

# 2 Energie

## 2.1 Was ist Energie?

### 2.2 Energieverbrauch

### 2.3 Reserven und Ressourcen



# Was ist Energie?

“It’s important to realize that in physics today,  
we have no knowledge of what energy is.”

(Nobelpreisträger R. Feynmann)

# Definition

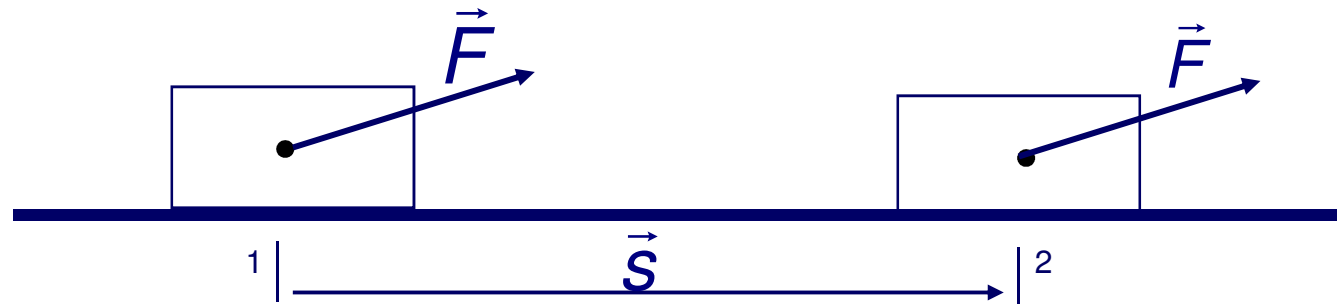
Gespeicherte Arbeit nennt man Energie.

Energie bedeutet Arbeitsfähigkeit.

Energie ist die Fähigkeit Arbeit zu verrichten,  
Wärme zu übertragen und Strahlung zu entsenden.



# Arbeit und Energie



## Definition:

$$\text{Arbeit } W = \text{Kraft} \cdot \text{Weg} = \vec{F} \cdot \vec{s} = - \int_1^2 \vec{F}(\vec{s}) \cdot d\vec{s}$$

Die Arbeit und Energie sind skalare Größen!

$$\text{Einheit: } [W, E] = [F] \cdot [s] = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ kg m/s}^2 = 1 \text{ J (Joule)}$$

Hubarbeit:

$$W = m \cdot g \cdot h$$

Potentielle Energie

Bewegungsarbeit:

$$W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2)$$

Kinetische Energie

Dehnungsarbeit:

$$W = \frac{1}{2} \cdot D \cdot x^2$$

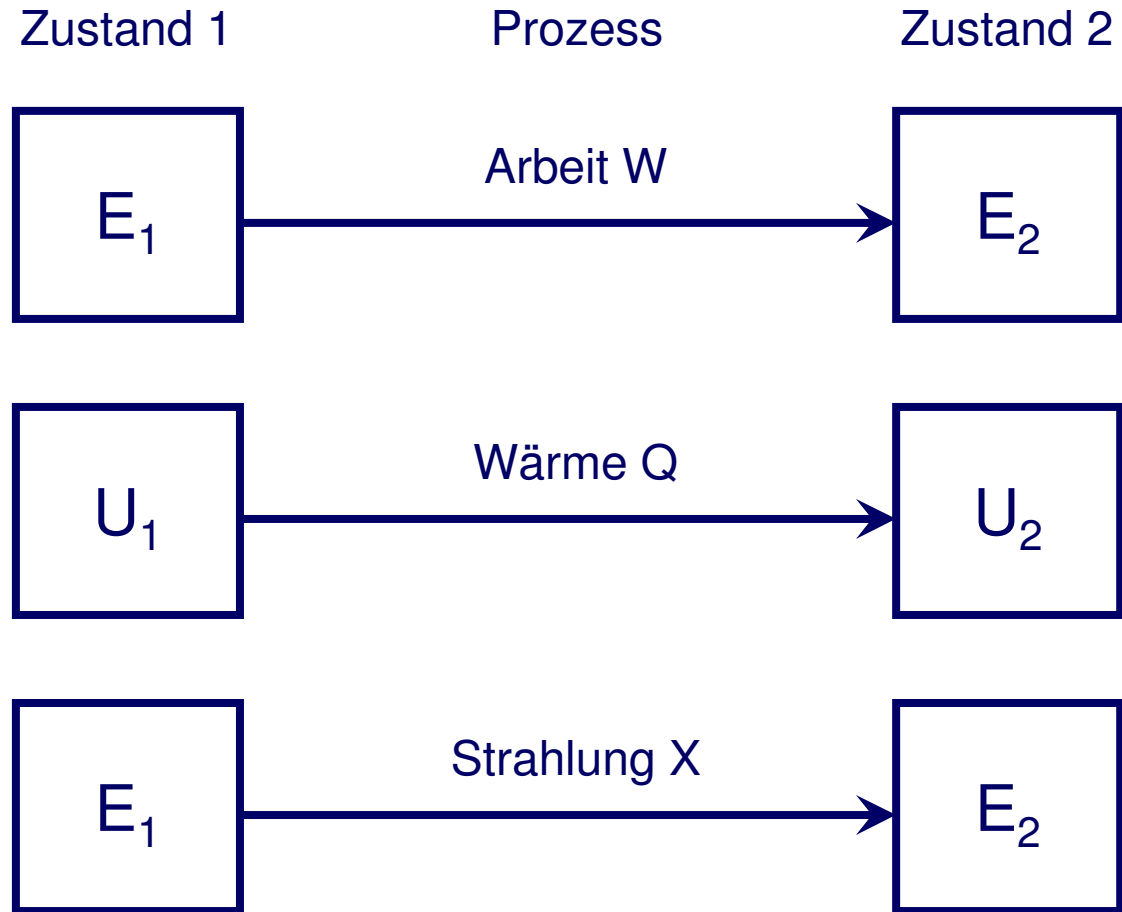
Elastische Energie

Reibungsarbeit:

$$W = \mu \cdot F_N \cdot s$$

Dissipationsenergie

# Zustands- und Prozessgrößen



Energie ist eine Zustandsgröße

Arbeit, Wärme und Strahlung sind Prozessgrößen.

# 1. Hauptsatz der Thermodynamik

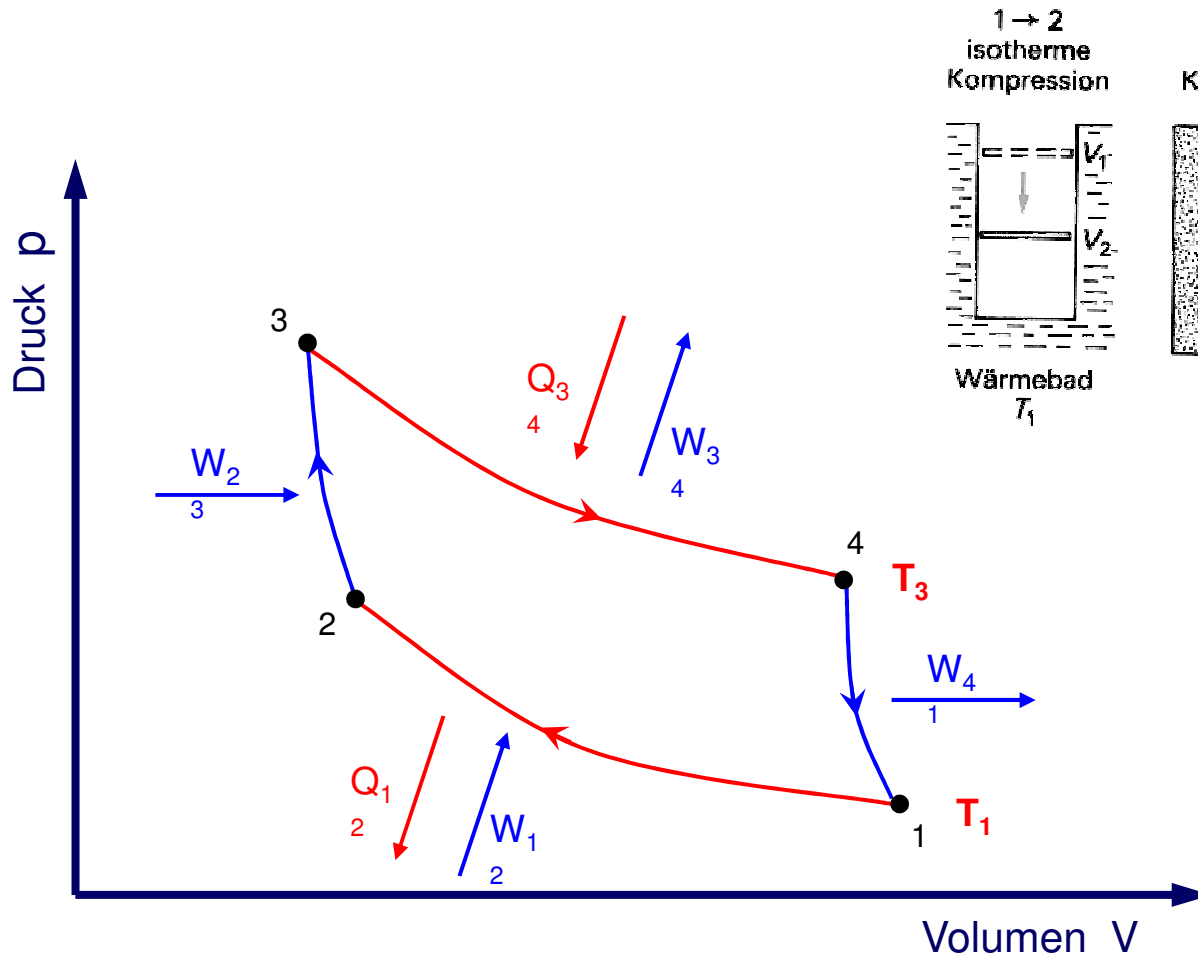
In einem abgeschlossenen System bleibt die innere Energie eines Systems konstant.

Die Änderung der Inneren Energie  $dU$  eines geschlossenen Systems entspricht der Summe von übertragener Wärme  $dQ$  und verrichteter Arbeit  $dW$ :

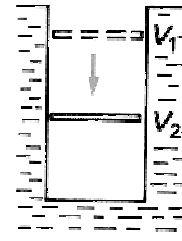
$$dU = dQ + dW$$

Einschränkung:

# Carnot-Prozess

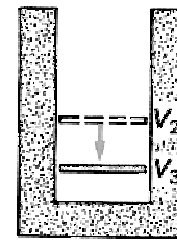


1 → 2  
isotherme  
Kompression



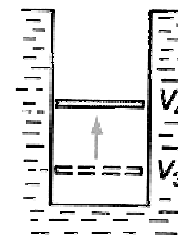
Wärmebad  
 $T_1$

2 → 3  
isentropische  
Kompression



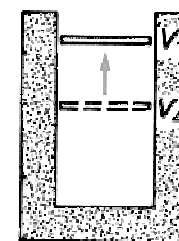
Wärme-  
isolation

3 → 4  
isotherme  
Expansion



Wärmebad  
 $T_3$

4 → 1  
isentropische  
Expansion



Wärme-  
isolation

$$\eta_C = \frac{|W_{ab}|}{Q_{zu}} = 1 - \frac{T_{ab}}{T_{zu}}$$

$$W_{12} = -\int_1^2 p \cdot dV = -\int_1^2 \frac{nRT_1}{V} dV = -nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$Q_{12} = +nRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$



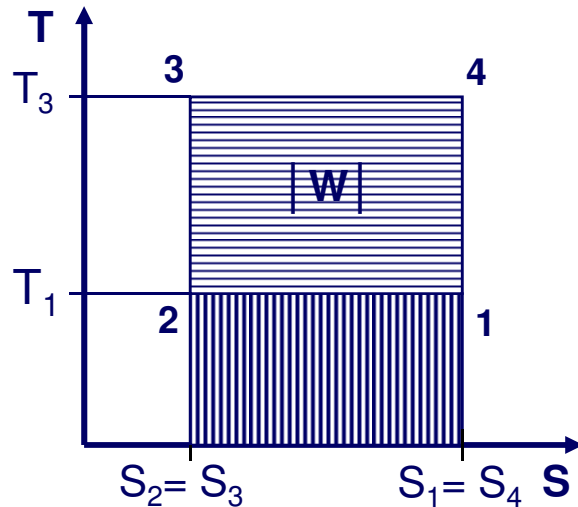
## 2. Hauptsatz der Thermodynamik

Es gibt keine periodisch arbeitende Maschine, die Wärme aus einem Wärmespeicher entnimmt und vollständig in mechanische Arbeit umwandelt.

Wärme geht nur von selbst von einem kalten auf einen warmen Körper über.



# Entropie



$$dS = \frac{dQ}{T}$$

$$Q_{12} = \int_1^2 T \cdot dS$$

## 2. Hauptsatz:

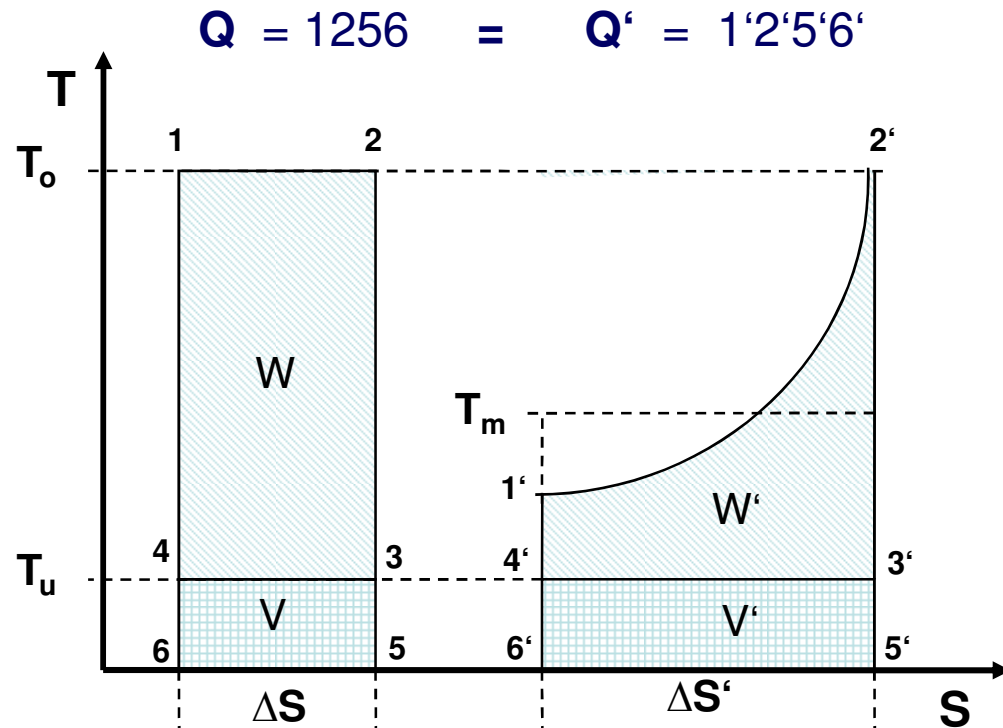
In einem adiabaten abgeschlossenen System können von selbst nur Vorgänge ablaufen, in denen die Entropie zunimmt:

$$dS \geq 0$$

# Entropie als Maß für den Arbeitswert der Wärme

Voraussetzung:

Beim ungestrichenem System wird die Wärme  $Q$  bei konstanter Temperatur  $T_0$ , beim gestrichenem System wird  $Q'$  bei steigender Temperatur zugeführt und beide Wärmemengen sind gleich.



Es gilt:

$$Q = \Delta S \cdot T_0 = Q' = \Delta S' \cdot T_m$$

und  $Q = \text{Arbeit } W + \text{Verlust } V$

$$Q' = \text{Arbeit } W' + \text{Verlust } V'$$

Da  $T_0 > T_m \Rightarrow \Delta S' > \Delta S$ .

Damit  $V' = \Delta S' \cdot T_u > \Delta S \cdot T_u = V$ .

Folglich  $W > W'$ .

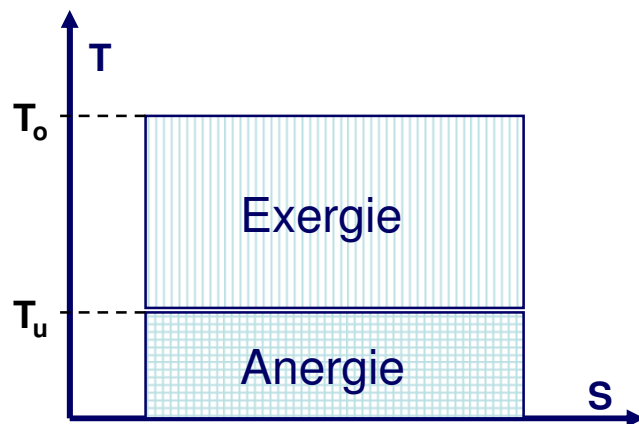
Damit  $\eta = W / Q > \eta' = W' / Q$ .

**Der Wirkungsgrad eines Kreisprozesses ist desto größer je höher die mittlere Temperatur bei der Wärmezufuhr und je kleiner die Entropieänderung ist.**

# Exergie und Anergie

Der Anteil einer Energie  $W$ , der unter Mitwirkung der Umgebung in jede andere Energieform umwandelbar ist, wird als Exergie  $E$ , der nicht umwandelbare Anteil als Anergie  $A$  bezeichnet:

$$W = E + A$$



$$E = \eta_c \cdot Q$$

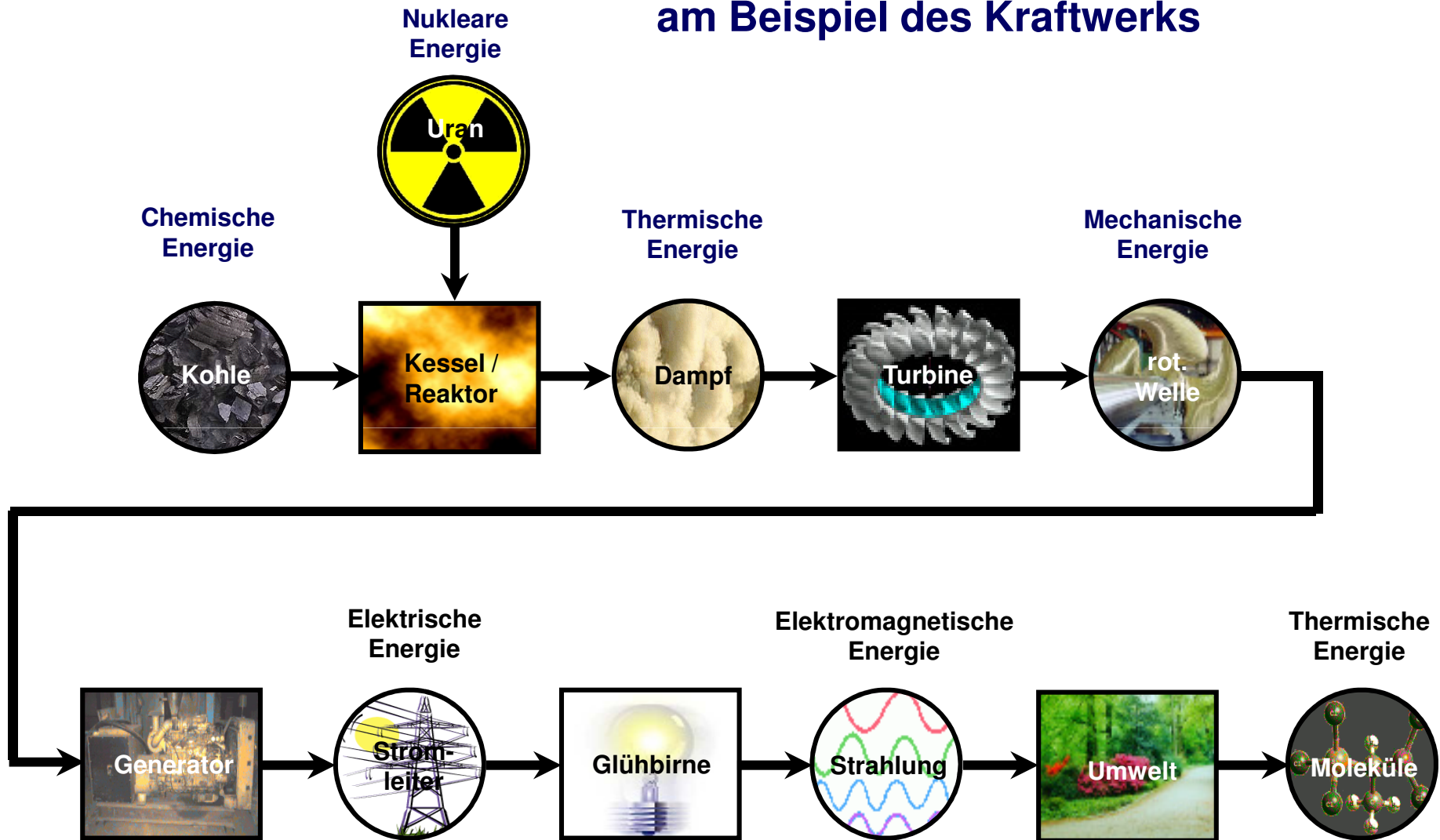
$$A = (1 - \eta_c) \cdot Q$$

Exergetischer Wirkungsgrad

$$\xi = |W| / E$$

# Energieformen - Energieträger - Energiewandler

## am Beispiel des Kraftwerks



# Energieerhaltungssatz

In einem abgeschlossenen System bleibt die Gesamtenergie erhalten. Energie kann weder verschwinden noch von selbst entstehen. Sie kann nur von einem System auf ein anderes übergehen oder sich von einer Form in eine andere umwandeln.

ETW  
09/2005



Institut für Energie- und Umwelttechnik

# Energiearten

- Potenzielle Energie  $E = m \cdot g \cdot h$
- Kinetische Energie  $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$
- Rotationsenergie  $E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$
- Thermische Energie  $U_i = c_v \cdot m \cdot T$
- Stromenergie  $E = U \cdot I \cdot t$
- Elektrische Energie  $E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$
- Magnetische Energie  $E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$
- Strahlungsenergie  $E = h \cdot f$   
 $E = m \cdot c^2$
- Quantentheorie  $H = \frac{P^2}{2 \cdot m} + V(x)$
- Feldenergien  $U_e = \int \frac{\epsilon_0}{2} \cdot E^2 \cdot dV$   
 $U_m = \int \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B^2 \cdot dV$   
 $U_g = -\int \frac{1}{8 \cdot \pi \cdot g} \cdot G^2 \cdot dV$



# Wie wird Energie gemessen?

Man kann Energie nur an ihren Folgeerscheinungen feststellen:

- an der Bewegung einer Maschine
- an der Wärme, die ein Herd abgibt
- an der Helligkeit, die eine Glühlampe abstrahlt
- an der Schalleistung eines Radios.

Will man Energie messen, so muss man z.B. die Arbeit messen, die mit der Energie verrichtet wird.

# Typische Energiewerte

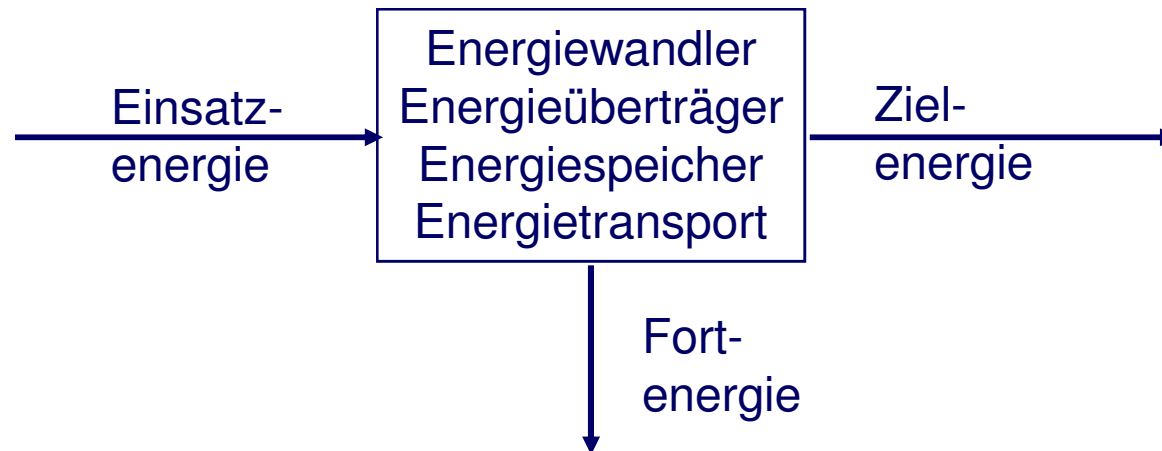
|  |            |  |           |
|--|------------|--|-----------|
| Chemische Bindungsenergie pro Atom                                       | $10^{-18}$ | Kinetische Energie eines Großraumflugzeugs bei 900 km/h      | $10^{10}$ |
| Nukleare Bindungsenergie pro Nukleon                                     | $10^{-12}$ | Jährlicher Energieverbrauch eines Industrielandes pro Bürger | $10^{11}$ |
| Speicherenergie eines Kondensators                                       | $10^{-2}$  | Abschuss eines Spaceshuttles                                 | $10^{12}$ |
| Anschlagen einer Schreibmaschinentaste                                   | $10^0$     | Schluchsee-Stausee (108 m <sup>3</sup> , 600 m Fallhöhe)     | $10^{14}$ |
| Heben eines 1 kg Steines auf 10 m Höhe                                   | $10^2$     | Spalten von 1 kg Uran  | $10^{14}$ |
| Betrieb einer 150 W Lampe über 1 Minute                                  | $10^4$     | Jährliche Energieproduktion eines Kernkraftwerkes            | $10^{16}$ |
| Speicherenergie eines Bleiakkus (1 kg)                                   | $10^5$     | Hurrikan oder Wasserstoffbombe                               | $10^{17}$ |
| Kinetische Energie eines 100 km/h fahrenden Autos                        | $10^6$     | Primärenergieverbrauch in Deutschland                        | $10^{19}$ |
| Verdampfen von 1 l Wasser  | $10^6$     | Schweres Erdbeben  | $10^{20}$ |
| Verbrennen von 1 kg Kohle  | $10^7$     | Welt-Primärenergieverbrauch                                  | $10^{20}$ |
| Mittlere tägliche Sonneneinstrahlung auf 1 m <sup>2</sup> in Deutschland | $10^7$     | Jährliche Einstrahlung der Sonne auf die Erde                | $10^{24}$ |
| Supraleitender magnetischer Energiespeicher                              | $10^7$     | Jährlich von der Sonne abgestrahlte Energie.                 | $10^{34}$ |
| Täglicher Grundbedarf eines Bürgers                                      | $10^7$     |  |           |
| Jährliche Energieernte einer 1 m <sup>2</sup> Solarzelle in Deutschland  | $10^8$     |  |           |



# Leistung und Wirkungsgrad

$$\text{Leistung } P = \text{Energiestrom} = \frac{\text{verrichtete Arbeit } W}{\text{benötigte Zeit } t} = \frac{W}{t}$$

Einheit:  $[P] = 1 \text{ J / s} = 1 \text{ W}$  (Watt)



$$\text{Wirkungsgrad } \eta = \frac{\text{Zielenergie } W}{\text{Einsatzenergie } Q}$$

## Energie: Einheiten und Umrechnungen

|                              | J                      | cal                   | kWh                   | kg SKE               | kg ROE               | eV                   |
|------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 1 Joule (J)                  | 1                      | 0,2388                | $2,778 \cdot 10^{-7}$ | $3,41 \cdot 10^{-8}$ | $2,39 \cdot 10^{-8}$ | $6,24 \cdot 10^{18}$ |
| 1 Kalorie (cal)              | 4,1868                 | 1                     | $1,16 \cdot 10^{-7}$  | $1,43 \cdot 10^{-6}$ | $10^{-7}$            | $2,61 \cdot 10^{19}$ |
| 1 Kilowattstunde (kWh)       | $3,6 \cdot 10^6$       | $8,597 \cdot 10^5$    | 1                     | 0,12                 | $8,6 \cdot 10^{-2}$  | $2,25 \cdot 10^{25}$ |
| 1 kg Steinkohleeinheit (SKE) | $2,930 \cdot 10^7$     | $7 \cdot 10^6$        | 8,140                 | 1                    | 0,70                 |                      |
| 1 kg Rohöleinheit (ROE)      | $4,187 \cdot 10^7$     | $10^7$                | 11,63                 | 1,429                | 1                    |                      |
| 1 Elektronenvolt (eV)        | $1,602 \cdot 10^{-19}$ | $3,83 \cdot 10^{-20}$ | $4,45 \cdot 10^{-26}$ |                      |                      | 1                    |

|      |   |           |       |       |            |
|------|---|-----------|-------|-------|------------|
| Kilo | k | $10^3$    | Milli | m     | $10^{-3}$  |
| Mega | M | $10^6$    | Mikro | $\mu$ | $10^{-6}$  |
| Giga | G | $10^9$    | Nano  | n     | $10^{-9}$  |
| Tera | T | $10^{12}$ | Pico  | p     | $10^{-12}$ |
| Peta | P | $10^{15}$ | Femto | f     | $10^{-15}$ |
| Exa  | E | $10^{18}$ |       |       |            |