

E. Einleitung

Diese Vorlesung Energietechnik soll, ausgehend von den allgemeinen Grundtatsachen zum physikalischen Begriff der Energie, über einige Fakten zu Energiequellen, zu Energieflüssen und zu Energiewandlungsprozessen hin zu einer einführenden Behandlung der elektrischen Energietechnik führen. Die **elektrische Energietechnik** ist somit eine Teildisziplin der Energietechnik, die sich ihrerseits mit der Bereitstellung, Umwandlung, dem Transport und der Nutzung unterschiedlicher Formen der Energie befasst. Dabei werden unterschieden Wärmeenergie, kinetische und potentielle Energie, chemische, bio-chemische und elektrische Energie. Die physikalische SI-Einheit für Energie „Joule“ wird aus SI-Basis-Einheiten abgeleitet:

$1 \text{ J} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$. Leistung ist Energie je Zeiteinheit: $P = W / t$, $P = \Delta W / \Delta t$, $P = dW / dt$.

Die physikalische SI-Einheit für Leistung „Joule/Sekunde“ wird aus SI-Basis-Einheiten abgeleitet: $1 \text{ J/s} = 1 \text{ W} = 1 \text{ Watt}$.

Folgende Einheiten für Energie und Leistung sind genormt und üblich.

• Energie W :

SI-Einheit: $1 \text{ Joule} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Watt} \cdot \text{Sekunde} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$ (SI: Système internationale)

Andere Einheiten: Wh, kWh, SKE (Steinkohleeinheit), ...

Einheit	Bezeichnung	Umrechnung in J
J	Joule	$1 \text{ J} = 1 \text{ J}$
Wh	Wattstunde	$1 \text{ Wh} = 3.6 \text{ kJ} = 3600 \text{ J}$
cal	Kalorie	$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J} = 4186/1000 \text{ J}$
(1 kg) SKE	(1 Kilogramm) Steinkohleeinheit	$1 \text{ kg SKE} = 29\,308 \text{ kJ} = 29.3 \text{ Mio. J}$
oe	Oil Equivalent	$1 \text{ kg oe} = 41\,868 \text{ kJ} = 41.9 \text{ Mio. J}$
eV	Elektronenvolt	$1 \text{ eV} = 160.2 \text{ zJ} = 160.2 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
m ³ Erdgas	Kubikmeter Erdgas	$1 \text{ m}^3 \text{ Erdgas} = 31\,736 \text{ kJ} = 31.7 \text{ Mio. J}$

• Leistung P :

SI-Einheit: $1 \text{ Watt} = 1 \text{ W}$,

weitere Einheiten: PS (Pferdestärke) = 736 W, hp (U.S. horse-power), ...

Einheit	Bezeichnung	Umrechnung in Watt (W)
W	Watt	$1 \text{ W} = 1 \text{ W}$
PS	Pferdestärke	$1 \text{ PS} = 735.75 \text{ W}$ $1 \text{ PS} = 75 \text{ kp} \cdot \text{m/s} = 75 \cdot 9.81 \text{ N} \cdot \text{m/s} = 735.75 \text{ W}$
hp	Horse-power (U.S.)	$1 \text{ hp} = 745.8 \text{ W}$ $1 \text{ hp} = 550 \text{ lbf} \cdot \text{ft/s} = 550 \cdot 4.448 \text{ N} \cdot 0.3048 \text{ m/s} = 745.8 \text{ W}$

Häufig verwendete Vorsätze bei Energieeinheiten sind k, M, G, T, P, E, da die weltweiten Energiemengen im Vergleich zur Basiseinheit 1 J sehr groß sind.

z. B.: $1 \text{ k} = 1000$, $1 \text{ M} = 1000\,000$, $1 \text{ G} = 1000\,000\,000 = 10^9$, $1 \text{ T} = 10^{12}$

Symbol	Name	Wert	Symbol	Name	Wert
Y	Yotta	10^{24}	d	Dezi	10^{-1}
Z	Zetta	10^{21}	c	Zenti	10^{-2}
E	Exa	10^{18}	m	Milli	10^{-3}
P	Peta	10^{15}	μ	Mikro	10^{-6}
T	Tera	10^{12}	n	Nano	10^{-9}
G	Giga	10^9	p	Piko	10^{-12}
M	Mega	10^6	f	Femto	10^{-15}
k	Kilo	10^3	a	Atto	10^{-18}
h	Hekto	10^2	z	Zepto	10^{-21}
da	Deka	10^1	y	Yokto	10^{-24}

Beispiel E-1:

a) 1 Exa-Joule = 10^{18} J = 1 000 000 000 000 000 000 J

b) 10 Tera-Wattstunden = 10 TWh = 10.1012 Wh = 10 000 000 000 000 Wh

Frage:

Welche der beiden Energiemengen ist größer?

$10 \text{ TWh} = 10 \cdot 10^{12} \cdot 3600 \text{ J} = 36 \cdot 10^{15} \text{ J} < 10^{18} \text{ J}$

Antwort:

a) Ist größer als b) (1000/36 = 28-fach)!

Gebräuchliche weitere international verwendete Bezeichnungen bei fossilen Energieträgern:

1 tcm: 1 *trillion cubic metres*, 10^{12} m^3 (deutsch: 1 Billion Kubikmeter)

1 bn: 1 *billion*, U.S.: 10^9 (deutsch: 1 Milliarde)

1 bbl: 1 *barrel* (= 159 Liter)

LNG: *liquid natural gas* (deutsch: Flüssiggas)

1 Btu = 1 British thermal unit = 1055 J

Erklärung des Energiebegriffs:

„Energie (griech. *energos* „wirksam“) (Formelzeichen W) ist die Fähigkeit eines Systems, äußere Wirkungen (= z. B. mechanische Arbeitsfähigkeit) hervorzubringen“ (*Max Planck*). Energie hat häufig die Fähigkeit eines physikalischen Systems zur Folge, Arbeit (W , work) zu verrichten. Äußere Wirkungen der Energie äußern sich somit u. a. durch Kraft, Wärme und Licht. Energie ist eine Erhaltungsgröße: Energie eines Systems kann daher nur durch Austausch mit der Umgebung geändert werden. Somit ist Energie in einem abgeschlossenen System konstant! Sie kann aber in einem System auf unterschiedliche Weise enthalten sein, d. h. es gibt verschiedene Energieformen! Mathematisch ergibt sich eine Energiemenge W aus der zeitlichen Integration der abgerufenen Leistung P .

$$W(t) = \int_0^t P(t) \cdot dt \quad (\text{E-1})$$

Beispiel E-2: Energie als mechanische Arbeit:

Eine (im physikalischen Sinn) „mechanische“ Arbeit wird dann verrichtet, wenn ein Körper unter dem Einfluss einer auf ihn wirkenden Kraft F mit der Geschwindigkeit v z. B. entlang einer räumlichen Wegkurve C bewegt wird (Bild E-1a).

$$dW = P \cdot dt = (\vec{F} \cdot \vec{v})dt = \vec{F} \cdot d\vec{s} = F \cdot ds \cdot \cos \alpha = dW_{mec} \quad (\text{E-2})$$

$$W = \int_C dW = \int_C \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_C F \cdot \cos \alpha \cdot ds = W_{mec} \quad (\text{E-3})$$

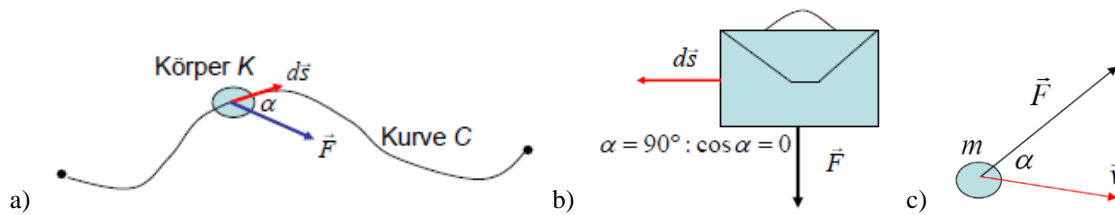


Bild E-1: a) Ein Körper K (Masse m) wird durch die Kraft F entlang der Kurve C bewegt. b) Der Körper ist eine Aktentasche im Schwerfeld, die parallel zur eben angenommenen Erdoberfläche (= unendlicher Halbraum) bewegt (getragen) wird. c) Kraft F und Geschwindigkeit v als Vektoren bei Körper

Eine Aktentasche ($m = 1.5$ kg, Bild E-1b) wird längs einer eben angenommenen Strecke $l = 100$ m von einer Person getragen. Wie groß ist die dabei von der Person verrichtete Arbeit W ? Gemäß Bild E-1b folgt:

$$W_{mec} = \int_l \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_l m \cdot \vec{g} \cdot d\vec{s} = \int_l m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot ds = \int_l m \cdot g \cdot 0 \cdot ds = 0 \quad (\text{E-4})$$

Die mechanische Arbeit ist Null! Die Muskelarbeit aber als Umsetzung biologischer Energie (chemische Stoffwechselprozesse) der gespannten Armmuskeln zum Halten der Tasche und die Muskelarbeit der Beine zum Gehen (Fortbewegen) wird dabei nicht berücksichtigt! Es ist stets auf die unterschiedlichen Energieformen bei der vollständigen Beschreibung eines Systems zu achten.

Die **Momentanleistung P** ist die zeitliche Änderungsrate der Energie.

$$P(t) = dW / dt \quad (\text{E-5})$$

Daher ergibt sich z. B. zu (E-4) als skalares Produkt aus Kraft- und Geschwindigkeitsvektor:

$$P(t) = dW / dt = \vec{F} \cdot d\vec{s} / dt = \vec{F} \cdot \vec{v} = F(t) \cdot v(t) \cdot \cos \alpha(t) = P_{mec} \quad (\text{E-6})$$

So können selbst geringe Energiemengen zu hohen Leistungen führen, wenn sich die Energie zeitlich rasch ändert.

Beispiel E-3:

Sei z. B. eine Kraft $F = 1$ N auf den Körper mit Masse $m = 1$ kg längs des Wegs $l = 1$ m wirksam, wobei gemäß Bild E-1c gelten möge $\alpha = 0$, so ist die Arbeit W

$$W = F \cdot l = 1 \cdot 1 = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ J} \quad (\text{E-7})$$

Wird diese Arbeit W während der kurzen Zeit $t = 1 \mu\text{s}$ verrichtet, ist eine große Leistung $P = 1$ MW nötig, da die Geschwindigkeit sehr hoch ist: $v = l/t = 10^6$ m/s = 3.6 Mio. km/h.

$$P = W / t = 1 / 10^{-6} = 10^6 \text{ W} = 1 \text{ MW}, \quad P = F \cdot v = 1 \cdot 10^6 = 10^6 \text{ W} \quad (\text{E-8})$$

Es werden gemäß Bsp. E-2 folgende unterschiedliche Energieformen unterschieden.

Mechanische Energie:

Bewegungsenergie, Lageenergie in Gravitationsfeldern, Deformationsenergie

Elektromagnetische Energie:

Elektrische Lageenergie im elektrostatischen Feld, magnetische Lageenergie im magnetostatischen Feld, transportierte elektromagnetische Energie bei Wellenausbreitung

Thermische Energie:

Wärmeenergie als kinetische Energie z. B. schwingenden Atomrümpfe im Kristallverband, frei im Raum bewegte Gaspartikel („thermische Wimmelbewegung“), ...

Chemische Energie:

Elektrische Bindungsenergie der Atome zu Molekülen oder Festkörpern, wobei die drei Grundformen chem. Bindung a) Kovalente Bindung, b) Ionenbindung, c) metallische Bindung unterschieden werden.

Atomenergie:

Elektrische Bindungsenergie der negativ geladenen Elektronen in der Atomhülle an den positiv geladenen Atomkern

Kernenergie:

Im Kern aneinander gebundenen Nukleonen (Kernbausteine) als elektrisch positiv geladene Protonen und ungeladene Neutronen.

Neben dieser physikalischen Unterscheidungsform gibt es auch eine Unterscheidung hinsichtlich Nutzbarkeit einer Energiemenge:

Exergie E: Ist jener Teil E der Gesamtenergie W eines Systems, der unbeschränkt Arbeit W_{mec} verrichten kann, wenn dieses System in das thermodynamische (= thermische, mechanische und chemische) Gleichgewicht mit seiner Umgebung gebracht wird. Exergie ist im Gegensatz zur Energie keine Erhaltungsgröße, also in einem abgeschlossenen System i. A. nicht konstant, denn sie kann „verloren“ gehen.

Anergie A: Ist jener Teil A der Gesamtenergie W eines Systems, der KEINE mechanische Arbeit verrichten kann.

Daher ist die **Gesamtenergie W eines Systems** die Summe aus Exergie und Anergie:

$$W = E + A.$$

Beispiel E-4:

a) Die el. Energie W_e wird im idealen (= verlustlos arbeitenden) Elektro-Motor zu 100% in mech. Arbeit W_{mec} umgewandelt. Somit bleibt die Exergie erhalten, denn sowohl W_e als auch W_{mec} können zur Arbeitsverrichtung verwendet werden.

b) El. Energie W_e wird in einem Heizwiderstand zu 100% in Raumwärme Q (z. B. bei der Raumtemperatur $\vartheta_R = 21^\circ\text{C}$) umgewandelt. Q könnte wegen des Temperaturgefälles zur Außentemperatur (z. B. $\vartheta_{\text{amb}} = 0^\circ\text{C}$, ambient = Umgebung) in einer Wärmekraftmaschine (WKM) noch in Arbeit (Exergie) W_{mec} und Abwärme Q_{ab} (Anergie) umgewandelt werden. Mit dem CARNOT-Wirkungsgrad η_{max} folgt der maximal mögliche Wert W_{mec} :

$$\eta_{\text{max}} = W_{\text{mec}} / Q = 1 - (T_u / T_R), \quad (\text{E-9})$$

$$T = 273.15 \text{ K} + \vartheta \Rightarrow T_u = 273.15 \text{ K}, T_R = 294.15 \text{ K}, \quad (\text{E-10})$$

$$\eta_{\text{max}} = 1 - (273.15 / 294.15) = 0.07 \Rightarrow W_{\text{mec}} = 0.07 \cdot Q = 0.07 \cdot W_e \approx 0 \quad (\text{E-11})$$

$$Q_{\text{ab}} = 0.93 \cdot Q \approx Q \quad (\text{E-12})$$

Als Anergie verbleibt Q_{ab} . Wegen der geringen Temperaturdifferenz zwischen Raum- und Außenluft kann Q keine Arbeit mehr verrichten \Rightarrow Die Exergie W_e wurde im Heizwiderstand (fast vollständig) in Anergie $Q_{\text{ab}} \approx Q$ umgewandelt.

Beispiel E-5:

Über seine kinetische Energie eines bewegten (= strömenden) Fluids in einem Rohr kann dieses mechanische Arbeit verrichten, z. B. eine Turbine antreiben. Die kinetische Energie ist also Exergie. Wenn aber diese kinetische Energie beim Strömen durch auftretende Reibung infolge der Zähigkeit des Mediums und der Rauigkeit der Rohrwand in Verlustwärme umgewandelt wird, so ist sie zur Anergie gewandelt worden.

Eine weitere Unterscheidung von Energieformen benötigt die Energiewirtschaft, nämlich Primär-, Sekundär- und Nutz- oder Endenergie.

1) Primärenergie: Ist jene Energie, die in ihrer ursprünglichen Erscheinungsform zur Verfügung steht.

Beispiel:

Chemische Bindungsenergie in fossilen Brennstoffen Öl, Kohle, etc., die als Primärenergieträger bezeichnet werden.

2) Sekundärenergie: Ist jene Energie, die aus der Umwandlung von Primärenergie entsteht.

Beispiele:

- Thermische (Sekundär-)Energie aus chemischer (Primär-)Energie durch Verbrennung,
- Mechanische (Sekundär-)Energie aus thermischer (Sekundär-)Energie in der Dampfturbine,
- Elektrische (Sekundär-)Energie aus mechanischer (Sekundär-)Energie im E-Generator.

3) Endenergie: Ist jene Energie, die vom Verbraucher bezogen wird. Die Endenergie ist also die **Nutzenergie**, die nach sämtlichen Wandlungsprozessen den Verbrauchern zur Verfügung steht.

Beispiele:

- Chemische (Primär-)Energie im Heizöl im Öltank,
- Elektrische (Sekundär-)Energie z. B.
 - a) über den Stromanschluss aus dem öffentlichen Netz,
 - b) über die hauseigene Photovoltaikanlage aus der solaren (Primär-)Strahlungsenergie.
- Thermische (Sekundär-)Energie in Form von warmem Wasser durch Verbrennung aus der Primärenergie im Erdöl.

Weiter wird für die nachhaltige Energiewirtschaft die bei der Nutzung von Geräten aller Art stillschweigend mit in Anspruch genommene „Graue“ **Energie** eines Geräts (Produkts) betrachtet. Dies ist die Energie für die Herstellung, den Transport und das spätere Recycling oder die Entsorgung eines von uns genutzten Geräts, aber nicht der Energieumsatz während der Gerätenutzung. Der Anteil an elektrischer Energie an der „grauen“ Energie nimmt mit der weltweit steigenden Nutzung der elektrischen Energie stetig zu.

Beispiel E-6:

Graue Energie einiger von uns häufig genutzter Geräte:

Personal Computer:	4 000 kWh
PKW (Mittelklassewagen):	60 000 kWh
1 kg Bohnen (Import N-Afrika):	10 kWh (durch Transportenergie)
1 kg Bohnen (Inland):	1 kWh

Wir wollen ein „Gefühl“ für den Begriff der Energie im Bsp. E-7 bekommen.

Beispiel E-7:

Welchen Nutzen haben wir von 1 kWh Energie?

PKW (Benzinmotor, Mittelklasse):	1.2 km Fahrtstrecke
LKW:	0.2 km Fahrtstrecke
Mensch zu Fuß (Läufer):	10.0 km Wegstrecke
PC-Arbeit:	5 h
Warm duschen:	5 Minuten
60°C-Wäsche, Waschmaschine A+	5 kg Wäsche waschen
Internet-Surfen:	100 Google-Suchanfragen

Abschließend wollen wir uns den in Deutschland aktuell gültigen Grad an Energienutzung an einem plakativen Beispiel E-8 veranschaulichen.

Beispiel E-8:

Im antiken Rom um 100 n. Chr. lebten etwa 20 Mio. römische Bürger und 120 Mio. dienstbare Völker und Sklaven. Das ergibt, wenn wir alle Nichtbürger vereinfachend als Sklaven bezeichnen, 6 Sklaven je römischer/-m Bürger/-in. Wenn nun jeder Sklave/Sklavin im Mittel etwa 1/10 der Arbeitsleistung eines Pferds zu leisten vermag, als 1/10 PS = 75 W, und das 8 Arbeitsstunden je Tag an ca. 360 Tagen pro Jahr, so ergibt das 216 kWh pro Jahr. Jedem römischen Bürger und jeder römischen Bürgerin standen damit $6 \cdot 216 \text{ kWh} = 1296 \text{ kWh}$ pro Jahr zur Verfügung, das sind 4680 MJ pro Jahr.

Im Land *Deutschland* 2019 wurden an Primärenergie 3 556 TWh eingesetzt. Das sind alle genutzten Energieformen, nicht nur die elektrische Energie. Je Einwohner/-in sind das $3556 \text{ TWh} / 83 \text{ Mio.} = 42.8 \text{ MWh}$. Bezogen auf das antike Rom entspricht das der Arbeitsleistung von 198 Sklaven, nämlich $42.8 \text{ MWh} / 216 \text{ kWh} = 198$.

Fazit:

In Deutschland hat jeder von uns im Mittel ständig 198 „Energiesklaven“ in der Form der für uns bereits gestellten Energie zur Verfügung. Diesen hohen Energieumsatz pro Kopf sollten wir bedenken, und daraus für unser persönliches Verhalten entsprechende Schlüsse ziehen.

Damit kommen wir zum didaktischen Konzept dieser Vorlesung:

Nach diesem Kapitel „E Einleitung“ sollten Sie im Kapitel „G Grundlagen“ die grundlegenden physikalischen Begriffe zur Energie in ihren unterschiedlichen Erscheinungsformen rekapitulieren. Diese Vorkenntnisse aus Vorlesungen über Physik und Elektrotechnik sind nötig für das weitere Verständnis. Im Kapitel „R Ressourcen und Energieströme“ wird auf die Energiequellen, Energievorräte und die zugehörigen Energieströme auf unserem Planeten Erde und in Bezug auf *Deutschland* im Überblick eingegangen. Das Kapitel „B Bedarf und Wachstum“ befasst sich knapp mit dem weltweiten Bevölkerungswachstum und Wachstumsgesetzen.

Nach diesen grundlegenden Kapiteln wird der Bogen hin zu elektrischen Energietechnik geschlagen. Im Kapitel „P Prozesse“ werden Energiewandlungsprozesse von mechanischen und thermischen Systemen hin zu elektrischen Systemen beschrieben. Auch chemische Energiewandlung (z. B. Verbrennung) und nukleare Energiewandlung (Kernspaltung und Fusion) werden kurz erläutert. Im Kapitel „T Transformatoren und Generatoren“ werden die el. Kernkomponenten der Energietechnik „Synchrongenerator“, „Drehstromnetz“, „Transformator“ und „Photovoltaik“ behandelt. Anschließend sind wir in der Lage, im Kapitel „V Elektrische Energieversorgung“ in Grundzügen die Prinzipien der modernen elektrischen Energieverteilung zu verstehen, indem auf Freileitungen, Kabel und Niederspannungsnetze eingegangen wird. So erhalten Sie einen Überblick über die elektrische Energietechnik auf dem Weg von der Komponente zum System.

Die angestrebte deutlich verstärkte Nutzung regenerativer Energieformen wird nur möglich sein, wenn ausreichend viele Energiespeicher zur Verfügung stehen, um auch während der „Dunkelflaute“ nicht andere Energiequellen zu benötigen. Deshalb ist ein Kapitel „S Speicher“ als ppt-Datei angefügt, dass für Interessierte zum Selbststudium gedacht ist. Darin wird auf aktuelle Möglichkeiten zur Energiespeicherung eingegangen.