

Energietechnik



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Kapitel E Einleitung

Technische Universität Darmstadt
Institut für Elektrische Energiewandlung

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Andreas Binder



E Einleitung

Lernziele



Verständnis für die physikalischen Grundlagen zu den uns verfügbaren Energiequellen und Energievorräten sowie zum weltweiten und nationalen Energiebedarf

Kennenlernen der grundlegenden Energiewandlungsprozesse und der weltweiten und nationalen Energieflüsse

Einblicke in die Grundlagen der elektrischen Energieerzeugung, Versorgung und Verteilung, Beherrschung grundlegender Berechnungsverfahren

Grundlegendes Verständnis der Funktionsweise der erforderlichen Komponenten für die elektrische Energieversorgung im Verbundnetz

Freiwillige Ergänzung: Kennenlernen möglicher Prinzipien für die Energiespeicherung zur nachhaltigen Nutzung unserer regenerativen Energiequellen



E Einleitung

Vorlesungsinhalt



E Einleitung

G Grundlagen (Wiederholung aus „Physik“ und „ET“)

Wird vorausgesetzt

R Ressourcen und Energieströme

B Bedarf und Wachstum

P Prozesse

T Transformatoren und Generatoren

V Elektrische Energieversorgung

S Speicher **Ergänzung**



E Einleitung



1. **Kontakt zum Institut**
2. **Prüfungsmodalitäten**
3. **Literatur, verwendete Quellen, Formelzeichen, Einheiten**
4. **Motivation: Warum Energietechnik lernen?**
5. **Energiebegriffe**



E1 Kontakt zum Institut

Adresse



Energietechnik

Andreas Binder
Institut für Elektrische Energiewandlung
Technische Universität Darmstadt

Landgraf-Georg-Straße 4
D-64283 Darmstadt
Tel.: 06151-16-24181 oder -24182, Fax: -24183
E-Mail: abinder@ew.tu-darmstadt.de

Dr.-Ing. Martin Weicker
Tel.: 06151-16-24191 bzw. -24181, Fax -24183
E-Mail: mweicker@ew.tu-darmstadt.de



E Einleitung

1. Kontakt zum Institut
2. Prüfungsmodalitäten
3. Literatur, verwendete Quellen, Formelzeichen, Einheiten
4. Motivation: Warum Energietechnik lernen?
5. Energiebegriffe

E2 Prüfungsmodalitäten

Randbedingung der Klausur



- Schriftlich
- Dauer 2 Stunden (120´)
- Aufbau:
 - Drei Berechnungsaufgaben ($3 \times 30' = 90'$)
 - Drei Theoriefragen ($3 \times 10' = 30'$)
- Zwei Prüfungstermine pro Jahr
- Stoffumfang/-abgrenzung für die Prüfung:
 - Berechnungsaufgaben ähnlich denen in der Aufgabensammlung
 - Theoriefragen ähnlich den Kontrollfragen in der Aufgabensammlung



E2 Prüfungsmodalitäten

Vorkenntnisse, Lernbehelfe



a) Vorkenntnisse:

- Vorlesung “Elektrotechnik und Informationstechnik 1 + 2“
- Vorlesung “Physik“
- Mathematik 1 + 2

**Wiederholung im
Kap. G**

b) Lernbehelfe:

- Besuch der Vorlesung und der begleitenden Übungen & Tutorials
- Skript “Energietechnik” Download (MOODLE)
- Aufgabensammlung “Energietechnik” Download (MOODLE)
- Foliensatz “Energietechnik” Download (MOODLE)
- Videos über MOODLE Link
- (Exkursion)

**Druckversion
bei *CityCopies*,
Holzstraße 5**



E Einleitung

1. Kontakt zum Institut
2. Prüfungsmodalitäten
3. Literatur, verwendete Quellen, Formelzeichen, Einheiten
(siehe Skript, Kap. A Allgemeines, Kap. E Einleitung)
4. Motivation: Warum Energietechnik lernen?
5. Energiebegriffe

E Einleitung



1. Kontakt zum Institut
2. Prüfungsmodalitäten
3. Literatur, verwendete Quellen, Formelzeichen, Einheiten
4. Warum Energietechnik lernen?
5. Energiebegriffe



E4 Warum Energietechnik lernen?

Motivation zur Energietechnik



- Warum muss sich die Menschheit mit Energietechnik beschäftigen?

Verlässliche und ununterbrochene Bereitstellung von Energie
ist fundamentale Voraussetzung
für das Funktionieren der modernen Gesellschaft
→ Wohlstand und Frieden



E4 Warum Energietechnik lernen?

Motivation zur Energietechnik



■ Problemstellungen

1. Wachsende Weltbevölkerung (insb. in Afrika, Nah- und Fernost), wachsender Lebensstandard versus **Endlichkeit der Ressourcen**
2. **Ökologisches Gleichgewicht ist gefährdet**: z. B. „Klimawandel“

→ Notwendigkeit zur

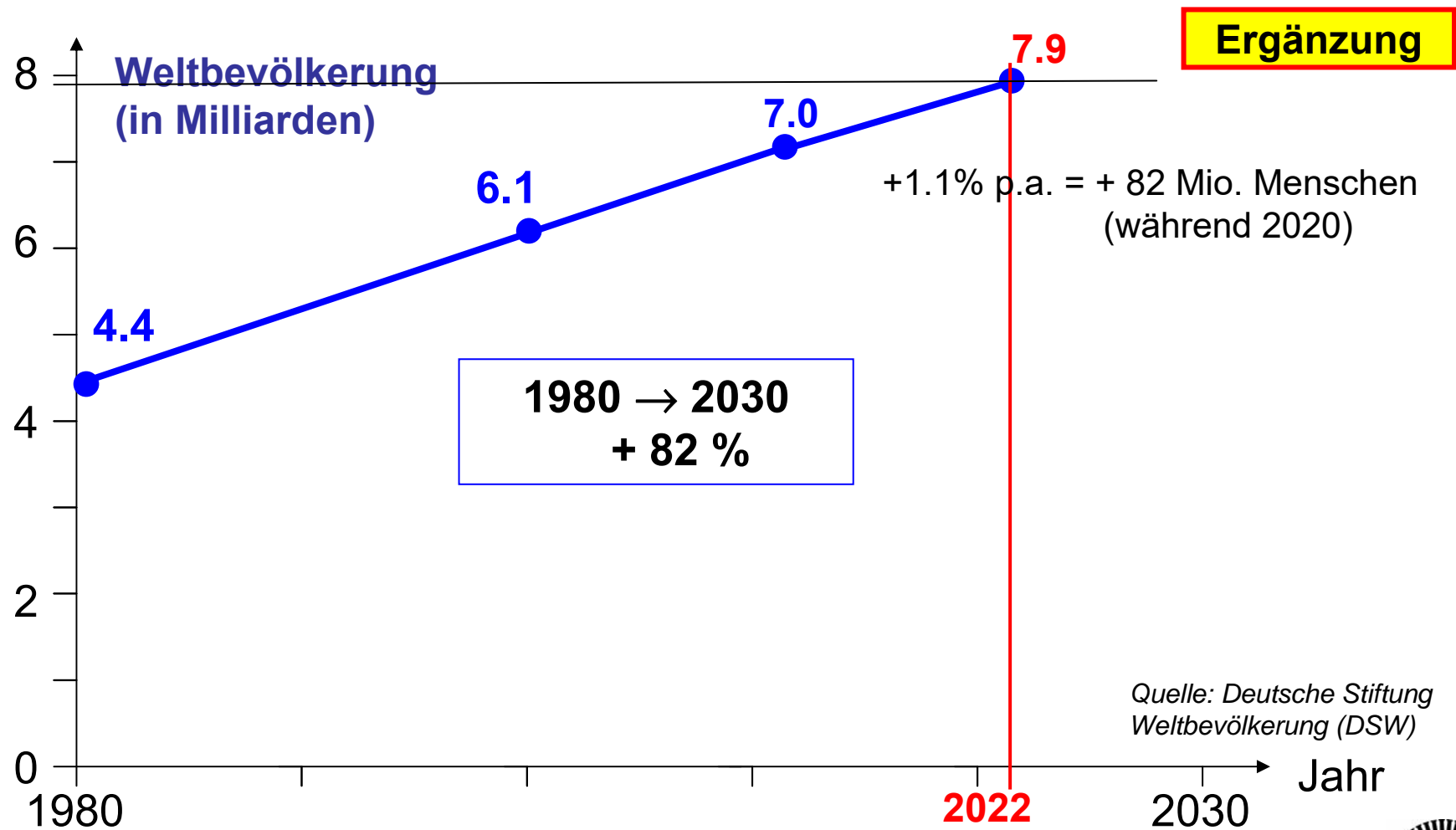
a) Effizienzsteigerung in der Energiewandlung,

b) alternativen Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen



E4 Warum Energietechnik lernen?

Weltbevölkerungswachstum +1.1% p. a.

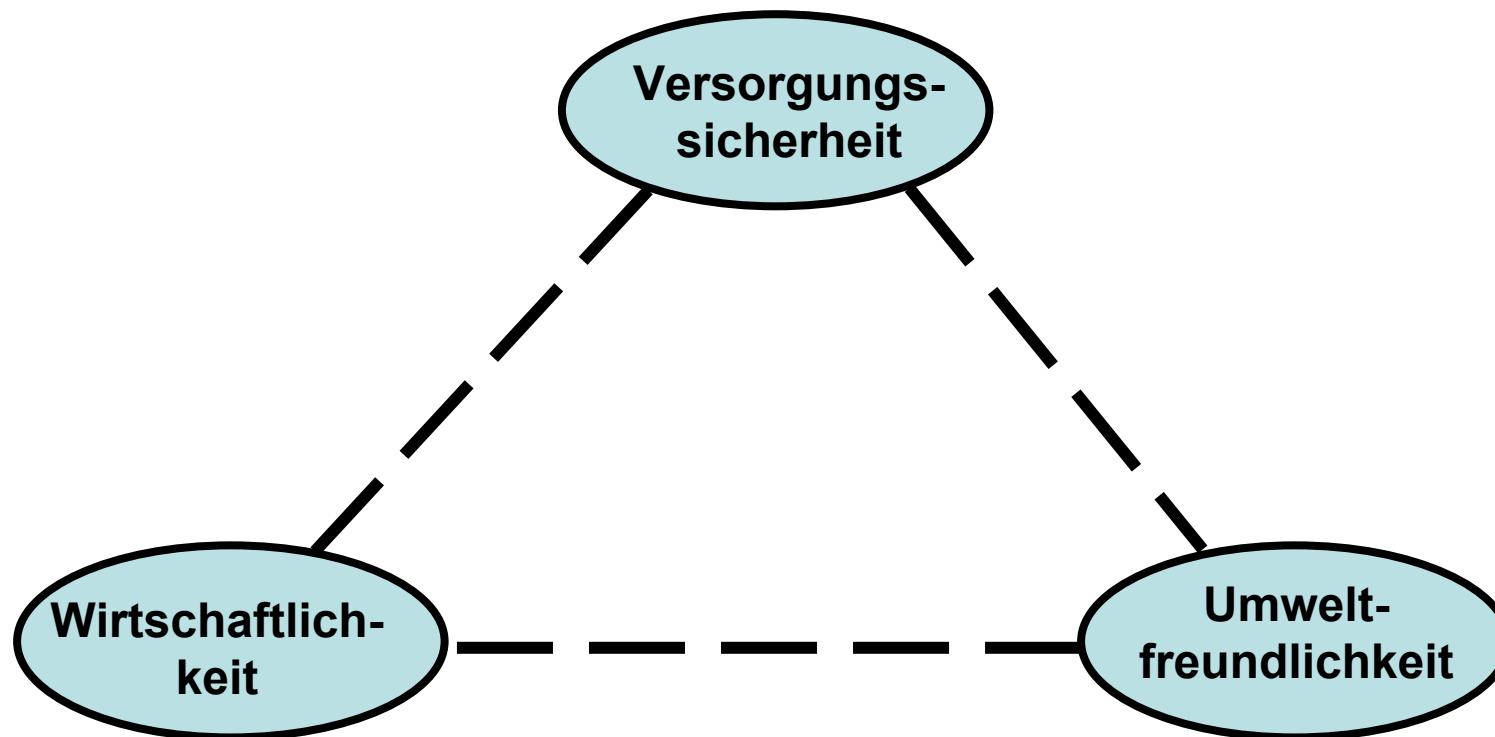


E4 Warum Energietechnik lernen?

„Magisches Dreieck“ der Energieversorgung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Quelle: Riedle, K.: Effiziente Energiewende,
VDI-nachrichten, 14/15, 2017



E4 Warum Energietechnik lernen?

Weitere Herausforderungen der Bedarfsdeckung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Ziele einer modernen Energieversorgung unterliegen Nebenbedingungen (z. B. „magisches Dreieck“):
 - Effizienz
 - Umweltverträglichkeit
 - Wirtschaftlichkeit, ...
- Aber es existieren auch begleitende Themen und Herausforderungen bei der Weiterentwicklung der Energietechnik, u. a.:
 - Klimaerwärmung (als Auswirkung auch unserer Energienutzung)
⇒ z. B.: Meeresspiegelerhöhung (Folge der Klimaerwärmung)
 - Trinkwasserbedarf (gekoppelt an Energiebedarf)
 - Metalle als Rohstoffe der Energietechnik: Knappheit vs. Recycling



E4 Warum Energietechnik lernen?

Die Energiewende: Eckpfeiler des Energiekonzepts

	Stand 2020	Ziel 2020	Ziel 2050
Treibhausgasemissionen (bzgl. 1990)	-35.1 %	-40 %	-80 %
Primärenergieverbrauch (bzgl. 2008)	-10.5 %	-20 %	-50 %
Wärmebedarf in Gebäuden (bzgl. 2008)	-17 %	-20 %	-60 %
Netto-Stromverbrauch (bzgl. 2008)	-4.8 %	-10 %	-25 %
Anteil Stromerzeugung aus regen. Quellen am Bruttostromverbrauch	41.1 % (2021)	35 %	80 %
Anteil regen. Energie am Brutto-Endenergieverbrauch	19.7 % (2021)	18 %	60 %
Batterie-Elektroautos	618 500 (1.1.2022)	1 Mio	5 Mio (2030)
Offshore-Windenergie	7.8 GW (2021)	10 GW	25 GW (2030)

- Beendigung der
 - a) Kernenergienutzung bis Ende 2022
 - b) Kohle-Verstromung bis Ende 2038
- Dynamischer Ausbau der **erneuerbaren Energien** in allen Sparten (80 % des Verbrauchs in 2050)
- Zügiger Ausbau und **Modernisierung der Stromnetze**
- Steigerung der **Energieeffizienz** – insbesondere im Bereich der Gebäude-Wärmeisolation
- **Senkung des Stromverbrauchs** mit modernen Technologien.

E Einleitung



1. Kontakt zum Institut
2. Prüfungsmodalitäten
3. Literatur, verwendete Quellen, Formelzeichen, Einheiten
4. Motivation: Warum Energietechnik lernen?
5. Energiebegriffe



E5 Energiebegriffe und Energieeinheiten

Erklärung des Energiebegriffs



- „Energie ist die Fähigkeit eines Systems, äußere Wirkungen (= z. B. mechanische Arbeitsfähigkeit) hervorzubringen“ (*Max Planck*)
- Äußere Wirkungen der Energie äußern sich u. a. durch Kraft, Wärme und Licht
- Energie ist eine Erhaltungsgröße: Energie eines Systems kann nur durch Austausch mit der Umgebung geändert werden.
- Energie ist in einem abgeschlossenen System konstant !
- Sie kann in einem System auf unterschiedliche Weise enthalten sein → es gibt verschiedene Energieformen!
- Energiemenge W ergibt sich mathematisch aus der zeitlichen Integration der abgerufenen Leistung P

$$W(t) = \int_0^t P(t) \cdot dt$$



E5 Energiebegriffe und Energieeinheiten

Energie W

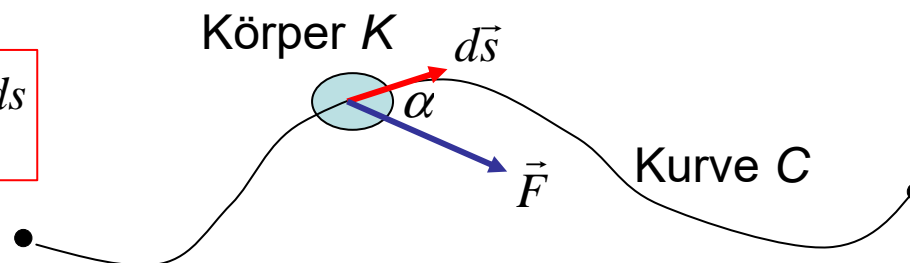
- **Energie** (griech. *energos* „wirksam“) (Formelzeichen W) hat z. B. häufig die Fähigkeit eines physikalischen Systems zur Folge, **Arbeit (W , work) zu verrichten**

- **Beispiel: 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 räumliche Wegkurve C bewegt wird.

$$dW = P \cdot dt = (\vec{F} \cdot \vec{v})dt = \vec{F} \cdot d\vec{s} = F \cdot ds \cdot \cos \alpha$$

$$W = \int_C dW = \int_C \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_C F \cdot \cos \alpha \cdot ds$$



E5 Energiebegriffe und Energieeinheiten

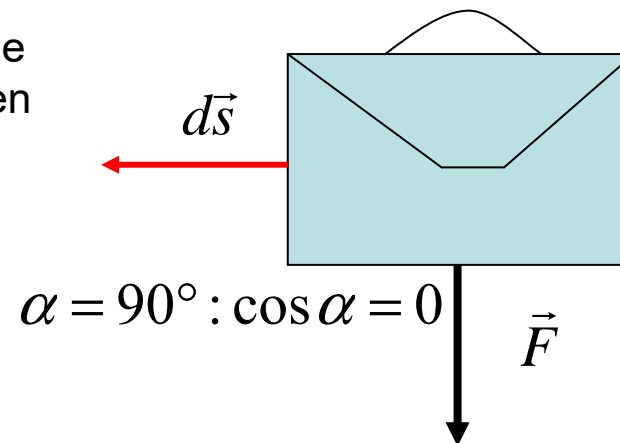
Beispiel: Mechanische Arbeit

Eine Aktentasche ($m = 1.5 \text{ kg}$) wird $l = 100 \text{ m}$ von einer Person getragen.

Wie groß ist die dabei verrichtete Arbeit W ?

$$W = \int_l \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_l m \cdot \vec{g} \cdot d\vec{s} = \int_l m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot ds = \int_l m \cdot g \cdot 0 \cdot ds = 0$$

Die Muskelarbeit als Umsetzung biologischer Energie (chemische Stoffwechselprozesse) der angespannten Armmuskel zum Halten der Tasche und zum Gehen (Fortbewegen) **wird hier nicht berücksichtigt!**



E5 Energiebegriffe und Energieeinheiten

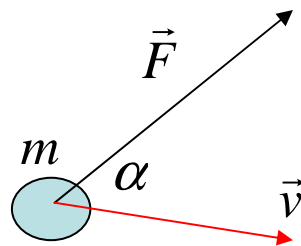
Leistung P

- Die (Momentan-)Leistung P ist die zeitliche Änderungsrate der Energie:

$$P(t) = dW / dt$$

- Beispiel:** Mechanische Momentan-Leistung:

$$P(t) = dW / dt = \vec{F} \cdot d\vec{s} / dt = \vec{F} \cdot \vec{v} = F(t) \cdot v(t) \cdot \cos \alpha(t)$$



- Selbst geringe Energiemengen können zu hohen Leistungen führen, wenn sich die Energie rasch ändert.

E5 Energiebegriffe und Energieeinheiten

Leistung P



- **Beispiel:**

Mechanische Arbeit durch Kraft $F = 1 \text{ N}$, die auf Körper mit Masse $m = 1 \text{ kg}$ längs des Wegs $s = 1 \text{ m}$ wirkt ($\alpha = 0$): $W = F \cdot s = 1 \cdot 1 = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ J}$

Wird diese Arbeit während der kurzen Zeit $t = 1 \mu\text{s}$ verrichtet, ist eine **große Leistung** nötig: $P = W / t = 1 / 10^{-6} = 10^6 \text{ W} = 1 \text{ MW}$

Hohe Geschwindigkeit $v = s/t = 10^6 \text{ m/s} = 3.6 \text{ Mio. km/h}$ } $P = F \cdot v = 1 \cdot 10^6 = 10^6 \text{ W}$



E5 Energiebegriffe und Energieeinheiten

Energieformen (siehe Kap. G „Grundlagen“)



- **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, ...
- **Chemische Energie:**
Elektrische Bindungsenergie der Atome zu Molekülen oder Festkörpern:
a) Kovalente Bindung, b) Ionenbindung, c) metallische Bindung
- **Atomenergie:**
Elektrische Bindungsenergie der negativ geladenen Elektronen in der Atomhülle an den positiv geladenen Atomkern
- **Kernenergie:**
Im Kern aneinander gebundene Nukleonen (Kernbausteine p und n) als elektrisch positiv geladene Protonen p und ungeladene Neutronen n



E5 Energiebegriffe und Energieeinheiten

Exergie und Anergie (1)



- **Exergie E :**
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 :**
Teil A der Gesamtenergie W eines Systems,
der **KEINE Arbeit** verrichten kann.

$$W = E + A$$

Gesamtenergie W eines Systems = Summe aus **Exergie-Anteil** und **Anergie-Anteil**



E5 Energiebegriffe und Energieeinheiten

Exergie und Anergie (2)



• Beispiel:

a) El. Energie W_e wird im idealen E-Motor zu 100% in mech. Arbeit W_{mec} umgewandelt

⇒ **Exergie bleibt Exergie:** $\eta_{max} = W_{mec} / W_e = 1$

b) El. Energie W_e wird im Heizwiderstand zu 100% in Raumwärme Q (z. B. bei $\vartheta_R = 21^\circ\text{C}$) umgewandelt. Q könnte wegen des geringen Temperaturgefälles zur Außentemperatur (z. B. $\vartheta_u = 0^\circ\text{C}$) in einer Wärmekraftmaschine (WKM) fast **keine Arbeit** mehr verrichten ⇒ **Exergie** W_e wurde (fast vollständig) in **Anergie** Q umgewandelt.

WKM: Max. möglich ist *Carnot*-Wirkungsgrad: $\eta_{max} = W_{mec} / Q = 1 - (T_u / T_R)$

$T = 273.15 \text{ K} + \vartheta \Rightarrow T_u = 273.15 \text{ K}, T_R = 294.15 \text{ K} \Rightarrow$

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

• Beispiel:

Kinetische Energie eines bewegten Fluids im Rohr kann mechanische Arbeit verrichten =

Exergie ⇒ Reibungswärme („Verluste“) an Rohrwand (= **Anergie**) ⇒

Ein Teil der **Exergie** wird in **Anergie** umgewandelt.



E5 Energiebegriffe und Energieeinheiten

Primär- und Sekundärenergie



1) Primärenergie:

Energie, die in ihrer **ursprünglichen Erscheinungsform** zur Verfügung steht.

Beispiel:

Chemische Bindungsenergie in fossilen Brennstoffen Öl, Kohle, ... (Primärenergieträger)

2) Sekundärenergie:

Energie, die aus der **Umwandlung** von Primärenergie entsteht.

Beispiele:

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



E5 Energiebegriffe und Energieeinheiten

Nutzenergie und „graue“ Energie



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

1) Endenergie (Nutzenergie):

Energie, die vom Verbraucher bezogen wird, die also nach sämtlichen Wandlungsprozessen dem Verbraucher zur Verfügung steht

2) Graue Energie (oder „kumulierter Energieaufwand“):

Erforderliche Energiemenge für

- Herstellung,
- Transport,
- Lagerung,
- Recycling und/oder Entsorgung

eines Produkts,

aber NICHT während der Nutzung des Produkts!

Für die graue Energie werden

- a) auch alle Vorprodukte bis zur Rohstoffgewinnung berücksichtigt und
- b) der Energieeinsatz aller angewandten Produktionsprozesse addiert.



E5 Energiebegriffe und Energieeinheiten

„Graue“ Energie eines Geräts (Produkts)



„Graue“ Energie:

Beispiele: Grobe Richtwerte für fossile Primärenergie !

Personal Computer:	4 000 kWh _{th}
PKW (Mittelklasse):	60 000 kWh _{th} in D: ca. 25 000 kWh _{el}
1 kg Bohnen trocken (Import N-Afrika):	10 kWh _{th}
1 kg Bohnen trocken *) (Inland):	1 kWh _{th}

kWh_{th} / kWh_{el} : (Thermisch / elektrisch) bereitgestellte Energie

*) **Energieinhalt von 1 kg Trocken-Bohnen** = 480 g Kohlenhydrate (KH): **2.23 kWh !**
(1 g KH hat 4 kcal = 16744 J, 480 g KH hat 8 MJ = 2.23 kWh)

Quelle: Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE 2009



E5 Energiebegriffe und Energieeinheiten

Bedeutung der Energie



1 kWh Energie: Welchen Nutzen haben wir davon?

PKW (Benzinmotor, Mittelklasse):	1.2 km Fahrtstrecke (10 l/100 km)
LKW:	0.4 km Fahrtstrecke (30 l/100 km)
Mensch zu Fuß (Läufer):	10.0 km Wegstrecke
PC-Arbeit:	5 h
Warm duschen:	5 Minuten (30 l Wasser, 37°C)
60°C-Wäsche, Waschmaschine A+	5 kg Wäsche waschen
Internet-Surfen:	100 Google-Suchanfragen
Wasser erwärmen:	10 Liter von 12°C auf 85°C
	20 Liter von 12°C auf 50°C
	30 Liter von 12°C auf 37°C

Quelle:

Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen VSE 2009



E5 Energiebegriffe und Energieeinheiten

184 „Energiesklaven“ je Einwohner, *Deutschland*



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

• Antikes Rom (100 n. Chr.):

- 20 Mio. römische Bürger/-innen und Freie & 120 Mio. Sklaven/-innen
6 Sklaven/-innen je römischer/-m Bürger/-in bzw. Freie
- 1 „mittlerer“ Sklave leistet etwa $1/10$ PS = 75 W
- 8 Arbeitsstunden, ca. 360 Tage pro Jahr = 216 kWh pro Jahr
- Je römischer freier Person verfügbar: $6 \cdot 216$ kWh = 1296 kWh pro Jahr

• Wohlstand im modernen *Deutschland* (2020 n. Chr.):

Primärenergie: 3 306 TWh

Je Einwohner/-in: $3\,306 \text{ TWh} / 83 \text{ Mio.} = 40 \text{ MWh}$

184 „Energiesklaven“ je Einwohner/-in *)

*) $184 = 40 \text{ MWh} / 216 \text{ kWh}$



E Einleitung

Zusammenfassung



- Unterschiedliche Energieformen:
mechanisch, elektrisch, thermisch, chemisch, nuklear
- Unterschiedliche Energiebegriffe: z. B. Exergie, Anergie, „Graue Energie“, ...
- Unterschiedliche Energie- und Leistungseinheiten (J, cal, Wh; W, PS, h. p., ...)

