

1.1 Musterlösung

Vom Wind zur Windmessung

- 1) Durch Sonneneinstrahlung erwärmt sich die Luft und steigt in höhere Atmosphärenschichten auf, wodurch in den unteren Schichten ein **Unterdruck** (Tiefdruck) entsteht. In anderen Gebieten kühlt die Luft in den oberen Atmosphärenschichten ab und sinkt wieder herab, wodurch dort ein atmosphärischer **Überdruck** (Hochdruck) entsteht. Die **Ausgleichsströmung** zwischen Hochdruck und Tiefdruck wird als Wind bezeichnet.
- 2) Wind strömt gegen Windflügel und versetzt den Rotor in eine **Drehbewegung**, wodurch ein Drehmoment erzeugt wird. Dieses Drehmoment wird auf einen **Generator** übertragen, der elektrische Energie liefert.
- 3) Die Windmessung wird beispielsweise in folgenden Anwendungsgebieten verwendet, wobei in der Aufgabe sechs Anwendungsgebiete genannt werden sollten:
 - a. Ballistik
 - b. Bauwesen (im Hochbau, bei Turm- und Brückenbauwerken)
 - c. Brandbekämpfung
 - d. Düngemittelausbringung in der Landwirtschaft
 - e. Heiz- und Lüftungstechnik
 - f. Luftfahrt
 - g. Meteorologie
 - h. Schifffahrt
 - i. Sportwettbewerbe (Laufen, Skispringen etc.)
- 4) Folgende Arten von Anemometern werden u. a. verwendet, wobei bei der Aufgabe lediglich vier Arten gefordert waren:
 - a. Flügelrad-Anemometer
 - b. Hitzdrahtanemometer
 - c. Schwingplattenanemometer
 - d. Staudruckanemometer
 - e. Schalensternanemometer
 - f. Ultraschallanemometer
- 5) Die oben genannten Anemometer basieren auf folgenden Prinzipien:
 - a. akustisch (durch Messung von Ultraschallimpulsen),
 - b. mechanisch (Übersetzung des Winddrucks),
 - c. optisch (mittels Laser-Dopplers)
 - d. thermisch (durch Kühlung eines Hitzdrahtes),

1.2 Musterlösung

Schwingplattenanemometer

- 1) Die Platte des Schwingplattenanemometers ist oben **drehbar gelagert** und wird durch den Winddruck aus ihrer senkrechten Lage ausgelenkt. Der Auslenkungswinkel ist abhängig vom **Winddruck**.
- 2) Der Strömungswiderstandskoeffizient c_w ist der **Widerstand**, den ein Körper einem ihn **umströmenden Medium entgegensetzt**. Es handelt sich dabei um eine dimensionslose Größe, da hier ein Verhältnis zwischen der Widerstandskraft und der Anströmung sowie einer Referenzfläche entscheidend ist.
- 3) Der Strömungswiderstandskoeffizient c_w eines Körpers hängt von seiner **Form** ab.
- 4) Sowohl die Anzahl der Anwendungen für einen besonders großen als auch für einen besonders kleinen Strömungswiderstandskoeffizient c_w ist sehr groß, sodass an dieser Stelle lediglich eine Auswahl dargestellt werden kann:

Ein besonders **großer** Strömungswiderstandskoeffizient c_w ist u. a. bei folgenden Anwendungen wichtig:

- a. Anemometer
- b. Fallschirm
- c. Luftbremsen
- d. Segel
- e. Windbrecher
- f. Windrad

Bei den folgenden Anwendungen ist ein **kleiner** Strömungswiderstandskoeffizient c_w entscheidend:

- a. Bauwerke
 - b. Fahrzeuge
 - c. Fische
 - d. Pfeile
 - e. Speere und Projektile
 - f. Sportbälle (Golfball, Football)
 - g. Vögel
- 5) Zwischen dem Winkel α , der Fläche der Platte A und ihrer windwirksamen Fläche A_w besteht eine mathematische Abhängigkeit gemäß der Kosinusfunktion:

$$\cos \alpha = \frac{A_w}{A}$$

$$\cos \alpha = \frac{a \cdot b}{b \cdot c}$$

$$\boxed{\cos \alpha = \frac{a}{c}}$$

- 6) Um die einzelnen Windgeschwindigkeiten auszurechnen, die für die jeweiligen Ausschläge des Schwingplattenanemometers verantwortlich sind, bestimmen wir zunächst den allg. Zusammenhang der einzelnen Größen. Hier gehen wir von der vereinfachten Beziehung aus, die beispielsweise die Reibung des Drehlagers und die Kräfte, die auf das Lager wirken, vernachlässigt:

$$F = G$$

Die Kraft F kann nach unseren Vorgaben wie folgt bestimmt werden:

1.2 Musterlösung

$$F = A_w \cdot p_{wind}$$

$$F = A_w \cdot c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{wind}^2$$

$$F = A \cdot \cos \alpha \cdot c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{wind}^2$$

Nun muss die Gewichtskraft bestimmt werden:

$$G = m \cdot g$$

$$G = \gamma \cdot A \cdot g$$

Bei den restlichen Berechnungen muss die Gleichung entsprechend umgestellt werden, um die Geschwindigkeit zu bestimmen:

$$A \cdot \cos \alpha \cdot c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v_{wind}^2 = \gamma \cdot A \cdot g$$

$$v_{wind}^2 = \frac{\gamma \cdot A \cdot g}{A \cdot \cos \alpha \cdot c_w \cdot \frac{\rho}{2}}$$

$$v_{wind}^2 = \frac{2 \cdot \gamma \cdot A \cdot g}{A \cdot \cos \alpha \cdot c_w \cdot \rho}$$

$$v_{wind} = \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma \cdot A \cdot g}{A \cdot \cos \alpha \cdot c_w \cdot \rho}}$$

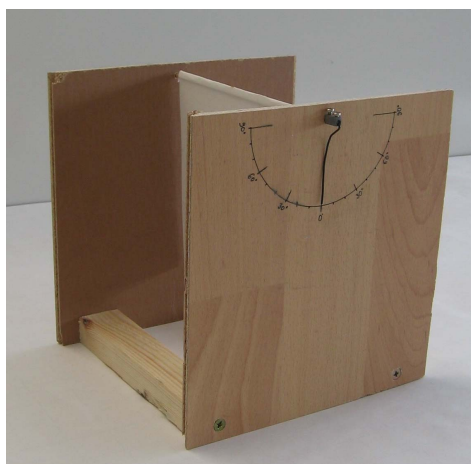
Um die tatsächliche Geschwindigkeit zu bestimmen werden nun die einzelnen Werte eingesetzt:

$$v_{30^\circ} = 2,26 \frac{m}{s}$$

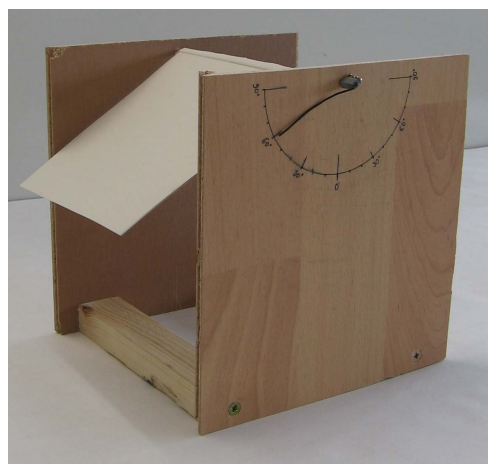
$$v_{60^\circ} = 2,98 \frac{m}{s}$$

$$v_{75^\circ} = 4,14 \frac{m}{s}$$

- 7) Es gibt bestimmt eine Menge Möglichkeiten, den Schwingplattenanemometer aufzubauen. Wir haben folgenden Aufbau verwendet:



Messung bei Windstille



Messung beim Wind

1.2 Musterlösung

- 8) Während wir bei der Frage 6 den Ausschlag vorgegeben haben, werdet ihr an dieser Stelle eure Messergebnisse verwenden. Beachtet bitte, dass die entwickelte Formel für den Fall $v_{wind} = 0$ nicht gilt.

Messbedingung	Ausschlagwinkel α	Windgeschwindigkeit v_{wind}
Windstille	0°	$0 \frac{m}{s}$
Leichter Wind	z. B. 30°	$2,26 \frac{m}{s}$
Starker Wind	z. B. 75°	$4,14 \frac{m}{s}$

1.3 Musterlösung

Photovoltaik

In der Einleitung zu dieser Aufgabe haben wir uns nicht korrekt ausgedrückt. Bei der Nutzung des Photoelektrischen Effekts ist nicht die Strahlungsintensität sondern die Energie des einzelnen Photons entscheidend, sodass hier die Wellenlänge (Farbe) des Lichtes von Bedeutung ist.

- 1) Der photovoltaische Effekt wird beispielsweise in folgenden Anwendungen genutzt:
 - a. Photodetektoren
 - b. Lichtschranken
 - c. Sensorchips in Digitalkameras und Mobiltelefonen
- 2) Aufgrund der Tatsache, dass eine erhebliche Menge des Halbleitermaterials in unserer „Mikroelektronik-Gesellschaft“ benötigt wird, wird Silizium verwendet. Silizium steht in nahezu unendlicher Menge auf der Erde zur Verfügung.
- 3) Das Längenverhältnis des einfallenden Lichts zu der Senkrechten kann (näherungsweise) durch die Kosinusfunktion beschrieben werden. Der Weg durch die Atmosphäre verlängert sich um einen Faktor s , wobei β der nördlichen Breite entspricht:

$$s = \frac{1}{\cos \beta}$$

$$s = \frac{1}{\cos 51^\circ}$$

$$s \approx 1,59$$

Die zur Verfügung stehende Energie ist somit um einen Faktor l verringert:

$$l = 100\% \cdot 0,8 \cdot \cos 51^\circ$$

$$l \approx 0,503$$

$$l \approx 50\%$$

- 4) Bei den multikristallinen Modulen, die mit einer maximalen Leistung betrieben werden, beträgt die Amortisationszeit 7,7 Jahre. Nach dieser Zeit haben die Module genauso viel Energie erzeugt, wie für die Herstellung dieser Module nötig war:

$$t = \frac{w_{\text{Herstellung}}}{t_{\text{Sonnenschein}}}$$

$$t_{\text{Multi}} = \frac{12.000 \frac{\text{kWh}}{\text{kW}}}{1550 \frac{\text{h}}{\text{a}}}$$

$$t_{\text{Multi}} \approx 7,74 \text{ a}$$

Bei den Dünnschichtmodulen beträgt diese Zeit lediglich 1,9 Jahre:

$$t_{\text{Duennschicht}} = \frac{3.000 \frac{\text{kWh}}{\text{kW}}}{1550 \frac{\text{h}}{\text{a}}}$$

$$t_{\text{Duennschicht}} \approx 1,94 \text{ a}$$

- 5) Der Wirkungsgrad stellt das Verhältnis zwischen der Menge der erzeugten Energie und der Menge der einfallenden Energie dar. In unserem Beispiel erreichen 1367 W/m² (Solarkonstante) die Erde, wovon ca. 50% in der Atmosphäre absorbiert werden:

1.3 Musterlösung

$$\eta_{Multi} \approx \frac{130 \frac{W}{m^2}}{1367 \frac{W}{m^2} \cdot 0,503}$$

$$\eta_{Multi} \approx 18,9 \%$$

$$\eta_{Duenschicht} \approx \frac{70 \frac{W}{m^2}}{1367 \frac{W}{m^2} \cdot 0,503}$$

$$\eta_{Duenschicht} \approx 10,2 \%$$

- 6) Um die benötigte Fläche für die Abdeckung des Jahresbedarfs eines 4-Personenhaushaltes zu ermitteln, betrachten wir die maximal erzeugte Leistung des jeweiligen Moduls pro Flächeneinheit. Zunächst kann die Zeit als ein Verhältnis zwischen Arbeit W und Leistung P formuliert werden, wobei die Leistung von der Fläche A und der flächenbezogenen Energie E abhängt:

$$t = \frac{W}{P}$$

$$t = \frac{W}{E \cdot A}$$

Diese Gleichung kann nach der Fläche umformuliert werden, sodass die benötigten Flächen beider Technologien bestimmt werden können:

$$A = \frac{W}{E \cdot t}$$

$$A_{Multi} \approx \frac{5000 \text{ kWh}}{0,13 \frac{\text{kW}}{m^2} \cdot 1550 \text{ h}}$$

$$A_{Multi} \approx 24,8 \text{ m}^2$$

$$A_{Duenschicht} \approx \frac{5000 \text{ kWh}}{0,07 \frac{\text{kW}}{m^2} \cdot 1550 \text{ h}}$$

$$A_{Duenschicht} \approx 46,1 \text{ m}^2$$

- 7) Eine identische Betrachtung kann für Deutschland vorgenommen werden:

$$A_{Multi} \approx \frac{597 \cdot 10^9 \text{ kWh}}{0,13 \frac{\text{kW}}{m^2} \cdot 1550 \text{ h}}$$

$$A_{Multi} \approx 2962 \text{ km}^2$$

$$A_{Duenschicht} \approx \frac{597 \cdot 10^9 \text{ kWh}}{0,07 \frac{\text{kW}}{m^2} \cdot 1550 \text{ h}}$$

$$A_{Duenschicht} \approx 5502 \text{ km}^2$$

1.4 Musterlösung

Wirtschaftlichkeit

1) Für die Berechnung der jährlichen Kosten sollte zunächst eine Recherche bzgl. des Verbrauchs eines drei bis vier Personen Haushalts sowie der Tarife der regionalen Anbieter recherchiert werden. Wir gehen von folgenden Daten aus:

- Stromverbrauch: 5000 kWh/a
- Verbrauchsunabhängiger Preis: 95,52 EUR/a
- Verbrauchsabhängiger Preis: 16,23 Cent/kWh

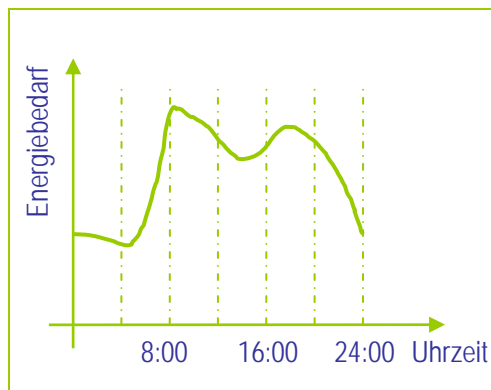
Damit betragen die Gesamtkosten 907,92 EUR pro Jahr:

$$K = K_{Verb.unabh.} + k_{Verb.abh.} \cdot E$$

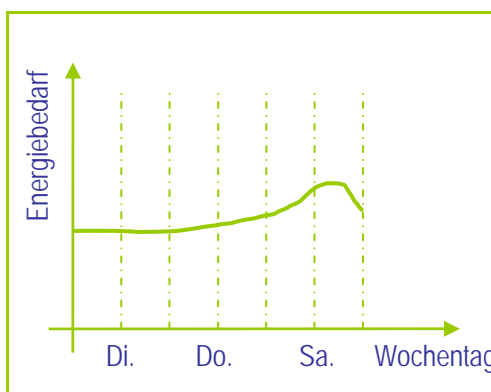
$$K = 95,53 \frac{EUR}{a} + 16,23 \frac{Cent}{kWh} \cdot 5000 \frac{kWh}{a}$$

$$K = 907,02 \frac{EUR}{a}$$

2) Die Profile spiegeln das gewöhnliche Verhalten der Menschen wider. Während der Verbrauch nachts sowie um die Mittagszeit gering ist, ist der Verbrauch morgens (vor der Schule etc.) und abends am höchsten, da zu diesen Zeiten alle Haushaltsmitglieder aktiv sind.

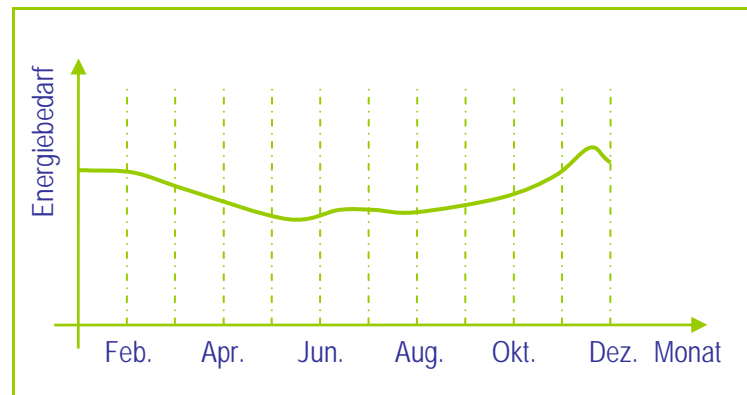


Wird ein Zeitraum von einer Woche betrachtet, so ist es auffallend, dass am Wochenende mehr Energie benötigt wird, da in diesem Zeitraum die Haushaltsmitglieder zu Hause aktiv sind.



Dunkle Abende und späte Sonnenaufgänge im Winter führen dazu, dass der Energiebedarf in den Wintermonaten steigt.

1.4 Musterlösung



Beachtet, dass die Profile Tendenzen aufzeigen und keine exakten Angaben über den Verbrauch machen.

- 3) Bei jeder Energieerzeugung (bzw. -wandlung) wird der maximale Ertrag einer Anlage angestrebt. So ist es selbstverständlich auch bei Windkraftanlagen, bei denen folgende Aspekte einen positiven Einfluss auf die Energiemenge haben:
- **Standort** mit größtmöglicher „mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit“. Diese Daten können bei dem Deutschen Wetter Dienst (www.dwd.de) abgerufen werden.
 - **Höhe der Anlage**, da die Windgeschwindigkeit höhenabhängig ist. An dieser Stelle bietet beispielsweise der Deutsche Wetterdienst Daten, die sich auf die Höhe von 10m und 80 m beziehen.
 - Die **Größe der Anlage** spielt ebenfalls eine wichtige Rolle, wobei hier die Fläche der Rotorblätter entscheidend ist.
 - Nicht nur die Größe, sondern auch die **Form der Rotorblätter** hat einen entscheidenden Einfluss auf den Ertrag einer Anlage, da hiermit der Windwiderstand beeinflusst wird.
 - Neben der Form kann der Ertrag zusätzlich durch den sogenannten **Pitch** (Anstellwinkel) des Rotors verändert werden. Auch dieser Aspekt hat einen Einfluss auf den Widerstand eines Rotors.
 - Schließlich entscheidet der **Typ der Rotoren** (horizontal oder vertikal (z.B. Darrius-Rotor)) und **Generatoren** über den Ertrag einer Anlage.
- 4) Die Energiegewinnung mittels der Windkraftanlagen hat neben den enormen Vorteilen einige Problemfelder, die ihren Einsatz beschränken:
- **Lärm** durch Strömungsabriss, Strömungsgeräusche sowie durch die Mechanik in Getriebe und Generatoren, der in bewohnten Gebieten eine Belastung für den Menschen und die Tiere sein kann.
 - Sich bewegende **Schatten**, die auf Wohn- und Arbeitsräume und Ställe von den Anlagen geworfen werden, können ebenfalls von Menschen und Tieren negativ empfunden werden.
 - Für die **Vögel und Fledermäuse** stellen die Rotoren eine Gefahr dar, da die Tiere in den Bereich der drehenden Rotorblätter hereinfliegen können.
 - Die Anlagen beeinflussen negativ zudem aufgrund ihrer Höhe das **Landschaftsbild**.
 - Bei dem Sonderfall von Off-Shore-Anlagen ist ein **Eingriff in den Meeresboden** notwendig, da Fundamentelemente und Leitungen aufgestellt bzw. verlegt werden müssen. Überdies spielt der o. g. **Lärm** ebenfalls eine Rolle, da hier die Meerestiere beeinträchtigt werden können. In diesem Bereich wird aktuell nach einer Beeinflussung der Meerestiere durch diesen Aspekt untersucht.
 - Neben der Beeinflussung der Meeresbewohner haben zusätzlich die Off-Shore-Anlagen eine Auswirkung auf die Schifffahrt, bei der diese Anlagen zusätzliche **Hindernisse** darstellen.

1.4 Musterlösung

5) Es gibt sicherlich eine große Anzahl von Möglichkeiten, die Problemfelder der Windkraftanlagen zu minimieren. Die Wahl eines **geeigneten Standorts** spielt eine wichtige Rolle, da hier eine gewisse Entfernung von Siedlungen bei gleichzeitiger Beachtung des Vorkommens von bestimmten Tierarten zu einer höheren Akzeptanz der Windkraft führen kann. Trotz der o. g. Aspekte scheinen Off-Shore-Anlagen vielversprechend, da hier ein Teil der Nachteile keine Rolle spielt. Auch eine **bedachte Integration** der Windkraftanlagen in Landschaftsbilder kann die Nutzung positiv beeinflussen.

6) Bei der Betrachtung können wir zunächst die gegebenen Größen auflisten:

- Rotordurchmesser $d = 1 \text{ m}$
- Nennleistung $P_N = 0,2 \text{ kW}$
- $t_{\text{Volllast}} = 2000 \text{ h/a}$
- Verbrauchsabhängiger Preis des lokalen Anbieters: $0,15 \text{ EUR/kWh}$
- Anschaffungspreis der Anlage $K_{\text{Anlage}} = 500,- \text{ EUR}$

Nun kann die Energiemenge bestimmt werden, die dem Verbraucher in einem Jahr zur Verfügung gestellt wird:

$$E = P_N \cdot t_{\text{Volllast}}$$

$$E = 0,2 \text{ kW} \cdot 2000 \frac{\text{h}}{\text{a}}$$

$$E = 400 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

7) Mit der Energiemenge, die in der vorausgegangenen Aufgabe bestimmt wurde, kann der „Gewinn“ der Anlage berechnet werden:

$$G = E \cdot k_{\text{Verb.abh.}}$$

$$G = 400 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \cdot 0,15 \frac{\text{EUR}}{\text{kWh}}$$

$$G = 60 \frac{\text{EUR}}{\text{a}}$$

Die Anlage hat sich dann (theoretisch) amortisiert, wenn die Anschaffungskosten durch den Gewinn gedeckt sind. Dies ist nach ca. 8,3 Jahren der Fall:

$$t_{\text{Amortisiert}} = \frac{K_{\text{Anlage}}}{G}$$

$$t_{\text{Amortisiert}} = \frac{500 \text{ EUR}}{60 \frac{\text{EUR}}{\text{a}}}$$

$$t_{\text{Amortisiert}} \approx 8,3 \text{ a}$$

8) Um dem Unterschied zwischen den Erzeugungs- und Verbrauchsprofilen entgegen zu wirken, ist eine Reihe von Lösungsmöglichkeiten denkbar, wobei sie auf das Speichern von Energie abzielen:

- Die naheliegende Möglichkeit ist die Speicherung mithilfe von **Akkus**, wobei hier erhebliche Kosten entstehen. Lithium- und Blei-Akkus können mehrer 100 EUR/kWh verschlingen. Dieser Faktor wird sich auch in Zukunft aufgrund des begrenzten Vorrates der Grundelemente Lithium und Blei nicht stark ändern.

1.4 Musterlösung

- Eine andere Möglichkeit, die Energie zu speichern, stellen **Pumpspeicherkraftwerke** dar. Hier wird in Zeiten, in den die Energie der Windkraft- bzw. Solaranlage nicht vollständig benötigt wird, das Wasser in ein höher gelegenes Staubecken gepumpt. Tritt ein Energiemangel auf, so kann das Wasser in das Tal heruntergelassen werden, wobei es Turbinen antreibt. Die Turbinen dienen zu diesem Zeitpunkt als Generatoren, die Elektrizität erzeugen.
- Als letzte Möglichkeit für die Speicherung sei der **Latentwärmespeicher** genannt. Bei dieser Lösung wird die Tatsache genutzt, dass Materialien Energie aufnehmen, wenn sie vom festen zum flüssigen Aggregatzustand (Schmelzen) wechseln. Diese Energie ist nun „gebunden“ (latent) bis der umgekehrte Vorgang eingeleitet wird. Das Material wechselt vom flüssigen in den festen Aggregatzustand (gefrieren) und gibt diese Energie ab.

Überdies gibt es einen weiteren Ansatz, der nicht die Speicherung sondern einen sofortigen Verbrauch der Energie in den Vordergrund stellt. Die Erzeugungs- und Verbrauchsprofile unterscheiden sich lediglich, wenn nur ein Ort betrachtet wird. Wird jedoch die Erzeugung an einem Ort der Erde vorgenommen und an einem anderen verbraucht, so kann dann die Energie sofort verbraucht werden. Es ist somit eine **Strombörse** denkbar, an der Energie gehandelt wird. Hier können auch größere Verbraucher (Industriebetriebe etc.) Energie beziehen.