

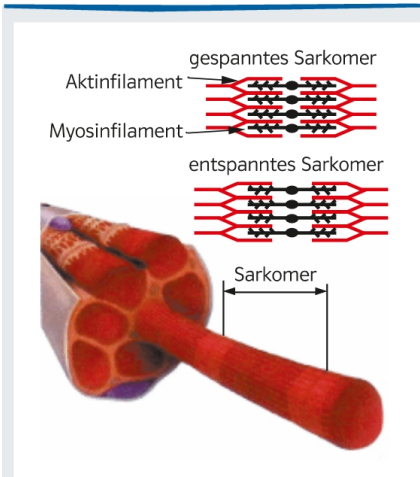
Arbeit und Energie - Querverbindungen

Alltag

Muskelarbeit



Sind Gehen und Koffertragen Arbeit?



70.3 Aufbau von Muskelfasern. Die kleinste Einheit ist das Sarkomer, das sich unter Energieumsatz verkürzt: Köpfchen am Myosinfilament stützen sich am nahen Aktinfilament ab und verkürzen die Faser durch Nicken. Danach entspannen sie sich wieder.

Gelegentlich wird behauptet, dass nach den Gesetzen der Physik beim Gehen oder Koffertragen in der Ebene keine Arbeit verrichtet werde. Die Kraft, mit der wir uns aufrecht halten, bzw. den Koffer tragen, ist vertikal nach oben gerichtet, der Weg ist jedoch horizontal: Daher gibt es keine Kraftkomponente in Bewegungsrichtung und daher ist $W=0$! Unsere Erfahrung sagt uns das Gegenteil! Wo liegt der Fehler?

Beim gleichmäßigen Gehen und Laufen wird der Körper abwechselnd gehoben und gesenkt, also Hubarbeit geleistet. Die Beinmuskulatur wirkt als Stoßdämpfer, wobei durch Reibung zwischen den Muskelfasern Bewegungsenergie in Wärmeenergie umgewandelt wird. Gleichzeitig werden die Beine abwechselnd nach hinten beschleunigt und wieder abgebremst.

Um einen Koffer zu halten, muss man die Muskeln anspannen. Jede Muskelanspannung erfordert einen Energieumsatz. Die Biologie hat dies auf der Ebene der Zelle und der Moleküle erforscht: Chemische Energie wird gebraucht, damit sich Muskelfasern verkürzen und ständig wieder spannen (**70.3**). Und wo endet die umgesetzte Energie schließlich? In Erwärmung der Muskulatur, also in innerer Energie!

Straßenverkehr

Physik im Alltag - Arbeit, Energie und Leistung

PKW - Fahrwiderstand

Der Wunsch nach individueller Mobilität, nach dem eigenen Fahrzeug, hat einen hohen Preis. Am Beispiel von Kraftfahrzeugen sehen wir Energieumwandlungen mit großen Verlusten. Die chemische Energie des Treibstoffs wird im Verbrennungsmotor zu weniger als 50 % in mechanische Energie gewandelt, mehr als die Hälfte erwärmt die Umwelt. Die verfügbare mechanische Energie wird teils in kinetische Energie des Fahrzeugs und auf Steigungen in potenzielle Energie umgewandelt, teils in elektrische Energie für die KFZ-Elektronik, Klimaanlage und Beleuchtung. Ein Teil geht für Luftwiderstand und Rollwiderstand auf, wieder wird durch Reibung die Umwelt erwärmt. Es eröffnen sich viele Fragen, doch fragen wir hier nur, wie wichtig Roll- und Luftwiderstand bei PKWs sind?

Rollwiderstand

Rollwiderstand

Auf S. 41 haben wir die Rollreibung als $F_R = f_R \cdot F_G$ kennen gelernt. Sie wirkt entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung. Um sie auszugleichen, muss der Antrieb des PKW eine gleich große Kraft in Fahrtrichtung liefern.

Für die Rollreibung von PKW-Reifen auf normaler Fahrbahn gilt $f_R \approx 0,02$. Um also einen Kleinwagen mit $m = 1000 \text{ kg}$ (Gewicht F_G ca. 10 kN) zu bewegen, müssen wir eine Kraft von etwa 200 N aufwenden, entsprechend dem Gewicht von zwei Eimern Wasser.

Wie wirkt sich der Rollwiderstand beim Fahren aus? Wie viel Prozent der maximalen Motorleistung (z.B. 50 kW) muss man z.B. bei $v = 30 \text{ m/s}$ (108 km/h) zur Kompensation des Rollwiderstands aufbringen?

Arbeit ist Kraft mal Weg. Um während der Zeitdauer Δt den Energieverlust durch den Rollwiderstand auszugleichen, muss daher am PKW eine Arbeit $W_R = F_R \cdot s = F_R \cdot v \cdot \Delta t$ verrichtet werden: Leistung ist Arbeit/Zeit. Damit ergibt sich

$$F_R = f_R \cdot F_G = 0,02 \cdot 10 \text{ kN} = 200 \text{ N}$$

$$P_R = W_R / \Delta t = F_R \cdot v = 200 \text{ N} \cdot 30 \text{ m/s} = 6000 \text{ W} = 6 \text{ kW}.$$

Etwa 12 % der maximalen Motorleistung werden im Beispiel für den Rollwiderstand eines Kleinwagens gebraucht. Leichtlaufreifen ($f_R \approx 0,01$) würden den Rollwiderstand halbieren, zu niedriger Reifendruck würde ihn erhöhen.

Luftwiderstand

Luftwiderstand

Wichtiger als der Rollwiderstand ist beim PKW der Luftwiderstand. Die vor dem Fahrzeug befindliche ruhende Luft muss weggeschoben, d.h. beschleunigt werden:

Der PKW verrichtet dadurch während einer Zeit Δt entlang des Wegs $v \cdot \Delta t$ die Arbeit $F_L \cdot v \cdot \Delta t$ und erteilt der Luftmasse $\rho \cdot A \cdot v \cdot \Delta t$ die kinetische Energie $\frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v \cdot \Delta t \cdot v^2$. (A ist die Querschnittsfläche des PKW in Fahrtrichtung.)

Gleichsetzen beider Ausdrücke ergibt mit einem zusätzlichen Faktor c_w

$$\text{Luftwiderstand} \\ F_L = \frac{1}{2} c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2.$$

Der Faktor c_w (Widerstandsbeiwert) hängt von der Form des Fahrzeugs ab: Je kleiner c_w , desto „windschlüpfiger“ ist der PKW. Messungen haben in einem großen Geschwindigkeitsbereich die Gültigkeit der Formel bestätigt: Der Luftwiderstand eines Körpers ist proportional zu v^2 , zur Dichte der Luft ρ und zum Querschnitt A . c_w hängt von der Form des Fahrzeugs ab und kann im Windkanal gemessen werden. A beträgt bei Klein-PKW ca. $2,5 \text{ m}^2$.

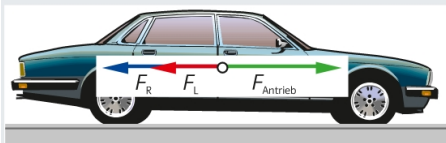
ρ ist die Dichte der Luft ($1,2 \text{ kg/m}^3$ bei 20°C), $c_w \approx 0,35$ für PKWs.

Die Leistung P_L , die für eine konstante Geschwindigkeit v gegen den Luftwiderstand aufgewandt werden muss, beträgt bei $v = 30 \text{ m/s}$:

$$P_L = F_L \cdot v = \frac{1}{2} c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^3 = 14 \text{ kW}.$$

Das ist etwa ein Viertel der angenommenen maximalen Motorleistung von 50 kW . Beachte, dass mit zunehmender Geschwindigkeit die notwendige Leistung und dadurch der Treibstoffverbrauch mit der 3. Potenz ansteigen. Der Rollwiderstand erfordert hingegen einen linear zunehmenden Anteil der Motorleistung.

In **70.1** zeigt, welche Motorleistung für den Luft- und den Rollwiderstand gebraucht wird. Ab einer bestimmten Geschwindigkeit steht keine Motorleistung mehr zum weiteren Beschleunigen zur Verfügung, die Maximalgeschwindigkeit ist erreicht.



69.1 Luftwiderstand und Reibung müssen bei der Autofahrt durch die kontinuierlich wirkende Motorkraft des PKW kompensiert werden.

Treibstoff sparen

Treibstoff sparen

In der Regel möchte man eine bestimmte Strecke s zurücklegen. Wir fragen daher, wie der Kraftstoffverbrauch in diesem Fall von der Geschwindigkeit abhängt, d.h. welche Arbeit gegen den Luftwiderstand verrichtet wird. Wegen

$$W_L = F_L \cdot s = \frac{1}{2} c_w \cdot A \cdot v^2 \cdot s$$

sehen wir: Neben einer günstigen Form des Fahrzeugs (c_w und A möglichst klein) ist die Senkung der Geschwindigkeit der wichtigste Faktor, um Energie zu sparen: 10 % weniger Geschwindigkeit bedeutet fast 20 % weniger Luftwiderstand.

Im Zeichen von Klimaschutz und Erdölverteuerung soll der Treibstoffverbrauch gesenkt werden. Wir schätzen für unseren Kleinwagen ab:

Wie viel Treibstoff wird ungefähr zur Überwindung von Luft- und Rollwiderstand bei konstanten 30 m/s und 36 m/s (ca. 130 km/h) auf ebener Straße für eine Strecke von 100 km verbraucht?

Die Antwort erfordert zwei Schritte: Berechnung der notwendigen Arbeit und Vergleich mit dem Energieinhalt von Benzin, bzw. Diesel.

Rollarbeit

Rollarbeit

Rollarbeit:

$$W_R = F_R \cdot s = 200 \text{ N} \cdot 100 \text{ km} = 2 \cdot 10^7 \text{ Nm} = 20 \cdot 10^6 \text{ J} = 20 \text{ MJ}$$

Arbeit gegen den **Luftwiderstand** bei $v = 30 \text{ m/s}$:

$$W_L = F_L \cdot s = \frac{1}{2} c_w \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 \cdot s$$

$$= 0,5 \cdot 0,35 \cdot 2,5 \cdot 1,2 \cdot 30^2 \cdot 100 \cdot 10^3 \text{ J}$$

$$= 47 \text{ MJ, bzw. } 68 \text{ MJ bei } v = 36 \text{ m/s.}$$

Insgesamt also $W = W_R + W_L = 67 \text{ MJ}$ ($v = 30 \text{ m/s}$), bzw. 88 MJ ($v = 36 \text{ m/s}$).

Ein Liter Benzin hat einen Energieinhalt (Heizwert) von ca. 32 MJ (Diesel: 35 MJ). In einem Automotor wird davon zwischen 35 % (Benzinmotor) und 50 % (Dieselmotor) in mechanische Energie umgewandelt, der Rest erwärmt die Umwelt. Der Kraftstoffverbrauch pro 100km in Litern ergibt sich daher zu

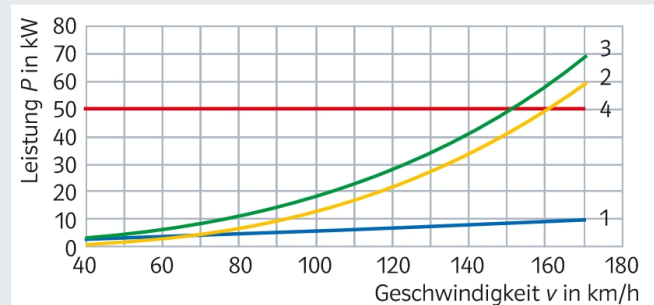
$$67 \text{ MJ} / (32 \text{ MJ/Liter} \cdot 0,35) = \text{ca. } 6 \text{ Liter } (v = 30 \text{ m/s}), \text{ bzw.}$$

$$\text{ca. } 8 \text{ Liter } (v = 36 \text{ m/s}) \text{ für Benzin-PKW und}$$

$$67 \text{ MJ} / (35 \text{ MJ/Liter} \cdot 0,5) = \text{ca. } 4 \text{ Liter } (v = 30 \text{ m/s}), \text{ bzw.}$$

$$\text{ca. } 5 \text{ Liter } (v = 36 \text{ m/s}) \text{ für Diesel-PKW.}$$

Das sind realistische Verbrauchsabschätzungen. Bergfahrten, Überholen, Dachträger, etc. erhöhen den Verbrauch.



70.1 Anteile der Motorleistung für (1) Roll-, (2) Luftwiderstand und ihre Summe (3) als Funktionen der PKW-Geschwindigkeit im Vergleich zur verfügbaren maximalen Motorleistung (4). Die Differenz zwischen den Kurven (4) und (3) kann für Beschleunigung genutzt werden. Die Höchstgeschwindigkeit wird am Schnittpunkt von (3) und (4) erreicht.

PKW - Motorleistung und Höchstgeschwindigkeit

Untersuche, überlege, forsche: PKW – Motorleistung und Höchstgeschwindigkeit



70.2 Welche Leistung hat dieses Tretauto?

70.1 W1 Für zwei verschieden motorisierte Modelle eines Klein-PKW nennt der Hersteller Motorleistungen von 50 bzw. 100 kW und Spitzengeschwindigkeiten von 160 bzw. 205 km/h. Wie lässt sich dies mit den Formeln für P_L und P_R begründen?

70.2 S2 Elektroautos – so werden sie beworben – verursachen keine Luftverschmutzung und produzieren kein CO_2 . Überlege, unter welchen Bedingungen dies zutrifft.

70.3 S2 Ein Problem von Elektroautos ist die geringe Energiespeicherung in Akkus. Informiere dich, wie viel elektrische Energie pro kg in Akkus gespeichert werden kann und vergleiche mit dem Energieinhalt von 1 Liter Treibstoff.

70.4 W1 Begründe, warum eine möglichst konstante Geschwindigkeit weniger Treibstoff erfordert als eine ungleichmäßige Fahrweise.

70.5 W1 Erkläre, warum ein Beschleunigen von 120 km/h auf 130 km/h gleich viel Energie erfordert wie ein „Ampelstart“ von 0 auf 50 km/h.

Hochschaubahn

Physik der Achterbahnfahrt

Energie und Geschwindigkeit beim Looping

Knoff Hoff-Show - Looping

Sport

Energieumwandlung beim Trampolinspringen



71.1 Trampolinspringen ist ein Wechsel von kinetischer und potenzieller Energie.

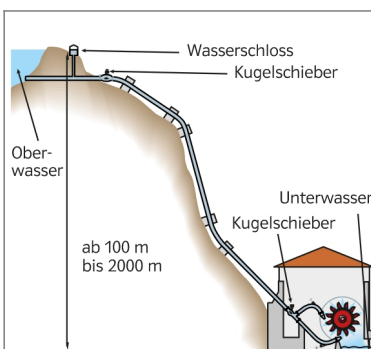
Am Beispiel des Trampolinspringens (**71.1**) wollen wir Energieumwandlungen beim Sport betrachten. Wir zerlegen die Bewegung in einzelne Phasen:

1. Du steigst auf das Sprungtuch. Durch dein Gewicht werden das Sprungtuch und die Federn elastisch gedehnt. Dehnungsenergie wird gespeichert.
2. Zu Beginn musst du hochspringen, im Körper gespeicherte chemische Energie wird in Bewegungsenergie umgewandelt. Das zurückfedernde Sprungtuch unterstützt den Vorgang. Dehnungsenergie trägt zur Bewegungsenergie bei.
3. In der Flugphase wird kinetische Energie in potenzielle Energie und zurück umgewandelt.
4. Wenn dabei Drehungen und Salti gemacht werden, wird zusätzlich chemische Energie umgesetzt.
5. Bei der Landung am Sprungtuch wird kinetische Energie in Dehnungsenergie gewandelt.
6. Der Vorgang setzt sich bei Phase 2 fort. Der Vorgang würde bald durch Reibung zu Ende kommen, würdest du nicht aktiv springen. Je mehr Energie du selbst einsetzt, desto stärker unterstützt dich das Sprungtuch <

Energiebereitstellung

Wasserenergie

Wozu werden Staudämme errichtet?



71.2 Schema eines Speicherkraftwerks. Von einem Speichersee führt eine Druckleitung zu einem tiefer gelegenen Kraftwerk. Potenzielle Energie wird in kinetische Energie umgewandelt: Aus den Düsen der Druckleitung spritzt Wasser mit hoher Geschwindigkeit auf die Turbinenschaufeln. Die Drehbewegung der Turbine wird im Generator in elektrische Energie umgewandelt. Das sog. Wasserschloss soll plötzliche Druckänderungen im Druckrohr beim Abschalten auffangen. (Kugelschieber sind Absperrventile der Druckleitung.)



71.3 Turbinenrad einer Freistahl-Pelton-Turbine. Wasser wird mit hoher Geschwindigkeit auf die Turbinenschaufeln gespritzt und treibt sie an. Pelton-Turbinen sind auch im Kraftwerk Reißbeck (Kärnten) bei einer Rekord-Fallhöhe von 1773 m im Einsatz.

Eine besondere Rolle in der Versorgung Österreichs mit elektrischer Energie spielen die Wasserkraftwerke, die etwa 60% des Strombedarfs decken: Kraftwerke an den großen Flüssen (Donau, Inn, Drau, Enns) arbeiten gleichmäßig Tag und Nacht, **Speicherkraftwerke in den Alpen liefern bei erhöhtem Strombedarf Spitzenstrom.** Die abgebildeten Stauseen liegen in den Stubai Alpen in Tirol und gehören zum Speicherkraftwerk Sellrain-Silz. Der obere See liegt in einer Höhe von 2300m und fasst ca. 60 Mio. m³ Wasser, der untere See (ca. 3 Mio. m³) liegt bei 1900m Höhe. **Um die Seen zu füllen, wird zusätzlich zum natürlichen Zufluss aus Schmelz- und Regenwasser der beiden Täler durch ein Stollensystem Wasser aus weiteren Tälern der Berggruppe zugeleitet.**

Am Ufer des unteren Sees steht ein Kraftwerk, das Wasser über eine Druckleitung aus dem oberen See erhält. Dabei wird eine Höhendifferenz von 400m genutzt. Die Leistung des Kraftwerks entspricht der Leistung eines Donaukraftwerks. In Zeiten mit geringem Strombedarf kann Wasser zurück in den oberen See gepumpt werden. Die dafür notwendige Energie stammt aus dem Stromnetz: Sie wird als potenzielle Energie des Wassers gespeichert. Allerdings betragen die unvermeidlichen Verluste beim Pumpen etwa 25% der eingesetzten Energie.

Eine weitere Druckleitung führt vom unteren See in das Kraftwerk Silz im Inntal (650m Höhe). Die enorme Höhendifferenz von 1250m lässt das Wasser mit 500km/h auf die Turbinenschaufeln (☞ 71.3) treffen. Die Leistung von max. 500MW entspricht 2 Donaukraftwerken oder 250 großen Windkraftanlagen.

Mit Speicherkraftwerken können kurzfristige Bedarfsspitzen gedeckt werden, da man sie schneller als z.B. Dampfkraftwerke ein- und ausschalten kann.

Speicherkraftwerke (☞ 71.2) nutzen die gegenseitige Umwandlung verschiedener Energieformen:

- Die Energie der Sonne lässt über dem Meer Wasser verdunsten, das durch Winde das Festland erreicht und als Regen oder Schnee im Gebirge Gletscher, Seen und Bäche speist.
- Wenn das Wasser eines Stausees durch die Druckleitung zu den Turbinen stürzt, wird potenzielle Energie zunächst in kinetische Energie des Wassers, in die Drehbewegung der Turbine und des Generators und schließlich in elektrische Energie umgewandelt.
- Wenn das Angebot an elektrischer Energie im europäischen Stromnetz den Bedarf übersteigt (und dadurch der Großhandelspreis niedrig ist), kann in Pumpspeicherwerken durch Hochpumpen des Wassers Energie als potenzielle Energie gespeichert werden und bei Bedarf wieder „verstromt“ werden.

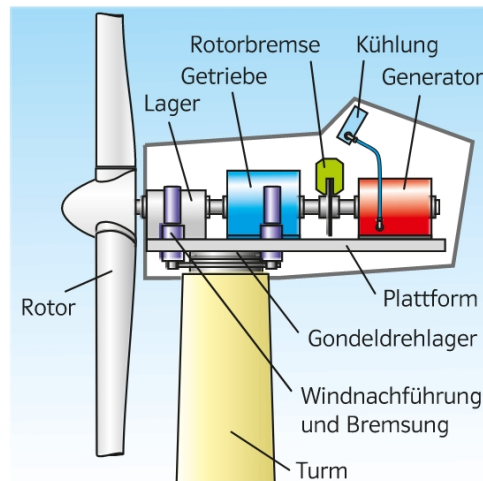
Neben den offensichtlichen Vorteilen von Speicherkraftwerken gibt es Nachteile: Durch ihre Lage im Gebirge sind sie weit von den Ballungszentren entfernt, so dass lange Hochspannungsleitungen erforderlich sind. Die Errichtung riesiger Staumauern ist teuer. Sie benötigen viel Platz und verändern die Landschaft.

Windenergie

Prinzip einer Windkraftanlage



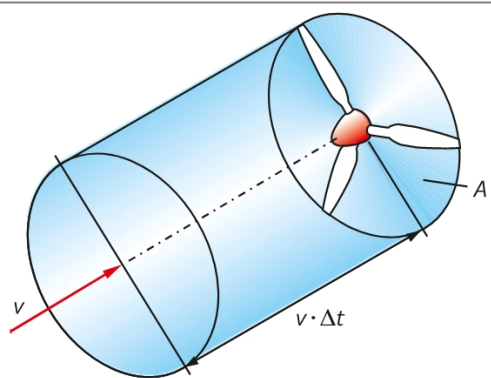
68.1 Windpark im Burgenland: Auf Türmen von 85–100 m Höhe treiben Rotorblätter von bis zu 40 m Länge Generatoren zur Stromerzeugung an. 1119 Windenergieanlagen standen im Jahr 2015 in Österreich in Betrieb.



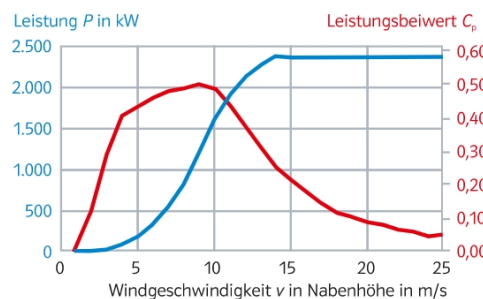
68.4 Komponenten einer Windkraftanlage

Das Prinzip von Windenergieanlagen (WEA) ist einfach (→ 68.4): Der Wind dreht die Flügel, die über eine Welle einen Generator zur Stromerzeugung antreiben, der Strom wird ins Stromnetz abgegeben. Dabei treten folgende Energieumwandlungen auf: Ein Teil der kinetischen Energie der Luftströmung durch den Rotor wird in Rotationsenergie des Generators umgewandelt. Der Generator wandelt die mechanische Rotationsenergie in elektrische Energie. Die elektrische Energie steht den Kunden in Industrie und Haushalten zur Verfügung.

Leistung einer Windkraftanlage



68.2 Die Luftmenge $A \cdot v \cdot \Delta t$ strömt während Δt durch das Windrad und dreht die Flügel.



68.3 Leistung einer Windenergieanlage bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten. Der Leistungsbeiwert ist der Anteil der genutzten Windenergie. (Daten: Fa. Enercon)

▷ Wir wollen die Leistung einer WEA mit Hilfe der kinetischen Energie der strömenden Luft abschätzen. Dazu betrachten wir ein Luftpaket, das durch die von den Rotorblättern überstrichene Fläche A fließt (☞ 68.2). Bei der Windgeschwindigkeit v strömt in der Zeit Δt durch diese Fläche ein Luftvolumen $A \cdot v \cdot \Delta t$. Die entsprechende Masse m erhalten wir durch Multiplikation mit der Luftdichte ρ . Die kinetische Energie ergibt sich durch Multiplikation mit $v^2/2$. Die Leistung P ist Energie pro Zeit, also:

$$P = \frac{mv^2}{2\Delta t} = \frac{A \cdot v \cdot \Delta t \cdot \rho \cdot v^2}{2\Delta t} = \frac{A \cdot \rho \cdot v^3}{2}$$

Dieser Ausdruck gibt die gesamte, vom Wind durch den Querschnitt A transportierte Leistung P an.

Da man den Wind durch eine WEA nicht vollständig abbremsen kann, wird ihm nur ein Teil dieser Leistung entnommen – bei modernen Anlagen beträgt dieser Wirkungsgrad maximal ca. 60 %. Wichtig ist, dass die Leistung mit der 3. Potenz der Windgeschwindigkeit wächst: Bei doppelter Windstärke gibt es die achtfache Leistung. Allerdings muss in der Praxis bei Windgeschwindigkeiten über 10 m/s durch Verstellen der Rotorblätter die Umdrehungszahl und dadurch die Leistung begrenzt werden, damit allzu große mechanische Belastungen der Rotorblätter und des Generators vermieden werden. (☞ 68.3)

Die Fläche A beträgt bei einer Flügellänge von 40 m ca. 5000 m². Mit $v = 15$ m/s (54 km/h) und $\rho = 1,2$ kg/m³ ergibt sich eine Windleistung P von rd. 10 MW, von denen 20 % genutzt werden, d.h. die abgegebene Leistung ist ca. 2 MW (☞ 68.3). Das ist die Größenordnung der Leistung von modernen Anlagen.

Alle Windenergieanlagen Österreichs lieferten 2014 insgesamt etwa dreimal soviel elektrische Energie wie das Donaukraftwerk Freudenau. Ihr Anteil an der Stromerzeugung beträgt ca. 6 %.

Vielfalt der Energieformen

Energieformen Welt der Physik

From:

<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/> - Wiki

Permanent link:

<http://elearn.bgamstetten.ac.at/wiki/doku.php?id=ph:arbeitenergie:aq>

Last update: **2020/12/09 10:31**

