



Physik und Sonnenenergie: Angebot, Gewinnung, Umwandlung, Speicherung

SSES Regionalgruppe beider Basel
Natürliche Kreislaufwirtschaft: Nachhaltigkeit als Lebensvoraussetzung


■ solare Einstrahlung 100%
 $T_{\odot} \approx 5900 \text{ K}$




■ reflektierte Strahlung 30%



■ infrarote Abstrahlung 70%
 $T_{\oplus} \approx -18^\circ \text{C}$

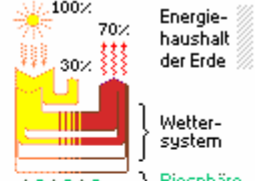


Entwertung und Entsorgung der Energie:
Die Prozesse auf der Erde laufen ab unter Nutzung der hohen Wertigkeit der solaren Strahlung:
Die Energie liegt nachher in ungeordneter Form als Wärme vor, welche über Strahlung in den kalten Weltraum entsorgt wird.



Stationäres Ungleichgewicht auf der Erde:

(1) Die eingestrahlte Energie auf der Erde ist gleich gross wie ihre abgestrahlte Energie.
(2) zyklisch und rezyklierend ablaufende Prozesse auf der Erde unter Entwertung der Energie.



Energiehaushalt der Erde

Wetter-system
Biosphäre

- Eine solare Energiewirtschaft lässt sich weitgehend innerhalb der Kreisläufe betreiben.
- Die fossil betriebene Technosphäre fügt sich nicht ein in diese Kreisläufe, betreibt damit Raubbau in einer Übernutzung der Ressourcen.
- Eine Haushaltsweise nach Vorbild in der Biosphäre somit für die Menschheit zwingend.

Inhalt

Die Sonne: Verfügbarkeit, Rolle in der Biosphäre, Nutzbarkeit als Energiequelle


1. Energiehaushalt der Erde und Strahlungsbilanz – solare Ressourcen solare Einstrahlung und die verschiedenen Wege bis zur Abstrahlung	2
2. solare Ressourcen im Vergleich mit dem derzeitigen Energieverbrauch – Angebot solares Angebot im Hinblick auf eine solare Energiewirtschaft	2
3. Energieverbrauch pro Kopf in Relation zur Belastbarkeit der Biosphäre fossile Energiewirtschaft in der Sackgasse - Konzeptidee Energieverbrauch pro Kopf: 2000 Watt – Gesellschaft - Tatsächlicher durchschnittlicher Energieverbrauch pro Kopf weltweit - Energieverbrauch pro Kopf und nach Regionen weltweit	3
4. Energieverbrauch pro Kopf in der Schweiz (~Europa) aufgeteilt nach Sparten wo fällt der Energiebedarf an: zur Frage der Energiebereitstellung	4
5. Stationäres Ungleichgewicht System Erde und resultierende Temperatur solare Einstrahlung und Wärmeabstrahlung im Fließgleichgewicht als Vorbereitung für die Themen: - Qualität der solaren Einstrahlung, hochwertige Form der Energie - grundlegende Bedeutung für das Leben – Photosynthese - Die Sonne als Strahlungsquelle - Verfügbarkeit und Nutzbarkeit der solaren Strahlung - Nutzung der Sonnenenergie – Verwertbarkeit aus physikalischer Sicht, Energiesysteme - Wege der Umwandlung	5
6. Nutzung der Solarstrahlung nach Technologie Gewinnsystem und Energiewandelprozess in die Nutzenergie-Form - Zur Qualität der Solarstrahlung	6
7. Solarthermische Energienutzung – Anlagen mit thermischem Absorber Erzeugung von Wärme und ihrer Anwendungen	7-9
8. Umwandlung von Strom in mechanische Energie Zur Funktionsweise eines Elektromotors	9
9. Zur Funktionsweise einer Solarzelle – mit dem grundlegenden Photoeffekt Erzeugung von Strom aus der solaren Einstrahlung	10
10. Doppelspaltexperiment – Grundversuch der "Wellenmechanik" zur seltsamen Natur des Lichtes: Welle oder Teilchen?	11

1. Der Energiehaushalt der Erde und Strahlungsbilanz – solare Ressourcen solare Einstrahlung und die verschiedenen Wege bis zur Abstrahlung



Solarer Eintrag in Terawatt und seine Umsetzung im Energiehaushalt der Erde.

In den **Energiehaushalt der Erde** gehen ein:

	Einstrahlung	173'000 TW	100%
	- Reflektion	52'000 TW	30%
	121'000 TW	70%	

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

① direkte Umwandlung	80'000 TW	46%
② Verdampfung von Wasser	40'000 TW	23%
③ Wind, Wellen, Strömungen	1000 TW	1%
④ Photosynthese (Biosphäre)	92 TW	0.053%
121'000 TW	70%	

Stationäres Ungleichgewicht auf der Erde

Die Prozesse auf der Erde werden angetrieben, indem die hochwertige Solarenergie ein Ungleichgewicht herstellt. Stationär ist dieses Ungleichgewicht insofern, als auf den Prozessen ①-④ und ihren Zwischenschritten die Energie im Verlauf zu ihrer Entwertung zu Wärme auf Umgebungstemperatur hin eine gleichbleibende Verweilzeit besitzt.

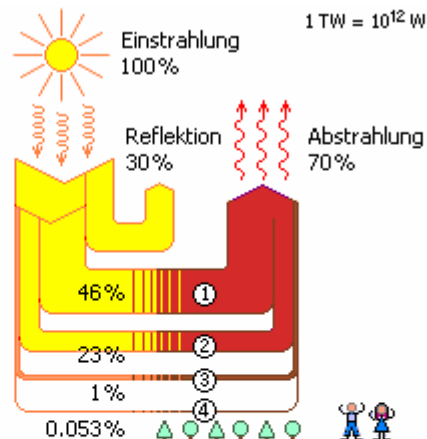



Bild: Fließgleichgewicht unter Reflexion (30%) und Thermalisierung (70%) der Einstrahlung (100%).

Und so die zugehörige Umgebungstemperatur - vermöge jener die Erde in den kalten Weltraum abstrahlt - einen stationären Wert annimmt:

$$(1 - 30\%) \cdot \text{Einstrahlung} = \frac{\text{Abstrahlung}}{\sigma \cdot T^4}$$

Temperatur 


 Umwandlung der solaren Einstrahlung in Wärme

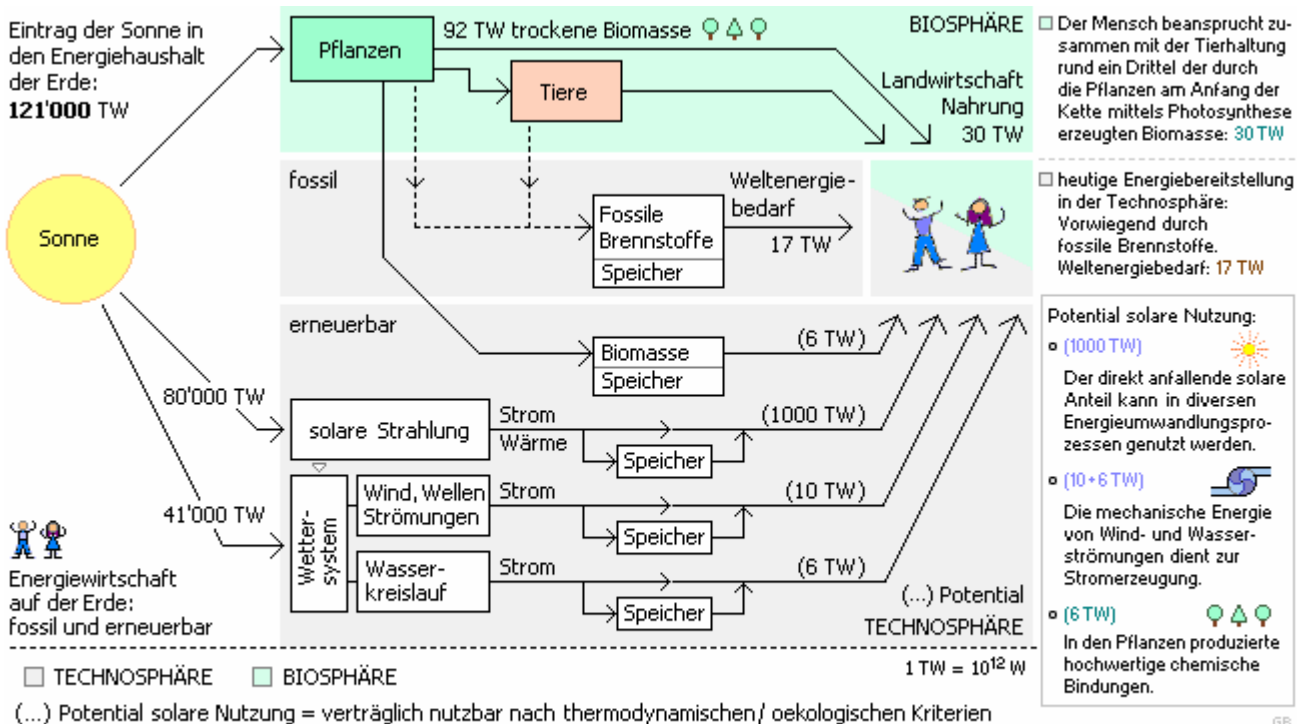
Die **Temperatur**, die diesem stationären Zustand zukommt, ergibt sich darum aus der Bedingung, dass die absorbierte solare Einstrahlung genauso gross sein muss wie die Wärme, die in den kalten Weltraum gestrahlt wird:
 $70\% \cdot \text{Einstrahlung} = \text{Abstrahlung}$
 (siehe Abschätzung weiter unten).

Fließgleichgewicht, darin $\text{Abstrahlung} \sim \sigma \cdot T^4$.

GR

Der Energiehaushalt der Erde und ihre Strahlungsbilanz - solare Ressourcen
 solare Einstrahlung und die verschiedenen Wege bis zur Abstrahlung

2. solare Ressourcen im Vergleich mit dem derzeitigen fossilen Energieverbrauch solares Angebot im Hinblick auf eine solare Energiewirtschaft




GR

solare Ressourcen im Vergleich mit dem derzeitigen fossilen Energieverbrauch
 solares Angebot im Hinblick auf eine solare Energiewirtschaft

3. 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

mittlere Dauerleistung:
 das entspricht einem
 Jahresenergieverbrauch:
 $2430 \text{ W} \cdot a =$
 $= 2,43 \text{ kW} \cdot 8760 \text{ h} =$
 $\hat{=} 21'300 \text{ kWh}$ pro Person

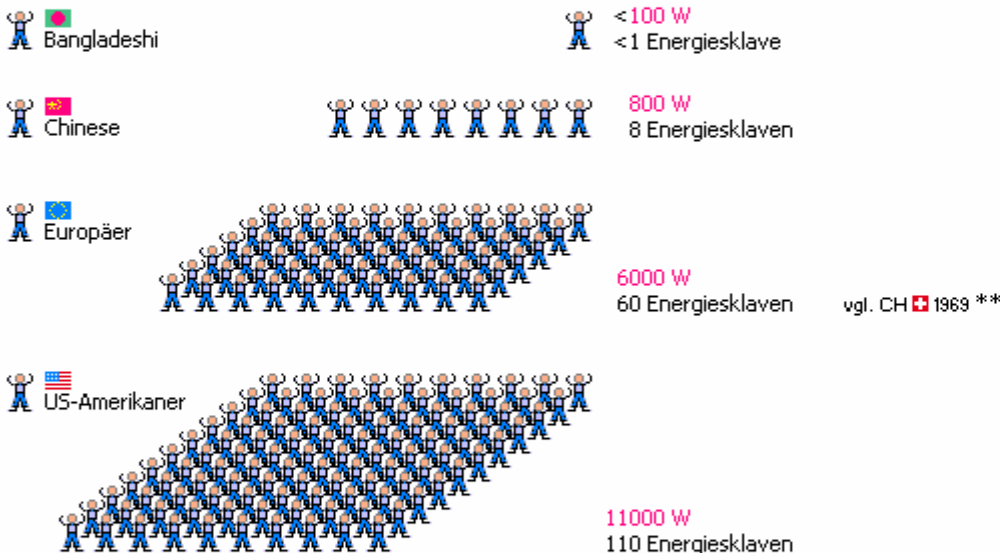
Damit bezieht ein Menschenbürger aus der Technosphäre die Arbeitsleistung von 24 Energiesklaven:
 $2430 \text{ W} / 100 \text{ W} \hat{=} 24$ Energiesklaven:




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:
 $17 \cdot 10^{12} \text{ W} / 100 \text{ W} = 170 \cdot 10^9$ Energiesklaven.

* vergleiche Zielvorgabe:
2000 Watt-Gesellschaft
 Modellvorgabe des
 Energiebedarfs eines
 Erdenbewohners:
 Auf Vereinbarkeit
 mit den Grenzen der
 Biosphäre zielend.

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.

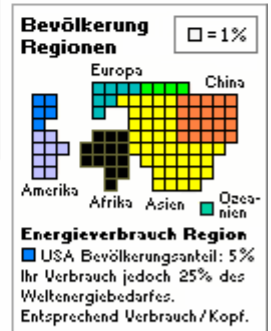


Die Erhaltung des Lebens auf der Erde wäre das vorrangige Ziel, dazu wäre aber koordiniertes Handeln notwendig, bei dem das Plündern der natürlichen Ressourcen aufhört. Nämlich Profite auf Kosten der kommenden Generationen zu machen, indem sie deren Lebensgrundlagen ruinieren. Wirtschaftlicher Erfolg 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.

** vergleiche Schweiz  1969:



und diese Zeiten waren so schlecht nicht!



2000 W Gesellschaft

Faktor 5-Festival
 11.06.2015



Zuerst die Idee Faktor 4:
 doppelter Wohlstand bei halbiertem
 Ressourcenverbrauch.
 Faktor 5 als neue Konzeptidee.

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

4. Energieverbrauch pro Kopf in der Schweiz / Europa nach Sparten wo fällt der Energieverbrauch an: zur Frage der Energiebereitstellung



Um Fragen beantworten zu können zur Bereitstellung der Energie (einfangen, umwandeln, verteilen):

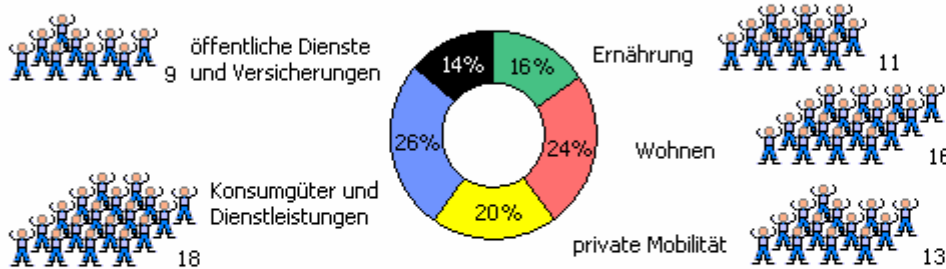
- o Erzielen derselben Dienstleistung auf effizienterem Weg
- o Transportwege
- o Produktlebensdauer
- o Zeitgewinn bei der Anwendung effizienterer Produkte
- o Stoffkreisläufe verträglich mit der Biosphäre
- o Effizienzsteigerung bei der Energieumwandlung und der Energiespeicherung
- o Sparpotentiale


muss die Frage beantwortet werden, in welchen Sparten man die Energie einsetzt:




Jährlicher Energieverbrauch in der Schweiz pro Person und Jahr

aus der Studie 16/06 "Umweltbewusster Konsum" des Bundesamt für Umwelt BAFU :



 1 Schweizer beansprucht: 9 + 18 + 13 + 16 + 11 = 67 Energiesklaven = 6700 W

Persönlicher Energieverbrauch

Der Energieverbrauch  eines Schweizer beträgt durchschnittlich:

67 Energiesklaven oder **6700 Watt**.

Wie ein persönlicher Verbrauch sich zusammensetzt gegenüber diesen ca. **6000 Watt** kann man ausrechnen hier:

web.energiespiel.stzh.ch/loader.html

und Schlüsse ziehen, wie man der **2000 Watt**- Gesellschaft näher kommt.

Im folgenden wird eingegangen auf die Frage, wie sich eine solare Energiewirtschaft integrieren lässt in die belebte Natur und ihr Ökosystem. Und wie eine damit verbundene effiziente Energietechnologie aussieht. Die Physik hinter den Gewinnsystemen, Umwandlungsprozessen und Speicherung der Energie lässt sich nicht austricksen, jedoch klug nutzen im Hinblick auf eine nachhaltige mit der lebendigen Natur verträgliche Energiebereitstellung.

GR

2000 W Gesellschaft

Faktor 5-Festival
 11.06.2015



Zuerst die Idee Faktor 4:
 doppelter Wohlstand bei halbiertem Ressourcenverbrauch.
 Faktor 5 als neue Konzeptidee.

Energieverbrauch pro Kopf in der Schweiz / Europa nach Sparten
 wo fällt der Energieverbrauch an: zur Frage der Energiebereitstellung

Den persönlichen Energieverbrauch in Watt (bezogene Dauerleistung) bestimmen:

- o wie weit ist mein persönlicher Energieverbrauch von der 2000 Watt - Gesellschaft entfernt?
- o wo liegen die Einsparpotentiale?
- o Hinweise für eine effizientere und sinnvollere Nutzung der Energie!

<http://web.energiespiel.stzh.ch/loader.html>

5. Stationäres Ungleichgewicht System Erde und resultierende Temperatur solare Einstrahlung und Wärmeabstrahlung im Fließgleichgewicht

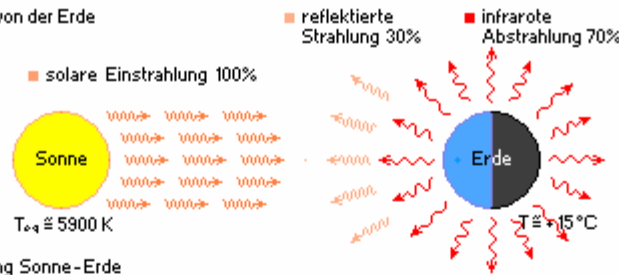


Energiehaushalt Strahlung der Erde

Solare Einstrahlung auf die Erde - Abstrahlung von der Erde

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.



Strahlungsintensität der Sonne

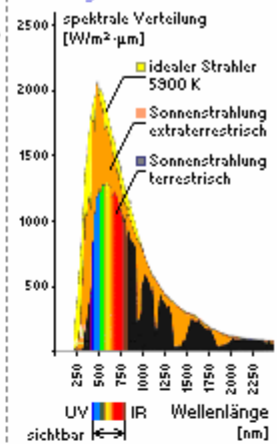


Bild: stationäres Ungleichgewicht der Strahlung Sonne-Erde

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:

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

Einfanquerschnitt 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:

$$P_{\text{Erde}}^{\text{cin}} = \underbrace{(1-30\%)}_{70\% \text{ absorbierte Energie}} \cdot P_{\text{Sonne}}^{\text{Erde}} = (1-30\%) \cdot S \cdot \pi R^2 = 1.21 \cdot 10^{17} \text{ W} = 121'000 \text{ TW} \quad (1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W})$$

Umwandlung der solaren Einstrahlung in Wärme

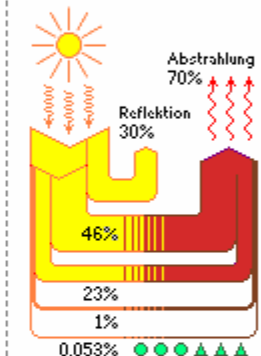
Dieser ganze Betrag wird, wenn auch auf verschiedenen Wegen, nach der Absorption in Wärme umgewandelt (1)-(4).



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 im Energiehaushalt der Erde nicht wirksam 30%
- (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:

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

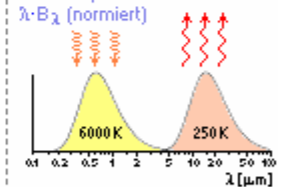
Oberfläche der Erde, $R = 6350 \text{ km}$ Radius der Erde

Im Gleichgewicht ist:

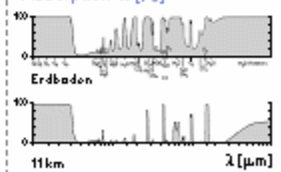
$$P_{\text{Erde}}^{\text{cin}} = P_{\text{Erde}}^{\text{aus}} \Rightarrow (1-30\%) \cdot S \cdot \pi R^2 = 4 \cdot \pi R^2 \cdot \sigma \cdot T^4 \Leftrightarrow T = \sqrt[4]{\frac{S \cdot (1-30\%) \cdot \pi R^2}{4 \cdot \pi R^2 \cdot \sigma}} = 255 \text{ K} \text{ bzw. } T = -18^\circ\text{C}$$

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 sinngemäss bei einem Treibhaus findet.

Planck Spektralfunktion



Absorption α [%]



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

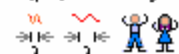
* Stefan-Boltzmann Strahlungsgesetz:

$$P = A \cdot \sigma \cdot T^4$$

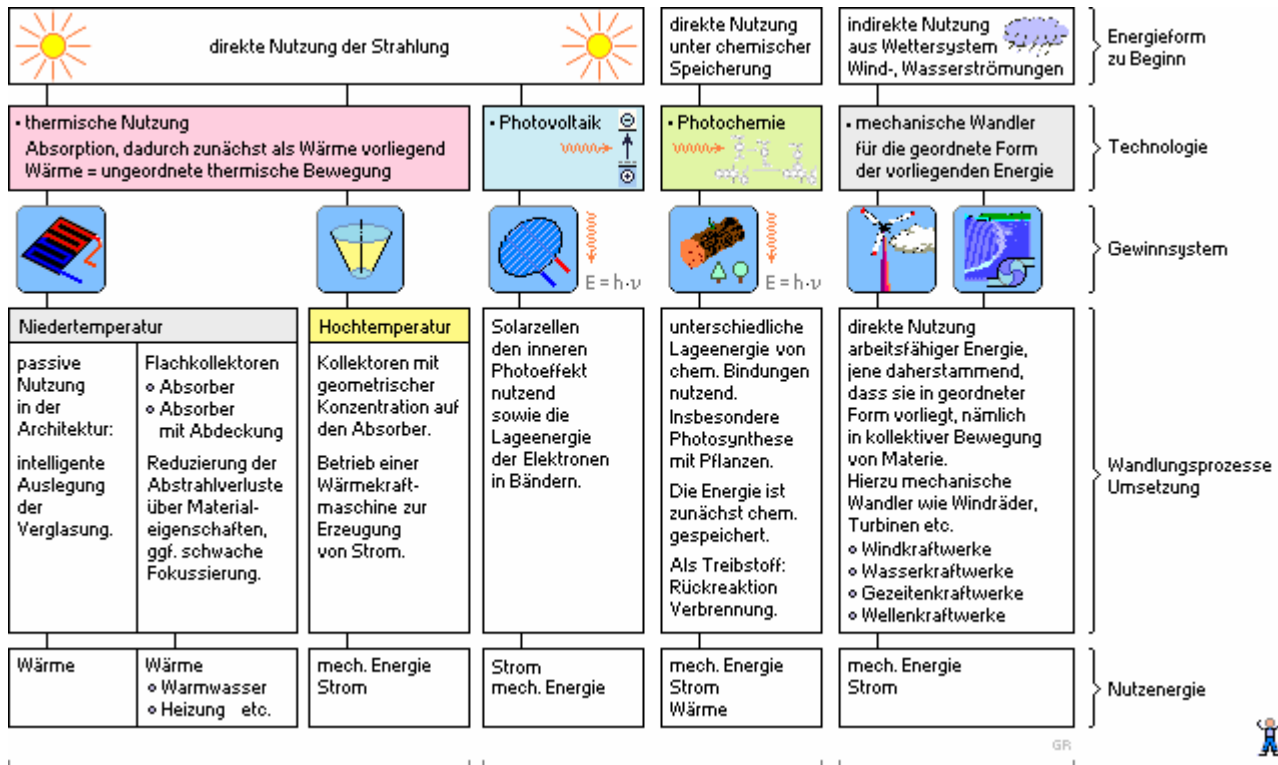
Strahlungsleistung P eines schwarzen Körpers der Fläche A und der absoluten Temperatur T .

GR

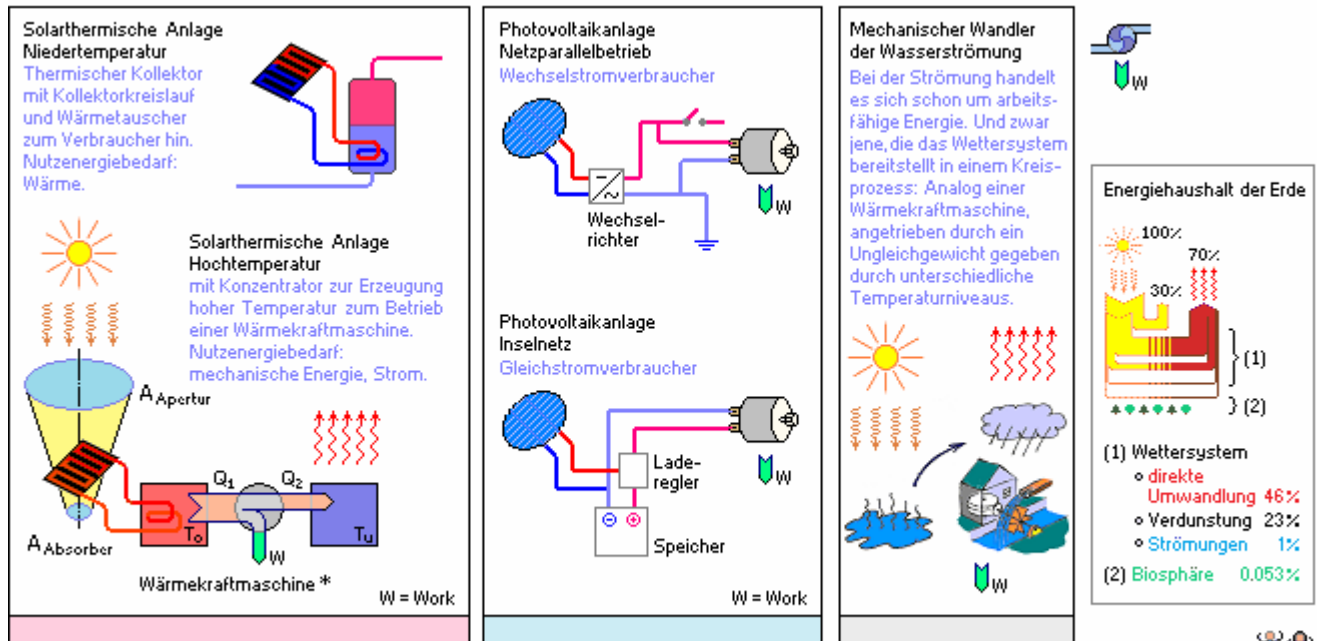
λ [µm]: Wellenlänge



6. Nutzung der Solarstrahlung nach Technologie Gewinnsystem und Energiewandelprozess in die Nutzenergie-Form



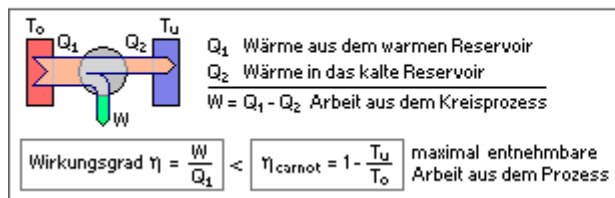
Repräsentative Beispiele:



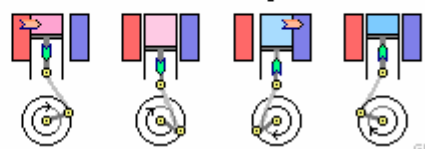
Nutzung der Solarstrahlung nach Technologie
 Gewinnsystem und Energiewandelprozess in die Nutzenergie-Form



* zyklisch arbeitende Wärmekraftmaschine:



Wärme \rightarrow mechanische Energie



Zur Qualität der Solarstrahlung

Das Strahlungsspektrum der Sonnenscheibe liefert Elementarquanten hoher Energie

Das Strahlungsspektrum der Sonne entstammt einem Strahler der Oberflächentemperatur von 5900 K. Es besteht aus **Elementarquanten**, welche am Ziel **Elementarprozesse** hoher Energie auslösen können.

Die Verdünnung infolge des Abstandes der Sonne ist hierbei gerade ein Vorteil, da die Strukturen, welche die passenden Energiestufen zur Energiegewinnung anbieten, thermisch stabil bleiben:

So beim Prozess der **Photosynthese**, welcher zu Beginn der Nahrungskette die hochwertigen chemischen Bindungen des Lebens liefert.

Technisch die **Photovoltaik**, welche Strom als arbeitsfähige Energie liefert.



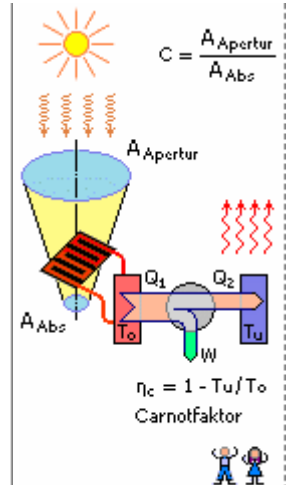
Die **hohe Arbeitsfähigkeit** der ursprünglichen Solar-

strahlung kann sich auf eine weitere Weise manifestieren:

Die **Sonnenscheibe** lässt sich bei klarem Himmel mittels **abbildender Optik** (z.B. Spiegel) **konzentrieren**, wobei jedoch als thermodynamisches Limit die ursprüngliche Strahlungsdichte nicht erreicht werden kann. Immerhin erreicht man Temperaturen mit denen effizient eine **Wärmeleistungsmaschine** betrieben werden kann, deren Wirkungsgrad

an den **Carnotfaktor** gebunden ist.

Der Grund für technisch ausreichende Wirkungsgrade, arbeitsfähige Energie zu gewinnen auf diesem Wege, kann man gerade in dem gerichtet kollektiven Fortschreiten der Strahlung sehen, mit der die Sonnenscheibe in das Konzentratorsystem leuchtet. Und in dieser Anordnung ihre **hohe Arbeitsfähigkeit** zum Tragen kommt.



GR

7. Solarthermische Energienutzung – Anlagen mit thermischem Absorber
Erzeugung von Wärme und ihrer Anwendungen



a) Nicht nachgeführte Kollektoren - Flachkollektoren

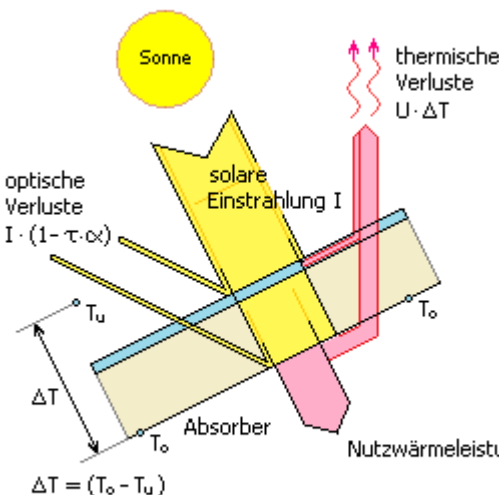
Ein erheblicher Teil der nachgefragten Nutzenergie besteht in Niedertemperaturwärme. Qualität im Sinne von Arbeitsfähigkeit, über die der Carnotfaktor $\eta_c = 1 - T_u/T_o$ Auskunft gibt, sind hier nicht gefragt, sondern ein hoher Kollektorstufigungsgrad η , Niedertemperaturwärme bereitzustellen.

In der Reihenfolge der erzielbaren Nutzttemperaturen sind dies:

Technik	Anwendung	äquivalenter Konzentrationsfaktor C *
unabgedeckte Kollektoren	Schwimmbadwasser-Temperierung	C = 1
Flachkollektoren	Warmwasser, Heizung, NT-Prozesswärme	C = 1 - 1.8
Vakuumröhrenkollektoren	Warmwasser, Heizung, NT-Prozesswärme, Klimatisierung	C = 1 - 2

* durch Massnahmen eines selektiven Absorbers und durch Abdeckung erzielt

Wirkungsgrad η eines Flachkollektors - berechnet aus einer Bilanzierung der Energieflüsse:

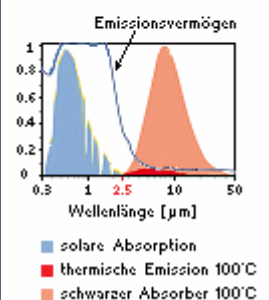


- I = solare Einstrahlung [W/m²]
- τ·α = optischer Gewinnfaktor [1]
- τ = Transmissionsvermögen Kollektor [1]
- α = Absorptionsvermögen Absorber [1]
- U = therm. Verlustkoeffizient [W/(m²·K)]
- ΔT = (To - Tu) = Temperaturdifferenz Absorber - Aussenluft [K]

Nutzwärmeleistung: $P = \underbrace{I \cdot (\tau \cdot \alpha)}_{\text{Gewinn}} - \underbrace{U \cdot \Delta T}_{\text{Verlust}}$ [W/m²]

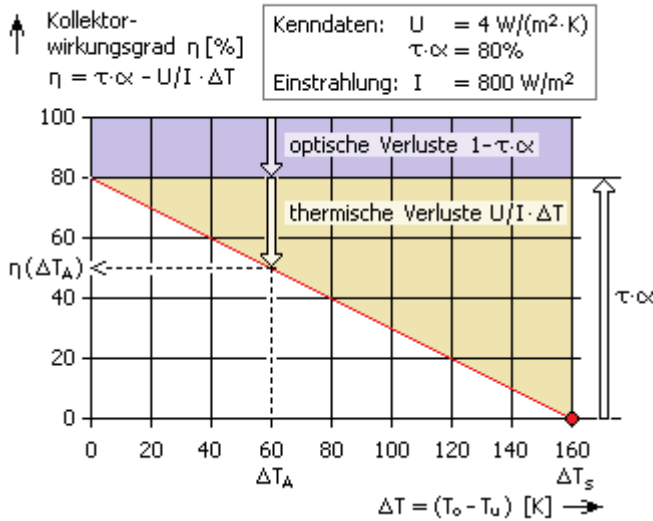
Wirkungsgrad bezogen auf die Einstrahlung I: $\eta = \frac{P}{I} = \tau \cdot \alpha - U/I \cdot \Delta T$ [%]

Selektivität eines Absorbers:



GR

aufgezeichneter Verlauf des Wirkungsgrades η :



○ Stillstandtemperatur:

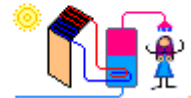
$$\eta = 0 : \tau \cdot \alpha = U/I \cdot \Delta T_S$$

$$\Leftrightarrow \Delta T_S = \tau \cdot \alpha \cdot I/U$$

$$\Delta T_S = 80\% \cdot \frac{800 \text{ W}/\text{m}^2}{4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})} = 160 \text{ K}$$

○ Wirkungsgrad η bei einer Arbeitstemperatur $\Delta T_A = 60 \text{ K}$:

$$\eta = 80\% - \frac{4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})}{800 \text{ W}/\text{m}^2} \cdot 60 \text{ K} = 50\%$$

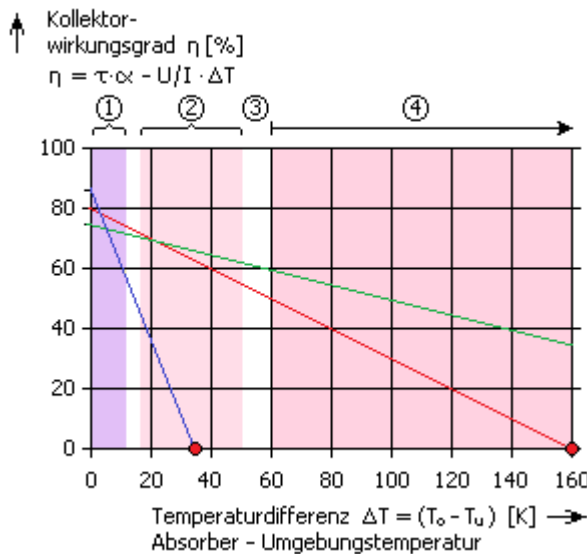


GR

Die thermischen Verluste fallen umso geringer aus, je weiter man mit der Arbeitstemperatur ΔT_A unter die Stillstandtemperatur ΔT_S zu liegen kommt.

So sind bei hohen Arbeitstemperaturen ΔT_A (i.a.) Kollektoren mit hohen Stillstandtemperaturen ΔT_S , d.h. solchen mit geringen Verlustkoeffizienten U , im Vorteil. Hierzu müssen die Eigenschaften bezüglich Kollektorabdeckung - gar solchen mit Vakuumröhren - und die Selektivität der Absorber verbessert werden.

Solche Massnahmen reduzieren i.a. den optischen Gewinnfaktor $\tau \cdot \alpha$ etwas, sodass bei Anwendungen, welche gar keine hohe Arbeitstemperatur ΔT_A erfordern, einfacher konzipierte Kollektoren ihr Anwendungsfeld haben:



Arbeitstemperaturbereiche:

- ① Schwimmbadtemperierung
- ② Warmwasseraufbereitung
- ③ Raumwärme
- ④ Prozesswärme

Kollektortyp:

- Solarabsorber
 $U = 20 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Flachkollektor
 $U = 4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- Vakuumkollektor
 $U = 2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

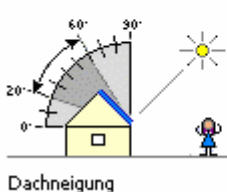
Einstrahlung
 $I = 800 \text{ W}/\text{m}^2$

GR

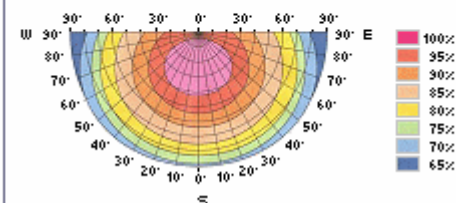
Optimale Ausrichtung von Flachkollektoren

Flachkollektoren sehen - ohne geometrische Konzentration - das Himmelsgewölbe über sich und nutzen daher auch die diffuse Strahlung. Deshalb brauchen sie nicht nachgeführt zu werden und besitzen bezüglich fixer Orientierung (Dachneigung, Azimut) Toleranzwerte, innerhalb welcher der Ertrag um ein Optimum schwankt:

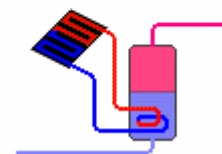
Ausrichtung:



zugehöriger Jahresertrag:



Solarthermische Anlage
 Niedertemperatur
 Thermischer Kollektor
 mit Kollektorkreislauf
 und Wärmetauscher
 zum Speicher des
 Verbrauchernetz:



b) Anlagen mit geometrischer Konzentration und Nachführung

Die Konzentration erfolgt hier durch eine geometrische Optik (Spiegel), welche die Sonnenscheibe auf einen Absorber abbildet. Der Konzentrationsfaktor ist gegeben durch das Verhältnis:

$$C = A_{\text{Apertur}} / A_{\text{Absorber}}$$

Die Wärmeverluste werden bei solch geometrisch konzentrierenden Systemen dadurch verringert, dass die Absorberfläche entsprechend ihrer reduzierten Fläche abstrahlt.

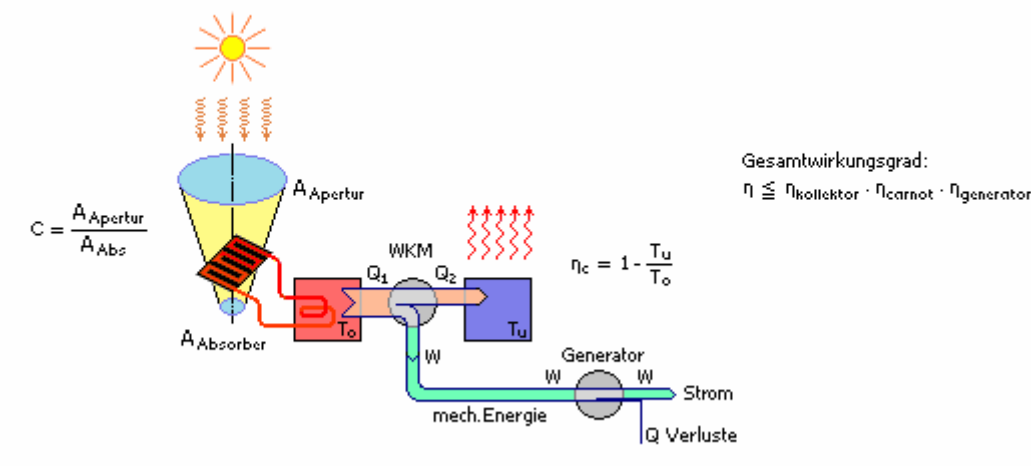
Es sind mit dieser Art der Konzentration weit höhere Temperaturen erreichbar als mit Flachkollektoren: Die Arbeitstemperaturen sind geeignet, Prozesse zu betreiben bis hin zum Betrieb von Wärmekraftmaschinen WKM, deren Wirkungsgrad durch den Carnotfaktor η_c limitiert ist im Sinne einer oberen Schranke für den Anteil, der in Arbeit umgesetzt werden kann.

Konzentrierende Kollektoren nutzen das direkte Licht der intensiv leuchtenden Sonnenscheibe, welches gerichtet daherkommt und müssen deshalb dem Sonnenstand nachgeführt werden.

Das diffuse Licht lässt sich kaum konzentrieren, weshalb solche Systeme angewiesen sind auf sonnenreiche Gegenden, wollen sie rentabel arbeiten.

In der Reihenfolge der erzielbaren Nutztemperatur unterscheidet man folgende Systeme:

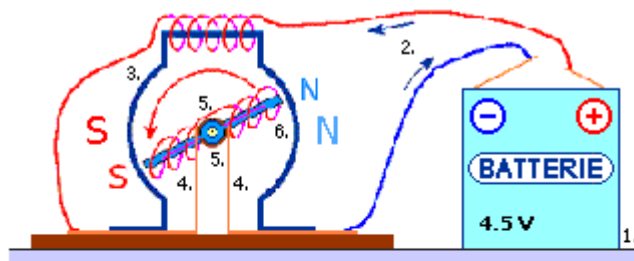
Technik	Anwendung	Konzentrationsfaktor C
1-achsig nachgeführte K.	thermische Kälterzeugung, MT-Prozesswärme	C = 20 - 100
2-achsig nachgeführte K.	Betrieb von WKM zur Stromerzeugung, HT-Prozesswärme	C = 100 - 5000



GR



8. Umwandlung von Strom in mechanische Energie zur Funktionsweise eines Elektromotors



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

GR

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.

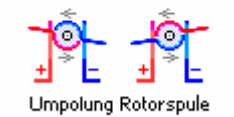
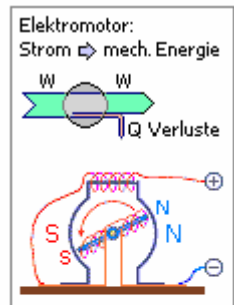
Energiesystem gesamtheitliche Betrachtung

- 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

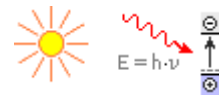


GR



9. 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:

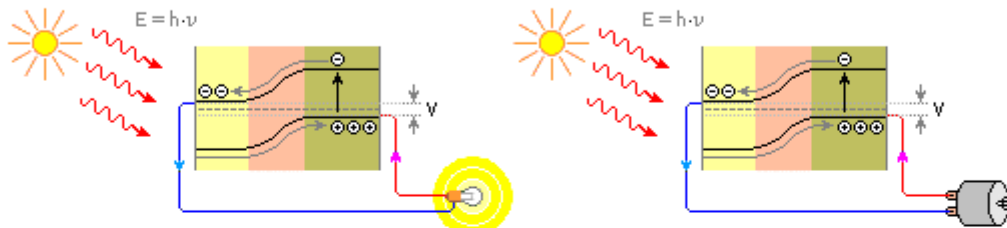


Wenn man nun zwei Schichten Silizium aufeinander bringt, die man geeignet und unterschiedlich dotiert hat, so werden die Energiebänder verstimmt und eine Stufe überbrückt jetzt die Grenzzone:

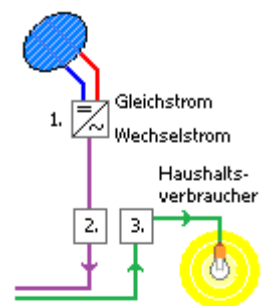


Die Elektronen fallen die Stufe runter, was den Strom antreibt, aber bedauerlicherweise nur bis sie unten angekommen sind. Wenn die Sonne jedoch scheint, so prasseln Lichtteilchen auf die Elektronen und heben sie aufs obere Band.

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!



Photovoltaikanlage:



Öffentliches Stromnetz

1. Wechselrichter
2. Einspeisezüher
3. Bezugzüher

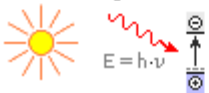
GR

Photoeffekt · Licht mit Teilcheneigenschaften

Die klassische Physik musste wesentlich erweitert werden

Das physikalisch Wesentliche an der Nutzung der Solarstrahlung mit Photovoltaik ist das Auftreten des Lichtes in **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 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** im 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 so ziemlich derart unterschiedliche Konzepte, dass im Grunde eine anschauliche Vereinbarkeit unmöglich ist.

Diese Erkenntnisse haben das Bild, das wir glauben uns von der Natur aus der Alltagserfahrung machen zu können, zutiefst erschüttert. Das folgende **Doppelspaltexperiment** kann als Einstieg dienen, sich mit dieser erstaunlichen Welt zu befassen:

Elementarprozess:



Energie des Photons $E = h \cdot \nu$

h Plancksches Wirkungsquantum
 ν Frequenz des Photons

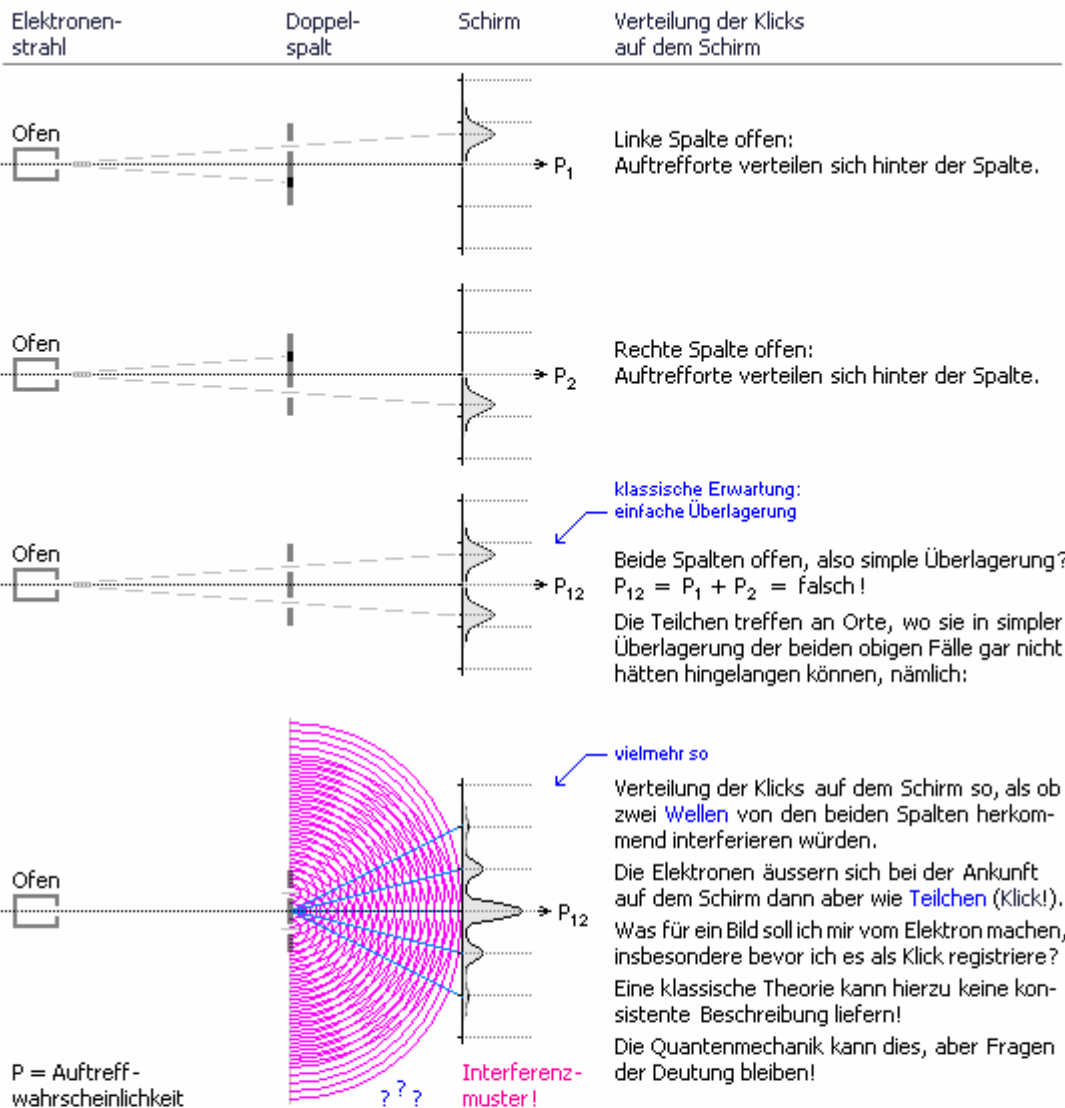
Diese Energie E steht bei einem **Elementarprozess** zur Verfügung: Hier bei der Wechselwirkung des Photons mit einem Elektron im Halbleitermaterial der **Solarzelle**.



GR

10. Doppelspaltexperiment Grundversuch der "Wellenmechanik"

Experiment



◦ Die Solarzelle ist ein typisches Beispiel für das Auftreten des Lichtes in Portionen.
 ◦ Die Erkenntnis, dass ein reines Wellenbild des Lichtes nicht hinreichend ist, hat das Naturverständnis revolutioniert hin zur Quantenmechanik.
 ◦ Zum sonderbaren Doppelleben von Licht aber auch der Materie hier noch das Grundexperiment der Quantenphysik:



GR

Theorie

Das Experiment widerspricht der Erwartung, die wir von den Dingen des Alltags haben, simple Überlagerung:

$$P_{12} \neq P_1 + P_2$$

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 ψ_1 und ψ_2 !

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'