsweise nach dem Widerstandsprinzip) zu verstärktem Luftwiderstand. Der Dreiblattrotor, der nach dem Auftriebsprinzip arbeitet, hat gegenüber dem Wind keine große Angriffsfläche und dreht sich aufgrund der Kraftwirkungen durch die Auftriebskraft schneller als der Savoniusrotor und erzeugt so auch eine größere elektrische Spannung am Generator, die eine Leuchtdiode betreiben kann.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 5 bis 7** des Anfangsunterrichts in Physik oder naturwissenschaftlichen Grundlagenfächern. Es ermöglicht eine **experimentelle Untersuchung verschiedener Rotorarten** von Windkraftanlagen. Außerdem ist eine Nutzung in einem Projekt zu regenerativen Energien möglich, wenn es für die empfohlenen Klassenstufen angeboten werden soll. Die Schüler üben sich im **Vorgehen beim Experimentieren**, beim **Zeichnen einfacher Skizzen** und sie erkennen Unterschiede bei gegebenen Experimentierobjekten.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Statt der Leuchtdiode kann für den Versuch auch das Motormodul oder die Glühlampe eingesetzt werden, um die Unterschiede der Rotoren darzustellen

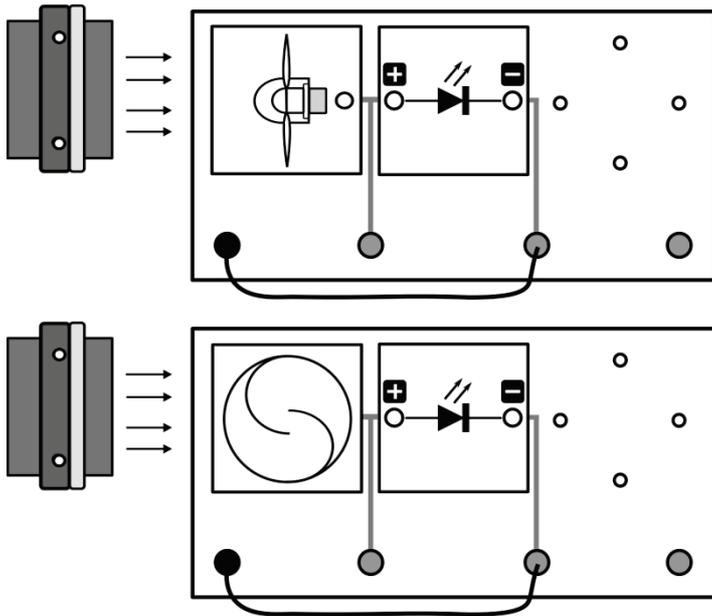


8.1 Vergleich zwischen Savonius- und Dreiblattrotor (phänomenologisch)

Aufgabe

Vergleiche einen Savoniusrotor mit einem Dreiblattrotor, indem du die Helligkeit einer Leuchtdiode untersuchst, die zum Leuchten gebracht wird.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (12V)
- Savoniusrotor mit Generatormodul
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- LED-Modul
- Kabel

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Verwende zuerst den Dreiblatt-Rotor.
2. Schalte die Stromversorgung ein und beobachte die Leuchtdiode.
3. Schalte die Stromversorgung wieder aus und entnimm das Modul des Dreiblatt-Rotors. Setze nun den Savoniusrotor an die gleiche Position.
4. Starte den Winderzeuger und notiere deine Beobachtungen, indem du den Lückentext ausfüllst.

Beobachtung

Der Savoniusrotor dreht sich **langsamer** als der Dreiblattrotor.

Die Leuchtdiode leuchtet **nicht**, wenn der Savoniusrotor verwendet wird.



8.1 Vergleich zwischen Savonius- und Dreiblattrotor (phänomenologisch)

Auswertung

Untersuche den Savoniusrotor genauer. Welche Unterschiede im Aufbau kannst du zwischen den verschiedenen Rotoren feststellen? Fertige dir auch eine Skizze der beiden Rotoren an

Antwort:

- Savoniusrotor dreht sich um eine vertikale Achse, Wind strömt in kreisrunde „Blätter“ hinein
(beim Dreiblattrotor eher flach), Savonius hat größere Angriffsfläche im Wind,
Savonius benötigt mehr Material, Savoniusrotor ist (hier im Modell) schwerer

+ Skizze vom prinzipiellen Aufbau der beiden Rotoren
(können mit Schülern gemeinsam noch genau beschriftet werden)

Experiment 8.2

Vergleich von Savoniusrotor und Dreiblattrotor (Spannungsmessung)

Inhalte des Experimentes:

Bei diesem Experiment wird die erzeugte Spannung von Savoniusrotor und Dreiblattrotor verglichen. Nacheinander werden bei den beiden Rotoren die jeweiligen Generatorspannungen gemessen und verglichen. Die Schüler notieren ihre weiteren Beobachtungen und fertigen in der Auswertung eine Skizze an, mit der versucht werden soll das Funktionsprinzip des Savoniusrotors zu erklären. Anschließend wird die Spannungsdifferenz berechnet und es soll vermutet werden, welche Ursachen dieser Unterschied haben könnte.

Erklärung der Ergebnisse

Der Dreiblattrotor dreht sich durch die Nutzung der Auftriebskraft wesentlich schneller als der Savoniusrotor, der die Kraft durch den Luftwiderstand nutzt. Der Savoniusrotor nutzt zwar die Energie, die durch das Abbremsen der Luft an den Rotor übertragen wird, bietet dem Wind allerdings eine große Angriffsfläche und durch Reibung kann ein großer Teil der kinetischen Energie der Luft nicht genutzt werden. Am Dreiblattrotor bewirkt auch der Luftwiderstand eine Kraftwirkung, allerdings nicht den größten Teil der erzeugten Kraft. Das Flügelrad dreht sich (hauptsächlich) durch die Auftriebskraft, die an den einzelnen Rotorblättern auftritt. Der Savoniusrotor dreht sich deshalb wesentlich langsamer als der Dreiblattrotor und erzeugt so eine geringere Spannung am Generator. Dieses Ergebnis lässt die Vermutung zu, dass der Wirkungsgrad des Savoniusrotors geringer ist, als der Wirkungsgrad des Dreiblattrotors. Diese Aussage ist für reale Anlagen zutreffend.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 7 bis 9**. Dabei ist besonders der Einsatz in **Projekten zur Windenergie** oder zu regenerativen Energien zu erwähnen. Die Schüler üben sich im **physikalischen Experimentieren** und im **Umgang mit Mess- und Experimentiergeräten**. Für die Erklärungen (bzw. Vermutungen) wenden die Schüler ihr Wissen zu Kraftwirkungen, besonders im Zusammenhang mit Luftwiderstand und Luftreibung an. Sie üben sich dabei im **fachsprachlichen Argumentieren**.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Bei Umbau von Dreiblattrotor zu Savoniusrotor (oder umgekehrt) ist darauf zu achten, dass der jeweilige Abstand zwischen Winderzeuger und Windgenerator beibehalten wird. Zusätzlich zum Rotorwechsel muss also auch die Position des Winderzeugers und die Position des Spannungsmessgerätes verändert werden.

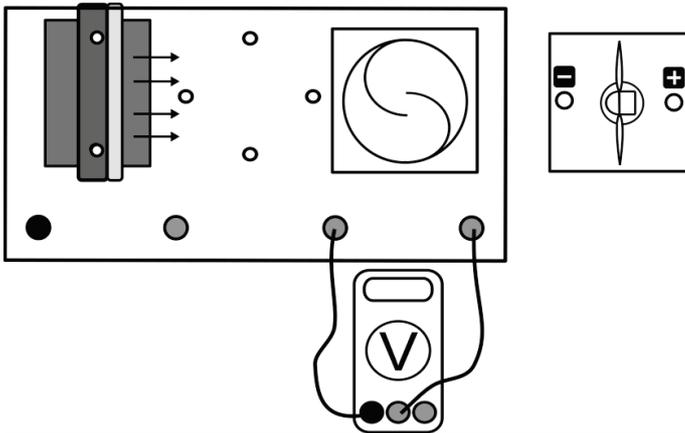


8.2 Vergleich zwischen Savonius- und Dreiblattrotor (Spannungsmessung)

Aufgabe

Vergleiche einen Savoniusrotor mit einem Dreiblattrotor, indem du die erzeugte Spannung untersuchst.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (12V)
- Savoniusrotor mit Generatormodul
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- Kabel
- Spannungsmessgerät

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Verwende zunächst den Savoniusrotor.
2. Schalte die Stromversorgung ein und miss die Spannung U_{Savonius} , die der Savoniusrotor liefert.
3. Schalte die Stromversorgung wieder aus, entnimm das Savoniusrotormodul und setze den Dreiblattrotor an die gleiche Position ein. Miss nun die Spannung $U_{\text{3-Blatt}}$.
4. Notiere deine Messwerte und weitere Beobachtungen.

Beobachtung

Der Savoniusrotor dreht sich langsamer als der Dreiblattrotor.

Die erzeugte Spannung des Savoniusrotors ist geringer als beim Dreiblattrotor

Messwerte

$$U_{\text{Savonius}} = 0,41\text{V}$$

$$U_{\text{3-Blatt}} = 3,13\text{V}$$

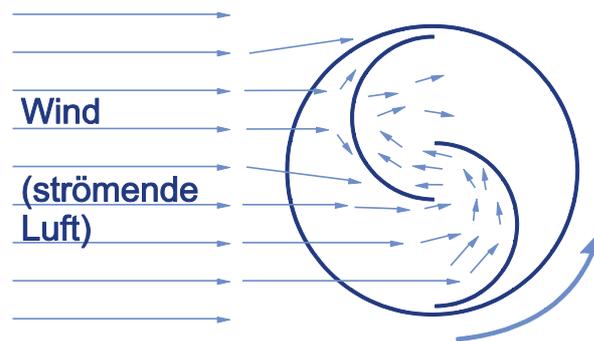


8.2 Vergleich zwischen Savonius- und Dreiblattrotor (Spannungsmessung)

Auswertung

1. Untersuche den Rotor genauer. Versuche anschließend, das Funktionsprinzip des Savoniusrotors zu erklären. Fertige dir eine Skizze an.
2. Wie groß ist die Spannungsdifferenz zwischen den beiden Rotorarten bei diesem Modell? Kannst du den Unterschied erklären? Notiere deine Vermutungen.

1.



Der Wind (die strömende Luft) trifft auf den Savoniusrotor. Dabei strömt Luft auf die halbrunden Rotorblätter und es wirkt eine Kraft auf diese. Der Rotor beginnt eine Drehbewegung auszuführen. Durch das Hindurchströmen der Luft durch den Zwischenraum zwischen den beiden Rotorblättern wird die Kraft, die die Drehbewegung bewirkt, noch vergrößert. Am Generator wird durch die Drehbewegung eine Spannung erzeugt.

2.

$$\Delta U = U_{3\text{-Blatt}} - U_{\text{Savonius}} = 3,13 \text{ V} - 0,41 \text{ V} = \underline{2,72 \text{ V}}$$

- Beim Einströmen in den Savoniusrotor wird die Luft stark abgebremst. Ein großer Teil der Energie des Windes wird in Reibungsarbeit umgewandelt. Der Rotor nutzt also nur einen geringeren Teil der Energie des Windes und die umgewandelte Energie ist geringer, sodass der Generator sich langsamer dreht und eine geringere Spannung erzeugt.

- beim Savoniusrotor wird nur Luftwiderstand zum Antrieb genutzt, der Dreiblattrotor nutzt außerdem noch den Auftrieb (bessere Energieausnutzung des Windes)

Experiment 8.3

Vergleich von Savoniusrotor und Dreiblattrotor (Leistungsmessung)

Inhalte des Experimentes:

Für verschiedene Windgeschwindigkeiten werden zuerst beim Savoniusrotor über einem festen Widerstand Stromstärke und Spannung gemessen. Der Versuchsaufbau wird wie beschrieben variiert und die Messung mit den angegebenen Windgeschwindigkeiten auch für den Dreiblattrotor durchgeführt. Aus den einzelnen Messwerten wird die elektrische Leistung berechnet. Diese errechneten Werte trägt der Schüler in die gegebenen Diagramme ein. Anschließend werden die beiden Rotoren verglichen und nach den angegebenen Aspekten untersucht. Es soll weiterhin eine Einschätzung zum aktuellen Einsatz von Savoniusrotoren gegeben werden.

Erklärung der Ergebnisse

Der Dreiblattrotor dreht sich durch die Nutzung der Auftriebskraft wesentlich schneller als der Savoniusrotor, der die Kraft durch den Luftwiderstand nutzt. Der Savoniusrotor nutzt zwar die Kraft, die durch das Abbremsen der Luft erzeugt wird, bietet dem Wind allerdings eine große Angriffsfläche und durch Reibung kann ein großer Teil der kinetischen Energie der Luft nicht genutzt werden. Am Dreiblattrotor bewirkt auch der Luftwiderstand eine Kraftwirkung, allerdings nicht den größten Teil der erzeugten Kraft. Das Flügelrad dreht sich (hauptsächlich) durch die Auftriebskraft, die an den einzelnen Rotorblättern auftritt. Der Savoniusrotor dreht sich deshalb wesentlich langsamer als der Dreiblattrotor und erzeugt so eine geringere Spannung am Generator, die schließlich eine geringere Leistung zur Folge hat. Dieses Ergebnis lässt die Vermutung zu, dass der Wirkungsgrad des Savoniusrotors geringer ist als der Wirkungsgrad des Dreiblattrotors. Diese Aussage ist für reale Anlagen zutreffend.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 8 und 9**. Dabei ist besonders der Einsatz in **Projekten zur Windenergie** oder zu regenerativen Energien zu empfehlen. Die Schüler üben sich im **physikalischen Experimentieren** und im **Umgang mit Mess- und Experimentiergeräten**. Sie beleuchten die verschiedenen Eigenschaften von Windrotoren detailliert und ziehen aus dem Experiment Schlüsse für die Nutzung der Windenergie als Teil regenerativer Energieerzeugung. Dabei steht unter anderem der Aspekt des **fachsprachlichen Argumentierens** im Vordergrund.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Beim Messen der Spannung sollte darauf geachtet werden, dass die Messwerte erst dann abgelesen und in die Tabelle eingetragen werden, wenn sich der angezeigte Wert am Messgerät nicht mehr ändert. Die veränderte Windgeschwindigkeit durch das Verschieben des Winderzeugers bewirkt dieses träge Verhalten des Windgenerators.
- Wird die Windgeschwindigkeit beim Experiment selbst mithilfe des Windgeschwindigkeitsmessers bestimmt, sind die Hinweise auf Seite 32 zu beachten.

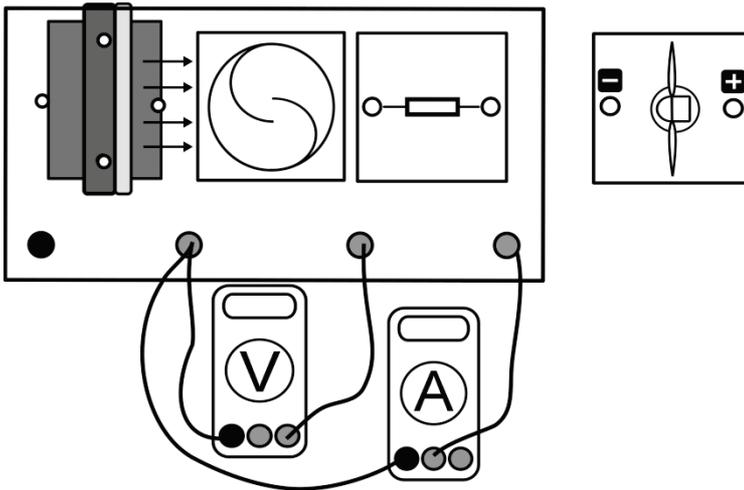


8.3 Vergleich zwischen Savonius- und Dreiblattrotor (Leistungsmessung)

Aufgabe

Vergleiche die Leistung eines Windgenerators, der durch einen Savoniusrotor angetrieben wird, mit der Leistung eines Dreiblattrotors in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit
- Stromversorgung (9V)
- Savoniusrotor mit Generatormodul
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- Widerstandsmodul
- Kabel
- Spannungsmessgerät
- Strommessgerät

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf. Verwende zunächst den Savoniusrotor.
2. Schalte die Stromversorgung ein und miss die Spannung und Stromstärke für verschiedene Windgeschwindigkeiten, die der Savoniusrotor liefert. Variiere die Windgeschwindigkeit, indem du die Spannung U_{netz} am Winderzeuger änderst.
3. Schalte die Stromversorgung wieder aus, entnimm das Savoniusrotormodul und setze den Dreiblattrotor an die gleiche Position ein.
4. Führe nun die Untersuchung mit dem Dreiblattrotor für die entsprechenden Windgeschwindigkeiten durch und notiere deine Messwerte sowie weitere Beobachtungen.

Beobachtung

Der Savoniusrotor dreht sich langsamer als der Dreiblatt-Rotor.

Stromstärke- und Spannungswert nehmen bei größerem Abstand vom Winderzeuger ab



8.3 Vergleich zwischen Savonius- und Dreiblattrotor (Leistungsmessung)

Messwerte

Savoniusrotor					3-Blatt-Rotor				
U_{netz} in V	v in m/s	U_S in V	I_S in mA	P_S in mW	U_{netz} in V	v in m/s	U_3 in V	I_3 in mA	P_3 in mW
12	4,1	0,34	7,23	2,4582	12	6	2,41	62,8	151,3
9	4,0	0,30	6,44	1,932	9	4,7	1,64	42,1	69,0
7,5	3,8	0,23	4,95	1,1385	7,5	3,9	1,19	30	35,7
6	3,6	0,19	4,10	0,779	6	3,0	0	0	0
5	3,3	0,16	3,62	0,5792	5	2,4	0	0	0

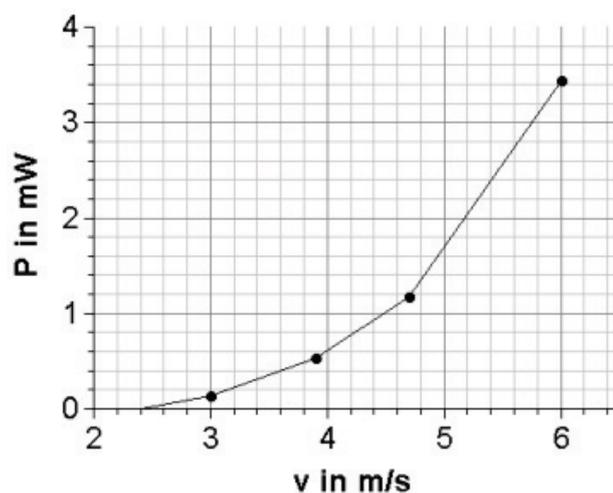
Die Werte für die Geschwindigkeit kannst du mit dem Windstärkemessgerät bestimmen oder aus dem entsprechenden Diagramm (siehe Seite 33) ablesen.

Auswertung

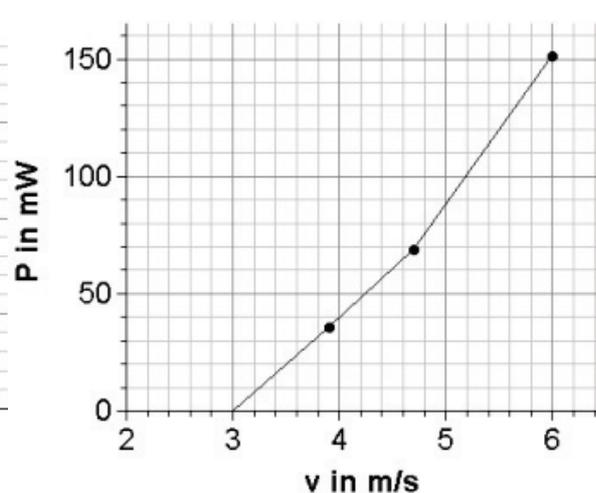
- Berechne die Leistung für die entsprechenden Abstände und trage deine Werte in die gegebenen Diagramme ein.
- Vergleiche die beiden Rotoren. Betrachte dabei folgende Aspekte:
 - äußeres Erscheinungsbild
 - Drehachse
 - Drehgeschwindigkeit
 - Anlaufgeschwindigkeit
 - Nennleistung
 - Funktionsprinzip
- Nenne mögliche Gründe, warum Savoniusrotoren kaum zur Energiegewinnung genutzt werden. Gibt es Gebiete oder Landschaften, an denen sie dennoch sinnvoll einzusetzen sind?

Diagramme

1. **Savonius rotor:**



Dreiblatt-Rotor:





8.3 Vergleich von Savonius- und Dreiblattrotor (Leistungsmessung)

Auswertung

2.

	Savoniusrotor	Dreiblattrotor
äußeres Erscheinungsbild	-2 runde Platten, dazwischen 2 halbkreisförmige Rotorblätter	- Nabe, an der 3 schmale, flache Rotorblätter befestigt sind - Rotor befindet sich im Abstand vom Boden
Drehachse	vertikal	horizontal
Drehgeschwindigkeit	langsamer	schneller
Nennleistung	gering (hier 0,6mW bis 2,5mW)	hoch (hier: 60mW-125mW)
Funktionsprinzip	- Rotorblätter verringern die Windgeschwindigkeit (bremsen Luftteilchen ab → Rückstoß (Kraftwirkung) auf den Rotor - kommt zur Drehbewegung des Rotors.	- Luft strömt an Rotorblättern vorbei und bewirkt dort Auftriebskräfte (zusätzlich gibt es einen Rückstoß) - Auftrieb und Rückstoß bewirken Bewegung in Drehrichtung, die auf Generator übertragen wird

3.

Savoniusrotoren erreichen eine wesentlich geringere Leistung im Vergleich zu Dreiblattrotoren. Bei gleicher Windgeschwindigkeit haben sie also einen kleineren Wirkungsgrad und arbeiten nicht so effektiv. Außerdem ist der Materialaufwand viel höher. Savoniusrotoren können in Gebieten mit häufig wechselnde Windrichtung trotzdem betrieben werden, da sie von jeder Seite vom Wind angeströmt werden können und eine gleichbleibende Leistung erzeugen.

Experiment 9.1

Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (phänomenologisch)

Inhalte des Experimentes:

Bei diesem Experiment werden Rotoren mit zwei, drei und vier Rotorblättern verglichen. Es wird die Helligkeit einer Leuchtdiode untersucht, die jeweils an den Rotor angeschlossen ist. Zum Austausch der Rotoren steckt man die jeweilige Anzahl an Rotorblättern auf die Nabe (Hinweise zum Austausch der Rotorblätter siehe Seite 32). Die Schüler tragen ihre Beobachtungen in die Tabelle ein und formulieren anschließend eine Beschreibung der Ergebnisse. Als Zusatzaufgabe wird die Nutzung von Dreiblattrotoren für Windkraftanlagen diskutiert. Die Schüler sollen eine mögliche Erklärung für den häufigen Einsatz dieser Art von Rotoren finden.

Erklärung der Ergebnisse

Der Zweiblattrotor lässt die Leuchtdiode nur sehr schwach aufleuchten. Drei- und Vierblattrotor bewirken eine starke Helligkeit der Leuchtdiode, wobei der Vierblattrotor noch geringfügig bessere Ergebnisse liefert. Diese Erscheinung ist ein Resultat der verstärkten Auftriebskraft bei einem Rotor mit größerer Flügelanzahl. An jedem einzelnen Rotorblatt wirkt eine Auftriebskraft, die die Drehbewegung des Rotors verstärkt. Diese Kräfte addieren sich, je mehr Rotorblätter am Windgenerator befestigt sind¹⁸. Am Zweiblattrotor wirkt also die geringste Auftriebskraft, er bewirkt somit auch die langsamste Drehung und erzeugt die geringste Spannung, sodass die Leuchtdiode nur schwach leuchtet. Der Dreiblattrotor erzeugt eine größere Spannung, sodass die Leuchtdiode hell leuchtet, erreicht allerdings eine geringere Spannung als der Vierblattrotor, der die stärkste Helligkeit erreicht.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 5 bis 7** des Anfangsunterrichtes in Physik oder naturwissenschaftlichen Grundlagenfächern. Es werden die verschiedenen Rotorarten anschaulich miteinander verglichen und die Ergebnisse auf die aktuelle Nutzung von Windkraftanlagen übertragen. Durch den einfachen Aufbau ist das Experiment zum **Üben des selbstständigen Experimentierens** zu empfehlen.

Die Zusatzaufgabe leistet einen Beitrag zur Übung des fachsprachlichen Argumentierens mithilfe erster physikalischer Kenntnisse.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Der Austausch der Rotorblätter darf nur bei ausgeschaltetem Winderzeuger durchgeführt werden, da sonst Verletzungsgefahr besteht.
- Zum Starten des Zweiblattrotors ist unter Umständen ein sanfter Stoß erforderlich, um die Trägheit des Generators zu überschreiten.

¹⁸ Dieser Zusammenhang gilt nicht für beliebig viele Rotorblätter, da bei zu großer Anzahl auch der Luftwiderstand sehr groß ist und damit die erzeugte Drehbewegung abgebremst wird. Für zwei, drei und vier Rotorblätter ist der Zusammenhang allerdings gegeben

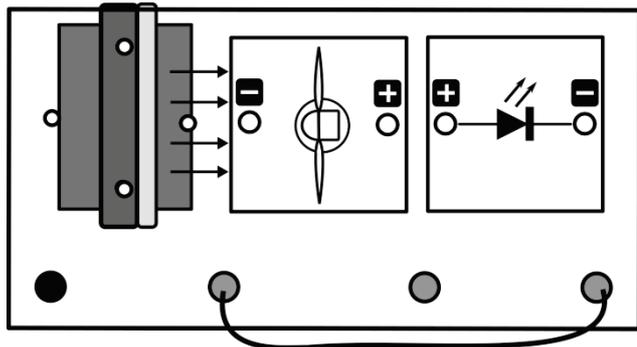


9.1 Vergleich von Zwei-, Drei und Vierblattrotoren (phänomenologisch)

Aufgabe

Untersuche die Helligkeit einer Leuchtdiode, wenn diese durch einen Windgenerator mit zwei, drei oder vier Rotorblättern betrieben wird.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (9 V)
- Windgeneratormodul (mit zwei, drei und vier Rotorblättern, optimiertes Profil, 25°)
- LED-Modul
- Kabel

Durchführung

1. Baue den Versuch nach obiger Anordnung auf.
2. Setze den 2-Blatt-Rotor an den Windgenerator und schalte den Winderzeuger (Erregerspannung 9V) ein. Beobachte die Leuchtdiode. Verwende für den 2-Blatt-Rotor die 4-Blatt-Nabe.
3. Wechsle nun die Rotorflügel und stecke nacheinander den Drei- und den Vierblattrotor an den Windgenerator und beobachte ebenfalls die Leuchtdiode. Verwende die 3-Blatt-Nabe für den 3-Blatt-Rotor. Hinweise zum Wechsel der Rotorblätter findest du auf Seite 32.
4. Notiere deine Beobachtungen und setze dazu in die jeweiligen Felder der Tabelle ein Kreuz.

Beobachtung

Die Leuchtdiode leuchtet...

	Die Leuchtdiode leuchtet...		
	hell	schwach	gar nicht
2 Blätter		x	
3 Blätter	x		
4 Blätter	x		



9.1 Vergleich von Zwei-, Drei und Vierblattrotoren (phänomenologisch)

Auswertung

Wie verändert sich die Helligkeit der Leuchtdiode, wenn sie durch unterschiedliche Rotoren betrieben wird? Beschreibe deine Ergebnisse.

Zusatz: In Deutschland kommen für Windkraftanlagen hauptsächlich Dreiblattrotoren zum Einsatz. Versuche eine mögliche Erklärung zu finden.

Je mehr Rotorblätter an der Windkraftanlage befestigt sind, desto heller leuchtet die Leuchtdiode. Bei zwei Rotorblättern leuchtet die Leuchtdiode nur sehr schwach.

Zusatz:

Der Unterschied zwischen Drei- und Vierblattrotoren ist nicht besonders groß. Die Dreiblattrotoren benötigen allerdings weniger Material (nur 3, statt 4 Flügel). Deshalb werden in Deutschland hauptsächlich Dreiblattrotoren verwendet.

Hinweis für den Lehrer: Außerdem verteilen sich die Kräfte, die bei der Drehbewegung auf die Rotorblätter wirken, besser. Beim Vierblattrotor treten beim Vorbeidrehen am Turm durch die Verwirbelungen Kräfte an diesem und dem direkt gegenüberliegenden Flügel auf. Bei Dreiblattrotoren wird die Kraft, die sonst auf den entgegengesetzten Flügel wirkt, auf die beiden anderen Flügel gleichmäßig verteilt. Der Materialverschleiß ist also geringer.

Experiment 9.2

Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (Spannungsmessung)

Inhalte des Experimentes:

Bei diesem Experiment werden Rotoren mit zwei, drei und vier Rotorblättern verglichen. Es wird die erzeugte Spannung am Generator untersucht. Zum Austausch der Rotoren wird die jeweilige Anzahl an Rotorblättern auf die Nabe gesteckt (Hinweise zum Austausch der Rotorblätter siehe Seite 32). Zu Beginn wird für eine gegebene Windgeschwindigkeit die Spannung am Generator bestimmt. Anschließend wiederholt man die Untersuchung für verschiedene Windgeschwindigkeiten.. Die Messwerte werden in die Tabelle eingetragen. In der Auswertung tragen die Schüler ihre Messwerte in Diagramme ein und beschreiben ihre Ergebnisse. Es sollen mithilfe dieser Ergebnisse außerdem Schlussfolgerungen für den Betrieb realer Windkraftanlagen durch die Schüler gezogen werden.

Erklärung der Ergebnisse

Der Zweiblattrotor erzeugt die geringste Spannung am Generator. Drei- und Vierblattrotor erreichen nahezu gleich große Spannungswerte, wobei der Vierblattrotor noch geringfügig bessere Ergebnisse liefert (je nach Einstellung der Spannung am Winderzeuger). Diese Erscheinung ist ein Resultat der verstärkten Auftriebskraft bei einem Rotor mit größerer Flügelzahl. An jedem einzelnen Rotorblatt wirkt die Auftriebskraft, welche die Drehbewegung des Rotors verstärkt. Diese Kräfte addieren sich, je mehr Rotorblätter am Windrotor befestigt sind¹⁹. Am Zweiblattrotor wirkt also die geringste Auftriebskraft, er bewirkt somit auch die langsamste Drehung und erzeugt die geringste Spannung. Der Dreiblattrotor erzeugt eine größere Spannung. Am Vierblattrotor wird eine gleichgroße oder geringfügig größere Spannung erzeugt als bei einem Dreiblattrotor, was vor allem aus der Windgeschwindigkeit am Rotor folgt. Bei größerer Windgeschwindigkeit sind die Unterschiede zwischen Drei- und Vierblattrotor geringer, da die Leistung der Windkraftanlage sich ihrem Sättigungswert nähert. Dieser Sättigungswert ist umso höher, je weniger Rotorblätter vorhanden sind. Eine Windkraftanlage mit zwei Rotorblättern kann also bei höherer Windgeschwindigkeit betrieben werden, als eine Anlage mit drei oder vier Rotorblättern, da die Wirbelbildung, die durch den Strömungsabriss zustande kommt, erst bei höheren Windgeschwindigkeiten zum Abbremsen des Rotors führt. Je mehr Rotorblätter, desto mehr Verwirbelungen und desto stärkeres Abbremsen bei gleicher Windgeschwindigkeit. In Gebieten mit sehr hoher Windgeschwindigkeit sind Rotoren mit zwei Rotorblättern auch sinnvoll einsetzbar.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 7 bis 9**. Auch die Nutzung in einem **Projekt zur Windenergie** oder zu regenerativen Energien ist zu empfehlen. Es werden die verschiedenen Rotorarten anschaulich miteinander verglichen und die Ergebnisse auf die aktuelle Nutzung von Windkraftanlagen übertragen. Die Schüler

¹⁹ Dieser Zusammenhang gilt nicht für beliebig viele Rotorblätter, da bei zu großer Anzahl auch der Luftwiderstand sehr groß ist und damit die erzeugte Drehbewegung abgebremst wird. Für zwei, drei und vier Rotorblätter ist der Zusammenhang allerdings gegeben

festigen ihre Kenntnisse im **Umgang mit Messgeräten** und in der **Interpretation von Diagrammen**. Sie übertragen ihre Erkenntnisse aus dem Experiment auf Sachverhalte an realen Windkraftanlagen und üben sich dabei im **Umgang mit der Fachsprache** des Physikunterrichtes.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Der Austausch der Rotorblätter darf nur bei ausgeschaltetem Winderzeuger durchgeführt werden, da sonst Verletzungsgefahr besteht.
- Zum Starten der Rotoren ist unter Umständen ein sanfter Stoß erforderlich, um die Trägheit des Generators zu überwinden (wird empfohlen)
- Beim Messen der Spannung sollte darauf geachtet werden, dass die Messwerte erst dann abgelesen und in die Tabelle eingetragen werden, wenn sich der angezeigte Wert am Messgerät nicht mehr ändert.
- Wird die Windgeschwindigkeit beim Experiment selbst mithilfe des Windgeschwindigkeitsmessers bestimmt, sind die Hinweise auf Seite 32 zu beachten

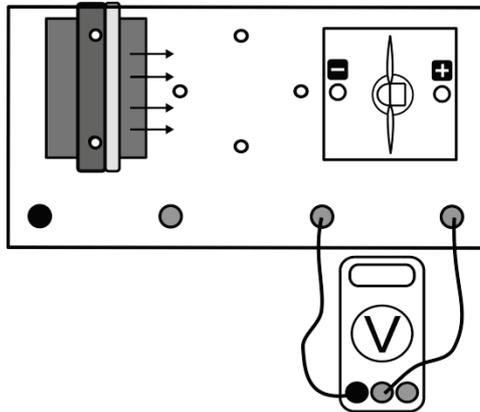


9.2 Vergleich von Zwei-, Drei und Vierblattrotoren (Spannungsmessung)

Aufgabe

Untersuche die Spannung am Windgenerator bei unterschiedlicher Anzahl von Rotorblättern.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (7,5 V)
- Windgeneratormodul (mit zwei, drei und vier Rotorblättern, optimiertes Profil, 25°)
- Kabel
- Spannungsmessgerät

Vorbemerkung

Die einzelnen Rotoren brauchen unterschiedlich viel Zeit, bis sie eine konstante Umfangsgeschwindigkeit und damit eine konstante Spannung erzeugen. Die Spannung sollte erst notiert werden, wenn sich der Messwert nicht mehr ändert.

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Stecke den Zweiblattrotor auf den Windgenerator, verwende für den 2-Blatt-Rotor die 4-Blatt-Nabe. Miss die erzeugte Spannung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Variiere die Windgeschwindigkeit, indem du die Spannung U_{netz} am Winderzeuger änderst. Trage alle Werte in die vorgesehenen Felder ein. Schalte anschließend den Winderzeuger wieder aus.
3. Wiederhole deine Messung mit dem Drei- und Vierblattrotor. Trage alle Werte in die vorgesehenen Felder ein. Verwende die 3-Blatt-Nabe für den 3-Blatt-Rotor.
4. Wiederhole die Messung auch mit dem 1-Blatt-Rotor. (Hinweis: die Messwerte sind nicht vergleichbar, da für den Einblattrotor mindestens ein Anstellwinkel von 30° verwendet werden muss.)

Messwerte

U_{netz}	v in m/s	U_2 in V	U_3 in V	U_4 in V
12	6,0	3,96	4,36	3,74
9	4,7	2,92	3,12	2,74
7,5	3,9	2,28	2,43	2,24
6	3,0	1,47	1,59	1,51
5	2,4	0	0,98	1,05

Die Werte für die Geschwindigkeit kannst du mit dem Windstärkemessgerät bestimmen oder aus dem entsprechenden Diagramm (siehe Seite 33) ablesen.

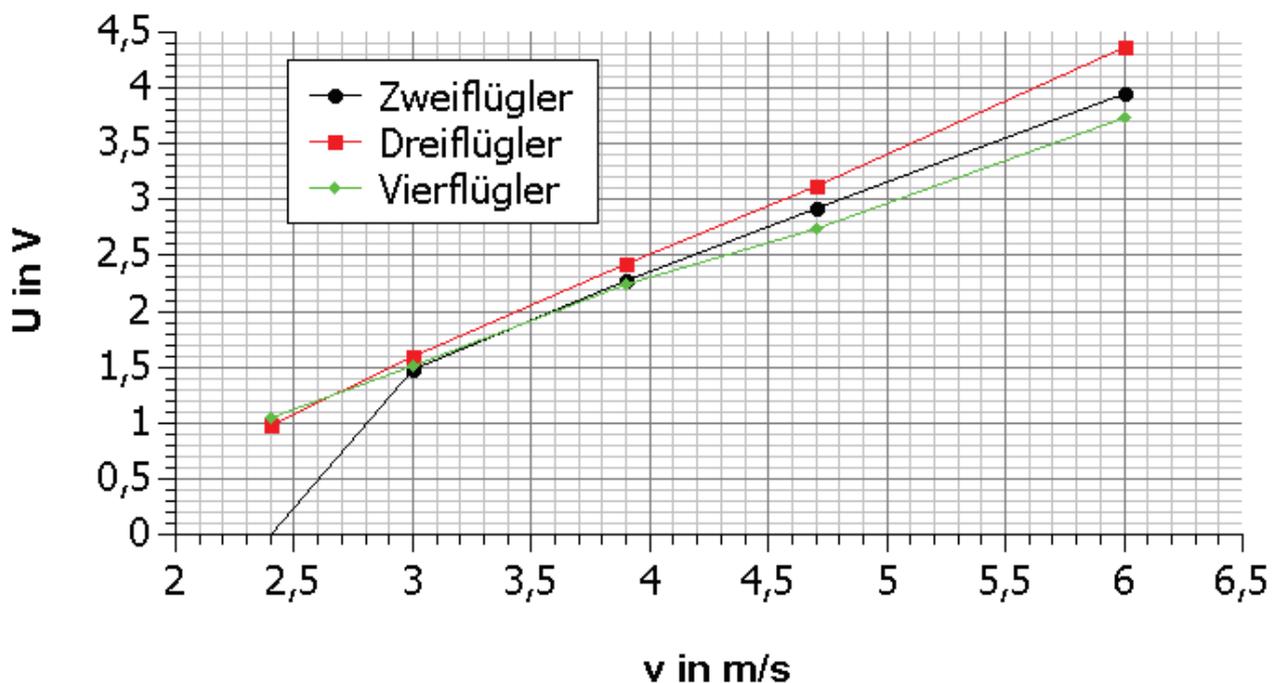


9.2 Vergleich von Zwei-, Drei und Vierblattrotoren (Spannungsmessung)

Auswertung

1. Trage deine Messwerte in die entsprechenden Diagramme ein.
2. Mit welcher Anzahl an Rotorblättern kann die größte Spannung erzeugt werden, welche erzeugt die geringste? Welcher Zusammenhang zwischen der Anzahl der Rotorblätter und der erzeugten Spannung lässt sich vermuten?
3. Für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten verändert sich auch die am Windgenerator erzeugte Spannung. Erkläre mithilfe deiner Ergebnisse warum bevorzugt Dreiblattrotoren und nicht Ein-, Zwei- oder Vierblattrotoren zur Energieerzeugung eingesetzt werden.

1.



2.

Die größte Spannung wurde (hier) mit dem Dreiblattrotor erzeugt. Sie ist allerdings fast genauso groß, wie beim Vierblattrotor. (Es wäre im Experiment möglich, dass der Vierblattrotor die maximale Spannung erbringt)

Es kann vermutet werden, dass die Leistung mit steigender Blattanzahl zunimmt oder dass bei 3 Blättern ein Leistungsmaximum (-optimum) zu finden ist.

3.

Der Unterschied in der Windenergienutzung zwischen Drei- und Vierblattrotoren ist gering. Ein Zweiblattrotor kann nur eine geringere Spannung erzeugen und startet erst bei hohen Windgeschwindigkeiten. Für einen Dreiblattrotor wird weniger Material benötigt, als für einen Vierblattrotor. Deshalb werden hauptsächlich Dreiblattrotoren für die Windkraftnutzung eingesetzt.

Experiment 9.3

Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (Leistungsmessung)

Inhalte des Experimentes:

Bei diesem Experiment werden Rotoren mit zwei, drei und vier Rotorblättern verglichen, indem die erzeugte Leistung am Generator untersucht wird. Zum Austausch der Rotoren wird die jeweilige Anzahl an Rotorblättern auf die Nabe gesteckt (Hinweise zum Austausch der Rotorblätter siehe Seite 32). Zu Beginn werden für einen gegebenen Abstand Spannung und Stromstärke am Widerstandsmodul bestimmt. Anschließend wiederholt man die Untersuchung für verschiedene Abstände zwischen Winderzeuger und Windgenerator. Die Messwerte werden in die Tabelle eingetragen. In der Auswertung berechnen die Schüler die erreichte Leistung an jedem Messpunkt und tragen die Daten in die vorgegebenen Diagramme ein. Zum Schluss sollen die Ergebnisse ausgewertet und beschrieben werden, mit welcher Zahl von Rotorflügeln sich die höchsten Leistungen erzielen lassen.

Erklärung der Ergebnisse

Der Zweiblattrotor erzeugt die geringste Leistung am Generator. Drei- und Vierblattrotor erreichen nahezu gleich große Leistungswerte, wobei der Vierblattrotor vor allem bei höheren Windgeschwindigkeiten geringfügig bessere Ergebnisse liefert. Diese Erscheinung ist ein Resultat der verstärkten Auftriebskraft bei einem Rotor mit größerer Flügelzahl. An jedem einzelnen Rotorblatt wirkt die Auftriebskraft, welche die Drehbewegung des Rotors verstärkt. Diese Kräfte addieren sich je mehr Rotorblätter am Windrotor befestigt sind²⁰. Am Zweiblattrotor wirkt also die geringste Auftriebskraft, er bewirkt somit auch die langsamste Drehung und erzeugt die geringste Leistung. Der Dreiblattrotor erzeugt eine größere Leistung. Am Vierblattrotor wird eine gleichgroße oder geringfügig größere Spannung erzeugt als bei einem Dreiblattrotor, was vor allem aus der Windgeschwindigkeit am Rotor folgt. Bei größerer Windgeschwindigkeit sind die Unterschiede zwischen Drei- und Vierblattrotor geringer, da die Leistung der Windkraftanlage sich ihrem Sättigungswert nähert. Dieser Sättigungswert ist umso höher, je weniger Rotorblätter vorhanden sind. Eine Windkraftanlage mit zwei Rotorblättern kann also bei höherer Windgeschwindigkeit betrieben werden, als eine Anlage mit drei oder vier Rotorblättern, da die Wirbelbildung, die durch den Strömungsabriss zustande kommt, erst bei höheren Windgeschwindigkeiten zum Abbremsen des Rotors führt. Je mehr Rotorblätter, desto mehr Verwirbelungen und desto stärkeres Abbremsen bei gleicher Windgeschwindigkeit. In Gebieten mit sehr hoher Windgeschwindigkeit sind Rotoren mit zwei Rotorblättern auch sinnvoll einsetzbar.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 7 bis 9**. Auch die Nutzung in einem **Projekt zur Windenergie** oder zu regenerativen Energien ist zu empfehlen. Es werden die verschiedenen Rotorarten anschaulich miteinander verglichen und die Ergebnisse auf die aktuelle Nutzung von Windkraftanlagen übertragen. Die Schüler festigen ihre Kenntnisse im **Umgang mit Messgeräten** und in der **Interpretation von**

²⁰ Dieser Zusammenhang gilt nicht für beliebig viele Rotorblätter, da bei zu großer Anzahl auch der Luftwiderstand sehr groß ist und damit die erzeugte Drehbewegung abgebremst wird. Für zwei, drei und vier Rotorblätter ist der Zusammenhang allerdings gegeben

Diagrammen. Sie übertragen ihre Erkenntnisse aus dem Experiment auf Sachverhalte an realen Windkraftanlagen und üben sich dabei im **Umgang mit der Fachsprache** des Physikunterrichtes.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Der Austausch der Rotorblätter darf nur bei ausgeschaltetem Winderzeuger durchgeführt werden, da sonst Verletzungsgefahr besteht.
- Zum Starten des Zweiblattrotors ist unter Umständen ein sanfter Stoß erforderlich, um die Trägheit des Generators zu überwinden (wird empfohlen).
- Beim Messen der Spannung und Stromstärke sollte darauf geachtet werden, dass die Messwerte erst dann abgelesen und in die Tabelle eingetragen werden, wenn sich der angezeigte Wert am Messgerät nicht mehr ändert.
- Wird die Windgeschwindigkeit beim Experiment selbst mithilfe des Windgeschwindigkeitsmessers bestimmt, sind die Hinweise auf Seite 32 zu beachten

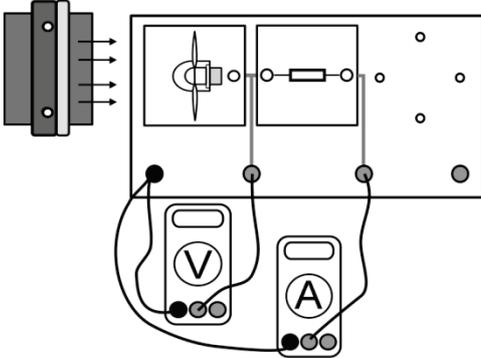


9.3 Vergleich von Zwei-, Drei und Vierblattrotoren (Leistungsmessung)

Aufgabe

Untersuche die Leistung des Windgenerators bei unterschiedlicher Anzahl von Rotorblättern.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (12 V)
- Windgeneratormodul (mit zwei, drei und vier Rotorblättern, optimiertes Profil, 25°)
- Widerstandsmodul
- Kabel
- Spannungsmessgerät
- Strommessgerät

Vorbemerkung

Die einzelnen Rotoren brauchen unterschiedlich viel Zeit, bis sie eine konstante Umfangsgeschwindigkeit und damit eine konstante Spannung erzeugen. Die Messwerte sollten erst notiert werden, wenn sie sich nicht mehr ändern.

Durchführung

1. Stecke den Zweiblattrotor auf den Windgenerator, stelle einen Abstand von 5 cm zwischen Rotor und Winderzeuger ein und schalte den Winderzeuger ein.
2. Miss die erzeugte Spannung und Stromstärke am Widerstandsmodul für unterschiedliche Abstände (5, 10, 15, 20, 25cm) und trage deine Werte in die Tabelle ein.
3. Wiederhole deine Messung mit dem Dreiblatt- und dem Vierblattrotor

Messwerte

Zweiblattrotor:

d in cm	5	10	15	20	25
v in m/s	6,2	5,45	5,1	4,85	4,6
U in V	1,59	1,63	1,48	1,29	1,04
I in mA	46,7	47,2	43,5	37,5	31,6
P in mW	74,2	76,9	64,3	48,3	32,8

Dreiblattrotor:

d in cm	5	10	15	20	25
v in m/s	6,2	5,45	5,1	4,85	4,6
U in V	2,06	1,96	1,80	1,60	1,46
I in mA	59,3	57,0	52,9	46,9	41,8
P in mW	122,1	111,7	95,2	75,0	61,0



9.3 Vergleich von Zwei-, Drei und Vierblattrotoren (Leistungsmessung)

Messwerte

Vierblattrotor:

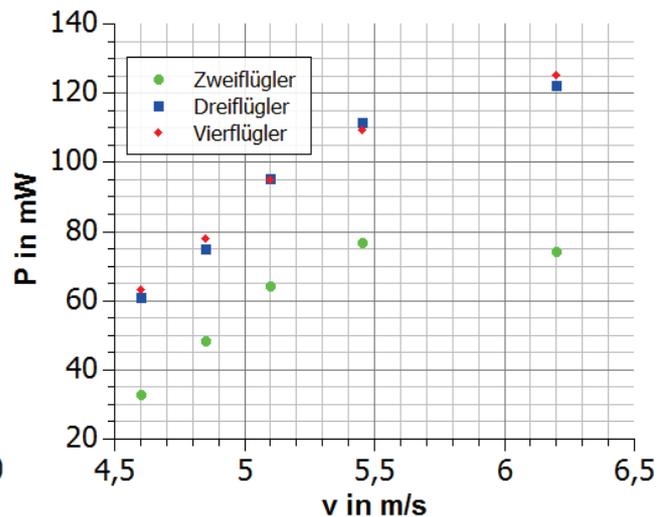
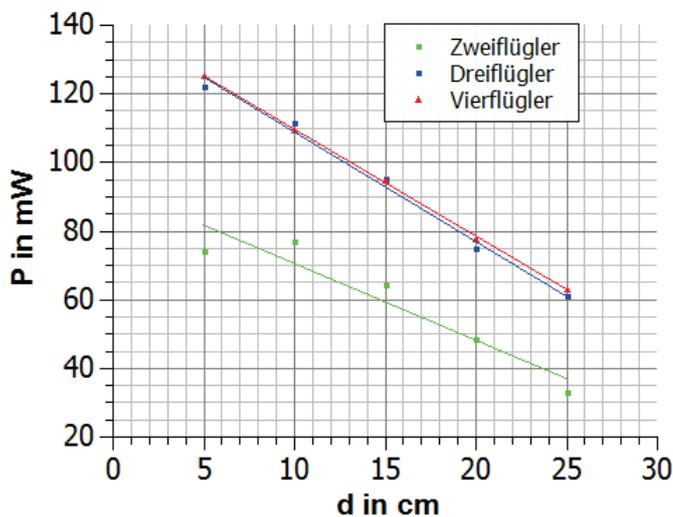
d in cm	5	10	15	20	25
v in m/s	6,2	5,45	5,1	4,85	4,6
U in V	2,08	1,94	1,81	1,64	1,48
I in mA	60,2	56,4	52,5	47,5	42,6
P in mW	125,2	109,4	95,0	77,9	63,0

Die Werte für die Geschwindigkeit kannst du mit dem Windstärkemessgerät bestimmen oder aus dem entsprechenden Diagramm (siehe Seite 33) ablesen.

Auswertung

1. Trage deine Messwerte in die entsprechenden Diagramme ein.
2. Mit welcher Anzahl an Rotorblättern kann die größte Leistung erzeugt werden, welche erzeugt die geringste? Welcher Zusammenhang zwischen der Anzahl der Rotorblätter und der erzeugten Leistung lässt sich vermuten?

1.



2.

Die größte Leistung wurde (hier) mit dem Vierblattrotor erzeugt. Sie ist allerdings fast genauso groß, wie beim Dreiblattrotor. (Es wäre im Experiment möglich, dass der Dreiblattrotor die maximale Leistung erbringt) Mit dem Zweiflügler lassen sich nur deutlich geringere Leistungen erzielen.

Es kann vermutet werden, dass die Leistung mit steigender Blattanzahl zunimmt oder dass bei 4 Blättern ein Leistungsmaximum (-optimum) zu finden ist.

Experiment 10

Kennlinien einer Windkraftanlage

Inhalte des Experimentes:

Bei diesem Experiment bestimmen die Schüler die Strom-Spannungskennlinie der Windkraftanlage. Mithilfe eines Potentiometers wird der an die Windkraftanlage angeschlossene Widerstand verändert, die jeweiligen Messwerte für Spannung und Stromstärke werden bestimmt und in ein Diagramm eingetragen. Aus den ermittelten Werten wird die jeweilige Leistung bestimmt und diese in Abhängigkeit von Spannung und angeschlossenem Widerstand in jeweils ein Diagramm eingetragen. Mithilfe ihrer Erkenntnisse sollen die Schüler Konsequenzen für den Betrieb realer Windkraftanlagen formulieren. Weiterhin sollen Einflüsse auf die Leistung einer Windkraftanlage von den Schülern diskutiert werden.

Erklärung der Ergebnisse

Die Strom-Spannungskennlinie beschreibt eine Kurve, die bei einem bestimmten Spannungswert ein Maximum der Stromstärke erreicht. Mit dem größten Widerstand wird die größte Spannung erzeugt und es fließt der geringste Strom. Verringert man nun den Widerstand, so verringert sich die Spannung und es kann eine größere Stromstärke gemessen werden. Wird der Widerstand weiter verkleinert, verringert sich die Spannung durch die Selbstinduktion in den Generatorspulen bis zu einem bestimmten Wert. Ab diesem Spannungswert (mit zugehörigem Widerstandswert) nimmt die Selbstinduktion in der Spule so stark zu, dass der durch die Induktionsspannung entstehende Induktionsstrom den Gesamtstrom wieder verringert. Dieser Zusammenhang lässt ein Leistungsmaximum vermuten. Aus dem Diagramm mit dargestellter Leistung in Abhängigkeit der Spannung kann ein Leistungsmaximum bei einer bestimmten erzeugten Spannung festgestellt werden. Dieser Wert wird durch Einstellen des Potentiometers auf einen bestimmten Widerstand erreicht. Aus dem Diagramm mit dargestellter Leistung in Abhängigkeit des Widerstandes lässt sich ein entsprechender Widerstandswert für den Generator bestimmen, bei dem die Leistung der Windkraftanlage maximal ist. Für reale Windkraftanlagen kann aus diesen Erkenntnissen geschlussfolgert werden, dass für den Betrieb mit maximaler Leistung ein bestimmter fester Widerstand angeschlossen werden muss. Dieser entspricht dabei gerade dem inneren Widerstand des Spulenkörpers im Generator.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 8 bis 9**. Für den Einsatz eignet sich ein Themenbereich, der die **Kennlinien verschiedener Bauelemente** vergleicht und untersucht. Auch die Nutzung in einem **Projekt zur Windenergie** oder zu regenerativen Energien ist zu empfehlen. Es werden Zusammenhänge zwischen Windenergienutzung und Aufbau der Windkraftanlage thematisiert. Die Schüler verbessern ihre **Fertigkeiten im Umgang mit Messgeräten** und führen ein vollständiges Protokoll. Aufgrund der **komplexen Zusammenhänge** zwischen Strom, Spannung, Leistung und Widerstand ist auch ein Einsatz des Experimentes in der **Sekundarstufe II** denkbar.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Es ist darauf zu achten, dass bei Drehen des Potentiometers kein zu kleiner Widerstand eingestellt wird. Der damit verbundene hohe Stromfluss kann unter

Umständen zum Zerstören des Strommessgerätes führen. Es empfiehlt sich ein Messintervall vom maximalen Spannungswert bis zum Wert 0,4 V.

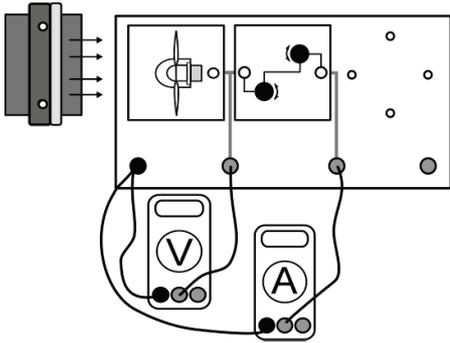


10. Kennlinien einer Windkraftanlage

Aufgabe

Nimm die Strom-Spannungskennlinie des Windrotors auf. Bestimme außerdem den Lastwiderstand, bei dem die maximale Leistung erreicht wird.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (12 V)
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- Potentiometermodul
- Kabel
- Spannungsmessgerät
- Strommessgerät

Vorbemerkung

Bevor mit der Messung begonnen wird, muss das Potentiometermodul auf den größtmöglichen Widerstandswert eingestellt werden.

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Stelle mithilfe des Potentiometermoduls verschiedene Spannungswerte ein und miss die jeweilige Stromstärke. Dazu wird zunächst das 1k Ω -Poti und danach das 100 Ω -Poti bis zum Maximum gedreht. Verringere die Spannung in Schritten von je ca. 0,2V und trage deine Messwerte in die Tabelle ein. Warte nach jeder neuen Einstellung des Potentiometers bis Spannung und Stromstärke konstant sind!

Messwerte

U in V	3,0	2,90	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,1	2,0
I in mA	4,5	7,6	11,7	14,0	17,0	20,5	24,6	28,2	31,2	34,7	36,8
R in Ω	666,6	381,58	239,32	192,86	152,94	121,95	97,56	81,56	70,51	60,52	54,35
P in mW	13,5	22,04	32,76	37,8	44,2	51,25	59,04	64,86	68,64	72,87	73,6

U in V	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,2	1,0	0,8	0,6	0,4
I in mA	40,9	44,2	46,1	49,2	52,2	54,7	58,1	61,5	63,1	63,5	57,4
R in Ω	46,45	40,72	36,88	32,52	28,74	25,59	20,65	16,26	12,68	9,45	6,97
P in mW	77,71	79,56	78,37	78,72	78,3	76,58	69,72	61,5	50,48	38,1	22,96

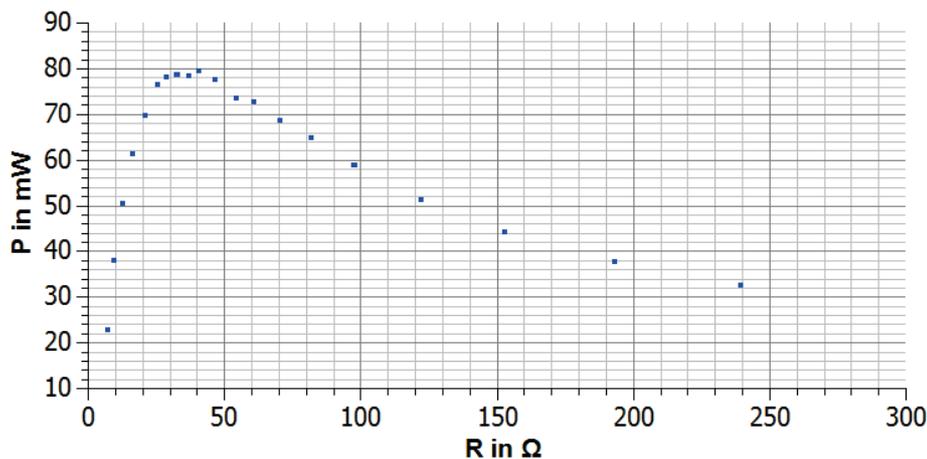
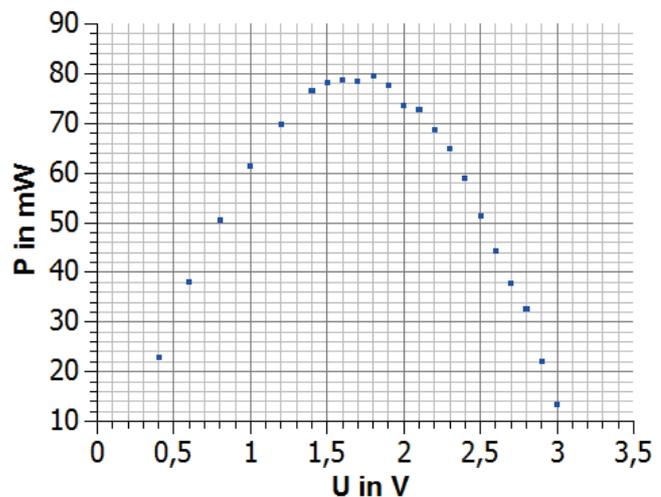
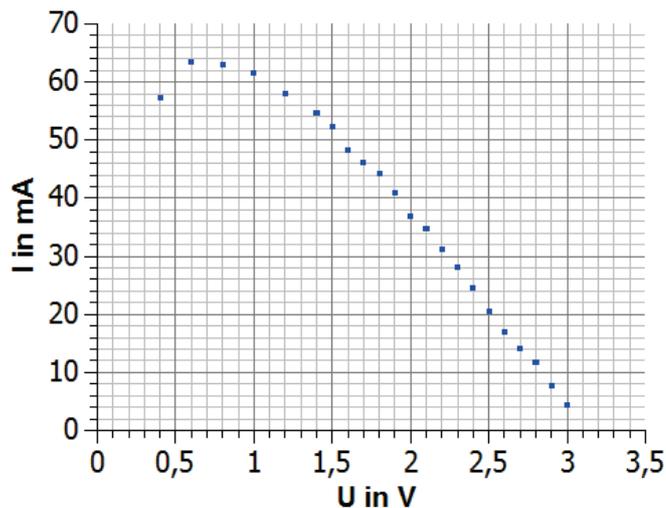


10. Kennlinien einer Windkraftanlage

Auswertung

1. Trage deine Messwertpaare in die entsprechenden Diagramme ein.
2. Bestimme aus dem Diagramm den Spannungswert, bei dem die Leistung der Windkraftanlage am größten ist. Wie groß ist der Lastwiderstand, bei dem die maximale Leistung am Generator erreicht wird?
3. Welche Konsequenz ergibt sich aus diesen Ergebnissen für den Betrieb realer Windkraftanlagen?
4. Die maximale Leistung einer Windkraftanlage hängt also vom Lastwiderstand am Generator ab. Nenne mögliche Effekte oder physikalische Größen, die ebenfalls einen Einfluss auf die Leistung einer Windkraftanlage haben könnten.

1.



2. $U_{\max} = 1,8V$ $R_{\max} = 40,72\Omega$

3.

Eine Windkraftanlage erreicht ihre maximale Leistung, wenn der Rotor eine bestimmte Spannung erzeugt. Eine Windkraftanlage erreicht ihre maximale Leistung, wenn sie durch einen bestimmten Widerstand belastet wird

4.

- Rotorblattform
- Windgeschwindigkeit
- Rotorgröße

Experiment 11.1

Einfluss der Windrichtung (phänomenologisch)

Inhalte des Experimentes:

Es soll die Abhängigkeit der Windrichtung auf die Leistung einer Windkraftanlage untersucht werden, indem die Helligkeit einer durch sie betriebenen Leuchtdiode untersucht wird. Dazu wird die Leuchtdiode zuerst durch einen frontal ausgerichteten Rotor zum Leuchten gebracht. Durch vorsichtige Drehung des Windgenerators wird die Helligkeit der Leuchtdiode verändert. Der Schüler notiert die Beobachtungen und trifft in der Auswertung eine Aussage über die abgebildeten Windrotoren. Diese folgt direkt aus den Ergebnissen des Experimentes.

Erklärung der Ergebnisse

Wird die Windkraftanlage nicht senkrecht durch den Wind angeströmt, so verringert sich deren Angriffsfläche. Durch die verkleinerte Fläche und die andere Strömungsrichtung verändert sich ebenfalls die resultierende Kraftwirkung auf die Anlage. Die Drehbewegung des Flügelrades verringert sich mit zunehmendem Drehwinkel und damit auch die Leistung der Windkraftanlage, die die Leuchtdiode dann nicht mehr zum Leuchten bringt.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 5 und 6** des Anfangsunterrichtes in Physik oder naturwissenschaftlichen Grundlagenfächern. Es ist für das Durchführen **erster Experimente im Unterricht** geeignet, da der Aufbau sehr übersichtlich ist. Den Schülern wird spielerisch die Abhängigkeit der Windkraftanlage von der vorherrschenden Windrichtung nahe gebracht.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Der Versuch ist statt mit einer Leuchtdiode auch mithilfe des Glühlampenmoduls durchführbar. Allerdings sollte die Glühlampe erst eingesetzt werden, wenn der Rotor sich bereits zu drehen beginnt. Es ist sonst möglich, dass die Windkraftanlage nicht startet.

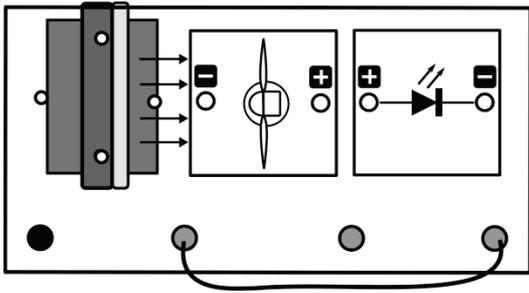


11.1 Einfluss der Windrichtung (phänomenologisch)

Aufgabe

Untersuche, wie sich die Helligkeit einer Leuchtdiode ändert, wenn die Richtung des Windes auf den Windgenerator verändert wird.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (9V)
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- LED-Modul
- Kabel

Durchführung

1. Baue den Versuch nach obiger Versuchsanordnung auf. Hinweise dazu findest du auf Seite 32.
2. Schalte den Winderzeuger mit einer eingestellten Spannung von 9V ein.
3. Drehe den Windgenerator vorsichtig nach rechts und links und beobachte die Leuchtdiode. Notiere deine Beobachtungen.

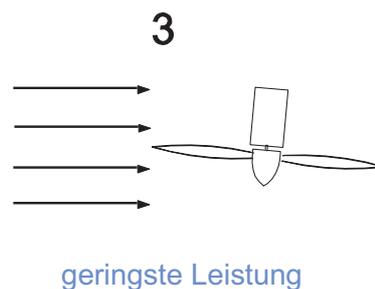
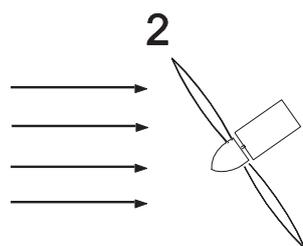
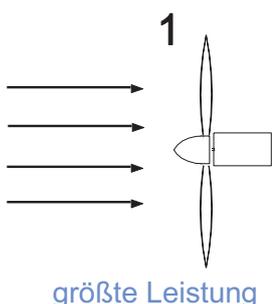
ACHTUNG! Beim Verdrehen des Windgenerators nicht in die Rotorblätter fassen – **Verletzungsgefahr!** –

Beobachtung

Die Leuchtdiode leuchtet weniger hell, wenn der eingestellte Winkel größer ist. Ab einem Winkel von 30° leuchtet die Leuchtdiode nicht mehr.

Auswertung

In den Abbildungen sind Windkraftanlagen dargestellt. Die Pfeile kennzeichnen die Richtung des Luftstromes (Windrichtung). Welche der Anlagen kann die größte Leistung erzeugen, welche die geringste? Begründe mithilfe deiner Beobachtungen aus dem Experiment.



Antwort: Die Luft strömt nur nicht mehr auf kürzestem Weg an den Rotorblättern vorbei und die Angriffsfläche am Rotor ist geringer, wenn der Winkel (die Richtung der Luft) sich ändert

Experiment 11.2

Einfluss der Windrichtung (Spannungsmessung)

Inhalte des Experimentes:

Es soll die Abhängigkeit der Windrichtung auf die erzeugte Spannung einer Windkraftanlage untersucht werden. Für verschiedene Drehwinkel werden die gemessenen Spannungswerte notiert. Zusätzlich zum Drehwinkel wird noch der Kosinus des Drehwinkels berechnet und die Schüler tragen ihre Messwerte in die jeweiligen Diagramme ein. Anschließend soll die Abhängigkeit der Spannung am Windrotor vom Drehwinkel beschrieben werden. Als kreative Aufgabe überlegen sich die Schüler, wie eine Windkraftanlage aufgebaut sein muss, um bei jeder beliebigen Windrichtung die maximale Leistung zu erzeugen.

Erklärung der Ergebnisse

Wird die Windkraftanlage nicht senkrecht durch den Wind angeströmt, so verringert sich deren Angriffsfläche. Durch die verkleinerte Fläche und die andere Strömungsrichtung verändert sich ebenfalls die resultierende Kraftwirkung auf die Anlage. Die Drehbewegung des Flügelrades verringert sich mit zunehmendem Drehwinkel. Der Windrotor dreht sich langsamer und die Spannung, die am Generator entsteht, ist geringer.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 7 bis 9**. Es ist ebenfalls für den Einsatz in einem **Projekt zur Windenergie** oder zu regenerativen Energien zu empfehlen. Die Schüler üben ihre Fertigkeiten im **Umgang mit Messgeräten**. Es wird die Abhängigkeit zwischen Leistung und Windrichtung an einer Windkraftanlage untersucht und die Schüler entwickeln **eigene Lösungen** zu einem vorgegebenen Problem der Thematik.

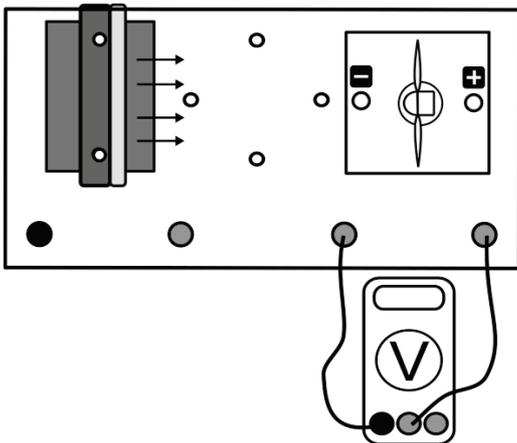


11.2 Einfluss der Windrichtung (Spannungsmessung)

Aufgabe

Untersuche die Spannung, die ein Windgenerator liefert, wenn sich die Richtung der Luftströmung auf den Rotor ändert.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (12 V)
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25° (Flügel: optimiertes Profil)
- Kabel
- Spannungsmessgerät

Vorbemerkung

ACHTUNG! Beim Verdrehen des Standfußes nicht in die Rotorblätter fassen – **Verletzungsgefahr!** – Zum Verdrehen sollte der Winderzeuger auch abgeschaltet werden.

Durchführung

1. Stelle den Drehwinkel zu Beginn auf 0° ein.
2. Schalte des Stromversorgungsgerät ein und miss die entsprechende Spannung am Generator. Trage deinen Messwert in die Tabelle ein und schalte gegebenenfalls die Stromversorgung wieder ab.
3. Verdrehe nun den Windgenerator vorsichtig um 10° . Wiederhole deine Messungen mit den entsprechenden Winkeleinstellungen und trage sämtliche Messwerte in die Tabelle ein.

Messwerte

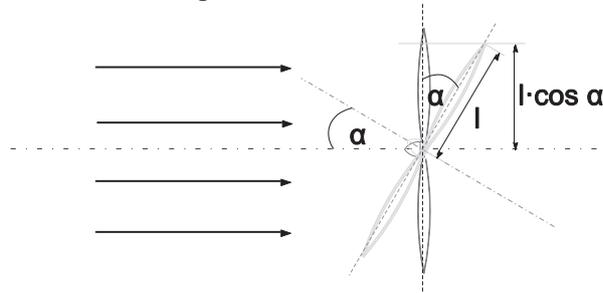
α in $^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\cos \alpha$	1	0,98	0,94	0,87	0,77	0,64	0,5	0,34	0,17	0
U in V	3,11	3,07	2,84	2,64	2,20	1,58	0,25	0	0	0



11.2 Einfluss der Windrichtung (Spannungsmessung)

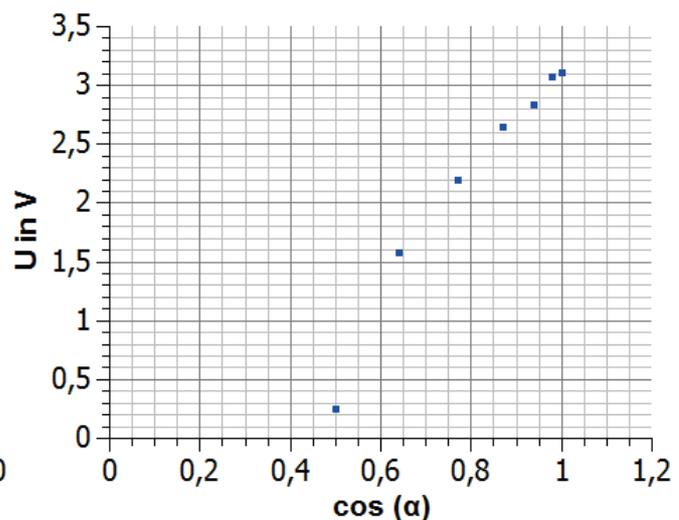
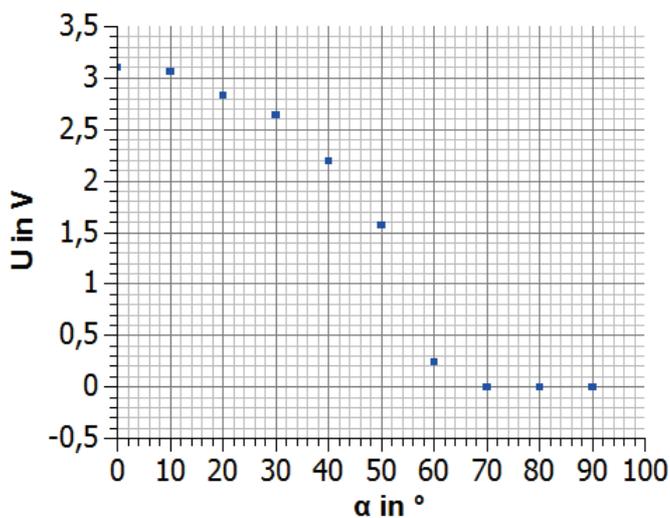
Auswertung

1. Trage die Messwerte in die entsprechenden Diagramme ein.
2. Die Größe $\cos \alpha$ ist ein Maß für die Angriffsfläche des Windes am Windrotor (wie in der Abbildung dargestellt). Beschreibe die Abhängigkeit der Spannung vom Drehwinkel und der Angriffsfläche des Windes am Windrotor, die durch $\cos \alpha$ dargestellt wird.



3. Die Richtung, aus der strömende Luft auf eine Windkraftanlage trifft, ist für die erzeugte Spannung von Bedeutung. Beschreibe eine Möglichkeit der Veränderung einer Anlage um immer die maximale Spannung erzeugen zu können.

1.



2.

Die Spannung nimmt mit zunehmendem Drehwinkel ab. Der Kurvenverlauf gleicht einer Kosinusfunktion. Im U-cos α -Diagramm ist ein annähernd linearer Zusammenhang erkennbar. Die Spannung nimmt also mit abnehmender Angriffsfläche linear ab.

3.

Um immer die maximale Spannung zu erzeugen, muss der Rotor der Windkraftanlage bei wechselnder Windrichtung gedreht werden. Der Rotor sollte jeweils so eingestellt werden, dass der Wind senkrecht auf das Flügelrad auftrifft.

Experiment 11.3

Einfluss der Windrichtung (Leistungsmessung)

Inhalte des Experimentes:

Es soll die Abhängigkeit der Windrichtung auf die erzeugte Leistung einer Windkraftanlage bei angeschlossenem Widerstand untersucht werden. Für verschiedene Drehwinkel werden die gemessenen Spannungs- und Stromstärkewerte notiert. Zusätzlich zum Drehwinkel wird noch der Kosinus des Drehwinkels berechnet und die Schüler tragen ihre Messwerte in die jeweiligen Diagramme ein. Der Zusammenhang zwischen Winkel (bzw. Kosinus des Winkels) und der Fläche des Windrotors soll von den Schülern selbstständig erarbeitet werden. (Kenntnisse zu trigonometrischen Funktionen werden für die Auswertung vorausgesetzt.) Weiterhin sollen die Schüler eigene Ideen zur technischen Umsetzung einer Vorrichtung formulieren, die die Windkraftanlage immer ideal zum Wind ausrichtet. Dabei soll der Aufbau einer Windkraftanlage recherchiert und in die Überlegungen mit einbezogen werden. Es werden kreative Antwortmöglichkeiten und damit eine Differenzierung ermöglicht.

Erklärung der Ergebnisse

Wird die Windkraftanlage nicht senkrecht durch den Wind angeströmt, so verringert sich deren Angriffsfläche. Durch die verkleinerte Fläche (sie berechnet sich als Durchmesser des Flügels multipliziert mit Kosinus des Drehwinkels) und die andere Strömungsrichtung verändert sich ebenfalls die resultierende Kraftwirkung auf die Anlage. Die Drehbewegung des Flügelrades verringert sich mit zunehmendem Drehwinkel. Der Windrotor dreht sich langsamer, die Spannung am Generator und damit ist auch die erzeugte Leistung der Windkraftanlage geringer.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 8 bis 9**. Für die Auswertung werden Kenntnisse zu trigonometrischen Funktionen vorausgesetzt. Das Experiment eignet sich ebenfalls für den Einsatz in einem **Projekt zur Windenergie**. Die Schüler üben ihre Fertigkeiten im **Umgang mit Messgeräten**. Es wird die Abhängigkeit zwischen Leistung und Windrichtung an einer Windkraftanlage (auch theoretisch) untersucht und die Schüler entwickeln **eigene Lösungen** zu einer vorgegebenen Problemstellung der Thematik und sind gefordert eigenständig gesuchte Informationen selbstständig zu nutzen.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Sollte den Schülern die theoretische Bestimmung des Zusammenhangs zwischen Rotorfläche und dem Kosinus des Drehwinkels zu schwierig sein, kann die Abbildung aus Experiment 11.2 den Schülern zusätzlich gegeben werden.

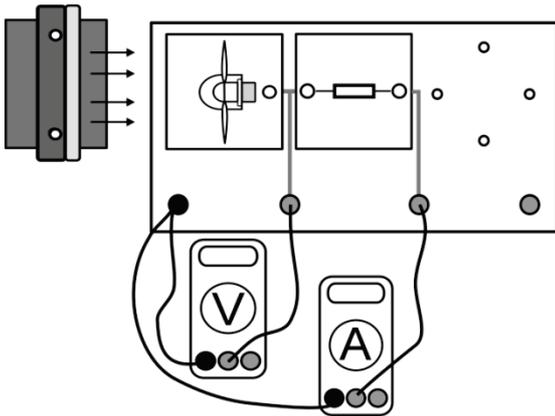


11.3 Einfluss der Windrichtung (Leistungsmessung)

Aufgabe

Untersuche die Leistung des Windrotors, wenn der Wind aus unterschiedlichen Richtungen auf den Windgenerator trifft.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (12 V)
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler 25°(Flügel: optimiertes Profil)
- Widerstandsmodul
- Kabel
- Spannungsmessgerät
- Strommessgerät

Vorbemerkung

ACHTUNG! Beim Verdrehen des Standfußes nicht in die Rotorblätter fassen – **Verletzungsgefahr!** – Zum Verdrehen sollte der Winderzeuger auch abgeschaltet werden.

Durchführung

1. Stelle den Drehwinkel zu Beginn auf 0° ein.
2. Schalte des Stromversorgungsgerät ein und miss Spannung und Stromstärke am Generator. Trage deinen Messwert in die Tabelle ein und schalte gegebenenfalls die Stromversorgung wieder ab.
3. Verdrehe nun den Windgenerator vorsichtig um 10° . Wiederhole deine Messungen mit den entsprechenden Winkeleinstellungen und trage sämtliche Messwerte in die Tabelle ein.

Messwerte

α in $^\circ$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\cos \alpha$	1	0,98	0,94	0,87	0,77	0,64	0,5	0,34	0,17	0
U in V	1,73	1,70	1,59	1,35	0,91	0,23	0	0	0	0
I in mA	44,4	43,6	40,2	35,1	23,3	5,9	0	0	0	0
P in mW	76,812	74,12	63,918	47,385	21,203	1,357	0	0	0	0

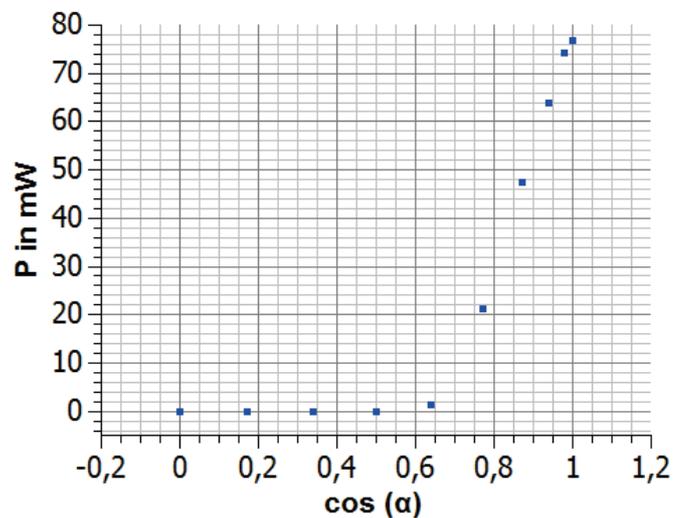
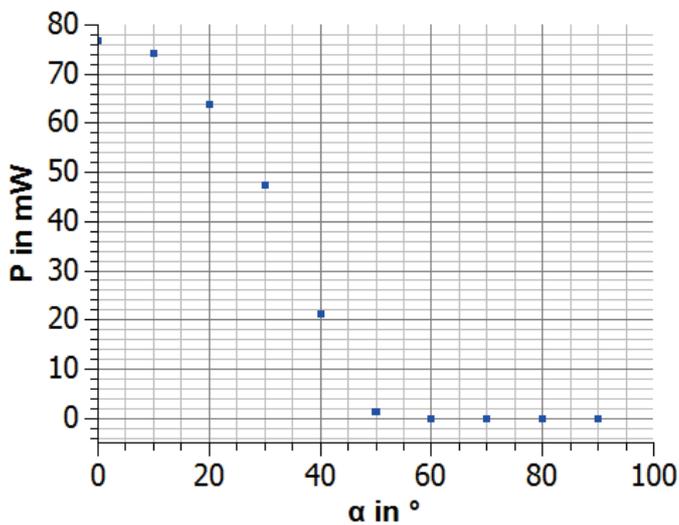


11.3 Einfluss der Windrichtung (Leistungsmessung)

Auswertung

1. Trage die Messwertpaare in die Diagramme ein.
2. Die Größe $\cos \alpha$ ist proportional zu einer bestimmten Fläche der gedrehten Windkraftanlage? Wie könnte man diese Fläche nennen? Beschreibe die Abhängigkeit der Spannung vom Drehwinkel und der genannten Fläche. Fertige dir dazu eine Skizze an.
3. An realen Windkraftanlagen ist es von großer Bedeutung immer die größtmögliche Leistung zu erzeugen. Wie kann man erreichen, dass eine Windkraftanlage immer die maximale Leistung erzeugt? Überlege dir eine Möglichkeit der technischen Umsetzung, wie eine solche Anlage immer optimal zum Wind ausgerichtet sein kann und beschreibe deine Überlegung. Informiere dich dazu über den Aufbau realer Windkraftanlagen

1.



2. eine Skizze ähnlich der Darstellung in Experiment 11.2

3.

Die Leistung der Windkraftanlage nimmt mit zunehmendem Einstellwinkel ab. Der mathematische Zusammenhang gleicht der Kosinusfunktion. Die Leistung nimmt mit abnehmendem $\cos \alpha$ ab. Die Leistung nimmt also mit abnehmender Angriffsfläche ab

Experiment 12.1

Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (phänomenologisch)

Inhalte des Experimentes:

Es soll die Abhängigkeit des Anstellwinkels der Rotorblätter auf die Leistung einer Windkraftanlage untersucht werden, indem die Helligkeit einer durch sie betriebenen Leuchtdiode untersucht wird. Dazu wird zunächst ein Dreiflügel-Rotor mit optimiertem Profil und einem Anstellwinkel von 20° aufgebaut (Der Anstellwinkel ist auf den Naben gekennzeichnet). Die Helligkeit einer Leuchtdiode soll nun beobachtet werden. Im Anschluss wird der Versuch mit den weiteren Anstellwinkeln wiederholt (20° , 25° , 30° , 50° , 90°) und die Ergebnisse in eine Tabelle eingetragen. Durch das Ausfüllen eines Lückentextes sollen die Schüler die Messergebnisse interpretieren.

Erklärung der Ergebnisse

Die Diode leuchtet am hellsten bei einem Anstellwinkel von 25° und ab einem Winkel von 50° leuchtet sie gar nicht mehr. Bei 90° Anstellwinkel ist es kaum möglich, den Rotor überhaupt zum Drehen zu bringen. Je nach Windgeschwindigkeit ergibt sich ein bestimmter optimaler Anstellwinkel aus der aerodynamischen Bauform der Flügel. Bei hohen Anstellwinkeln kommt es zum sogenannten Strömungsabriss an den Rotorflügeln, der zu einer starken Verringerung der Leistung am Windgenerator führt. Im Versuch zeigt sich dies in einer verringerten Helligkeit der Diode bei hohem Anstellwinkel. Genaueres kann in Kapitel 3.5 nachgelesen werden.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 5 und 6** des Anfangsunterrichtes in Physik oder naturwissenschaftlichen Grundlagenfächern. Es ist für das Durchführen **erster Experimente im Unterricht** geeignet, da der Aufbau sehr übersichtlich ist. Den Schülern wird spielerisch die Abhängigkeit der Windkraftanlage vom Anstellwinkel der Rotorblätter nahe gebracht.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Der Versuch ist statt mit einer Leuchtdiode auch mithilfe des Glühlampenmoduls durchführbar. Allerdings sollte die Glühlampe erst eingesetzt werden, wenn der Rotor sich bereits zu drehen beginnt. Es ist sonst möglich, dass die Windkraftanlage nicht startet.
- Der Austausch der Naben darf nur bei ausgeschaltetem Winderzeuger durchgeführt werden, da sonst Verletzungsgefahr besteht.



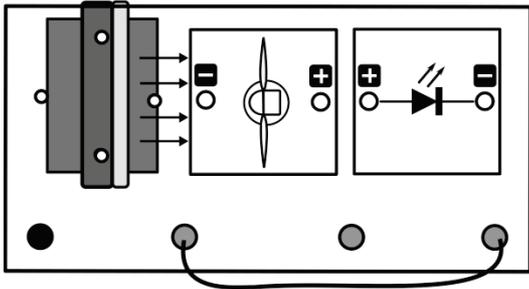
12.1 Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (phänomenologisch)

Aufgabe

Untersuche den Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter gegenüber der Rotorebene auf die Helligkeit einer Leuchtdiode.

Aufbau

Benötigte Geräte



- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (9V)
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler (alle Winkel, optimiertes Profil)
- LED-Modul
- Kabel

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Baue einen Rotor mit 3 Flügeln und einem Anstellwinkel der Blätter von $\alpha = 20^\circ$ auf und stecke ihn auf den Windgenerator.
3. Schalte den Winderzeuger ein und beobachte die Helligkeit der Leuchtdiode. Schiebe den Rotor ggf. an, falls er nicht von allein anläuft. Trage anschließend deine Beobachtungen in die Tabelle ein. Male dazu die entsprechende Anzahl an Feldern aus.
4. Wiederhole die Messung für alle anderen Rotorblattanstellwinkel.
5. Zusatz: Führe die gleiche Messung mit den Flügeln mit flachem Profil durch!

Auswertung

Anstellwinkel	20°	25°	30°	50°	90°	Beispiel
Die Leuchtdiode leuchtet...						 hell schwach gar nicht

Vervollständige nun den angegebenen Text:

Bei größerem Anstellwinkel leuchtet die Leuchtdiode **nicht mehr**. Am stärksten leuchtet die LED bei einem Winkel von **25°**.

Zusatz: Mit dem flachen Profil beobachtet man, **dass die Leuchtdiode nicht leuchtet**.

Experiment 12.2

Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (Spannungsmessung)

Inhalte des Experimentes:

Es soll der Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter auf die erzeugte Spannung am Windgenerator untersucht werden. Dafür werden die Spannungswerte am Windgenerator für verschiedene Anstellwinkel der Rotorflügel gemessen und notiert. In einem Diagramm tragen die Schüler im Anschluss die Spannung über dem Anstellwinkel ab. Es soll der Zusammenhang zwischen beiden Größen untersucht und erklärt, beziehungsweise eine Vermutung geäußert werden, wie sich die Spannung für kleinere Anstellwinkel als 20° verhalten wird.

Erklärung der Ergebnisse

Im Experiment wird die größte Spannung bei einem Anstellwinkel von 20° erreicht, sie unterscheidet sich aber nur minimal von der Spannung bei einem Winkel von 25° . Mit größerem Winkel sinkt die Spannung rapide, bei einem Anstellwinkel von 90° reicht die Windgeschwindigkeit nicht aus, um den Generator zum Drehen zu bringen. Dieser Effekt kommt folgendermaßen zustande: bei großem Anstellwinkel kommt es zum sogenannten Strömungsabriss, wodurch sich der Auftrieb an den Rotorflügel stark verringert (genauer kann im Kapitel 3.5 nachgelesen werden).

Durch den verringerten Auftrieb ändert sich die Leistungsaufnahme des Rotorblattes, was sich im Versuch in einer kleineren Drehzahl und damit verringerter Spannung zeigt. In Versuch 12.4 wird auf die sogenannte Leistungsbegrenzung und Sturmabschaltung eingegangen. Dieser Effekt wird bei realen Windkraftanlagen ausgenutzt, um Beschädigungen an der Windkraftanlage vorzubeugen, zum Beispiel bei Sturm oder sehr hohen Windgeschwindigkeiten.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 7 bis 9**. Es ist ebenfalls für den Einsatz in einem **Projekt zur Windenergie** oder zu regenerativen Energien zu empfehlen. Die Schüler üben ihre Fertigkeiten im **Umgang mit Messgeräten**. Es wird die Abhängigkeit zwischen Spannung und Anstellwinkel von Rotorblättern an einer Windkraftanlage untersucht und die Schüler entwickeln **eigene Lösungen** zu einem vorgegebenen Problem der Thematik.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Der Austausch der Rotorblätter darf nur bei ausgeschaltetem Winderzeuger durchgeführt werden, da sonst Verletzungsgefahr besteht.
- Beim Messen der Spannung sollte darauf geachtet werden, dass die Messwerte erst dann abgelesen und in die Tabelle eingetragen werden, wenn sich der angezeigte Wert am Messgerät nicht mehr ändert.

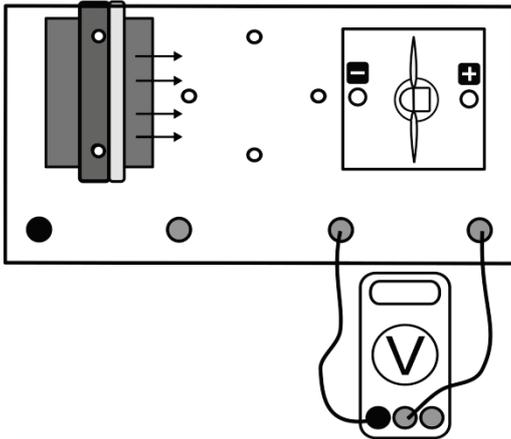


12.2 Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (Spannungsmessung)

Aufgabe

Untersuche den Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter gegenüber der Rotorebene auf die Spannung am Windgenerator.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (12V)
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler (alle Winkel, optimiertes Profil)
- Kabel
- Spannungsmessgerät

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Baue einen Rotor mit 3 Flügeln und einem Anstellwinkel der Blätter von $\alpha = 20^\circ$ auf und stecke ihn auf den Windgenerator.
3. Schalte den Winderzeuger ein und miss die Spannung am Windgenerator. Schiebe den Rotor ggf. an, falls er nicht von allein anläuft. Erfasse die Messwerte in einer Tabelle.
4. Wiederhole die Messung für alle anderen Rotorblattanstellwinkel.

Messwerte

$\alpha / ^\circ$	20	25	30	50	90
U in V	3,05	3,03	2,45	0,87	0V

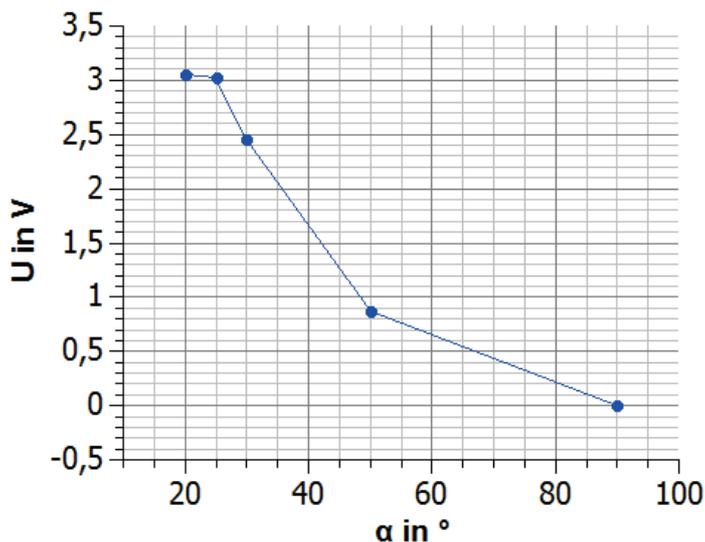


12.2 Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (Spannungsmessung)

Auswertung

1. Trage die Spannung U über dem Anstellwinkel α ab. Falls du auch die flachen Profile verwendest, kennzeichne die Kurve in einer anderen Farbe.
2. Beschreibe den Zusammenhang zwischen Spannung und Anstellwinkel der Rotorblätter.
3. Welchen Verlauf des Graphen erwartest du für Winkel kleiner 20° ?

1.



2.

Mit zunehmendem Anstellwinkel verringert sich die Spannung am Windgenerator. Bei einem Anstellwinkel von 90° dreht sich der Generator nicht mehr. Der Verlauf der Kurve ist nicht linear.

3.

Anhand der Kurve kann erwartet werden, dass sich die Spannung für kleinere Anstellwinkel einem Sättigungswert nähert. Tatsächlich sinkt die Spannung für kleinere Anstellwinkel unter den für das gegebene Rotorprofil maximalen Wert bei einem Winkel von etwa 20° .

Experiment 12.3

Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (Leistungsmessung)

Inhalte des Experimentes:

Die Schüler untersuchen den Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter auf die erzeugte Leistung am Windgenerator. Zunächst werden mit dem optimierten Profil die Spannung und Stromstärke an einem Widerstandsmodul in Abhängigkeit vom Anstellwinkel der Rotorblätter gemessen und in einer Tabelle notiert. Diese Messreihe wird im Anschluss für das flache Flügel-Profil wiederholt. Bei der Auswertung wird die jeweilige Leistung am Windgenerator berechnet und in einem Diagramm über dem Anstellwinkel abgetragen. Die Schüler sollen den Zusammenhang zwischen beiden Größen erkennen und daraus auf den Betrieb realer Windkraftanlagen schließen. Durch die Messung mit unterschiedlichen Profilen wird der Einfluss der Flügelform hervorgehoben, was von den Schülern anhand der Messwerte erkannt und interpretiert werden soll.

Erklärung der Ergebnisse

Im Experiment wird die größte Leistung für das optimierte Profil bei einem Anstellwinkel von 25° erreicht. Bei dem flachen Profil ergibt sich eine minimal bessere Leistung bei einem Winkel von 20° . Mit größerem Winkel sinkt die Spannung rapide, bei einem Anstellwinkel von 90° reicht die Windgeschwindigkeit nicht aus, um den Generator zum Drehen zu bringen. Dieser Effekt kommt folgendermaßen zustande: bei großem Anstellwinkel kommt es zum sogenannten Strömungsabriss, wodurch sich der Auftrieb an den Rotorflügeln stark verringert (genauer kann im Kapitel 3.5 nachgelesen werden). Durch den verringerten Auftrieb ändert sich die Leistungsaufnahme des Rotorblattes, was sich im Versuch in einer kleineren Drehzahl und damit verringerter Leistung zeigt. In Versuch 12.4 wird auf die sogenannte Leistungsbegrenzung und Sturmabschaltung eingegangen. Dieser Effekt wird bei realen Windkraftanlagen ausgenutzt, um Beschädigungen an der Windkraftanlage vorzubeugen, zum Beispiel bei Sturm oder sehr hohen Windgeschwindigkeiten.

Mit dem optimierten Profil können deutlich höhere Leistungen erzielt werden, als mit dem flachen Profil. Die Begründung für dieses Verhalten kann in Kapitel 3.3.2 nachgelesen werden.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 8 bis 9**. Für die Auswertung werden Kenntnisse zu trigonometrischen Funktionen vorausgesetzt. Das Experiment eignet sich ebenfalls für den Einsatz in einem **Projekt zur Windenergie**. Die Schüler üben ihre Fertigkeiten im **Umgang mit Messgeräten**. Es wird die Abhängigkeit zwischen Leistung und Anstellwinkel der Rotoren an einer Windkraftanlage (auch theoretisch) untersucht und die Schüler entwickeln **eigene Lösungen** zu einer vorgegebenen Problemstellung der Thematik und sind gefordert eigenständig gesuchte Informationen selbstständig zu nutzen.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Der Austausch der Rotorblätter darf nur bei ausgeschaltetem Winderzeuger durchgeführt werden, da sonst Verletzungsgefahr besteht.
- Beim Messen der Spannung und Stromstärke sollte darauf geachtet werden, dass die Messwerte erst dann abgelesen und in die Tabelle eingetragen werden, wenn sich der angezeigte Wert am Messgerät nicht mehr ändert.

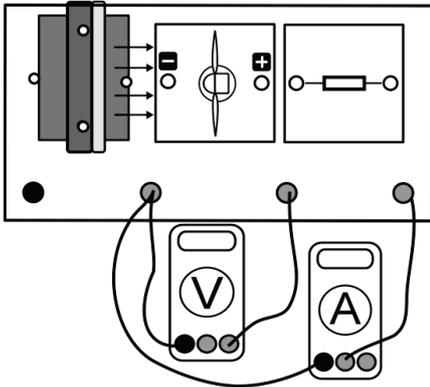


12.3 Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (Leistungsmessung)

Aufgabe

Untersuche den Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter gegenüber der Rotorebene auf die Leistung des Windgenerators.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (12V)
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler (alle Winkel, optimiertes und flaches Profil)
- Widerstandsmodul
- Kabel
- Spannungsmessgerät
- Strommessgerät

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf (Abstand zwischen Winderzeuger und Windgenerator: 20 cm).
2. Baue einen Rotor mit 3 Flügeln und einem Anstellwinkel der Blätter von $\alpha = 20^\circ$ auf und stecke ihn auf den Windgenerator.
3. Schalte den Winderzeuger ein und miss Spannung und Stromstärke am Widerstandsmodul. Schiebe den Rotor ggf. an, falls er nicht von allein anläuft. Erfasse die Messwerte in einer Tabelle.
4. Wiederhole die Messung für alle anderen Rotorblattanstellwinkel.
5. Führe die gleiche Messung mit den Flügeln mit flachem Profil durch!
6. Berechne jeweils die Leistung des Windgenerators.

Messwerte

optimiertes Profil:

$\alpha / ^\circ$	20	25	30	50	90
U in V	1,6	1,73	1,44	0,62	0
I in mA	40,9	44	37,1	13	0
P in mW	65,44	76,12	53,424	8,06	0

flaches Profil:

$\alpha / ^\circ$	20	25	30	50	90
U in V	0,72	0,71	0,61	0,26	0
I in mA	19,1	18,5	16,2	7,0	0
P in mW	13,752	13,135	9,882	1,82	0

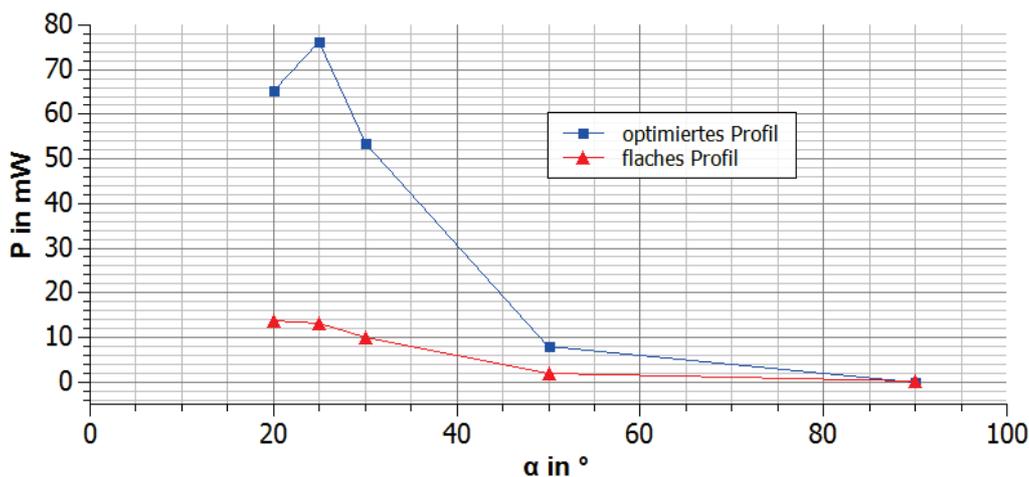


12.3 Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (Leistungsmessung)

Auswertung

1. Trage die Leistung P über dem Anstellwinkel α jeweils für das optimierte und das flache Profil ab.
2. Beschreibe den Zusammenhang zwischen Leistung und Anstellwinkel der Rotorblätter. Welchen Einfluss könnte dieser Effekt auf den Betrieb realer Windkraftanlagen haben?
3. Welchen Einfluss hat die Flügelform?

1.



3.

Mit zunehmendem Anstellwinkel verringert sich die erzeugte Leistung am Windgenerator. Bei dem optimierten Profil gibt es ein Leistungsmaximum bei einem Winkel von 25° . Das liegt an der Profilform Der Flügel. Für reale Windkraftanlagen mit einem optimierten Flügelprofil sollte deshalb ein an das Profil angepasster Anstellwinkel gewählt werden. Bei hohen Windgeschwindigkeiten könnte durch die Wahl eines großen Anstellwinkels die Windkraftanlage gebremst und damit vor Beschädigungen geschützt werden.

3.

Mit dem optimierten Profil können deutlich höhere Leistungen erzielt werden. Bei dem optimierten Profil tritt ein Leistungsmaximum bei einem Anstellwinkel von 25° auf, das ist beim flachen Profil nicht der Fall (hier höchste Leistung bei 20°). Bei einem Anstellwinkel von 90° dreht sich der Generator in beiden Fällen nicht mehr.

Experiment 12.4

Anlaufgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Anstellwinkel

Inhalte des Experimentes:

Die Schüler untersuchen die Anlaufgeschwindigkeit einer Windkraftanlage in Abhängigkeit vom Anstellwinkel der Rotorblätter. Gleichzeitig wird die Spannung am Windgenerator für verschiedene Windgeschwindigkeiten und verschiedene Anstellwinkel untersucht. Zunächst wird für einen festen Anstellwinkel die Windgeschwindigkeit variiert, indem die Spannung am Netzgerät des Winderzeugers verändert wird, beziehungsweise der Abstand des Winderzeugers vom Windgenerator verändert wird. Dabei soll die Anlaufgeschwindigkeit festgestellt werden. Die Schüler sollen danach die am Generator erzeugten Spannungen für verschiedene Windgeschwindigkeiten in einer Tabelle notieren. Diese Messreihe soll anschließend für alle Anstellwinkel wiederholt werden. Mithilfe der Messpunkte sollen die Schüler ein Diagramm erstellen, welches die Abhängigkeit der Spannung am Generator von der Windgeschwindigkeit für verschiedene Anstellwinkel aufzeigt. Anhand dieses Diagrammes sollen Zusammenhänge zwischen diesen beiden Größen erkannt und interpretiert werden. Bei der Interpretation spielen verschiedene Größen, wie die Anlaufgeschwindigkeit und der Anstellwinkel eine Rolle. Zuletzt soll der Schüler erkennen, wie man diese Effekte bei realen Windkraftanlagen nutzen kann.

Erklärung der Ergebnisse

Die Anlaufgeschwindigkeit ist für größere Anstellwinkel niedriger, auch wenn die tatsächlich erzielte Leistung (hier Spannung) bei höheren Windgeschwindigkeiten für den niedrigeren Anstellwinkel größer ist. Im Experiment wird bei höheren Windgeschwindigkeiten die größte Spannung bei einem Anstellwinkel von 20° erreicht. Mit größerem Anstellwinkel sinkt die Spannung rapide, bei einem Anstellwinkel von 90° dreht der Generator sich kaum, beziehungsweise erst bei sehr hoher Windgeschwindigkeit (mit niedriger Drehzahl!). Dieser Effekt kommt folgendermaßen zustande: bei großem Anstellwinkel kommt es zum sogenannten Strömungsabriss, wodurch sich der Auftrieb an den Rotorflügel stark verringert (genauer kann im Kapitel 3.5 nachgelesen werden). Durch den verringerten Auftrieb ändert sich die Leistungsaufnahme des Rotorblattes, was sich im Versuch in einer kleineren Drehzahl und damit verringerter Spannung am Windgenerator zeigt. Dieser Effekt wird bei realen Windkraftanlagen ausgenutzt, um Beschädigungen an der Windkraftanlage vorzubeugen, zum Beispiel bei Sturm oder sehr hohen Windgeschwindigkeiten (Leistungsbegrenzung, Pitch-Regelung siehe Kapitel 3.5)

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 8 bis 9**. Für die Auswertung werden Kenntnisse zu trigonometrischen Funktionen vorausgesetzt. Das Experiment eignet sich ebenfalls für den Einsatz in einem **Projekt zur Windenergie**. Die Schüler üben ihre Fertigkeiten im **Umgang mit Messgeräten**. Es wird die Abhängigkeit zwischen Spannung und Anstellwinkel der Rotoren an einer Windkraftanlage (auch theoretisch) untersucht und die Schüler entwickeln **eigene Lösungen** zu einer vorgegebenen Problemstellung der Thematik und sind gefordert eigenständig gesuchte Informationen selbstständig zu nutzen.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Der Austausch der Rotorblätter darf nur bei ausgeschaltetem Winderzeuger durchgeführt werden, da sonst Verletzungsgefahr besteht.
- Beim Messen der Spannung und Stromstärke sollte darauf geachtet werden, dass die Messwerte erst dann abgelesen und in die Tabelle eingetragen werden, wenn sich der angezeigte Wert am Messgerät nicht mehr ändert.

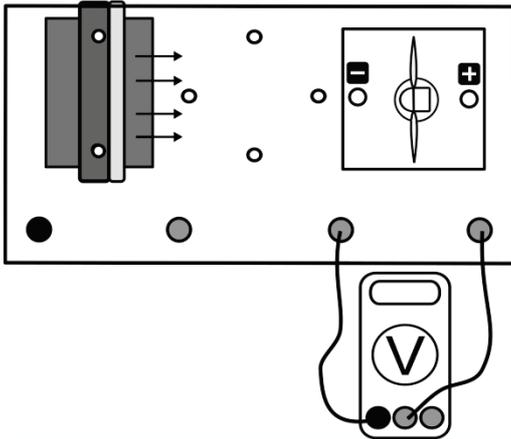


12.4 Anlaufgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Anstellwinkel der Rotorblätter

Aufgabe

Untersuche den Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter gegenüber der Rotorebene auf die Anlaufgeschwindigkeit einer Windkraftanlage.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (5...12V)
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler (alle Winkel, optimiertes Profil)
- Kabel
- Spannungsmessgerät

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Baue einen Rotor mit 3 Flügeln und einem Anstellwinkel der Blätter von $\alpha = 20^\circ$ auf und stecke ihn auf den Windgenerator.
3. Schalte den Winderzeuger mit einer Versorgungsspannung von 12V ein und miss die Spannung am Windgenerator. Schiebe den Rotor ggf. an, falls er nicht von allein anläuft.
4. Wiederhole die Messung mit verschiedenen Versorgungsspannungen am Winderzeuger (12V, 9V, 7,5V, 6V, 5V). Trage deine Messwerte in die Tabelle ein
5. Wiederhole die Messung für alle anderen Rotorblattanstellwinkel.
6. Bestimme für alle Anstellwinkel jeweils die Anlaufgeschwindigkeit der Windkraftanlage.

Messwerte

Die Werte für die Geschwindigkeit kannst du mit dem Windstärkemessgerät bestimmen oder aus dem entsprechenden Diagramm (siehe Seite 33) ablesen.

Anstellwinkel 20° :

v in m/s	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
U_{gen} in V	0	0	1,96	2,42	2,80	3,38	3,64	4,39	4,56

Anlaufgeschwindigkeit $v_a = 3\text{m/s}$



12.4 Anlaufgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Anstellwinkel der Rotorblätter

Messwerte

Anstellwinkel 25°:

v in m/s	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
U_{gen} in V	0	1,28	1,81	2,3	2,60	3,22	3,33	4,01	4,23

Anlaufgeschwindigkeit $v_a = 2,5\text{m/s}$

Anstellwinkel 30°:

v in m/s	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
U_{gen} in V	0,68	1,04	1,36	1,78	1,97	2,44	2,62	3,08	3,20

Anlaufgeschwindigkeit $v_a = 1,5\text{m/s}$

Anstellwinkel 50°:

v in m/s	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
U_{gen} in V	0,22	0,40	0,55	0,69	0,79	0,93	0,96	1,19	1,22

Anlaufgeschwindigkeit $v_a = 1,5\text{m/s}$

Anstellwinkel 90°:

v in m/s	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
U_{gen} in V	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,2

Anlaufgeschwindigkeit $v_a = 6\text{m/s}$

Auswertung

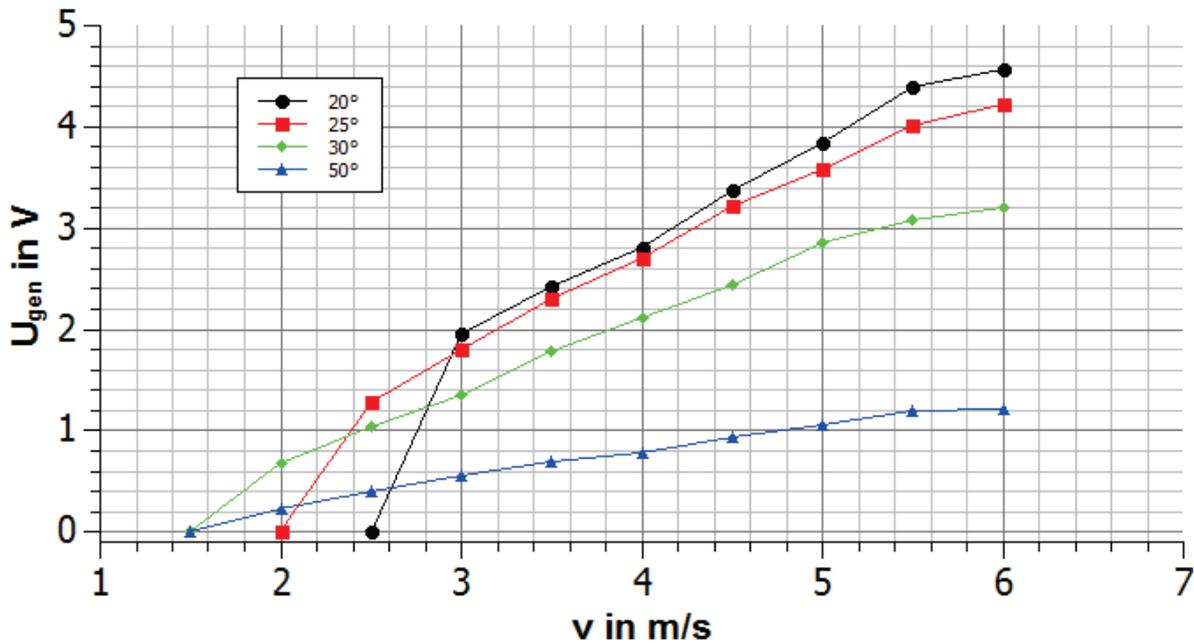
1. Trage die Spannung am Windgenerator über der Windgeschwindigkeit für die verschiedenen Anstellwinkel im Diagramm ein. Beschreibe den Zusammenhang zwischen der Spannung am Windgenerator und der Windgeschwindigkeit.
2. Welchen Einfluss hat der Anstellwinkel auf die maximale Spannung am Generator und die Anlaufgeschwindigkeit?
3. Wie könnte dieser Effekt bei der Realisierung realer Windkraftanlagen genutzt werden, zum Beispiel, um Beschädigungen bei Sturm vorzubeugen?



12.4 Anlaufgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Anstellwinkel der Rotorblätter

Auswertung

1.



Mit zunehmender Windgeschwindigkeit steigt die Spannung am Windgenerator (nahezu linearer Anstieg).

2.

Die größte Spannung kann mit einem Anstellwinkel von 20° erreicht werden. Diese unterscheidet sich aber nur wenig von der bei einem Winkel von 25°. Die Anlaufgeschwindigkeit ist allerdings bei höheren Anstellwinkeln geringer, der Rotor beginnt sich also schon eher zu drehen. Damit verhält sich die erzielbare Spannung bei höheren Windgeschwindigkeiten umgekehrt wie die Anlaufgeschwindigkeit!

3.

Bei hohen Windgeschwindigkeiten kann durch eine Regulierung des Anstellwinkels (zu größeren Winkeln) ein Abbremsen der Windkraftanlage erzielt werden. Zum Beispiel bei Sturm werden die Rotoren bei manchen Anlagen gedreht auf einen Winkel von 90°. Durch das Bremsen wird eine Überlastung bzw. Beschädigung der Windgeneratoren vermieden (→ sog. „Pitch-Regelung“)

Experiment 13.1

Einfluss der Flügelform (phänomenologisch)

Inhalte des Experimentes:

Es soll die Abhängigkeit der Leistung einer Windkraftanlage von der Form der Rotorflügel untersucht werden. Dazu soll die Leuchtdiode zunächst mithilfe eines Rotors mit optimierten Flügeln zum Leuchten gebracht werden. Danach sollen die Schüler den gleichen Versuch mit dem flachen Flügelprofil wiederholen. Es soll der qualitative Unterschied der beiden Flügelformen anhand der Helligkeit der Diode festgestellt werden und die Flügelform anschließend genauer beschrieben werden. Dem Schüler sollte zumindest ein Beispiel einfallen, wo das flache Profil zum Einsatz kommt.

Erklärung der Ergebnisse

Beim optimierten Profil leuchtet die LED heller. Das optimierte Profil ähnelt vom Aufbau her einem Flugzeugflügel, worin auch die Begründung liegt, dass dieser Flügel geeigneter ist für reale Windkraftanlagen. Durch das aerodynamisch optimierte Profil können Auftriebseffekte genutzt werden, die zu einer besseren Leistungsentnahme des Rotorflügels aus der Luft führen. Genaueres kann im Kapitel 3.3.2 nachgelesen werden.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 5 und 6** des Anfangsunterrichtes in Physik oder naturwissenschaftlichen Grundlagenfächern. Es ist für das Durchführen **erster Experimente im Unterricht** geeignet, da der Aufbau sehr übersichtlich ist. Den Schülern wird spielerisch die Abhängigkeit der Leistung einer Windkraftanlage von der Flügelform nahe gebracht.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Der Versuch ist statt mit einer Leuchtdiode auch mithilfe des Glühlampenmoduls durchführbar. Allerdings sollte die Glühlampe erst eingesetzt werden, wenn der Rotor sich bereits zu drehen beginnt. Es ist sonst möglich, dass die Windkraftanlage nicht startet.
- Der Austausch der Rotorblätter darf nur bei ausgeschaltetem Winderzeuger durchgeführt werden, da sonst Verletzungsgefahr besteht.

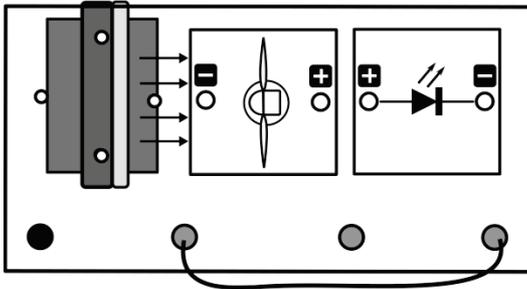


13.1 Einfluss der Flügelform (phänomenologisch)

Aufgabe

Untersuche die Helligkeit einer Leuchtdiode bei unterschiedlicher Form der Rotorblätter.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (9V)
- Windgeneratormodul (drei Rotorblätter, 25°, optimiertes Profil und flaches Profil)
- LED-Modul
- Kabel

Durchführung

1. Baue die Versuchsanordnung wie oben dargestellt auf.
2. Stecke den Dreiblattrotor mit dem optimierten Profil auf den Windgenerator und schalte den Winderzeuger ein. Beobachte die Helligkeit der Leuchtdiode.
3. Wiederhole deine Messung mit dem Dreiblattrotor mit flachem Profil. Hinweise zum Wechsel der Rotorblätter findest du auf Seite 32.
4. Notiere deine Beobachtungen.

Auswertung

1. Bei welcher Flügelform leuchtet die LED heller?
2. Untersuche die Flügelform beider Rotorflügel genauer. Welche Unterschiede kannst du feststellen?
3. Kennst du Beispiele, wo das flache Profil zum Einsatz kommt?

1.

Beim optimierten Profil

2.

Beim optimierten Profil laufen die Flügel vorn spitz zu und sind breiter am Ansatz (unsymmetrischer Aufbau, ähnlich wie Flugzeugflügel). Sie sind außerdem leicht in sich selbst verdreht. Die flachen Flügel sind rechteckig und überall gleich dick.

3.

Windmühle

Experiment 13.2

Einfluss der Flügelform (Spannungsmessung)

Inhalte des Experimentes:

Die Schüler sollen zunächst einen Aufbau des Rotors mit den optimierten Flügeln verwenden und die Spannung am Windgenerator messen. Im Anschluss wird die Spannung für einen Rotor mit flachem Profil (unter sonst gleichen Bedingungen) aufgenommen. Beide Werte werden verglichen und die Schüler sollen aus den Ergebnissen schließen, welchen Einfluss die Flügelform auf die Leistung einer Windkraftanlage hat.

Erklärung der Ergebnisse

Beim optimierten Profil ist die Spannung am Generator deutlich höher. Das optimierte Profil ähnelt vom Aufbau her einem Flugzeugflügel, worin auch die Begründung liegt, dass dieser Flügel geeigneter ist für reale Windkraftanlagen. Durch das aerodynamisch optimierte Profil können Auftriebseffekte genutzt werden, die zu einer besseren Leistungsentnahme des Rotorflügels aus der Luft und damit höheren Spannungswerten führen.

Genauereres kann im Kapitel 3.3.2 nachgelesen werden.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 7 bis 9**. Es ist ebenfalls für den Einsatz in einem **Projekt zur Windenergie** oder zu regenerativen Energien zu empfehlen. Die Schüler üben ihre Fertigkeiten im **Umgang mit Messgeräten**. Es wird die Abhängigkeit zwischen Leistung und Flügelform der Rotorflügel einer Windkraftanlage untersucht und

die Schüler entwickeln **eigene Lösungen** zu einem vorgegebenen Problem der Thematik.

Hinweise zur Durchführung des Experimentes

- Der Austausch der Rotorblätter darf nur bei ausgeschaltetem Winderzeuger durchgeführt werden, da sonst Verletzungsgefahr besteht.

- Beim Messen der Spannung sollte darauf geachtet werden, dass die Messwerte erst dann abgelesen werden, wenn sich der angezeigte Wert am Messgerät nicht mehr ändert.

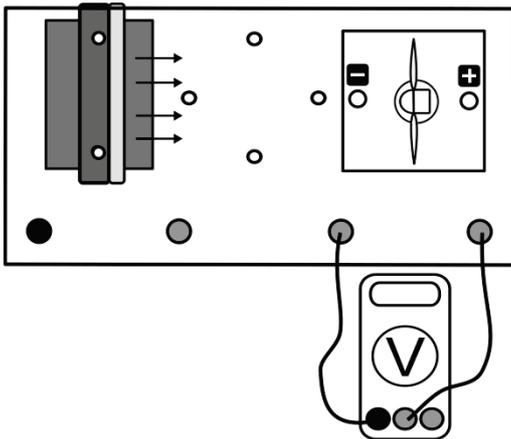


13.2 Einfluss der Flügelform (Spannungsmessung)

Aufgabe

Untersuche die Spannung am Generator bei unterschiedlicher Form der Rotorblätter.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (9V)
- Windgeneratormodul (drei Rotorblätter, 25°, optimiertes Profil und flaches Profil)
- Kabel
- Spannungsmessgerät

Durchführung

1. Stecke den Dreiblattrotor mit dem optimierten Profil auf den Windgenerator und schalte den Winderzeuger ein. Miss die am Generator erzeugte Spannung.
2. Wiederhole deine Messung mit dem Dreiblattrotor mit flachem Profil.

Messwerte

$$U_{\text{opt}} = 2.25\text{V}$$

$$U_{\text{flach}} = 0,91\text{V}$$

Auswertung

1. Mit welchem Profil können höhere Spannungen erzeugt werden?
2. Stelle eine Vermutung auf: Welchen Einfluss hat die Flügelform auf die erzeugte Leistung einer Windkraftanlage?

1. U_{opt} .

2.

Mit dem optimierten Profil lassen sich bei gleicher Windgeschwindigkeit deutlich höhere Drehzahlen erreichen. Das wiederum bedingt eine höhere Leistungsentnahme aus der Luft. In realen Windkraftanlagen sollten also die optimierten Flügel zum Einsatz kommen.

Experiment 13.3

Einfluss der Flügelform (Leistungsmessung)

Inhalte des Experimentes:

Die Schüler sollen zunächst einen Aufbau des Rotors mit den optimierten Flügeln verwenden und die Spannung und Stromstärke an einem Widerstandsmodul in Abhängigkeit vom Abstand des Winderzeugers vom Windgenerator aufnehmen. Die gleiche Messreihe wird wiederholt mit dem flachen Profil und die errechneten Leistungen in ein Diagramm eingetragen. Aus dem Kurvenverlauf kann dann ermittelt werden, mit welchem Profil eine bessere Leistungsentnahme aus der Luft möglich ist. Die Schüler sollen in der Auswertung den besseren Auftrieb an den optimierten Flügeln herleiten und daraus schließen, dass diese Form der Rotorflügel für reale Windkraftanlagen geeigneter ist.

Erklärung der Ergebnisse

Beim optimierten Profil ist die erzeugte Leistung in Abhängigkeit vom Abstand deutlich höher. Das optimierte Profil ähnelt vom Aufbau her einem Flugzeugflügel, worin auch die Begründung liegt, dass dieser Flügel geeigneter ist für reale Windkraftanlagen. Durch das aerodynamisch optimierte Profil können Auftriebseffekte genutzt werden, die zu einer besseren Leistungsentnahme des Rotorflügels aus der Luft und damit höheren Spannungswerten führen.

Genauereres kann im Kapitel 3.3.2 nachgelesen werden.

Einsatzmöglichkeiten im Unterricht und didaktische Ziele

Dieses Experiment eignet sich für den Einsatz in den **Klassenstufen 7 bis 9**. Es ist ebenfalls für den Einsatz in einem **Projekt zur Windenergie** oder zu regenerativen Energien zu empfehlen. Die Schüler üben ihre Fertigkeiten im **Umgang mit Messgeräten**. Es wird die Abhängigkeit zwischen Leistung und Flügelform der Rotorflügel einer Windkraftanlage untersucht und die Schüler entwickeln **eigene Lösungen** zu einem vorgegebenen Problem der Thematik.

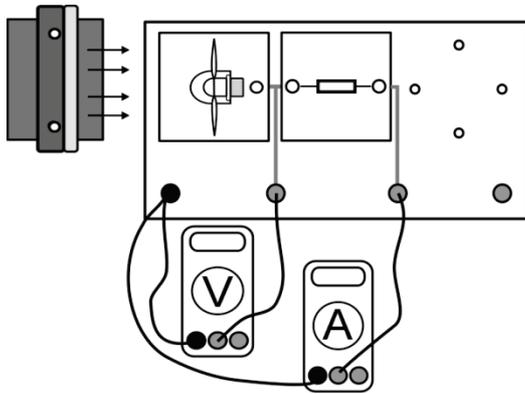


13.3 Einfluss der Flügelform (Leistungsmessung)

Aufgabe

Untersuche die Leistung eines Windgenerators bei unterschiedlicher Form der Rotorblätter.

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Stromversorgung (9V)
- Windgeneratormodul (drei Rotorblätter, 25°, optimiertes Profil und flaches Profil)
- Widerstandsmodul
- Kabel
- Spannungsmessgerät
- Strommessgerät

Durchführung

1. Baue den Versuch entsprechend der Versuchsanordnung auf.
2. Stecke den Dreiblattrotor mit dem optimierten Profil auf den Windgenerator, stelle einen Abstand von 25cm zwischen Rotor und Winderzeuger ein und schalte den Winderzeuger ein.
3. Miss in verschiedenen Abständen zum Winderzeuger jeweils Spannung und Stromstärke am Windgenerator. Trage deine Messwerte in die Tabelle ein.
4. Wiederhole die Messung mit dem Dreiblattrotor mit flachem Profil.

Messwerte

Optimiertes Profil:

d in cm	5	10	15	20	25
v in m/s	4,9	4,2	4,1	4,0	3,8
U in V	1,40	1,36	1,23	1,06	0,93
I in mA	40,9	37,7	35,5	31,1	26,8
P in mW	57,26	51,272	43,665	32,966	24,924

Flaches Profil:

d in cm	5	10	15	20	25
v in m/s	4,9	4,2	4,1	4,0	3,8
U in V	0,55	0,58	0,55	0,46	0,40
I in mA	16,0	17,1	16,3	13,7	11,7
P in mW	8,8	9,918	8,965	6,302	4,68

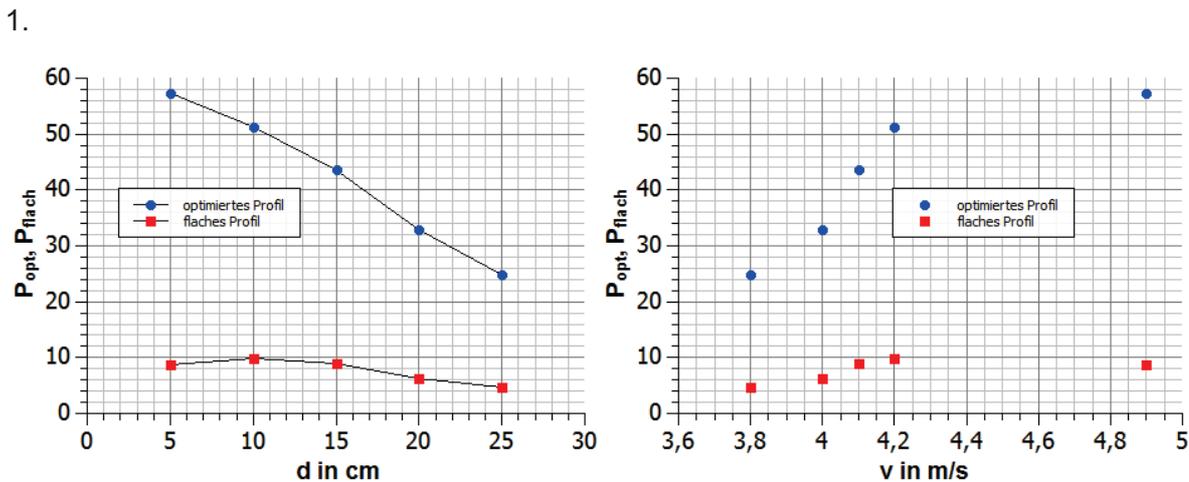
Die Werte für die Geschwindigkeit kannst du mit dem Windstärkemessgerät bestimmen oder aus dem entsprechenden Diagramm (siehe Seite 33) ablesen.



13.3 Einfluss der Flügelform (Leistungsmessung)

Auswertung

1. Trage deine Messwerte in die entsprechenden Diagramme ein.
2. Mit welchem Profil lassen sich höhere Leistungen erzeugen?
3. Welcher physikalische Effekt könnte für das Verhalten des optimierten Flügels verantwortlich sein? Vergleiche den Flügel mit einer Flugzeugtragfläche.
4. Welches Profil wird daher bei realen Windkraftanlagen eingesetzt? Begründe deine Entscheidung.



2. $P_{\text{opt}} > P_{\text{flach}}$

3. Mit dem optimierten Profil lässt sich ein dynamischer AUFTRIEB an den Flügeln erreichen. Dies kommt durch die typische Form (ähnlich einem Flugzeugflügel) zustande. Verantwortlich dafür ist der Bernoulli-Effekt, der für den verstärkten Auftrieb an den Flügeln sorgt.

4. Das optimierte Profil wird eher eingesetzt, weil durch den Auftrieb eine deutlich bessere Leistungsentnahme aus der Luft möglich ist. Damit können mit diesem Profil auch viel höhere Leistungen am Verbraucher erzielt werden.

IV. Literaturverzeichnis

- **Bundesverband Windenergie e.V.** Entstehung des Windes. [Online] <http://www.windenergie.de/de/technik/entstehung/>.
- —. Leistungsregelung (Pitch- und Stallregelung). [Online] <http://www.windenergie.de/de/technik/physik-der-windenergie/leistungsregelung/>.
- —. Physik der Windenergie. [Online] <http://www.wind-energie.de/de/technik/physik-der-windenergie/schnelllaufzahl/?type=91>.
- **Global Wind Energy Concil (GWEC). 2011.** *Global Wind Report - Annual market update*. Brüssel : GWEC, 2011.
- **Malberg, Horst. 2007.** *Meteorologie und Klimatologie*. Berlin : Springer-Verlag, 2007.
- **Meschede, Dieter. 2004.** *Gerthsen Physik*. 22. völlig neu bearbeitete. Heidelberg : Springer-Verlag, 2004.
- **Quaschnig, Volker.** Regenerative Energien und Klimaschutz. [Online] www.volker-quaschnig.de.
- —. **2007.** *Regenerative Windsysteme*. 5. aktualisierte. München : Carl Hanser Verlag, 2007.
- **Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21). 2011.** *Renewables 2011 Global Status Report*. Paris : REN21, 2011.

leXsolar GmbH
Strehleener Straße 12-14
01069 Dresden / Germany

Telefon: +49 (0) 351 - 47 96 56 0
Fax: +49 (0) 351 - 47 96 56 - 111
E-Mail: info@lexsolar.de
Web: www.lexsolar.de