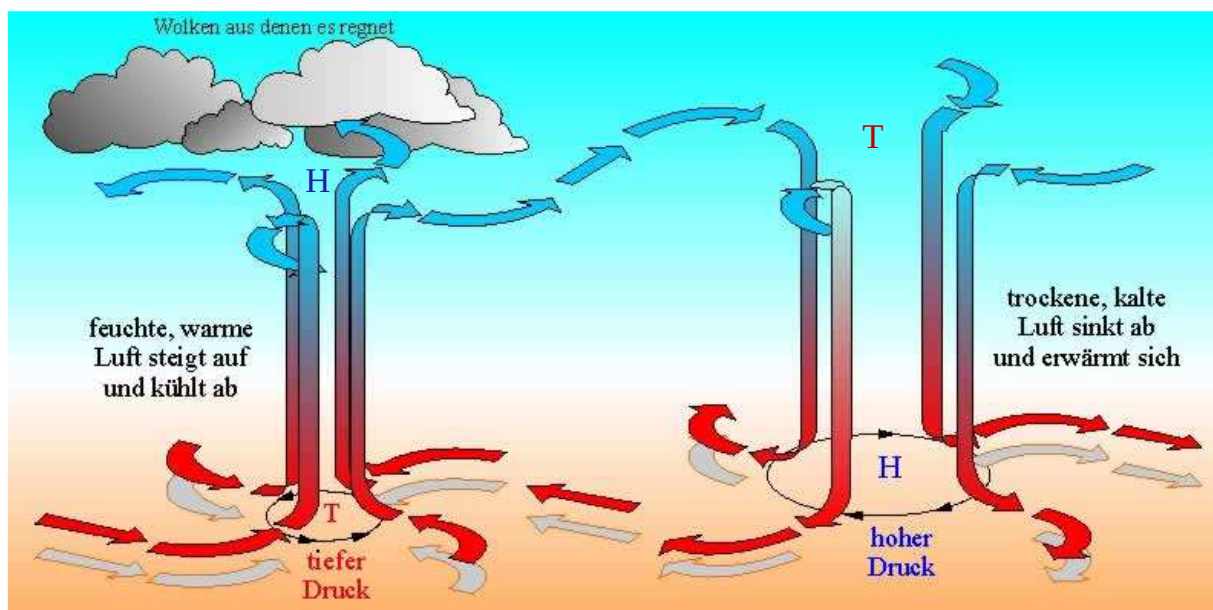


Windenergie

Hintergrundinformation

Wie entsteht Wind? Indem sich die Luft durch die Sonneneinstrahlung erwärmt, beginnt warme Luft aufzusteigen (das kennen wir vom Heißluftballon), und an anderen Orten sinkt kältere Luft ab. Dort, wo sich die warme Luft in der Atmosphäre sammelt, erhöht sich durch die großen Luftmengen der Druck, und es entsteht ein Hochdruckgebiet. Durch die nun fehlende Luft am Boden sinkt dort der Luftdruck und es bildet sich ein Tiefdruckgebiet. Die erwärmte Luft in der Atmosphäre kühlt jedoch wieder ab und sinkt wieder zu Boden. Dadurch entsteht ein Hochdruckgebiet in Bodennähe. Nun beginnt sich die Luft vom Hochdruckgebiet am Boden in Richtung des Tiefdruckgebiets am Boden zu bewegen. Die dadurch entstehenden Luftbewegungen nennen wir Wind. Je größer der Druckunterschied, desto stärker weht der Wind. Das Prinzip könnt ihr der folgenden Abbildung entnehmen:



Quelle: nach LMU München

Früher hat man die Energie des Windes für Segelschiffe und für Mühlen genutzt. Heute nutzen wir die Energie des Windes in Windkraftanlagen, um elektrische Energie zu erzeugen. Alte und moderne Windräder haben jedoch wenig gemeinsam. In den alten Windrädern oder Windmühlen wurde Mehl gemahlen oder Holz gesägt. Moderne Windräder sind viel größer und wandeln die Windenergie in elektrische Energie um.

Die Flügel der **moderne Windkraftanlagen** werden Rotorblätter genannt. Meist haben sie drei Rotorblätter, manchmal auch zwei, in seltenen Fällen auch nur ein Rotorblatt. Die Rotorblätter werden an der Rotornabe zusammen gehalten. Rotornabe und Rotorblätter bilden den Rotor. Der Rotor ist an einer Gondel befestigt, die auf einem hohen Turm steht. In der Gondel befindet sich ein Generator, der den Strom erzeugt. Moderne Windkraftanlagen sind riesig. Die größten Anlagen haben



Experimente zu Windenergie

heutzutage eine Nabenhöhe (das ist die Höhe vom Boden bis zur Rotornabe) von bis zu 140 m und einen Durchmesser der Rotorblätter bis zu 125 m.

Früher



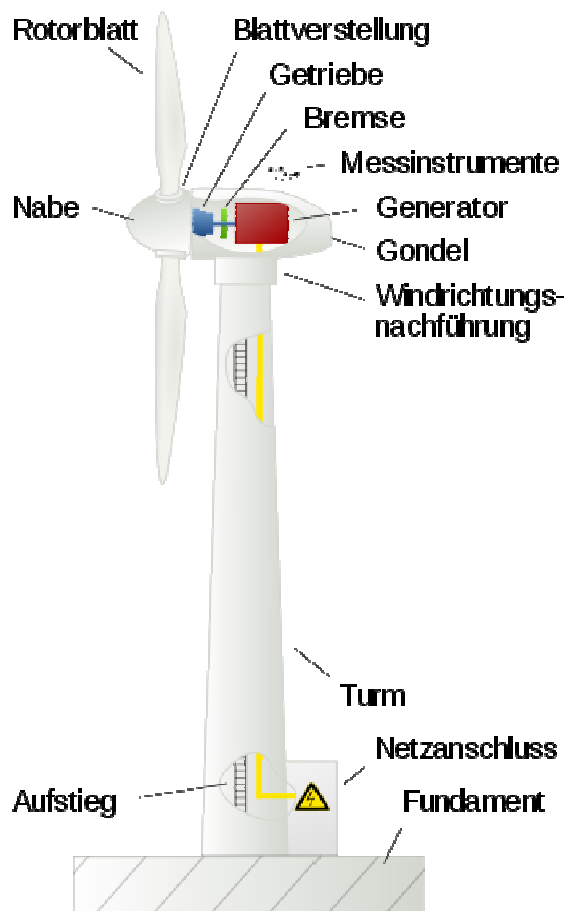
Quelle: Carsten Plein, wikimedia

Heute



Quelle: Drenaline, wikimedia

Im Folgenden seht ihr die schematische Darstellung einer Windkraftanlage:



Der Wind drückt auf die speziell aerodynamisch geformten **Rotorblätter**, die an der **Nabe** befestigt sind, und setzt sie in Bewegung. Auf der **Welle**, die an der Nabe befestigt ist, sitzt ein **Getriebe**, das die langsame Rotation der Rotoren in eine schnelle Rotation übersetzt. Auf der sich schnell drehenden Welle hinter dem Getriebe sitzt ein **Generator**, der die Rotationsenergie in elektrische Energie umwandelt. Das Gehäuse, das auf dem **Turm** der Anlage sitzt, nennt man **Gondel**. Dort sind auch **Messinstrumente** zur Messung z.B. der Windgeschwindigkeit, und Vorrichtungen zur **Nachführung** der Gondel installiert. Dadurch kann die Gondel nachgeführt werden kann, wenn sich der Wind dreht. Die elektrische Energie wird durch starke Kabel abgeleitet, die im Turm der Windkraftanlage verlegt sind. Am Fuß der Anlage, wo auch der **Aufstieg** in Form von Leitern beginnt, befindet sich der **Netzananschluss**, an dem der erzeugte Strom in das öffentliche Stromnetz eingespist wird.

Quelle: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c3/Windkraftanlage.svg/368px-Windkraftanlage.svg.png> © by Arne Nordmann (norro)

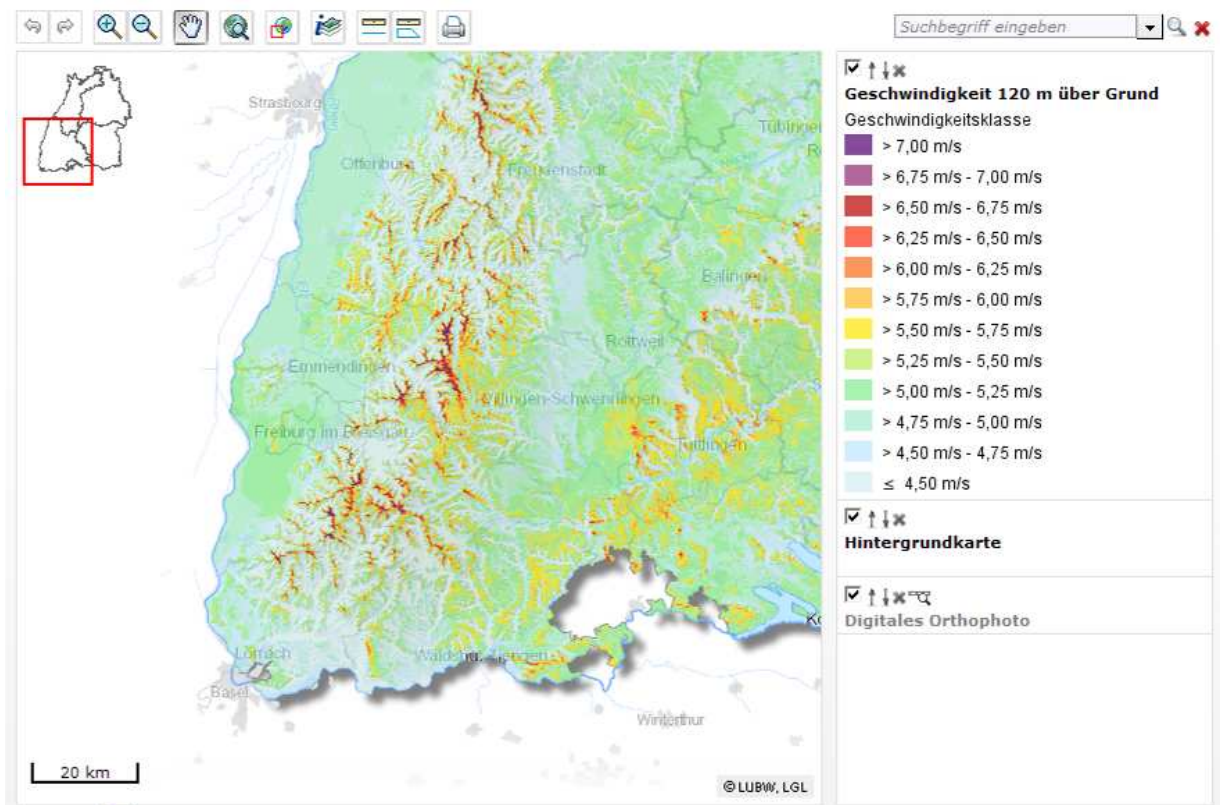


Experimente zu Windenergie

Die Energie, die die Windkraftanlage erzeugen kann, ist abhängig von der Windstärke. Instrumente zur Messung der Windstärke nennt man **Anemometer**.

Windkraftanlagen werden an Orten aufgestellt, an denen der Wind möglichst stark und über das gesamte Jahr gleichmäßig weht, z.B. auf Höhenzügen von Gebirgen oder an der Küste. Diese Orte nennt man windhöfzig.

Um geeignete Orte für den Bau von Windkraftanlagen zu finden, ist ein sogenannter Windatlas hilfreich. Er zeigt uns an welchen Orten der Wind mit welcher Geschwindigkeit weht. In der folgenden Abbildung seht ihr einen Auszug aus dem Windatlas für Baden-Württemberg:



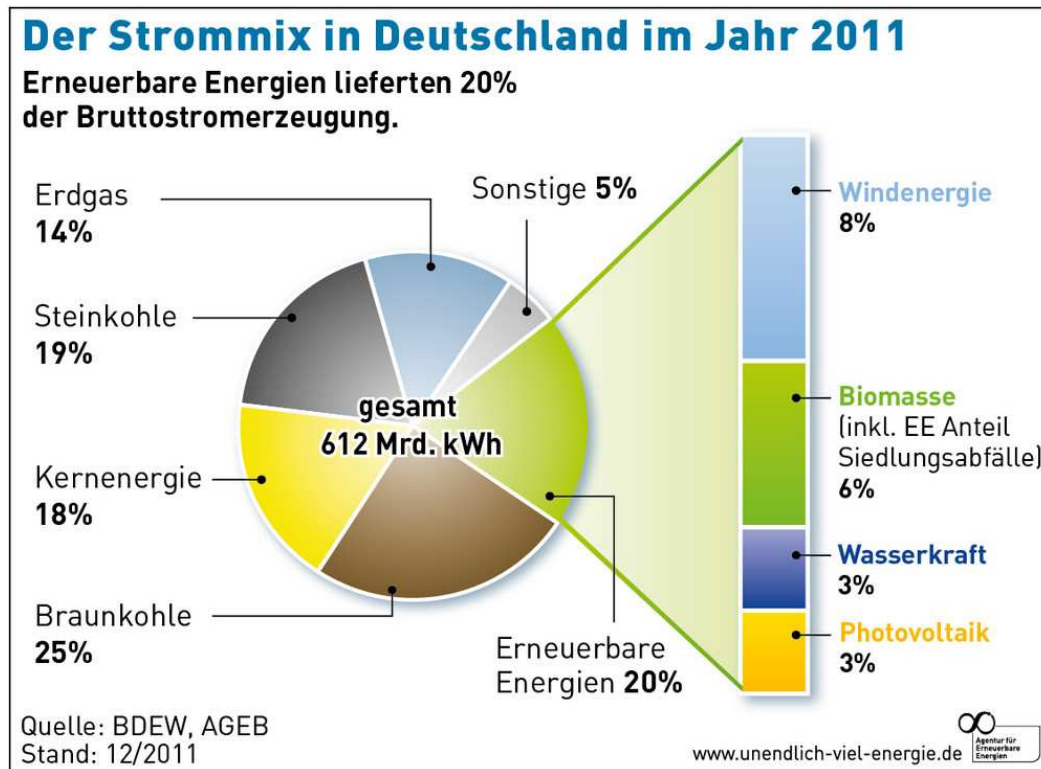
Quelle: Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz LUBW

Findet ihr auf dem Auszug die Orte mit hohen Windgeschwindigkeiten?

Inzwischen werden Windkraftanlagen sogar in das Meer (offshore) gebaut, da der Wind dort am stärksten und beständigsten weht. Dafür muss der Turm allerdings mit starken Fundamenten im Meeresboden verankert werden. Gleichzeitig stellt die salzhaltige Meeresluft hohe Anforderungen an das Material, da salzhaltige Luft sehr korrosiv (rostbildend) wirkt. Die elektrische Energie wird über Seekabel abgeleitet und auf dem Festland in das öffentliche Stromnetz eingespeist. Unklar ist, ob die Vibrationen der Windkraftanlagen, die über den Turm ins Wasser übertragen werden, die Meeresbewohner stören, und ob die Bewegung der Rotoren über Wasser die Flugrouten von Zugvögeln stört.



Im Energiemix in Deutschland spielt die Windenergie eine bedeutende Rolle, wie die folgende Grafik zeigt:



Quelle: BDEW, AGEB

Hier findet ihr einige Video-Clips zum Aufbau und Betrieb von Windenergieanlagen:

- Onshore-Windenergieanlagen (5:44):
<http://www.youtube.com/watch?v=AjvQrDjj7Do>
- Offshore-Windenergieanlagen (2:58):
<http://www.youtube.com/watch?v=N5VQNgkJo5w>

Modell einer Windkraftanlage

Anleitungstext

In der MINT-ExperimentierBox findet ihr den Experimentierkasten leXsolar-Wind, sowie, ein Gerät zur Spannungsversorgung und ein Gerät zur Messung der Windgeschwindigkeit (Anemometer).

In dem Experimentierkasten leXsolar-Wind sind folgende Bauteile enthalten:

- Grundeinheit
- Winderzeuger mit Schiene
- Windgenerator auf Modulplatte
- LED-Modul (Leuchtdiode)
- Messgeräte mit Kabel (Spannungs- und Strommessgerät)
- Savoniusrotor (mit Generatormodul)
- Widerstandsmodul ($R = 30 \Omega$)
- Kondensatormodul ($C = 220 \text{ mF}$)
- Potentiometermodul ($R = 0 \Omega \dots 1 \text{ k}\Omega$)
- Anemometer

Hinweise zur Handhabung

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

1. Umgang mit der Schiene:

Beim Entnehmen der Schiene aus der Box (bzw. dem Koffer) sollte darauf geachtet werden, dass die Schiene nahe dem Standfuß angefasst wird. Wird sie zu weit vom Standfuß entfernt angefasst und herausgeholt, so kann der Standfuß abbrechen.

2. Aufbau der Grundeinheit mit Schiene und Winderzeuger:

Zuerst wird die Grundeinheit aufgebaut und auf den linken Steckplatz das Grundmodul des Windgenerators befestigt. Dabei sollte der Windgenerator selbst noch nicht aufgesteckt werden. Als nächsten Schritt steckt man die Schiene so auf das Grundmodul auf, dass sie links neben der Grundeinheit auf der Tischplatte steht und horizontal ausgerichtet ist. Erst jetzt wird der Winderzeuger auf der Schiene befestigt. Je nachdem, welches Experiment durchgeführt werden soll, muss nun der Windgenerator oder der Savoniusrotor mit Motormodul auf der Grundeinheit befestigt werden.

ACHTUNG!

Beim Abbau der Geräte sollte darauf geachtet werden, dass zuerst der Winderzeuger aus dem Aufbau entfernt wird, bevor die Schiene von der Grundeinheit gelöst werden kann. Es kann sonst zum Abbrechen des Standfußes durch das Gewicht des Winderzeugers kommen.

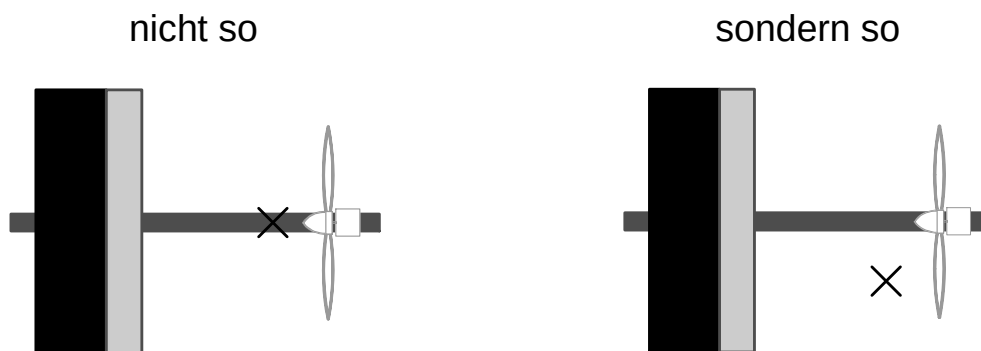


3. Polarität einzelner Bauteile im Gesamtaufbau:

Beim Aufbau von Generator und den Bauelementen müssen die Polaritäten beachtet werden. Der Windgenerator dient dabei als Spannungsquelle. Rechts befindet sich der positive und links der negative Pol. Es muss bei den Modulen, bei denen eine Polarität angegeben ist, darauf geachtet werden, dass stets Plus an Plus und Minus an Minus angeschlossen wird (genauso wie bei Anschluss an eine herkömmliche Spannungsquelle). Ebenso ist die Polarität des Windgenerators für den Anschluss der Messgeräte zur Spannungs- und Strommessung von Bedeutung und muss dabei beachtet werden.

4. Messung der Windgeschwindigkeit (mit dem Windgeschwindigkeitsmesser):

Wird die Windgeschwindigkeit mithilfe des Windgeschwindigkeitsmessers gemessen, so ist darauf zu achten, dass die Windgeschwindigkeit nicht in der Mitte (direkt vor der Nabe), sondern links oder rechts der Nabe gemessen wird. Beachte dazu die folgende Abbildung.



Allerdings wird die **Messung der Windgeschwindigkeit** immer **ohne Windgenerator** durchgeführt. Der Rotor in der Darstellung dient nur der Veranschaulichung der Position.

Im Folgenden finden sich Experimente, die mit dem Experimentierkasten lexsolar-Wind und dem Anemometer (Windmesser) durchgeführt werden können.

Die MINT-EnergieBox enthält das **Lehrsystem "leXsolar-Wind"**. Es enthält ein Schülerheft mit den Versuchsanleitungen und ein Lehrerheft mit Hintergrundinformationen und den Lösungen zu den Versuchen. Beide liegen in der MINT-EnergieBox als Ausdruck und elektronisch (CD-ROM) vor.

Inhaltsverzeichnis Schülerheft

Dieses Heft enthält die Experimentieranleitungen sowie die zugehörigen Vorlagen zur Auswertung für folgende Experimente:

1.1 Abstandsabhängigkeit der Windgeschwindigkeit (phänomenologisch)	10
1.2 Abstandsabhängigkeit der Windgeschwindigkeit (Spannungsmessung)	11
1.3 Abstandsabhängigkeit der Windgeschwindigkeit (Leistungsmessung)	13
2.1 Anlaufgeschwindigkeit an einer Windkraftanlage	15
2.2 Vergleich der Anlaufgeschwindigkeit zwischen Savonius- und Dreiblattrotor	17
3.1 Veränderung der Generatorspannung durch Zuschalten eines Verbrauchers	19
3.2 Veränderung der Generatorspannung durch Zuschalten verschiedener Verbraucher**	21
4 Untersuchung der Windgeschwindigkeit hinter dem Rotor*	23
5.1 Energiebilanz an einer Windkraftanlage	25
5.2 Berechnung des Wirkungsgrades einer Windkraftanlage	27
6 Speicherung elektrischer Energie	29
7.1 Energieumwandlungen an einer Windkraftanlage**	31
7.2 Untersuchungen an Farbscheiben mithilfe einer Windkraftanlage**	32
8.1 Vergleich zwischen Savonius- und Dreiblattrotor (phänomenologisch)	33
8.2 Vergleich zwischen Savonius- und Dreiblattrotor (Spannungsmessung)	35
8.3 Vergleich zwischen Savonius- und Dreiblattrotor (Leistungsmessung)	37
9.1 Vergleich von Zwei-, Drei und Vierblattrotoren (phänomenologisch)	40
9.2 Vergleich von Zwei-, Drei und Vierblattrotoren (Spannungsmessung)	42
9.3 Vergleich von Zwei-, Drei und Vierblattrotoren (Leistungsmessung)	44
10 Kennlinien einer Windkraftanlage	46
11.1 Einfluss der Windrichtung (phänomenologisch)	48
11.2 Einfluss der Windrichtung (Spannungsmessung)	49
11.3 Einfluss der Windrichtung (Leistungsmessung)	51
12.1 Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (phänomenologisch)	53
12.2 Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (Spannungsmessung)	54
12.3 Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (Leistungsmessung)	56
12.4 Anlaufgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Anstellwinkel der Rotorblätter	58
13.1 Einfluss der Flügelform (phänomenologisch)	61
13.2 Einfluss der Flügelform (Spannungsmessung)	62
13.3 Einfluss der Flügelform (Leistungsmessung)	63

Die mit * gekennzeichneten Versuche sind nur möglich mit der Erweiterung „Windstärkemesser“

Die mit ** gekennzeichneten Versuche sind nur möglich mit der Erweiterung „MOM“ (Messen ohne Messgerät). Dies ist nicht in der MINT-EnergieBox enthalten.

Auf den Seiten 3 bis 9 des Schülerheftes finden sich nähere Erläuterungen zu den Anleitungen und zur Durchführung der Experimente, damit die Experimente sicher zum Erfolg führen.



Experimente zu Windenergie

Es folgt eine Liste mit Experimenten, die mit dem Experimentierkasten „leXsolar-Wind“ und dem Anemometer (Windmesser) durchgeführt werden können.

Die Experimente sind ihrem Anspruch nach in Level 1 und Level 2 unterteilt. Experimente, die optional durchgeführt werden können, sind grau eingefärbt.

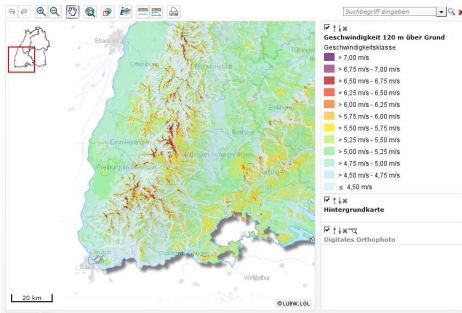
Level 1

- Experiment 1.1:** Veränderung der Windgeschwindigkeit durch Verändern des Abstandes (phänomenologisch)
- Experiment 2.1:** Anlaufwindgeschwindigkeit an einer Windkraftanlage
- Experiment 3.1:** Veränderung der erzeugten Spannung durch Zuschalten eines Verbrauchers (mit Widerstand)
- Experiment 4.1:** Untersuchung der Windgeschwindigkeit vor und hinter dem Rotor (im Leerlauf)
- Experiment 6:** Speicherung elektrischer Energie
- Experiment 7.1:** Energieumwandlungen an einer Windkraftanlage
- Experiment 8.1:** Vergleich zwischen Savoniusrotor und Dreiblattrotor (phänomenologisch)
- Experiment 9.1:** Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (phänomenologisch)
- Experiment 10:** Kennlinien einer Windkraftanlage
- Experiment 11.1:** Einfluss der Windrichtung auf die Leistung des Windrotors (phänomenologisch)

Level 2

- Experiment 1.2:** Veränderung der Windgeschwindigkeit durch Verändern des Abstandes (Spannung)
- Experiment 1.3:** Veränderung der Windgeschwindigkeit durch Verändern des Abstandes (Leistung)
- Experiment 2.2:** Vergleich der Anlaufgeschwindigkeit zwischen Savonius- und Dreiblattrotor
- Experiment 3.2:** Veränderung der erzeugten Spannung durch Zuschalten eines Verbrauchers (mit Hupe, Glühlampe und Motor)
- Experiment 4.2:** Untersuchung der Windgeschwindigkeit vor und hinter dem Rotor (mit Widerstand und Glühlampe)
- Experiment 5.1:** Berechnung des Wirkungsgrades einer Windkraftanlage
- Experiment 5.2:** Energiebilanz an der Windkraftanlage
- Experiment 6:** Speicherung elektrischer Energie
- Experiment 7.2:** Untersuchungen an Farbscheiben mithilfe einer Windkraftanlage
- Experiment 8.2:** Vergleich zwischen Savoniusrotor und Dreiblattrotor (Spannung)
- Experiment 8.3:** Vergleich zwischen Savoniusrotor und Dreiblattrotor (Leistung)
- Experiment 9.2:** Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblattrotoren (Spannung)
- Experiment 10:** Kennlinien einer Windkraftanlage
- Experiment 11.2:** Einfluss der Windrichtung auf die Leistung des Windrotors (Spannung)
- Experiment 11.3:** Einfluss der Windrichtung auf die Leistung des Windrotors (Leistung)





Windkraft

Potenziale der Windkraft berechnen

Experiment 1

Level 1

Material:

Abbildung Windatlas laminiert

Einleitung:

Die jährliche Stromerzeugung einer Windenergieanlage berechnet sich aus der Anzahl Volllaststunden (das sind die Stunden, in denen die Windenergieanlage mit ihrer Nennleistung läuft) multipliziert mit der Nennleistung der Anlage. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit ist zur Berechnung der Jahresstromerzeugung nicht geeignet, da sie keine Aussage liefert, wie oft der Wind mit dieser Geschwindigkeit über das Jahr weht. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit ist aber ein guter Indikator für die prinzipielle Eignung eines Standorts zum Bau einer Windenergieanlage.

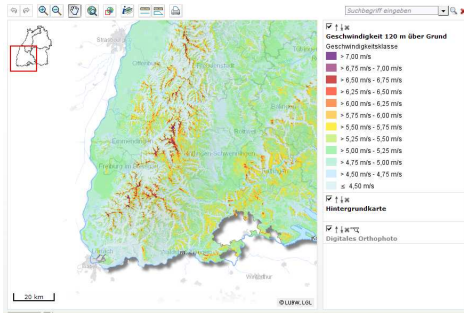
Aufgaben:

Schaut euch das Kartenmaterial aufmerksam an und lest euch den Einleitungstext zu Experiment 1 durch. Beantwortet dann folgende Fragen:

- a) Wo finden sich auf der Karte die Gebiete mit den höchsten Windgeschwindigkeiten? Warum weht der Wind dort am stärksten?

- b) Berechnet die jährliche Stromerzeugung einer Windkraftanlage mit 2 Megawatt (MW) Leistung an einem Standort, an dem die Anlage im Jahr 2000 Volllaststunden erreicht.





Windkraftanlage

Potenziale der Windkraft berechnen

Experiment 1

Level 2

Material:

Abbildung Windatlas laminiert

Einleitung:

Die jährliche Stromerzeugung einer Windenergieanlage berechnet sich aus der Anzahl Volllaststunden (das sind die Stunden, in denen die Windenergieanlage mit ihrer Nennleistung läuft) multipliziert mit der Nennleistung der Anlage. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit ist zur Berechnung der Jahresstromerzeugung nicht geeignet, da sie keine Aussage liefert, wie oft der Wind mit dieser Geschwindigkeit über das Jahr weht. Die durchschnittliche Windgeschwindigkeit ist aber ein guter Indikator für die prinzipielle Eignung eines Standorts zum Bau einer Windenergieanlage.

Aufgaben:

Schaut euch das Kartenmaterial aufmerksam an und lest euch den Einleitungstext zu Experiment 1 durch. Beantwortet dann folgende Fragen:

- a) Wo finden sich auf der Karte die Gebiete mit den höchsten Windgeschwindigkeiten? Warum weht der Wind dort am stärksten?

- b) Berechnet die jährliche Stromerzeugung einer Windkraftanlage mit 2 Megawatt (MW) Leistung an einem Standort, an dem die Anlage im Jahr 2000 Volllaststunden erreicht.

- c) Ein 4-Personen-Haushalt verbraucht im Jahr 3.500 Kilowattstunden Strom. Wie viele Haushalte lassen sich mit der 2 MW Windkraftanlage rechnerisch versorgen?



Lösungen zu den Arbeitsblättern

Lösungen

Experiment 1: Windkraft - Potenziale der Windkraft berechnen

- a) Auf den Höhenzügen des Schwarzwalds. Die Windgeschwindigkeit nimmt mit steigender Höhe zu.
- b) 4 Gigawattstunden, das sind 4.000 Megawattstunden oder 4.000.000 Kilowattstunden
- c) 1142 Haushalte

