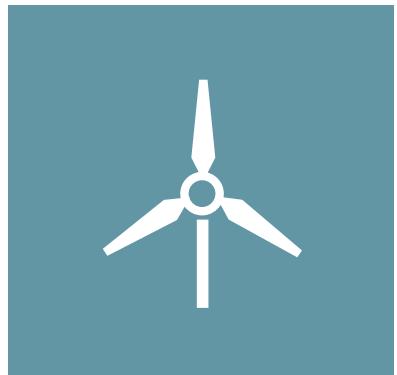
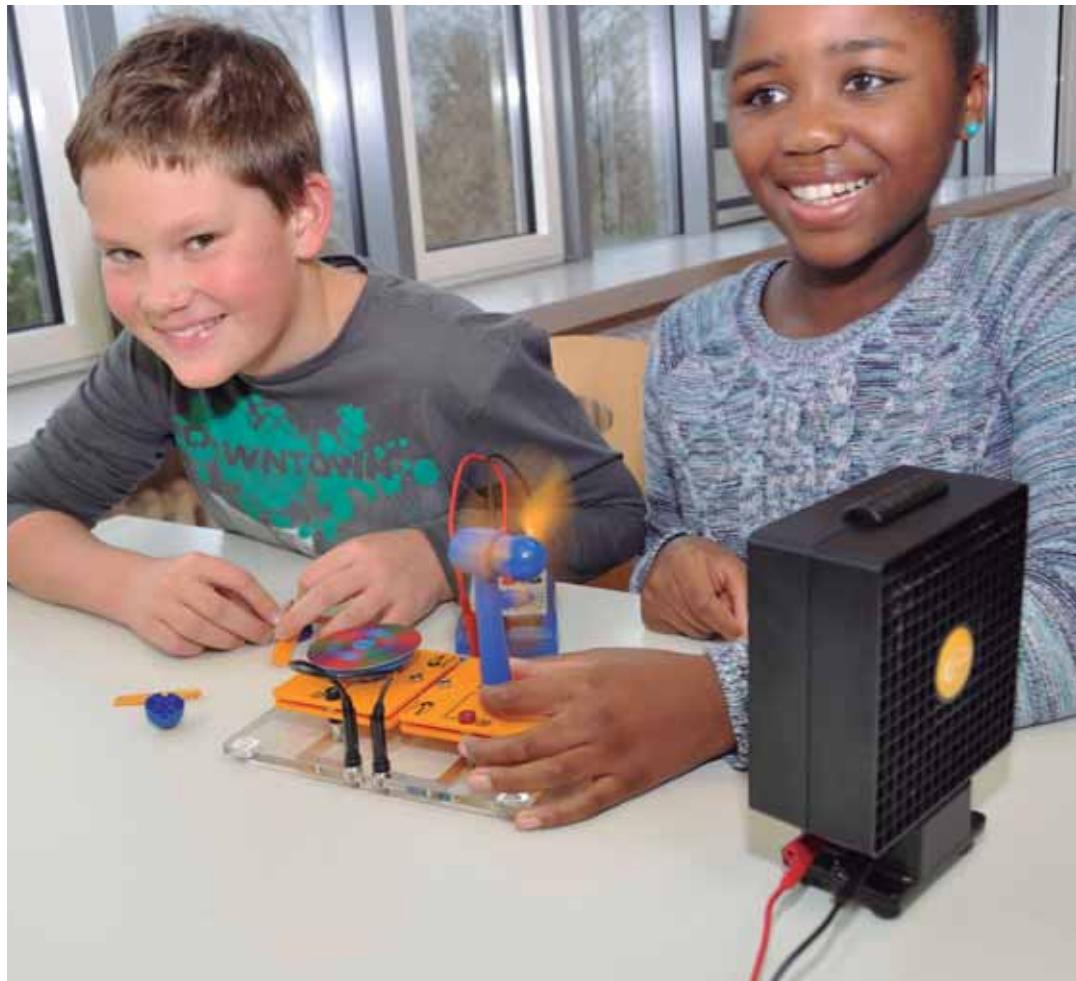


leXsolar-Wind Large



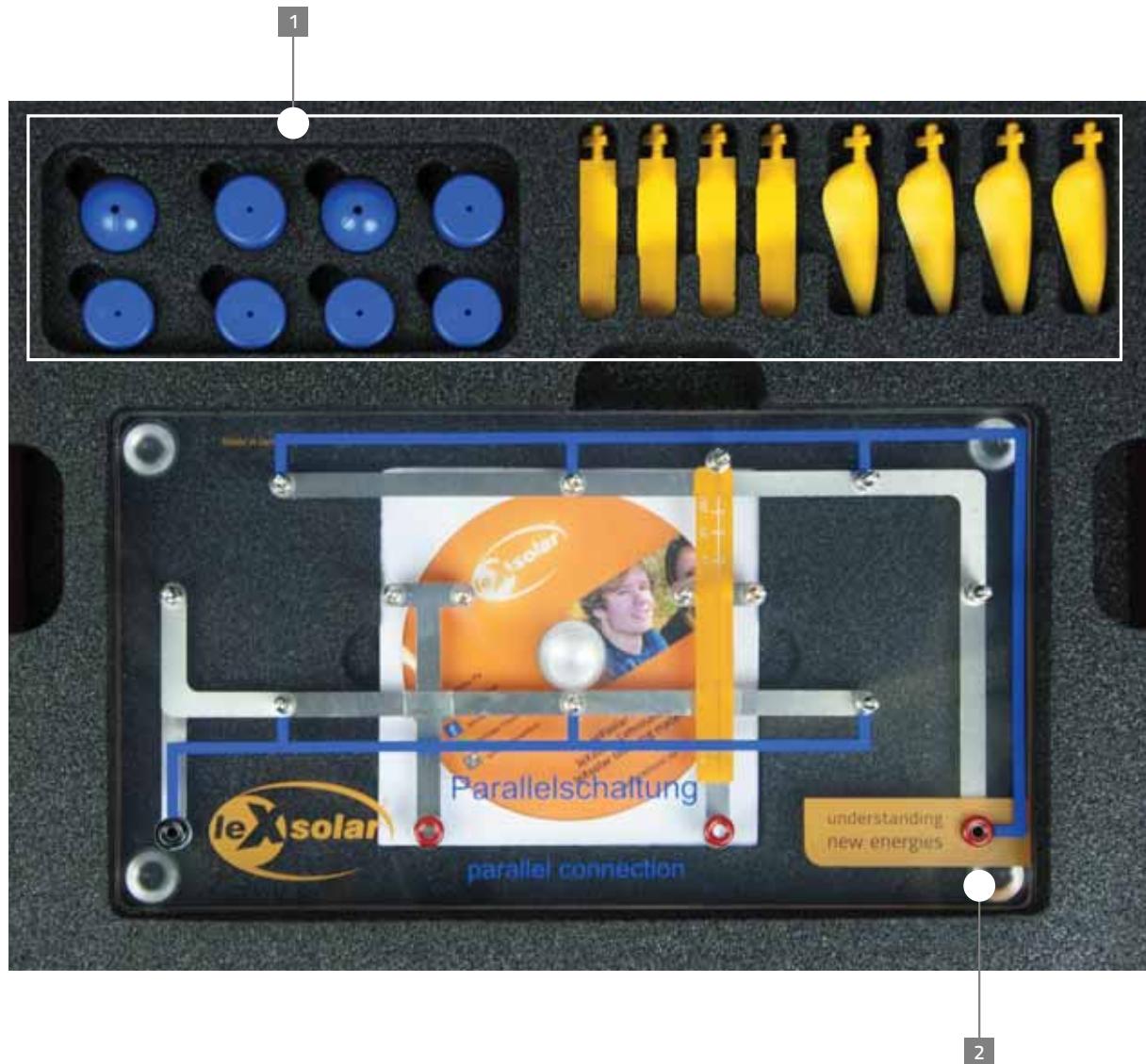
Lehrerheft

Layout diagram leXsolar-Wind Large 2.0

Item-No.1404

Bestückungsplan leXsolar-Wind Large 2.0

Art.-Nr.1404



1 1400-12 leXsolar-Wind rotor set
(8 blades, 6 hubs, 2 caps)
1400-12 leXsolar-Windrotoren
(8 Flügel, 6 Naben, 2 Kappen)

2 1100-19 leXsolar-Base unit Large
1100-19 leXsolar-Grundeinheit groß

Version number
Versionsnummer

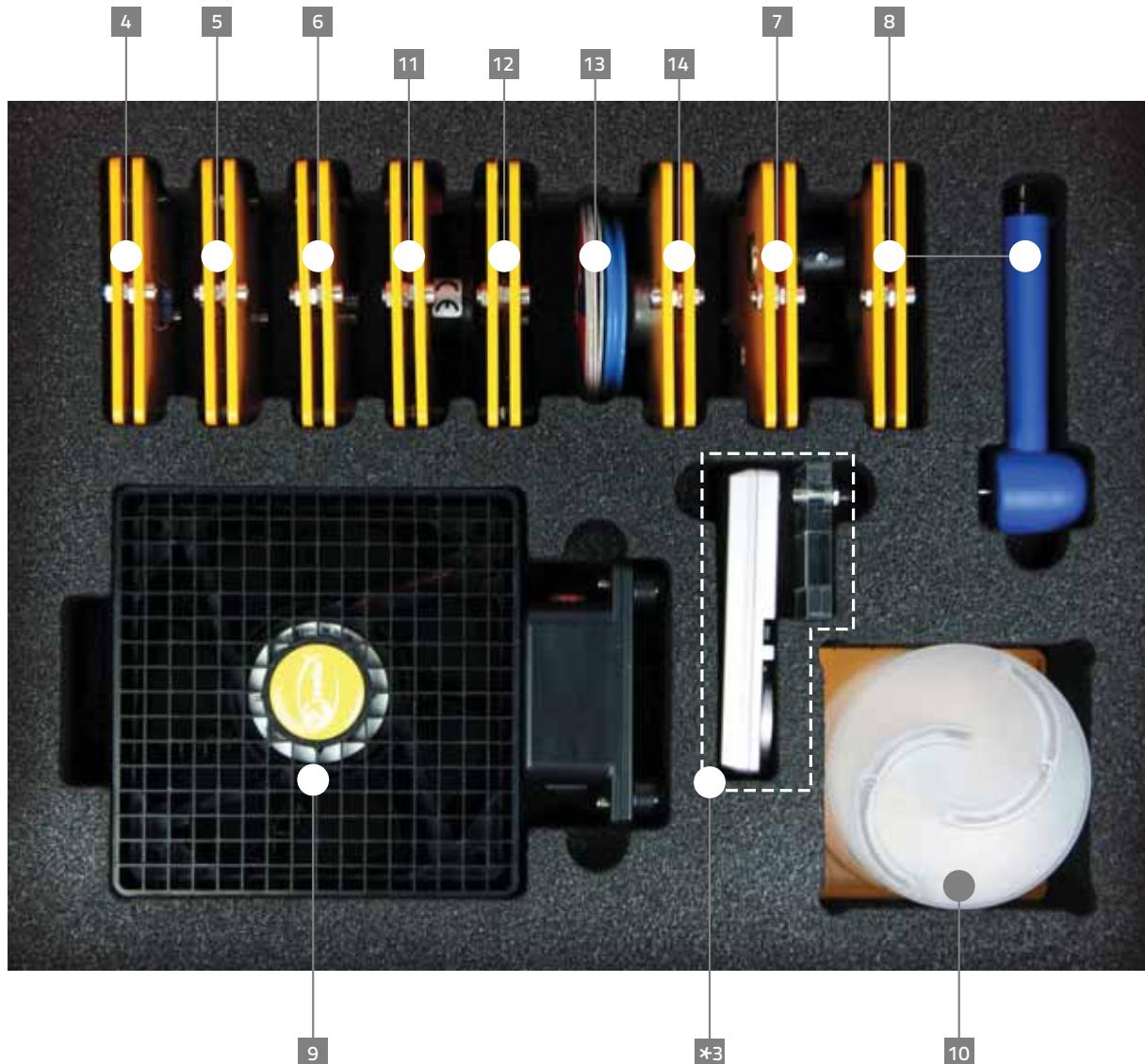
L3-03-132_25.07.2016

Layout diagram leXsolar-Wind Large 2.0

Item-No.1404

Bestückungsplan leXsolar-Wind Large 2.0

Art.-Nr.1404



- 4** 1100-22 Resistor module
1100-22 Widerstandsmodul
- 5** 1400-08 LED-module 2mA, red
1400-08 LED-Modul 2 mA, rot
- 6** 1400-07 Capacitor module 220 mF, 2.5V
1400-07 Kondensatormodul 220 mF, 2.5V
- 7** 1100-23 Potentiometer module
1100-23 Potentiometermodul
- 8** 1400-22 Wind turbine module
1400-22 Windturbinenmodul
- 9** 1400-19 leXsolar-Wind machine
1400-19 leXsolar-Winderzeuger
- 10** 1400-01 Savonius rotor module
1400-01 Savoniusrotormodul

Optional expansions Optionale Erweiterungen

- *3** 1400-02 Anemometer with mount
1400-02 Windgeschwindigkeitsmesser mit Ständer
- 11** 1100-25 Buzzer module
1100-25 Hupenmodul
- 12** 1100-26 Light bulb module
1100-26 Glühlampenmodul
- 13** 1100-28 Color discs with mount Set 1
1100-28 Farbscheiben Set 1
- 14** 1100-27 Motor module without gear
1100-27 Motormodul ohne Getriebe

leXsolar Wind Large

Lehrerheft

Inhaltsverzeichnis

I. Wissenschaftliche Grundlagen	6
1 <i>Wie entsteht Wind?</i>	6
1.1 Globale Betrachtung von Winderscheinungen	6
1.2 Einflüsse auf lokale Windverhältnisse	7
2 <i>Windenergie im Wandel der Zeiten.....</i>	8
2.1 Die Anfänge der Windenergienutzung – Rotoren mit vertikaler Drehachse	8
2.2 Erste Windkraftanlagen in Europa	9
2.3 Windenergieerzeugung ab 1900	10
3 <i>Physikalisch-Technische Grundlagen der Windenergienutzung</i>	11
3.1 Überblick über Strömungsmechanik	11
3.2 Arten verschiedener Windkraftanlagen.....	12
3.3 Physikalische Betrachtungen zur Windkraftanlage.....	15
3.3.1 Leistung und Wirkungsgrad des Windrotors	16
3.3.2 Auftrieb am Rotorblatt.....	20
3.4 Getriebe- und Generatortechnik	24
3.5 Leistungsbegrenzung am Windrotor	26
4 <i>Fakten zur Windkrafnutzung</i>	28
II. Handhabung der Experimentiergeräte leXsolar-Wind.....	31
1 <i>Bezeichnungen der Bauteile</i>	31
2 <i>Hinweise zur Handhabung</i>	37
2.1. Messung der Windgeschwindigkeit:	37
2.2. Einsetzen und Wechseln der Rotorblätter	37
2.3. Handhabung des Fingerschutzes	38
3 <i>Diagramme zu den Experimenten.....</i>	39
III. Musterlösungen der Experimente.....	40
<i>Experiment 1.1: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (phänomenologisch)....</i>	42
<i>Experiment 1.2: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (Spannungsmessung) ..</i>	44
<i>Experiment 1.3: Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (Leistungsmessung)</i>	47
<i>Experiment 2.1: Anlaufwindgeschwindigkeit an einer Windkraftanlage.....</i>	51
<i>Experiment 2.2: Anlaufwindgeschwindigkeit eines Savoniusrotors</i>	54
<i>Experiment 2.3: Vergleich der Anlaufwindgeschwindigkeit zwischen Savonius- und Dreiblattrotor</i>	57
<i>Experiment 3.1: Veränderung der Generatorspannung durch Zuschalten eines Verbrauchers.....</i>	60
<i>Experiment 3.2: Veränderung der Generatorspannung durch Zuschalten verschiedener Verbraucher.....</i>	63

<i>Experiment 4: Untersuchung der Windgeschwindigkeit hinter dem Rotor.....</i>	66
<i>Experiment 5.1: Energiebilanz an einer Windkraftanlage</i>	67
<i>Experiment 5.2: Berechnung des Wirkungsgrades einer Windkraftanlage</i>	72
<i>Experiment 6: Speicherung elektrischer Energie</i>	75
<i>Experiment 7.1: Energieumwandlungen an einer Windkraftanlage</i>	79
<i>Experiment 7.2: Untersuchungen an Farbscheiben mithilfe einer Windkraftanlage</i>	81
<i>Experiment 8.1: Vergleich von Savoniusrotor und Dreiblatttrotor (phänomenologisch)</i>	85
<i>Experiment 8.2: Vergleich von Savoniusrotor und Dreiblatttrotor (Spannungsmessung).....</i>	88
<i>Experiment 8.3: Vergleich von Savoniusrotor und Dreiblatttrotor (Leistungsmessung)</i>	91
<i>Experiment 9.1: Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblatttrotoren (phänomenologisch).....</i>	95
<i>Experiment 9.2: Vergleich von Zwei-, Drei- und Vierblatttrotoren (Leistungsmessung)</i>	98
<i>Experiment 10: Kennlinien einer Windkraftanlage mit Gleichstromgenerator</i>	102
<i>Experiment 11.1: Einfluss der Windrichtung (phänomenologisch)</i>	105
<i>Experiment 11.2: Einfluss der Windrichtung (Spannungsmessung)</i>	107
<i>Experiment 11.3: Einfluss der Windrichtung (Leistungsmessung).....</i>	110
<i>Experiment 12.1: Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (phänomenologisch)</i>	113
<i>Experiment 12.2: Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (Spannungsmessung)</i>	115
<i>Experiment 12.3: Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (Leistungsmessung)</i>	118
<i>Experiment 12.4: Anlaufgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Anstellwinkel.....</i>	121
<i>Experiment 13.1: Einfluss der Flügelform (phänomenologisch)</i>	126
<i>Experiment 13.2: Einfluss der Flügelform (Spannungsmessung)</i>	128
<i>Experiment 13.3: Einfluss der Flügelform (Leistungsmessung).....</i>	130
IV. Literaturverzeichnis	136

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 Wunderscheinungen

Die komplexen Windphänomene sollen hier nur stark vereinfacht skizziert werden. Ursprung sämtlicher Wunderscheinungen 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 mit hohem und niedrigem Druck¹. Der Druckunterschied wird durch eine Bewegung der Luftmassen vom Ort des höheren zum Ort des geringeren Druckes ausgeglichen. Diese Luftbewegung zwischen einem Hoch- und einem Tiefdruckgebiet nennt man Wind.

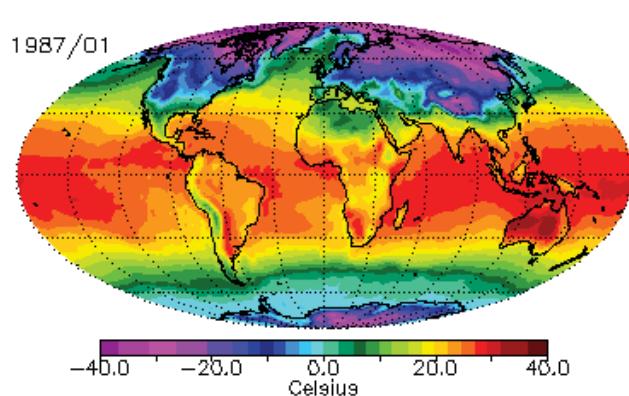


Abbildung 1-1 Temperaturverteilung der Erde (Januar 1987)

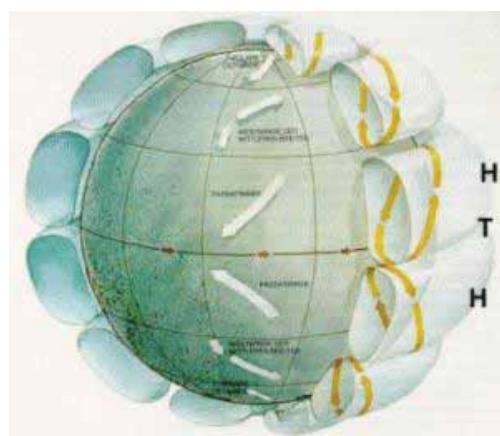


Abbildung 1-2 Globale Luftströmungen

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

berechnet werden. Sie vergrößert sich mit zunehmender Windgeschwindigkeit sehr stark. (Quaschning, 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 39 gegeben. Bei der Planung von Windkraftanlagen auf dem Festland Europas nimmt man für die Dichte einen bestimmten Wert an ($\rho = 1,225 \frac{kg}{m^3}$)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.

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, dass eine horizontale Drehachse besitzt. Aber wie kann man die Nutzung des Windes nun beschreiben?

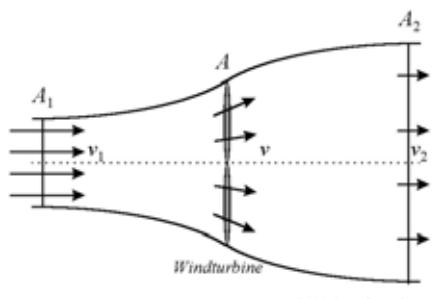


Abbildung 3-12: Luftströmung am Rotor

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

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

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

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.

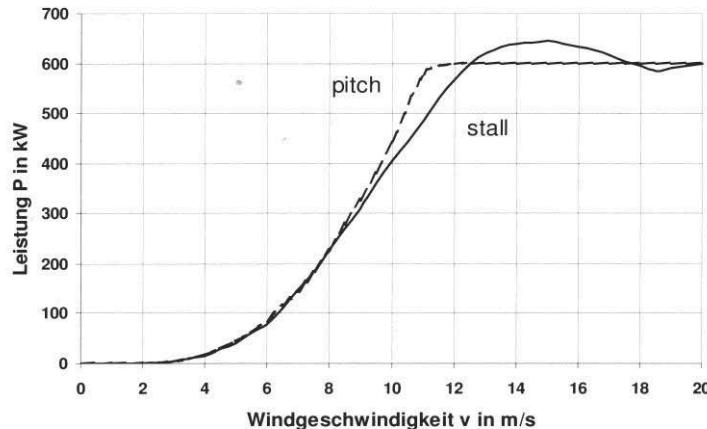


Abbildung 3-23 Vergleich der Leistung zwischen Anlagen mit Pitch- oder Stallregelung

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

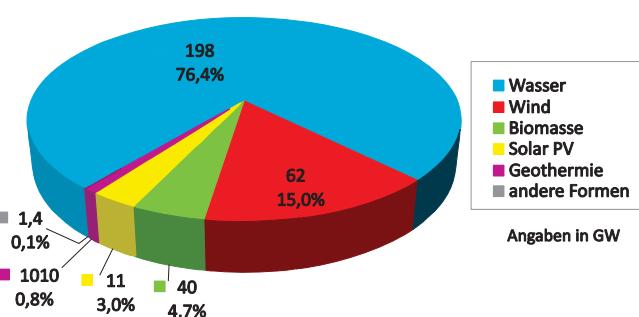
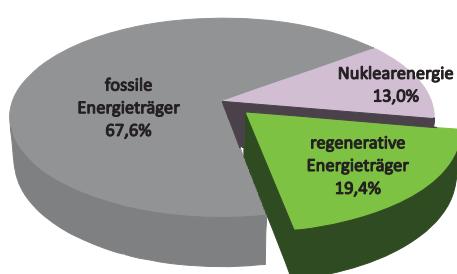


Abbildung 4-2 Anteile verschiedener Energiformen an der gesamten durch regenerative Energieträger zur Verfügung gestellten Energie (2010)

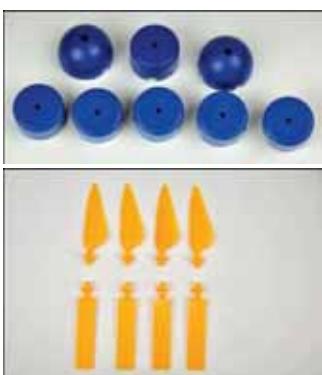
Abbildung 4-1 Anteil der verschiedenen Energieträger am weltweiten Energiehaushalt (2010)

Energieträger erzeugt. Die Nutzung von Wasser als Energiequelle hat dabei den größten Anteil (76,4%), wird aber direkt von der

Technische Daten:

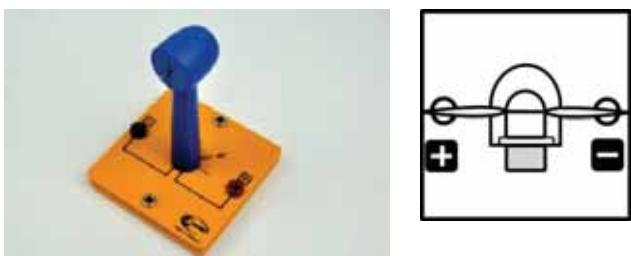
- Maximale Spannung: 12V DC (stabilisiert)
- Windgeschwindigkeit: 0 – 7m/s

Windrotoren 1400-12



Aus den Bestandteilen können Rotoren mit 2, 3 oder 4 Rotorblättern mit einem flachen Profil oder einem optimierten Profil zusammensetzt werden. Der 4-fach Nabeneinsatz ist in einem Anstellwinkel von 25° und der 3-fach Einsatz in den Anstellwinkeln 20°, 25°, 30°, 50° und 90° vorhanden.

leXsolar-Windturbinenmodul 1400-22



Zunächst muss die blaue Windturbine auf die entsprechende Modulplatte gesteckt werden. Auf die Generatorwelle wird dann ein Windrotor befestigt, um eine kleine Windkraftanlage zu erhalten. Der Rotor sollte dabei nicht das Gehäuse der Turbine berühren, da er sich durch die Reibung deutlich schwerer drehen kann.

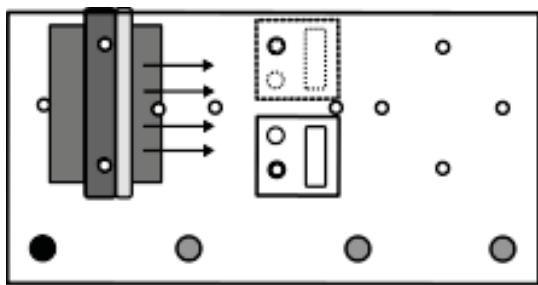
Der Generator erzeugt eine Gleichspannung, deren Polung auf der Modulplatte erkennbar ist. Des Weiteren ist auf die Modulplatte eine Winkelskala aufgedruckt, mit der die Turbine in einem bestimmten Winkel in den Wind gedreht werden kann.

Während sich der Rotor dreht, besteht Verletzungsgefahr. Der Rotor darf nur angefasst werden, wenn er nicht rotiert!

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:



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.

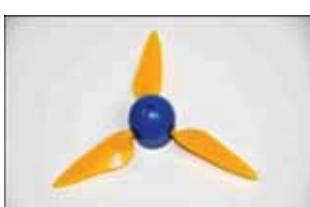
2.2. Einsetzen und Wechseln der Rotorblätter



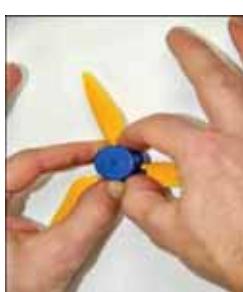
Zuerst wird eine Nabe mit dem gewünschten Anstellwinkel und der Flügelzahl ausgewählt (die Nabens sind auf der Rückseite entsprechend beschriftet). Der Zweiflügel- und Vierflügel-Rotor kann mithilfe der Nabe mit 4 Einsätzen aufgebaut werden



Danach werden die Rotorflügel 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 Nabekappe 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.

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, so dass Sie selbst entscheiden müssen, welche Ergebnisse Sie von den Schülern fordert. Als Spannungsquelle für den Winderzeuger wurde das leXsolar PowerModul verwendet, dass Spannungen von 0 V bis 12 V in 0,5 V-Schritten anlegen kann. Unter Umständen kann ihre zur Verfügung stehende Spannungsquelle die vorgegebenen Spannungswerte nicht bereitstellen, so dass sie eigene Musterlösungen anfertigen müssen.

Als Erweiterungen für das leXsolar Wind Large Experimentiersystem gibt es das PowerModul, sowie das Windgeschwindigkeitsmessgerät. Für die Musterlösungen wurde vorausgesetzt, dass alle Komponenten vorhanden sind. Überprüfen sie daher vor der Durchführung, ob der Versuch mit den vorhandenen Komponenten durchgeführt werden kann.

Als Hilfestellung 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		
2.3			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)	



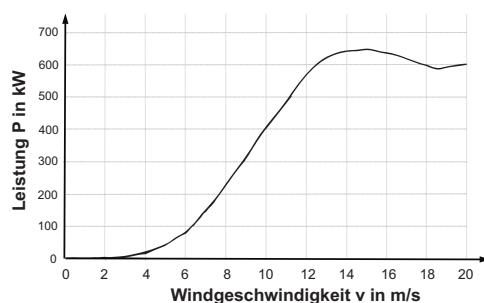
1.3 Einfluss der Windgeschwindigkeit auf eine Windturbine (Leistungsmessung)

Auswertung

1. Berechne für die entsprechenden Spannungen die jeweilige elektrische Leistung. Trage die Wertepaare anschließend in die zugehörigen Diagramme ein.
2. Beschreibe den Zusammenhang zwischen Leistung und Windgeschwindigkeit am Windgenerator.
3. Ziehe Schlussfolgerungen für den Betrieb realer Windkraftanlagen!

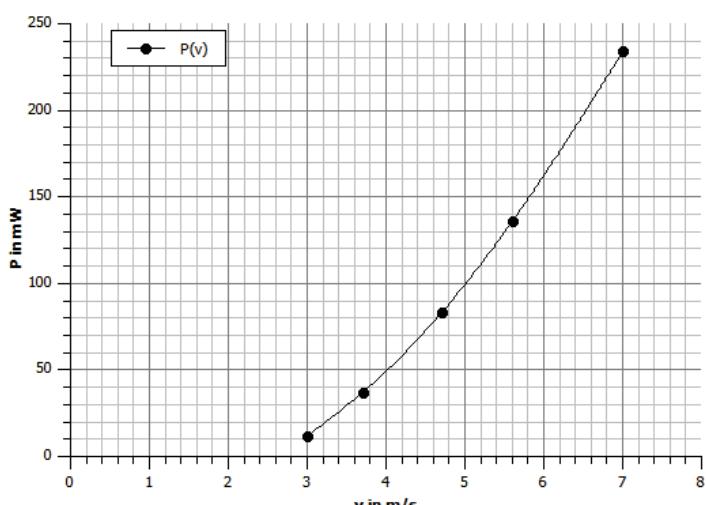
Zusatz:

Bei realen Windkraftanlagen existiert der folgende Zusammenhang zwischen Leistung und Windgeschwindigkeit des Rotors.



Erklären, wieso die Leistung bei sehr hohen Windgeschwindigkeiten 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)



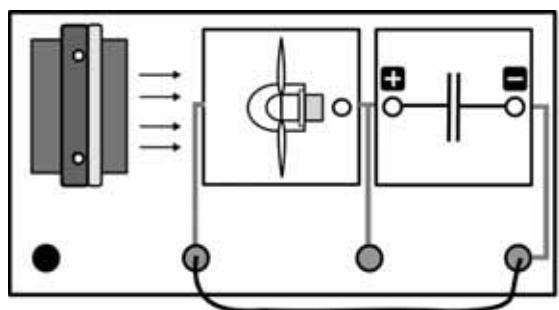
6. Speicherung elektrischer Energie

Aufgabe

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

Achtung Verletzungsgefahr: Berühre nicht den drehenden Rotor

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Spannungsquelle (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.

Durchführung

1. Baue den Versuch wie in der Versuchsanordnung vorgegeben auf, vorerst jedoch ohne LED.
2. Stelle die Spannungsquelle auf 9V ein und starte den Winderzeuger. Der Kondensator wird aufgeladen, sobald sich der Windgeneratormodul dreht.
3. Lade den Kondensator ungefähr eine Minute lang auf. Entferne danach das Windgeneratormodul von der Grundeinheit.
4. Stecke anschließend das LED-Modul neben den Kondensator auf die Grundeinheit und beobachte die Leuchtdiode. Beachte die Polarität beim Aufstecken (Minus an Minus, Plus an Plus).

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. Benenne neben dem Kondensator weitere Möglichkeiten um elektrische Energie speichern können.
3. Erläutere, weshalb die Speicherung von elektrischer Energie, die durch Windkraftanlagen erzeugt wurde, besonders wichtig ist. Wo wären solche Speicher in Verbindung mit Windenergienutzung sinnvoll einsetzbar.



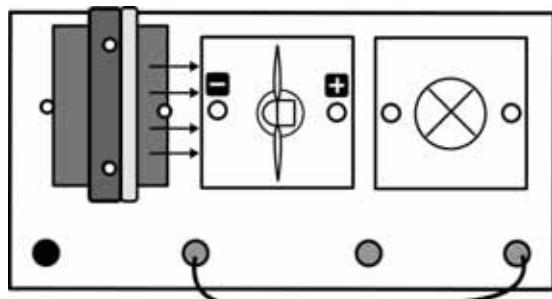
12.1 Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (phänomenologisch)

Aufgabe

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

Achtung Verletzungsgefahr: Berühre nicht den drehenden Rotor

Aufbau



Benötigte Geräte

- leXsolar-Grundeinheit
- Winderzeugermodul mit Spannungsquelle (9V)
- Windgeneratormodul
- 3-Flügler (alle Winkel, optimiertes Profil)
- Glühlampenmodul
- 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 bei einer Spannungsquellenspannung von 9V ein und beobachte die Helligkeit der Glühlampe. 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 Glühlampe leuchtet...						hell schwach gar nicht

Vervollständige nun den angegebenen Text:

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

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

Experiment 12.2: Einfluss des Anstellwinkels der Rotorblätter (Spannungsmessung)

Inhalte des Experimentes:

Es soll der Einfluss des Anstellwinkels bei unterschiedlich ausgerichteten Rotorblättern auf die erzeugte Spannung am Windgenerator untersucht werden. Dafür werden die Spannungswerte am Windgenerator für verschiedene Anstellwinkel der jeweiligen 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 25° erreicht. Mit größerem Abstand zu diesem Winkel sinkt die Spannung rapide. Dieser Effekt kommt folgendermaßen zustande: bei größeren Winkeln kommt es zum sogenannten Strömungsastriss, wodurch sich der Auftrieb an den Rotorflügel stark verringert (genauereres kann im Kapitel 3.5 nachgelesen werden). Bei kleinen Winkeln ist die Angriffsfläche zu gering. Durch den verringerten Auftrieb ändert sich die Leistungsaufnahme des Rotorblattes, was sich im Versuch in einer kleineren Drehzahl und damit verringelter 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.

leXsolar GmbH
Strehlener 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