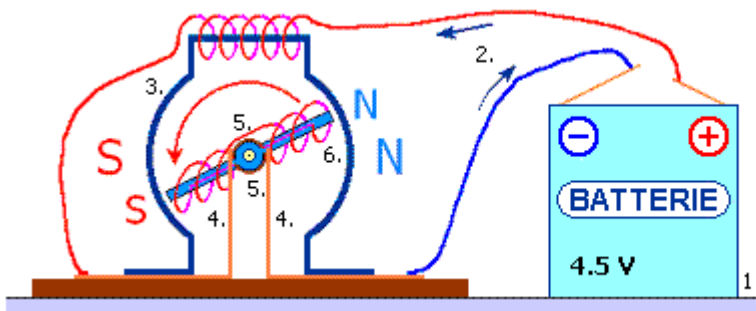


Etwas Physik zu einer umweltverträglichen Energienutzung

Nachhaltige Energietechnologie – eine lohnende Herausforderung der Naturwissenschaften

Umwandlung von Strom in mechanische Energie Wie funktioniert ein Elektromotor?



1. Batterie
2. Stromzuleitungen
3. Stator mit Spule
4. Schleifkontakte
5. Stromabnehmer
6. Rotor mit Spule

Zum Funktionsprinzip des Elektromotors

(hier die Variante Gleichstrom)

Zwei Magnete

- Hufeisenförmiger Stator (3.)
- Rotierender Anker oder Rotor (6.)

Beide Magnete haben je einen Nordpol N und einen Südpol S

N-N und **S-S** stoßen sich ab

N-S und **S-N** ziehen sich an

Das Magnetfeld wird erzeugt durch den Strom in der aufgewickelten Spule

- Stator (3.) Strom fließt hier immer in dieselbe Richtung
Darum **N** und **S** des Stators immer am gleichen Ort
- Rotor (6.) Strom wird umgepolt nach jeder halben Drehung
Dies, weil die Stromabnehmer jeweils nach einer halben Umdrehung den Schleifkontakt vertauschen. Darum werden auch **N** und **S** jedesmal im richtigen Moment vertauscht.

Der Rotor (6.) bleibt deshalb nicht einfach stehen, wenn sein Südpol **S** zum Nordpol **N** des Stators gelangt ist, sondern läuft weiter wegen der Umpolung, die nach jeder halben Drehung stattfindet.

Zum Begriff der Energie

Der Motor kann mechanische Arbeit leisten, bezieht aber dazu die Energie.

Bis jetzt wurden nur die physikalischen Vorgänge angegeben. Diese Vorgänge unterliegen immer einem sehr zentralen Gesetz: In all den Vorgängen kann keine Energie verschwinden. Ebenso wenig kann auch Energie abgegeben werden, die nicht irgendwo aufgenommen wurde.

Der Motor verrichtet nur Arbeit, solange er dazu der Stromquelle Energie entnehmen kann.

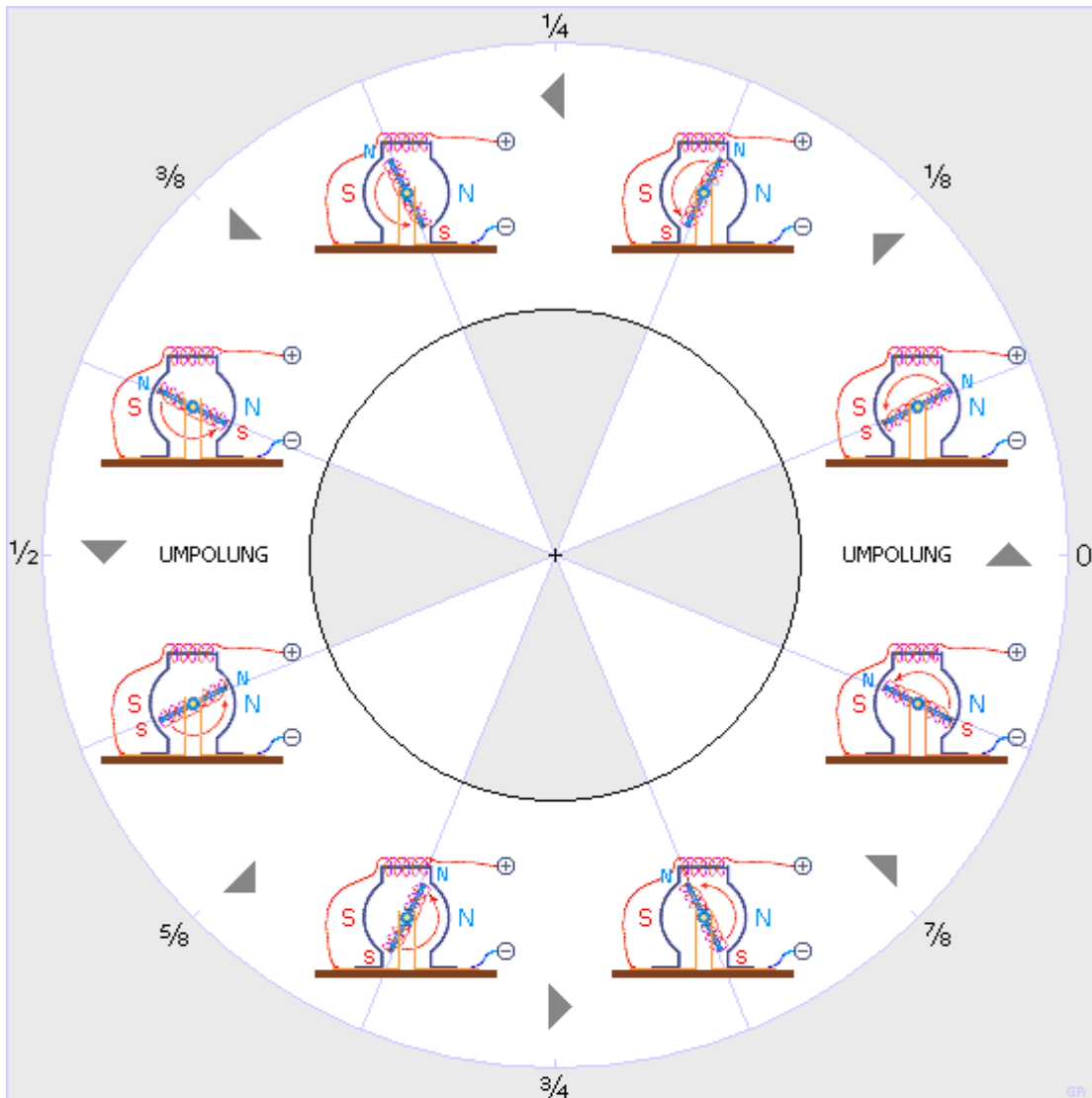
Energie geht niemals verloren und wird auch niemals einfach erzeugt, sondern wird immer nur umgewandelt von einer Form in die andere.
Dieses Naturgesetz wird in der Physik auch **Energieerhaltungssatz** genannt.

In unserem Beispiel wird chemische Energie der Batterie in mehreren Teilschritten umgewandelt in die mechanische Energie, die der Motor abgibt.

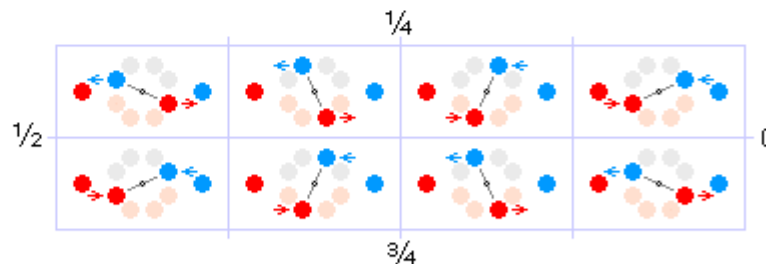
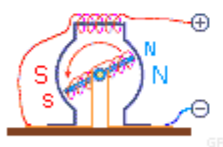
Die unverbrauchte Batterie enthält die umsetzbare Energie, die sie hergibt, wenn man sie anschliesst.

Welchen Weg die Energie nimmt, d.h. ihre Umwandlung unter dem Energieerhaltungssatz, lässt sich am Elektromotor sehr detailliert diskutieren. Die Energie kann in keiner Phase verschwinden, sie liegt immer irgendwo in einer Form vor. Im Detail geht das beim Elektromotor mit Stromquelle so:

◦ **Illustration des Energieerhaltungssatzes am Beispiel des Elektromotors**
Umwandlung von Strom in mechanische Energie



Umpolung des Rotors an den Schleifkontakten jede 1/2 Umdrehung!



① **Umdrehung 0 → 1/2**
 Der Rotor dreht im Magnetfeld eine 1/2 Umdrehung, bis sein Südpol gegen den Nordpol des Stators weist. Hier ist die Lageenergie minimal und er würde dort stehen bleiben.

Feldenergie in mechanische Energie

② **UMPOLUNG (Kontakte und Feld) nach 1/2 Umdrehung**
 Nun wird aber das Magnetfeld des Stators umgepolt, weil seine Stromabnehmer den Strom am Schleifkontakt vertauscht abnehmen:



Die Stromquelle muss zur Umpolung Arbeit leisten: Die Energie steckt im aufgezwungenen Magnetfeld von Rotor und Stator, die ja nun wieder verdreht zueinander stehen.

elektrische Energie der Stromquelle in Feldenergie

③ **Umdrehung 1/2 → 1**
 Der Rotor dreht darum weiter, wieder in den Zustand niedrigster Energie. Die Arbeit, die das Feld dabei verrichtet, kann man dem Rotor entnehmen als mechanische Energie.

Feldenergie in mechanische Energie



④ **UMPOLUNG (Kontakte und Feld) nach 1 Umdrehung**

GR

Die Stromquelle im obigen Beispiel war eine Batterie. Wenn man eine Batterie an einen Verbraucher anschliesst, so fließt ein Strom, der eine chemische Reaktion in Gang hält, bis alles Material in reagierter Form vorliegt. Die Batterie ist dann leer in dem Sinn, dass ihr Inhalt vorliegt als Reaktionsprodukt mit tieferer chemischer Energie und somit der Vorgang Strom zu liefern, zum Erliegen kommt.

zusammenfassende Merkmale des Elektromotors (Energiewandler) und des Energieträgers Strom:

Aspekt Umwandlung beim Elektromotor

- o Andere Möglichkeiten: immer muss man die relative Lage der Polung von Rotor und Stator in gerichteter Abfolge verändern.
- o Hohe Wirkungsgrade von 90% und darüber sind möglich.

Aspekt Energieträger

- o Die Umwandlung von Strom in mechanische Energie unterliegt nicht den Grenzen einer Wärmekraftmaschine, die die 'ungeordnete' Wärme nutzen muss.
- o Strom ist darum eine hochwertige Energieform.

Energiesystem gesamtheitliche Betrachtung

- o Eine solche Beurteilung muss sowohl den Prozess der Energiebereitstellung als auch den Energieträger einbeziehen:
- o Energiewandler
 Beispiel Elektromotor
- o Energieträger
 Beispiel Strom



- o **Umwandelbarkeit:** Prozess, Energieträger
- o **Produktion:** Ressourcenverbrauch, Risiken
- o **Speicherbarkeit:** incl. Transport

GR

Zur Beurteilung eines Energiesystemes
 Aspekte Energiewandler und Energieträger

Eine nachhaltige Energiewirtschaft muss sich sowohl mit den Energiewandlern als auch mit den Energieträgern beschäftigen, also beiden Aspekten eines Energiesystems.

Damit hat man die wichtigen Kriterien zur Beurteilung einer Energieversorgung zusammen:

**Zusammenfassung der wichtigsten Aspekte der Energieversorgung
 Fragen zu Umwandelbarkeit, Produktion und Speicherbarkeit**

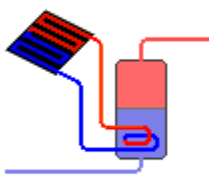


- o **Umwandelbarkeit:**
- o **Produktion**
- o **Speicherbarkeit und Transport**

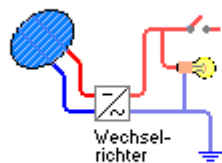
Dieses Kapitel wird noch ausgeführt.

**Prinzipschemas Solaranlagen
 Gewinnsystem (Kollektor) und Einbindung ins Verbrauchernetz**

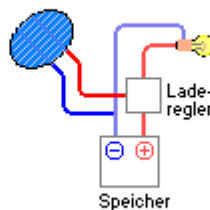
Solarthermische Anlage geschlossener Kreislauf mit Wärmetauscher



Photovoltaikanlage im Netzparallelbetrieb Wechselstromverbraucher



Photovoltaikanlage im Inselnetz Gleichstromverbraucher



GR

Prinzipschemas Solaranlagen
 Gewinnsystem (Kollektor) und Einbindung in Verbrauchernetz

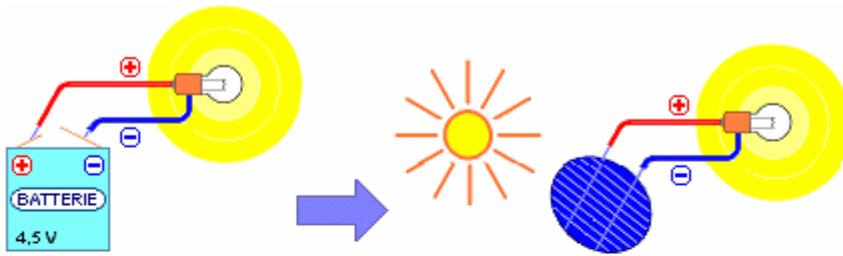
Dieses Kapitel wird ebenfalls noch ausgeführt.

Die angegebenen Beispiele arbeiten mit Flachkollektoren.

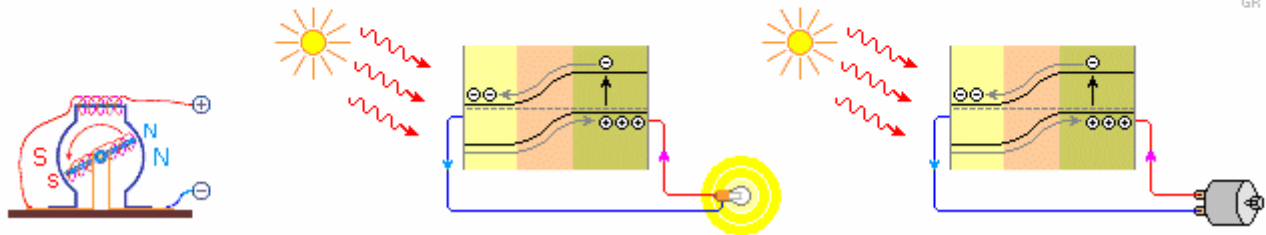
Es gibt aber noch andere Wege, die Solarstrahlung einzufangen und nutzbar zu machen – zwei Beispiele hierzu:

- o Ein Raum mit geeignet ausgelegter Verglasung fängt die solare Strahlung und trägt zur Raumheizung bei. Wenn man alles richtig macht, also auch den Raum ausreichend dämmt, kommt man praktisch zu einer Volldeckung des Heizenergiebedarfs (sog. Passive Nutzung der Solarenergie).
- o Man kann die Solarstrahlung konzentrieren auf einen sogenannten Receiver. Die hohe Wertigkeit der Solarstrahlung zeigt sich in den hohen Temperaturen, die man erreicht damit. Man kann damit Wärmekraftmaschinen auf einem hohen Temperaturniveau betreiben und damit bedeutende Wirkungsgrade erreichen (aktives System).

○ **Energie von der Sonne**
Einfangen der Solarstrahlung und Nutzbarmachung ihrer Energie



Nutzung der Solarstrahlung in Energieanwendungen. Hier am Beispiel einer der Möglichkeiten, elektrische Energie zu gewinnen.
Oben: Die Sonne als praktisch unerschöpfliches Reservoir kann herkömmliche Technologien ersetzen. **Unten:** Hierzu die kluge Nutzung physikalischer Vorgänge.



○ **In der Sonne laufen Kernprozesse ab, die freiwerdende Energie wird abgestrahlt**

In der Sonne reagieren die Kerne der Atome miteinander. Die neu konfigurierten Kerne setzen die freiwerdende Energie in Strahlung um, die millionenfach höher ist als das, was wir gewohnt sind, wenn Atome untereinander nur ihre chemischen Bindungsverhältnisse ändern. Diese Energie erhitzt die Sonne, an der Oberfläche ist sie noch 5800 K heiss. Diese Temperatur nimmt sie als Gleichgewicht ein, weil dann die Materie an der Oberfläche genauso viel Energie abstrahlt, wie sie von unten her nachgeliefert bekommt. Die gesamte abgestrahlte Energie liegt vor als Licht, von dem wir aber nur einen Teil sehen können. Das Spektrum reicht von kurzweiliger Röntgenstrahlung bis zur langwelligen Wärmestrahlung.

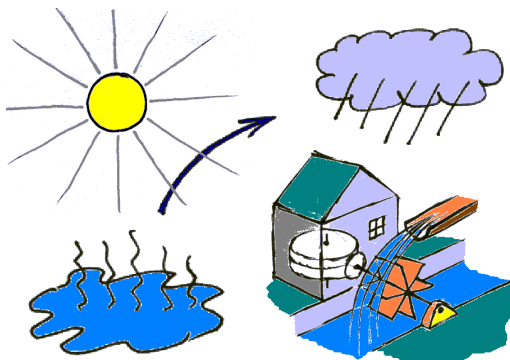
○ **Weshalb sollte man die Energie von der Sonne nehmen?**

Die Sonne scheint zunächst gratis! Wichtiger dabei ist jedoch: Wenn man sie geschickt einfängt, kehrt man zurück zu der Art Energiegewinnung, die der belebten Natur seit je her eigen ist. Und zu der Art von Energiehaushalt, der auf einem langfristigen Gleichgewicht beruht, auf das alles Leben angewiesen ist. Ganz im Gegensatz zu den fossilen Energieträgern wie Erdöl, die dieses Gleichgewicht nachhaltig stören, einen zerstörerischen Eingriff in die Natur bedeuten und zudem schon in absehbarer Zeit knapp werden.

○ **Rückbesinnung auf die Sonne**

Die gesamte belebte Natur, das heisst alle Pflanzen und Tiere nehmen ihre Energie von der Sonne. Und zwar können die Pflanzen das Sonnenlicht nutzen zu ihrem Aufbau (Blätter, Holz, Grashalme etc.). Tiere und Menschen nutzen diese Energie indirekt, indem sie Pflanzen essen. Auch wenn wir uns bewegen, brauchen wir Energie, die ursprünglich als Licht von der Sonne auf die Erde gelangte.

Dazu: Erdöl, Erdgas und die Kohle entstammen fossilen Überresten von Pflanzen und Tieren, die einmal auf der Erde gelebt haben. Ihre Energie stammt damit auch von der Sonne! Beim Verbrennen im heutigen Ausmass entstehen jedoch unlösbare Probleme: Klimaveränderungen wie Treibhauseffekt, Verschmutzung von Wasser, Luft und Böden, Aussterben zahlreicher Pflanzen- und Tierarten.



Typisch für eine umweltverträgliche Energienutzung sind demgegenüber geschlossene Kreisläufe in der Natur.

Die Wasserkraft stellt einen solchen Kreislauf dar, der von der Sonne angetrieben wird. Was wir der Natur entnommen haben, geben wir der Natur wieder zurück. Man spricht deshalb auch von erneuerbaren Energien.

○ **Der Verbrauch der derzeitigen Energiewirtschaft und solare Ressourcen**
Ein Vergleich im Hinblick auf eine solare Energiewirtschaft

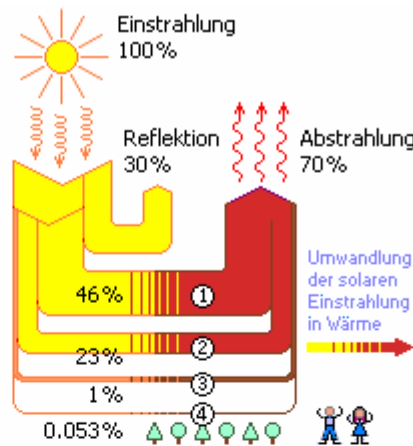
Energiehaushalt der Erde
 1 TW = 10¹² W

Einstrahlung 173'000 TW 100%
 - Reflektion 52'000 TW 30%

Dieser Betrag: 121'000 TW 70%
 geht ein in den Energiehaushalt der Erde.

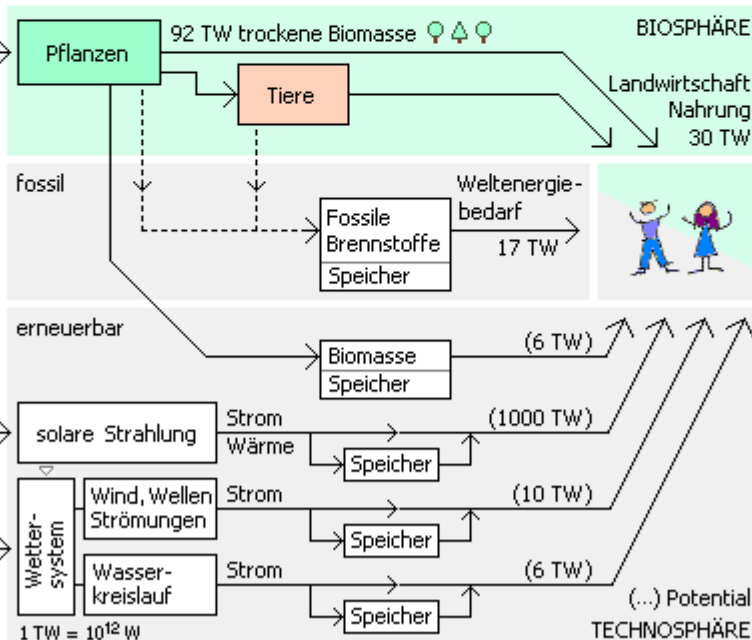
Er wird auf verschiedenen Wegen ①-④
 in Wärme umgewandelt und in den kalten
 Weltraum entsorgt als Wärmestrahlung:

- | | | |
|-----------------------------|-----------|--------------|
| ① direkte Umwandlung | 80'000 TW | } 121'000 TW |
| ② Verdampfung von Wasser | 40'000 TW | |
| ③ Wind, Wellen, Strömungen | 1000 TW | |
| ④ Photosynthese (Biosphäre) | 92 TW | |



Es stellt sich ein Gleichgewicht ein mit einer Temperatur, bei der die Wärmeabstrahlung genauso gross ist, wie die absorbierte solare Einstrahlung:
 70% × Einstrahlung = Abstrahlung
 (siehe Abschätzung weiter unten).

Eintrag der Sonne in den Energiehaushalt der Erde:
 121'000 TW



Der Mensch beansprucht zusammen mit der Tierhaltung rund ein Drittel der durch die Pflanzen am Anfang der Kette mittels Photosynthese erzeugten Biomasse.

heutige Energiebereitstellung in der Technosphäre: Vorwiegend fossile Brennstoffe. Weltenergiebedarf: 17 TW

erneuerbare Energieträger nutzen die laufend eingestrahle Solarenergie:
 • In den Pflanzen produzierte hochwertige chemische Bindungen.
 • Die mechanische Energie von Wind- und Wasserströmungen dient zur Stromerzeugung.
 • Der direkt anfallende Anteil kann in diversen Energieumwandlungsprozessen genutzt werden.

Energiewirtschaft auf der Erde:
 fossil und erneuerbar
 1 TW = 10¹² W

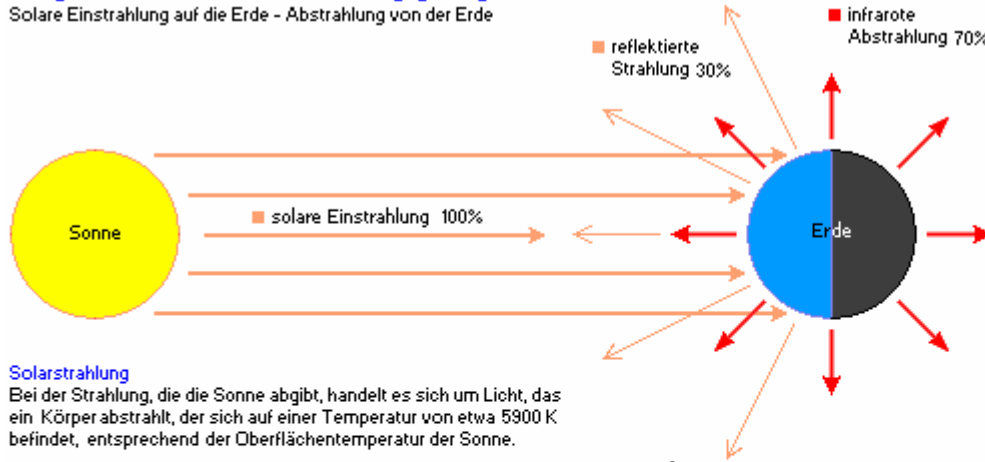
Der Verbrauch der derzeitigen Energiewirtschaft und solare Ressourcen
 Ein Vergleich im Hinblick auf eine solare Energiewirtschaft

○ **Strahlungsgleichgewicht und Gleichgewichtstemperatur**
 solare Einstrahlung und Wärmeabstrahlung im Gleichgewicht

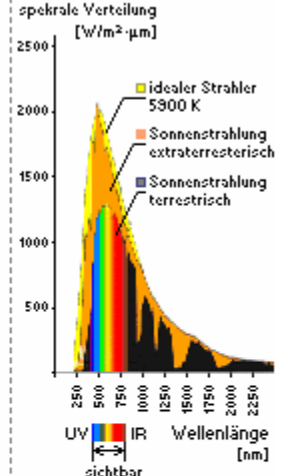


Energiehaushalt der Erde und Strahlungsgleichgewicht

Solare Einstrahlung auf die Erde - Abstrahlung von der Erde



Strahlungsintensität der Sonne



terrestrische Strahlung: Anteil der Solarstrahlung, der nach der Abschwächung durch die Atmosphäre die Erde erreicht.

Solarstrahlung

Bei der Strahlung, die die Sonne abgibt, handelt es sich um Licht, das ein Körper abstrahlt, der sich auf einer Temperatur von etwa 5900 K befindet, entsprechend der Oberflächentemperatur der Sonne.

Der Strahlungsfluss der Sonne pro Fläche beträgt bei der Erde noch $S = 1367 \text{ W/m}^2$ (Solarkonstante)

Damit beträgt die Strahlungsleistung P , die auf die Erde trifft:

$$P_{\text{Sonne}}^{\text{Erde}} = S \cdot \pi R^2 = 1367 \text{ W/m}^2 \cdot \pi \cdot (6.35 \cdot 10^6 \text{ m})^2 = 1.73 \cdot 10^{17} \text{ W} = 173'000 \text{ TW} \quad (1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W})$$

Einfangquerschnitt der Erde, $R = 6350 \text{ km}$ Radius der Erde



Von dieser Strahlung werden 30% reflektiert, d.h. nur 70% der Einstrahlung treten im Energiehaushalt der Erde in Erscheinung:

$$P_{\text{Erde}}^{\text{ein}} = (1 - 30\%) \cdot P_{\text{Sonne}}^{\text{Erde}} = (1 - 30\%) \cdot S \cdot \pi R^2 = 1.21 \cdot 10^{17} \text{ W} = 121'000 \text{ TW} \quad (1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W})$$

70% absorbierte Energie 173'000 TW

Umwandlung der solaren Einstrahlung in Wärme

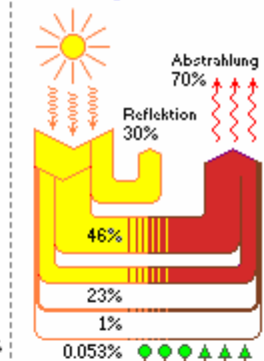
Dieser ganze Betrag wird, wenn auch auf verschiedenen Wegen, nach der Absorption in Wärme umgewandelt (1)-(4).



Unter Wärme versteht man die ungeordnete thermische Bewegung der Materie. Die Erde entsorgt diese Wärme ins kalte Weltall durch Wärmestrahlung: Und zwar stellt sich eine mittlere Gleichgewichtstemperatur ein, bei der die Erde genausoviel Energie abstrahlt, wie sie von der Sonne laufend empfängt.

- (0) reflektierte Strahlung 30% im Energiehaushalt der Erde nicht wirksam
- (1) direkte Umwandlung in Wärme 46%
- (2) Verdampfung von Wasser 23%
- (3) Wind, Wellen, Strömungen 1%
- (4) Photosynthese (Biosphäre) 0.053%

Umwandlung der solaren Einstrahlung in Wärme



Strahlungsgleichgewicht

Die Erde ist bezüglich der Abstrahlung ein Strahler wie die Sonne, jedoch befindet sie sich auf einem tieferen für das Leben angenehmen Temperaturniveau: Sie muss nicht mehr so heiss werden wie die Sonne, um den solaren Eintrag loszuwerden, da die Erde in ihrem Abstand die solare Einstrahlung in verdünnter Intensität empfängt.

Welche Temperatur T ausreichte, den solaren Eintrag zu entsorgen, wenn die Erde keine Atmosphäre hätte, die die Abstrahlung behindert, kann man mit den obigen Angaben jetzt machen. Die thermische Abstrahlung der Erde beträgt:

$$P_{\text{Erde}}^{\text{aus}} = 4 \cdot \pi R^2 \cdot \sigma \cdot T^4 \quad \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \text{K}^4) \text{ Stefan-Boltzmann-Konstante} \quad P = A \cdot \sigma \cdot T^4$$

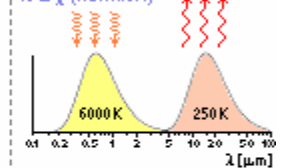
Oberfläche der Erde, $R = 6350 \text{ km}$ Radius der Erde * Stefan-Boltzmann Strahlungsgesetz

Im Gleichgewicht ist:

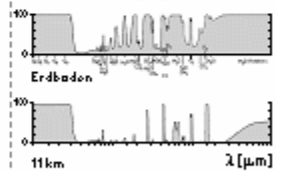
$$P_{\text{Erde}}^{\text{ein}} = P_{\text{Erde}}^{\text{aus}} \Rightarrow (1 - 30\%) \cdot S \cdot \pi R^2 = 4 \cdot \pi R^2 \cdot \sigma \cdot T^4 \Leftrightarrow T = \sqrt[4]{\frac{S \cdot (1 - 30\%) }{4 \cdot \sigma}} = 255 \text{ K} \text{ bzw. } T = -18^\circ\text{C}$$

Der beobachtete Wert liegt mit $T = +15^\circ\text{C}$ erwartungsgemäss höher: Die vorliegende Abschätzung berücksichtigt keine Behinderung der freien Abstrahlung durch eine Atmosphäre, welchen Effekt man sinnngemäss bei einem Treibhaus findet.

Planck Spektralfunktion



Absorption α [%]

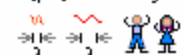


□ Transmissionsvermögen $\tau = 1 - \alpha$: Treibhausgase CO_2 , Methan, Stickoxide, Ozon und H_2O behindern die Abstrahlung □.


* Strahlungsleistung P eines schwarzen Körpers der Fläche A und der absoluten Temperatur T .

GR

λ [µm]: Wellenlänge



○ **Energieverbrauch pro Kopf in Relation zur Belastbarkeit der Biosphäre**
fossile Energiewirtschaft in der Sackgasse

 Verbrauch pro Person = $\frac{\text{Weltenergieverbrauch}}{\text{Weltbevölkerung}} = \frac{17 \cdot 10^{12} \text{ W}}{7 \cdot 10^9} = 2430 \text{ W}$.

Um diese Grösse zu fassen, sei dieser Energieumsatz verglichen mit der körperlichen Arbeitsleistung eines Menschen: Ein Mensch leistet bei 200 W Schwerarbeit, die Hälfte des Tages sei ihm zur Erholung gegeben. Dann beträgt seine mittlere Leistung 100 W.

1 Energiesklave $\hat{=}$ 100 W

Damit bezieht ein Menschenbürger aus der Technosphäre die Arbeitsleistung von 24 Energiesklaven:
 $2430 \text{ W} / 100 \text{ W} \hat{=} 24 \text{ Energiesklaven}$:

mittlere Dauerleistung.
 Im Jahr [a] ergibt das den Jahresenergieverbrauch:
 $2430 \text{ W} \cdot a =$
 $= 2,43 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h} =$
 $\hat{=} 21'300 \text{ kW} \cdot \text{h}$
 pro Person

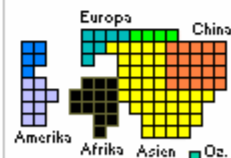
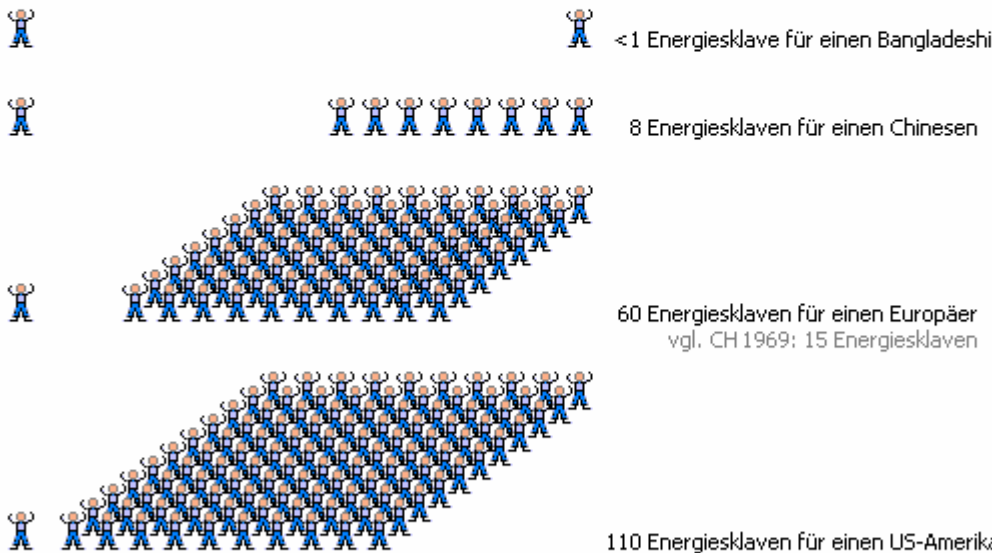


Die Menschheit leistet sich mithin einen Energieumsatz von 24 Schattenmenschheiten. Die ganze Menschheit mit 7 Milliarden Individuen bezieht aus der Technosphäre die Leistung von 170 Milliarden Energiesklaven:
 $17 \cdot 10^{12} \text{ W} / 100 \text{ W} = 170 \cdot 10^9 \text{ Energiesklaven}$.



Der angegebene Verbrauch ist nicht ausgewogen verteilt: Er hängt zum Teil ab vom Industrialisierungsgrad. Jedoch innerhalb industrialisierten Ländern mit vergleichbarem Standard auch von den politisch wirksamen Strukturen, insofern diese in der Lage sind, einen effizienten Umgang mit der Energie umzusetzen.

Die Erhaltung des Lebens auf der Erde wäre das vorrangige Ziel, dazu wäre aber koordiniertes Handeln notwendig, bei dem das Plündern der natürlichen Ressourcen aufhört. Nämlich Profite auf Kosten der kommenden Generationen zu machen, indem sie deren Lebensgrundlagen ruinieren. Wirtschaftlicher Erfolg durch Auslagern der Kosten und Schulden machen in der Natur darf nicht Grundlage des Erfolges sein. Die Wirtschaft ist für den Menschen da und nicht der Mensch für eine Wirtschaft, die sich vor der Verantwortung drückt.



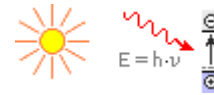
Im folgenden wird eingegangen auf die Frage, wie sich eine solare Energiewirtschaft integrieren lässt in unsere Umgebung und wie eine damit verbundene effiziente Energietechnologie aussieht. Die Physik hinter den Gewinnssystemen, Umwandlungsprozessen und Speicherung der Energie lässt sich nicht austricksen, aber klug nutzen im Hinblick auf eine nachhaltige mit der lebendigen Natur vereinbare Energiebereitstellung.

Der Verbrauch einer Region ergibt sich aus dem Verbrauch pro Kopf (z.B. in Energiesklaven) mal ihre Bevölkerungszahl.
 $\square = 1\%$

GR

Energieverbrauch pro Kopf in Relation zur Belastbarkeit der Biosphäre
 fossile Energiewirtschaft in der Sackgasse

○ **Zur Funktionsweise einer Solarzelle**
Erzeugung von Strom aus der solaren Einstrahlung



zur Funktionsweise einer Solarzelle:

In einem Halbleiter wie Silizium können die Elektronen nicht eine beliebige Energie einnehmen; es gibt zwei Energiebänder:

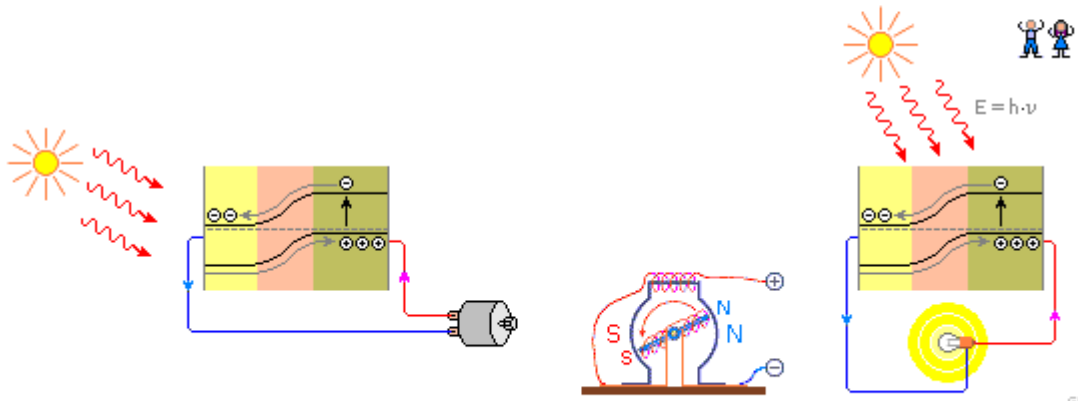


Wenn man nun zwei Schichten Silizium aufeinander bringt, die man geeignet und unterschiedlich dotiert hat, so werden die Energiebänder verstimmt und eine Stufe überbrückt jetzt die Grenzzone:



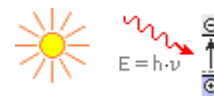
Die Elektronen fallen die Stufe runter, was den Strom antreibt, aber bedauerlicherweise nur bis sie unten angekommen sind. Wenn die Sonne jedoch scheint, so prasseln Lichtteilchen auf die Elektronen und heben sie aufs obere Band.

Damit endet zwar die Existenz eines Lichtteilchens, doch seine Energie verschwindet selbstverständlich nicht: Sie steckt im angehobenen Elektron, das die Stufe wieder runterfällt und so den Strom antreibt!



Zur Funktionsweise einer Solarzelle
 Erzeugung von Strom aus der solaren Einstrahlung

○ **Photoeffekt**
Die klassische Physik musste wesentlich erweitert werden



Das physikalisch Wesentliche an dieser Art der Nutzung der Solarstrahlung ist das Auftreten des Lichtes als **Quanten** in ihrer Wechselwirkung mit den Elektronen, somit in abgrenzbaren **Elementarprozessen**.

Es kommt auf die Energie der einfallenden "**Lichtteilchen**" an: Sie muss im Bereich des Energieabstandes der beiden Bänder liegen, sonst werden die Elektronen nicht aufs höhere Niveau gehoben.

Es nützt nichts, die **Intensität** des Lichtes zu steigern: Wenn man die Intensität steigert, dann steigert man nur die **Zahl** der **Lichtquanten** und wenn diese einzeln keine ausreichende **Energie** haben, so finden die Übergänge ins höhere Band gar nicht erst statt und es fließt darum auch kein Strom.

Für die richtige Deutung dieses Effekts bekam Albert Einstein 1921 den Nobelpreis rückwirkend auf seine Arbeit zum sogenannten **Photoeffekt** im Jahre 1905.

Man ist zwischendurch vielfach auf die Ansicht gelangt, bei Licht handele es sich um **Wellen**: Dies aufgrund der Erfahrung aus vielen optischen Versuchen, aber auch aufgrund der ausserordentlich erfolgreichen Theorie von Maxwell, in der das Licht als **Welle** auftritt.

Seit Beginn des 20. Jh. musste man endgültig erkennen, dass man unsere Erfahrungen mit der Natur in vielen Fällen nur beschreiben kann unter der Annahme, dass Materie und Strahlung in **Quanten** auftritt.

Man möchte von einer Doppelbödigkeit der Natur sprechen, weil **Teilchenverhalten** und **Wellenverhalten** sind derart **unterschiedliche Konzepte**, dass im Grunde eine anschauliche Vereinbarkeit unmöglich ist.

So hängt die Energie E, die man einem **Photon** bei der Wechselwirkung mit Materie als **Einzelereignis** zuordnet, von einer typischen **Welleneigenschaft** (!) ab, nämlich der Frequenz ν , ab:

Energie des Photons: $E = h \cdot \nu$, $h = \text{Plancksches Wirkungsquantum}$, $\nu = \text{Frequenz des Photons}^*$

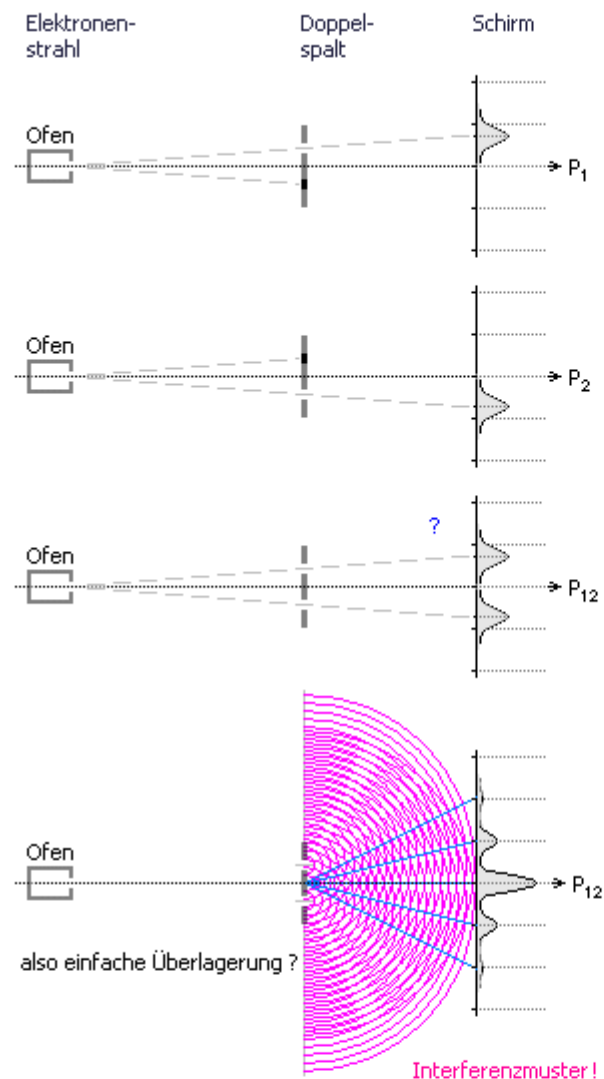
Diese Energie E steht bei einem **Elementarprozess** zur Verfügung, hier etwa bei der Wechselwirkung mit einem Elektron im Halbleitermaterial der **Solarzelle**.

* Die Frequenz ν , oder Kombinationen davon, erzeugen in unserem Gehirn reproduzierbare Farbeindrücke. Damit ist die Frequenz von Licht in einem gewissen Rahmen unseren Sinnen zugänglich.

Diese hier angedeuteten Erkenntnisse haben das Bild, das wir glauben, uns von der Natur aus der Alltagserfahrung machen zu können, zutiefst erschüttert. Das folgende abschliessende Kapitel zum **Doppelspaltexperiment** (Grundversuch der Wellenmechanik) kann als Einstieg dienen, sich mit dieser erstaunlichen Welt zu befassen:

○ **Doppelspaltexperiment**
 Grundversuch der "Wellenmechanik"

Experiment



Verteilung der Klicks auf dem Schirm



Linke Spalte offen:
 Auftrefforte verteilen sich hinter der Spalte.

Rechte Spalte offen:
 Auftrefforte verteilen sich hinter der Spalte.

Beide Spalten offen, also simple Überlagerung?
 $P_{12} = P_1 + P_2 = \text{falsch!}$
 Die Teilchen treffen an Orte, wo sie in simpler Überlagerung der beiden obigen Fälle gar nicht hätten hingelangen können, nämlich:

Verteilung der Klicks auf dem Schirm so, als ob zwei **Wellen** von den beiden Spalten herkommend interferieren würden.
 Die Elektronen äussern sich bei der Ankunft auf dem Schirm dann aber wie **Teilchen** (Klick!).
 Was für ein Bild soll ich mir vom Elektron machen, insbesondere bevor ich es als Klick registriere?
 Eine klassische Theorie kann hierzu keine konsistente Beschreibung liefern!
 Die Quantenmechanik kann dies, aber Fragen der Deutung bleiben!

Bei der Solarzelle sieht man, dass Licht mit Teilcheneigenschaften auftreten kann. Genau dies hat zu der grossen Revolution in der Physik geführt!
 Zum sonderbaren Doppelleben von Licht und Materie hier noch das Grundexperiment Quantenphysik.

also einfache Überlagerung ?

Interferenzmuster!

GR

Theorie

Das Experiment widerspricht der Erwartung, die wir von den Dingen haben, indem:
 $P_{12} \neq P_1 + P_2$
 Das Elektron führt vor dem Klick eine Art Existenz der Tendenz möglicher Realisierungen, beschrieben durch die Wellenfunktion ψ .

Richtig nun aber ist, dass man diese Wellenfunktionen überlagern muss:
 $\psi_{12} = \psi_1 + \psi_2$
 Das Elektron 'schwebt' vor dem Auftreten auf dem Schirm in den zwei Alternativen!

Durch Quadrieren bekommt man die Wahrscheinlichkeit seines örtlichen Auftreffens:

$$P_{12} = |\psi_{12}|^2$$

$$= |\psi_1 + \psi_2|^2$$


$$= \underbrace{|\psi_1|^2}_{P_1} + \underbrace{|\psi_2|^2}_{P_2} + \underbrace{\psi_1 \cdot \psi_2^* + \psi_1^* \cdot \psi_2}_{\text{Interferenzterm!}}$$



GR

Doppelspaltexperiment
 Grundversuch der 'Wellenmechanik'

Georges Reber

 www.sses-net.ch/basel

Dieses Dokument wird laufend weiter überarbeitet und wesentlich ergänzt!
 (09.05.2012)