

Abiturprüfung ab 2024	Berufliches Gymnasium
1.5.5	Umwelttechnik (TG)

Formelsammlung Umwelttechnik

Zahlenangaben und Tabellenwerte ohne Gewähr!

Stand 09/2022, 52 Seiten

Fehler in Aufgabenlösungen, die aufgrund von hier falsch angegebenen Formeln
oder Zahlenwerten entstehen, werden als richtig gewertet.

Inhaltsverzeichnis

1	Energietechnik und Thermodynamik.....	5
	Formelzeichen und Einheiten der Thermodynamik.....	5
	Normbedingungen.....	5
	Übersicht über Energieeinheiten.....	5
	Wirkungsgrade, Energieflussdiagramm.....	5
	Stoffwerte bei Normbedingungen.....	6
	Erster Hauptsatz der Wärmelehre.....	6
	allgemeines Gasgesetz.....	6
	Zustandsänderungen idealer Gase.....	6
	Erwärmung von Stoffen.....	7
	Schmelzen und Verdampfen.....	7
	Verbrennung von Brennstoffen (BS).....	7
	Wasserdampftafel.....	8
	Wärmeerzeuger – Brennwerttechnik.....	8
	Wärmeerzeuger – Solarthermie.....	9
	Wärmeerzeuger – Wärmepumpe.....	10
	Wärmeerzeuger – Blockheizkraftwerke.....	10
	Brennstoffzelle.....	10
	Wärme­kraftwerke.....	11
	T,s-Diagramm von Wasser.....	11
2	Bauphysik.....	12
	Wärmeleitung.....	12
	Ermittlung von Temperaturen an den Bauteilober- und Grenzflächen.....	12
	Tabelle: Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl.....	13
	Wasserdampfteil­druck, Wasserdampfdiffusion.....	14
	Tabelle Sperrstoffe.....	14
	Bedingungen Tau- und Verdunstungsperiode.....	14
	Tabelle: Wasserdampf­­sättigungsdruck p_s	15
	h_x -Diagramm (Gesamt­druck 100 hPa).....	16
	kontrollierte Wohnraumlüftung.....	17
3	Strömung, Wasserkraft, Windkraft.....	18
	Strömungen in Rohrleitungen - Volumen- und Massenstrom.....	18
	Strömungen in Rohrleitungen - Kontinuitätsgesetz.....	18
	Wasserkraft.....	18
	Turbinen Einsatzgebiete.....	19
	Turbinenwirkungsgrad.....	19
	Windkraft.....	20
	Windturbinenformen mit Leistungsbeiwert und Schnelllaufzahl.....	20
	Widerstandsläufer und Widerstandsbeiwert.....	21
	Auftrieb und Kräfte am Rotorblatt.....	21
4	Elektrotechnik.....	22
	Ladung Q, Strom I, Spannung U, Arbeit W, Leistung P, Widerstand R.....	22
	Widerstand.....	23
	Reihenschaltung.....	23
	Innenwiderstand R_i einer Spannungsquelle.....	24
	Parallelschaltung.....	24
	Knoten- und Maschenregel.....	24
	Spannungsteiler.....	25
	Brückenschaltung.....	25
	Dioden und LEDs.....	26
	Photovoltaik, Solarzelle.....	27
	Wechselrichter.....	28
	Mittlere tägliche Globalstrahlung auf eine Fläche und Korrekturfaktoren.....	29
	Mittlere jährliche globale Einstrahlungssumme Standort Berlin.....	29
	Kondensator.....	30
	Durchflutung.....	31
	Induktion.....	31

Spule.....	32
Gleichstrom-Motor: Ersatzschaltbild und Kennlinien (gilt auch im Generatorbetrieb).....	33
Gleichstrom-Motor Leistungsbilanz.....	33
Wirkungsgrad-Kennlinienfeld für die Einheit aus Elektromotor und Leistungselektronik.....	34
Kennlinienfeld des spezifischen Verbrauchs (Muscheldiagramm) Dieselmotor.....	34
Transistor und Transistorschaltungen.....	35
PWM-Signal, Tastgrad.....	35
Transistor-Brückenschaltung.....	36
Tiefsetzsteller.....	36
Hochsetzsteller.....	36
Sinusförmige Wechselspannung.....	37
Transformator.....	37
Dreiphasen-Wechselspannung, Drehstrom (symmetrische Belastung).....	38
Digitaltechnik Symbole und Schaltalgebra.....	39
Codes und Codierer.....	40
Speicher RS-Flipflop.....	40
Symbole der Elektrotechnik.....	41
Symbole der RI-Fließtechnik.....	41
Regelkreis.....	42
Grafische Darstellungen von Ablaufsteuerungen, Zustandsdiagramm, GRAFCET.....	43
Schritt看ette mit RS-Flipflops.....	43
5 Mathematische Grundformeln.....	44
Flächen- und Volumenberechnungen.....	44
Winkelfunktionen.....	44
Lineare Interpolation.....	44
6 Physikalische Grundformeln und Einheiten.....	45
Physikalische Formeln.....	45
Getriebe, Riemenscheibe, Übersetzungsverhältnis.....	46
Zehnerpotenzen.....	46
Einheiten.....	47
Umrechnungen.....	47
Temperaturskalen.....	47
7 Periodensystem der Elemente.....	48
8 Typische CO₂-Emissionen und Energieverbräuche.....	49
9 Umweltchemisches Labor und chemisches Rechnen.....	50
molare Masse.....	50
molares Volumen.....	50
Zusammensetzung von Lösungen und Stoffgemischen.....	50
Löslichkeit.....	50
Leitfähigkeit.....	50
Abscheidegrad (Filter).....	50
10 Darstellungsarten und Grundbegriffe.....	51
Anlagenschema / Technologieschema.....	51
Blockschaltbild.....	51
Schaltung.....	51
energetisches Blockschaltbild.....	51
Sankeydiagramm / Energieflussdiagramm.....	51
Begriffe Nachhaltigkeit, Treibhausgase THG, Energiearten, Energieamortisation, Ökologischer Fußabdruck, Ökobilanz, Lebenszyklusanalyse LCA, Systemgrenzen, Lebenszyklen C2C WTW.....	52

Anregungen und Hinweise auf mögliche Fehler bitte an: blank@fes-es.de oder get@ces.karlsruhe.de

1 Energietechnik und Thermodynamik

Formelzeichen und Einheiten der Thermodynamik

W	Arbeit in J $1 \text{ J} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$	Q	Wärmemenge in J bzw. Wh	\dot{Q}	Leistung in W $1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}}$
w	spezifische Arbeit in $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$	q	spez. Wärmemenge in $\frac{\text{J}}{\text{kg}}$	m	Masse des Gases in kg
W_{12}	Arbeitsumsatz bei Zustandsänderung von Zustand 1 nach Zustand 2	Q_{12}	Wärmeumsatz bei Zustandsänderung von Zustand 1 nach Zustand 2	T	absolute Temperatur in K
U	innere Energie in J	V	Volumen in m^3	p	absoluter Druck in bar $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

c_p, c_v, R_i, κ siehe Tabelle Stoffwerte nächste Seite

Δ bedeutet die Differenz zwischen Zustand 2 (nachher) und Zustand 1 (vorher), z.B. $\Delta T = (T_2 - T_1)$

Normbedingungen

Normtemperatur: $\vartheta_0 = 0^\circ \text{C}$, $T_0 = 273 \text{ K}$

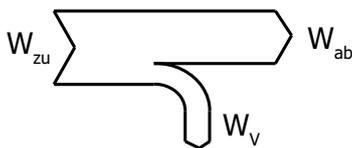
Normdruck: $p_0 = 1013,25 \text{ hPa} = 1013,25 \text{ mbar}$

Übersicht über Energieeinheiten

Einheit	Bezeichnung, Erläuterung	Umrechnung in kJ bzw. kWh
J	Joule	$1.000 \text{ J} = 1.000 \text{ Ws} = 1 \text{ kJ}$
cal	Kalorie	$1.000 \text{ cal} = 1 \text{ kcal} = 4,186 \text{ kJ}$
Wh	Wattstunde	$1 \text{ Wh} = 3,6 \text{ kJ}$
(kg) SKE	(Kilogramm) Steinkohleeinheit	$1 \text{ kg SKE} = 29.308 \text{ kJ}$
(kg) RÖE	(Kilogramm) Rohöleeinheit	$1 \text{ kg RÖE} = 41.868 \text{ kJ}$
m^3 Erdgas	Kubikmeter Erdgas	$1 \text{ m}^3 \text{ Erdgas} = 31.736 \text{ kJ}$

Wirkungsgrade, Energieflussdiagramm

Energieflussdiagramm



Bei einem Sankey-Diagramm erfolgt eine mengenproportionale Darstellung

$$W_v = W_{zu} - W_{ab}$$

$$P_v = P_{zu} - P_{ab}$$

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} \quad \eta_{\text{ges}} = \eta_1 \cdot \eta_2$$

Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{W_{ab}}{W_{zu}} = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

Carnot-Wirkungsgrad

$$\eta_c = 1 - \frac{T_{\min}}{T_{\max}}$$

- W_{zu} zugeführte Arbeit (Energie)
- W_{ab} abgegebene Arbeit (Energie)
- W_v Verluste
- $P_{zu,ab,v}$ entsprechende Leistungen
- η Wirkungsgrad
- η_1, η_2 Einzelwirkungsgrade
- η ohne Einheit, wird häufig in % angegeben.

Stoffwerte bei Normbedingungen

Gas	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p in $\frac{J}{kg \cdot K}$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen c_v in $\frac{J}{kg \cdot K}$	Adiabatenkoeffizient $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$	spezifische Gaskonstante für Gas i R_i in $\frac{J}{kg \cdot K}$
Kohlendioxid	844	655	1,29	189
Luft	1005	718	1,40	287
Sauerstoff	917	658	1,39	260
Stickstoff	1038	741	1,40	297

Hinweis: R_i wird in der Literatur oft mit R_s bezeichnet

Erster Hauptsatz der Wärmelehre

$$\Delta Q + \Delta W = \Delta U$$

$$\text{Im Kreisprozess gilt: } \Sigma Q + \Sigma W = 0$$

ΔQ zugeführte oder abgeführte Wärmemenge in J, Wh

ΔW verrichtete Arbeit in J, Wh

ΔU Änderung der inneren Energie in J, Wh

allgemeines Gasgesetz

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T$$

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{const}$$

p Druck in $\frac{N}{m^2}$, 1 bar = 10^5 Pa = $10^5 \frac{N}{m^2}$

V Volumen in m^3

m Masse in kg

R_i spezifische Gaskonstante in $\frac{J}{kg \cdot K}$ (s. o.)

T Temperatur in K

Zustandsänderungen idealer Gase

Hinweis: Q_{12} ist die zu- bzw. abgeführte Wärmemenge bei der Zustandsänderung von Zustand 1 zu Zustand 2 (ΔQ).

W_{12} ist die zu- bzw. abgeführte Arbeit bei der Zustandsänderung von Zustand 1 zu Zustand 2 (ΔW).

Vorzeichenregelung: zugeführte Energie > 0, abgeführte Energie < 0

isobar

$$Q_{12} = c_p \cdot m \cdot \Delta T$$

$$W_{12} = -p \cdot \Delta V$$

$$p = \text{const} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

isochor

$$Q_{12} = c_v \cdot m \cdot \Delta T$$

$$W_{12} = 0$$

$$V = \text{const} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

isotherm

$$Q_{12} = -W_{12}$$

$$W_{12} = -m \cdot R_i \cdot T \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$$

$$W_{12} = -m \cdot R_i \cdot T \cdot \ln \frac{p_1}{p_2}$$

$$T = \text{const} \quad p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

adiabat

$$Q_{12} = 0$$

$$W_{12} = -\frac{m \cdot R_i}{1 - \kappa} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$W_{12} = -\frac{m \cdot R_i \cdot T_1}{1 - \kappa} \cdot \left[\left[\frac{V_1}{V_2} \right]^{\kappa - 1} - 1 \right]$$

$$W_{12} = -\frac{m \cdot R_i \cdot T_1}{1 - \kappa} \cdot \left[\left[\frac{p_2}{p_1} \right]^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} - 1 \right]$$

$$p \cdot V^\kappa = \text{const}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left[\frac{p_1}{p_2} \right]^{\frac{\kappa - 1}{\kappa}} = \left[\frac{V_2}{V_1} \right]^{\kappa - 1}$$

Erwärmung von Stoffen

zugeführte Wärmemenge

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

zugeführte Wärmeleistung

$$\dot{Q} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{t} = \dot{m} \cdot c \cdot \Delta T$$

Mischungswärme

$$Q_M = Q_1 + Q_2$$

spezifische Wärmekapazität bei Normbedingungen

c_{Wasser}	$4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	$1,16 \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
c_{Eis}	$2,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	$0,57 \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
c_{Dampf}	$2,05 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	$0,57 \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$

Q_1, Q_2 Wärmemenge in der Stoffportion 1 bzw. 2

Schmelzen und Verdampfen

Schmelzwärme = Schmelzenthalpie bei isobarer Zustandsänderung

$$Q_s = m \cdot q$$

Verdampfungswärme = Verdampfungsenthalpie bei isobarer Zustandsänderung

$$Q_v = m \cdot r$$

Spezifische Schmelzwärme von Wasser bei Normbedingungen

q	$332 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$92,2 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$
-----	-----------------------------------	------------------------------------

Spezifische Verdampfungswärme von Wasser

r	$2257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	$627,2 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$
-----	------------------------------------	-------------------------------------

Verbrennung von Brennstoffen (BS)

Wärmebelastung volumen- bzw. massenabhängig (bei der Verbrennung freigesetzter Wärmestrom)

nach dem Brennwert	nach dem Heizwert
$\dot{Q}_{B,s} = \dot{V}_B \cdot H_s$	$\dot{Q}_{B,i} = \dot{V}_B \cdot H_i$
\dot{V}_B Brennstoffvolumenstrom in $\frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	
$\dot{Q}_{B,s} = \dot{m}_B \cdot H_s$	$\dot{Q}_{B,i} = \dot{m}_B \cdot H_i$

\dot{m}_B Brennstoffmassenstrom in $\frac{\text{kg}}{\text{h}}$

Brennwerte verschiedener Brennstoffe

	Brennwert H_s	Heizwert H_i	min. Luftbedarf L_{min}	$\text{CO}_{2,\text{max}}$ in Vol.-%
Erdgas	$11,1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$	$10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$	$9,9 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$	12,0
Heizöl EL / Diesel	$10,7 \frac{\text{kWh}}{\text{l}}$	$10 \frac{\text{kWh}}{\text{l}}$	$11,2 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	15,4
Benzin		$8,7 \frac{\text{kWh}}{\text{l}}$		
Holzpellets	$5,21 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$	$4,9 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$	$4 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	20
Steinkohle	$8,6 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$	$8 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$	$8 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$	20,5
Wasserstoff	$3,55 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$	$3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$	$2,4 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$	0

Wirkungsgrad

nach dem Heizwert

$$\eta_i = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_{B,i}} \left(< \frac{H_s}{H_i} \right)$$

nach dem Brennwert

$$\eta_s = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_{B,s}} (< 1)$$

Luftverhältniszahl

$$\lambda = \frac{L_{\text{tats}}}{L_{\text{min}}}$$

Abgaszusammensetzung:

Volumenanteil

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V_{\text{ges}}} = \frac{p_i}{p_{\text{ges}}} = \frac{n_i}{n_{\text{ges}}}$$

\dot{Q}_L Wärmeleistung in kW

$\dot{Q}_{B,i}$ Wärmebelastung nach dem Heizwert in kW

$\dot{Q}_{B,s}$ Wärmebelastung nach dem Brennwert in kW

L_{tats} tatsächliche Luftmenge in $\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$ oder $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

L_{min} theoretischer Mindest-Luftbedarf in $\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$ oder $\frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

V_i Volumen Komponente i in L bzw. m^3

V_{ges} Gesamt-Abgas-Volumen in L bzw. m^3

p_i Partialdruck Komponente i in Pa bzw. bar

p_{ges} Gesamtdruck im Abgas (i.d.R. vereinfacht $p_{\text{ges}}=1$ bar)

n_i Stoffmenge Komponente i in mol

n_{ges} Gesamt-Abgas-Stoffmenge in mol

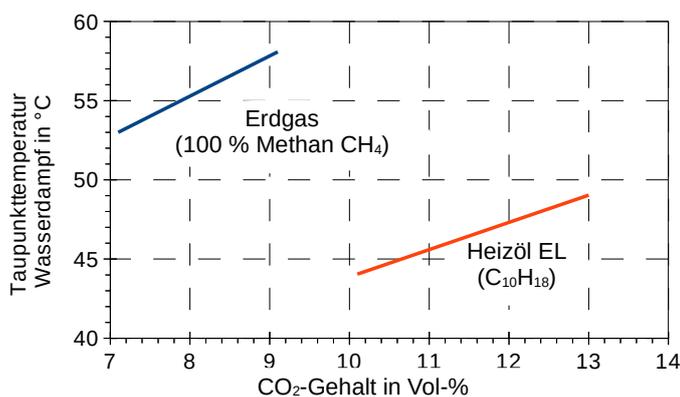
Wasserdampftafel

Absoluter Druck in bar	Siede-Temperatur in °C	Dampf-volumen in $\frac{m^3}{kg}$	Dampf-dichte in $\frac{kg}{m^3}$	Enthalpie des Wassers in $\frac{kJ}{kg}$	Enthalpie des Dampfes in $\frac{kJ}{kg}$	Verdampfungs-wärme in $\frac{kJ}{kg}$
0,010	6,98	129,200	0,00774	29,34	2514,4	2485,0
0,015	13,04	87,980	0,01137	54,71	2525,5	2470,7
0,020	17,51	67,010	0,01492	73,46	2533,6	2460,2
0,025	21,10	54,260	0,01843	88,45	2540,2	2451,7
0,030	24,10	45,670	0,02190	101,00	2545,6	2444,6
0,035	26,69	39,480	0,02533	111,85	2550,4	2438,5
0,040	28,98	34,800	0,02873	121,41	2554,5	2433,1
0,045	31,04	31,140	0,03211	129,99	2558,2	2428,2
0,050	32,90	28,190	0,03547	137,77	2561,6	2423,8
0,055	34,61	25,770	0,03880	144,91	2564,7	2419,8
0,060	36,18	23,740	0,04212	151,50	2567,5	2416,0
0,065	37,65	22,020	0,04542	157,64	2570,2	2412,5
0,070	39,03	20,530	0,04871	163,38	2572,6	2409,2
0,075	40,32	19,240	0,05198	168,77	2574,9	2406,2
0,080	41,53	18,100	0,05523	173,86	2577,1	2403,2
0,085	42,69	17,100	0,05848	178,69	2579,2	2400,5
0,090	43,79	16,200	0,06171	183,28	2581,1	2397,9
0,095	44,83	15,400	0,06493	187,65	2583,0	2395,3
0,10	45,83	14,670	0,06814	191,83	2584,8	2392,9
0,15	54,00	10,020	0,09977	225,97	2599,2	2373,2
0,20	60,09	7,650	0,13070	251,45	2609,9	2358,4
0,25	64,99	6,204	0,16120	271,99	2618,3	2346,4
0,30	69,12	5,229	0,19120	289,30	2625,4	2336,1
0,40	75,89	3,993	0,25040	317,65	2636,9	2319,2
0,45	78,74	3,576	0,27960	329,64	2641,7	2312,0
0,50	81,35	3,240	0,30860	340,56	2646,0	2305,4
0,55	83,74	2,964	0,33740	350,61	2649,9	2299,3
0,60	85,95	2,732	0,36610	359,93	2653,6	2293,6
0,65	88,02	2,535	0,39450	368,62	2656,9	2288,3
0,70	89,96	2,365	0,42290	376,77	2660,1	2283,3
0,75	91,79	2,217	0,45110	384,45	2663,0	2278,6
0,80	93,51	2,087	0,47920	391,72	2665,8	2274,0
0,85	95,15	1,972	0,50710	398,63	2668,4	2269,8
0,90	96,71	1,869	0,53500	405,21	2670,9	2265,6
0,95	98,20	1,777	0,56270	411,49	2673,2	2261,7
1,00	99,63	1,694	0,59040	417,51	2675,4	2257,9

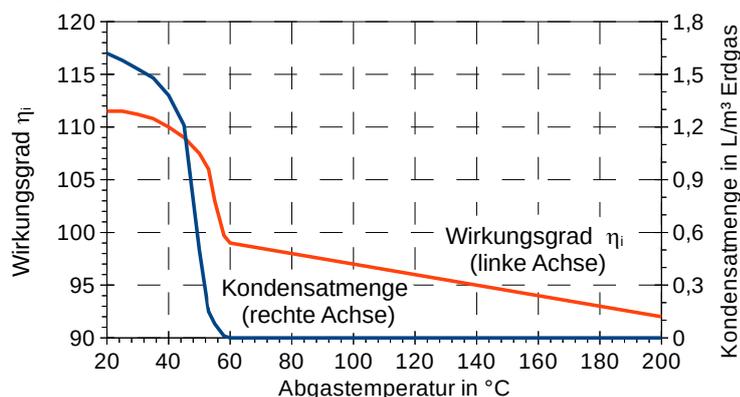
Hinweis: Formeln zur linearen Interpolation auf S. 44

Wärmeerzeuger – Brennwerttechnik

Taupunkttemperatur in Abhängigkeit des CO₂-Gehalts



Kesselwirkungsgrad, Kondensatmenge in Abhängigkeit der Abgastemperatur bei $\lambda = 1,1$ (Erdgas)



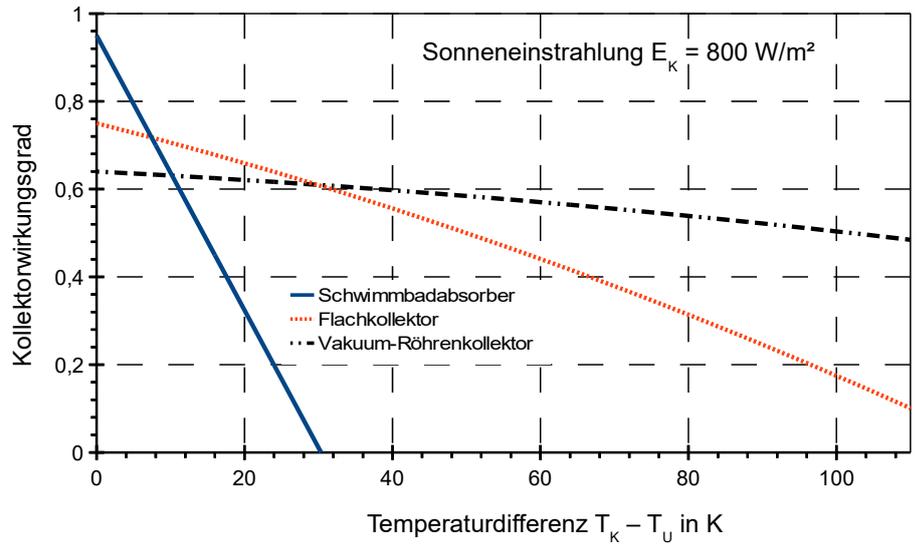
Wärmeerzeuger – Solarthermie

Kollektorwirkungsgrad

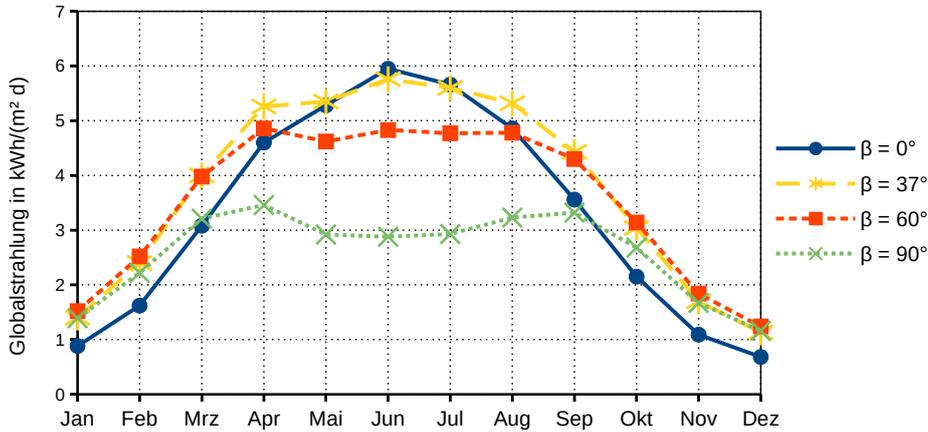
$$\eta = \eta_0 - \frac{k_1 \cdot (T_K - T_U) + k_2 \cdot (T_K - T_U)^2}{E_K}$$

- T_K mittlere Kollektortemperatur in K
- T_U Umgebungstemperatur in K
- E_K Sonneneinstrahlung in $\frac{W}{m^2}$
- η_0 Transmissionsgrad
- k_1, k_2 Wärmeverlustbeiwerte
(exemplarische Werte für η_0, k_1, k_2 s. Tabelle)

exemplarische Werte aus Datenblättern	η_0	k_1 in $\frac{W}{m^2 \cdot K}$	k_2 in $\frac{W}{m^2 \cdot K^2}$
Flachkollektor	0,75	3,40	0,012
Vakuum-Röhrenkollektor	0,64	0,69	0,004



Wirksame Globalstrahlung auf geneigte Fläche (Neigungswinkel β) mit Südausrichtung ($\alpha = 0^\circ$) am Standort Karlsruhe



Zahlenwerte zu Einstrahlung und Korrekturfaktoren an anderen Standorten sowie bei anderer Ausrichtung α und Neigungswinkel β
s. Seite 29

Der im Diagramm dargestellte Wert entspricht dem Produkt $H_h \cdot K_{\alpha,\beta}$ bei $\alpha = 0^\circ$.

Ermittlung der Kollektorfläche

$$A_K = \frac{Q_{\min}}{H_h \cdot K_{\alpha,\beta} \cdot \eta_{Anl}}$$

- Q_{\min} minimaler täglicher Wärmebedarf in kWh
- H_h mittlere tägliche Globalstrahlung auf horizontale Fläche in $\frac{kWh}{m^2 \cdot d}$
- $K_{\alpha,\beta}$ Korrekturfaktor in Abhängigkeit von der Ausrichtung α und der Neigung β
- η_{Koll} Kollektorwirkungsgrad (s. o.)
- $\eta_{Verteil}$ Verteilungswirkungsgrad (0,8 ... 0,95)
- $\eta_{Speicher}$ Speicherwirkungsgrad (0,7 ... 0,85)

Anlagenwirkungsgrad

$$\eta_{Anl} = \eta_{Koll} \cdot \eta_{Verteil} \cdot \eta_{Speicher}$$

Wärmeerzeuger – Wärmepumpe

Leistungszahl	$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_L}{P_{el,V}}$	\dot{Q}_L $P_{el,V}$	von der WP abgegebener Wärmestrom (Heizleistung) in kW vom Verdichter aufgenommene el. Leistung in kW
Coefficient of Performance	$COP = \frac{\dot{Q}_L}{P_{el,V+Hilf}}$	$P_{el,V+Hilf}$	vom Verdichter und Hilfsaggregaten aufgenommene el. Leistung in kW
Jahresarbeitszahl	$JAZ = \beta = \frac{Q_L}{W_{el,V+Hilf}}$	Q_L $W_{el,V+Hilf}$	von der WP abgegebene Wärmemenge in kWh vom Verdichter und Hilfsaggregaten aufgenommene el. Arbeit in kWh
Carnot-Leistungszahl	$\varepsilon_C = \frac{T_{warm}}{T_{warm} - T_{kalt}}$	T_{warm} T_{kalt}	abs. Temperatur Wärmeträgermedium (VL) in K abs. Temperatur Wärmequelle in K
Gütegrad	$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_C}$		

Wärmeerzeuger – Blockheizkraftwerke

thermischer Wirkungsgrad	$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_{B,i}}$	\dot{Q}_L $\dot{Q}_{B,i}$	Heizleistung in kW Wärmebelastung (bezogen auf Heizwert) in kW
elektrischer Wirkungsgrad	$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{B,i}}$	P_{el}	elektrische Leistung in kW
Gesamtwirkungsgrad	$\eta_{ges} = \eta_{th} + \eta_{el}$		

Brennstoffzelle

theoretische Klemmenspannung	$U_{th} = \frac{\Delta W_R}{z \cdot F}$	ΔW_R z F	Reaktionsenergie in $\frac{kJ}{mol}$ Anzahl der übertragenen Elektronen Faraday-Konstante $F = 96\,487 \frac{C}{mol}$ ($\frac{Coulomb}{mol}$)
Reaktionsenthalpie	$\Delta W_R = H_i \cdot V_m$	H_i V_m	Heizwert in $\frac{kJ}{m^3}$ molares Volumen (bei Normbedingungen: $V_m = 0,0224 \frac{m^3}{mol}$)
		Hinweis:	$1 C = 1 As = 1 \frac{J}{V}$
elektrischer Wirkungsgrad	$\eta_{el} = \frac{W_{el}}{\Delta W_R}$	W_{el} U I t	elektrische Arbeit (Energie) Spannung in V Strom in A Zeit in s
elektrische Arbeit	$W_{el} = U \cdot I \cdot t$		

Wärme­kraftwerke

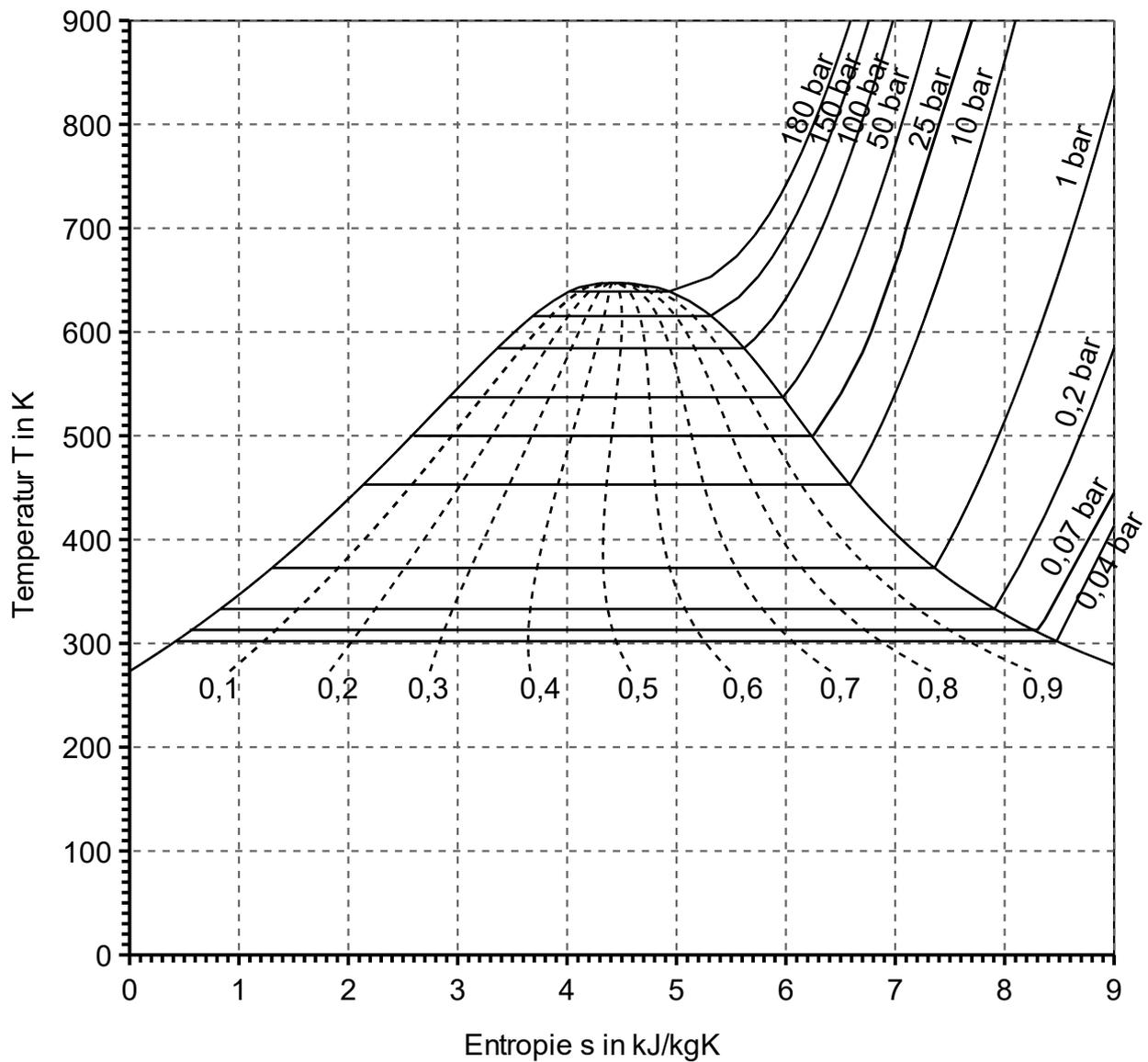
spezifische Entropie

$$\Delta s = \frac{\Delta q}{T}$$

- Δs spezifische Entropie in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
- Δq spezifische Wärme in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
- T absolute Temperatur in K

Hinweis: Δq entspricht der bei einer Zustandsänderung zu- bzw. abgeführten spezifischen Wärmemenge, z. B. q_{12}

T,s-Diagramm von Wasser



2 Bauphysik

Wärmeleitung

Wärmestrom in W

$$\dot{Q} = A \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \Delta T_{1\text{Schicht}}$$

$$\dot{Q} = A \cdot U \cdot \Delta T_{\text{innen-außen}}$$

Wärmedurchlasswiderstand in $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$

$$R_\lambda = \frac{d}{\lambda}$$

mehrschichtige Bauteile

$$R = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \dots$$

Wärmedurchgangswiderstand

$$R_T = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \dots + R_{se}$$

Wärmedurchgangskoeffizient in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$

$$U = \frac{1}{R_T}$$

A Fläche des Bauteils in m^2

d Bauteildicke in m

λ Wärmeleitfähigkeit in $\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$

$\Delta T_{1\text{Schicht}}$ Temperaturdifferenz in K über eine Bauteilschicht

$\Delta T_{\text{innen-außen}}$ Temperaturdifferenz in K zwischen Innen- und Außenluft

U Wärmedurchgangskoeffizient in $\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ (Berechnung s.u.)

$d_{1,2,3 \text{ usw}}$ Baustoffdicke des Baustoffs 1,2,3 usw. in m

Richtung des Wärmestroms	innerer Wärmeübergangswiderstand R_{si}	äußerer Wärmeübergangswiderstand R_{se}
aufwärts	0,10 $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$	0,04 $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$
horizontal	Wärmeschutz 0,13* $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$	0,043 $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$
abwärts	0,17 $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$	0,04 $\frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$

* (betrifft R_{si} , horizontal): Vereinfachte Betrachtung für wärme- und feuchteschutztechnische Untersuchungen.

Bei genaueren Untersuchungen ist beim Feuchteschutz mit einem Wert von $R_{si} = 0,167 \text{ m}^2\text{K/W}$ zu rechnen.

Ermittlung von Temperaturen an den Bauteilober- und Grenzflächen

Trennschicht: Berührungsfläche zwischen zwei Baustoffschichten bei mehrschichtigem Aufbau eines Außenbauteils.

Oberflächentemperatur innen

$$\vartheta_{si} = \vartheta_i - \frac{\Delta T}{R_T} \cdot R_{si}$$

Temperatur in der ersten Grenzfläche (von innen betrachtet):

$$\vartheta_1 = \vartheta_i - \frac{\Delta T}{R_T} \cdot (R_{si} + R_1)$$

Temperatur in der zweiten Grenzfläche (von innen betrachtet):

$$\vartheta_2 = \vartheta_i - \frac{\Delta T}{R_T} \cdot (R_{si} + R_1 + R_2)$$

Temperatur in der n-ten Grenzfläche (von innen betrachtet)

$$\vartheta_n = \vartheta_i - \frac{\Delta T}{R_T} \cdot (R_{si} + R_1 + \dots + R_n)$$

Der Teilwiderstand eines Bauteils ist proportional zum Temperaturabfall in diesem Bauteil:

$$\frac{R_{\text{Schicht}}}{\Delta T_{\text{Schicht}}} = \frac{R_T}{\Delta T_{\text{ges}}}$$

ϑ_{si} Temperatur Oberfläche innen in $^{\circ}\text{C}$

ϑ_i Temperatur Raumluft innen in $^{\circ}\text{C}$

ϑ_e Temperatur Außenluft in $^{\circ}\text{C}$

ΔT Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft

R_T Wärmedurchgangswiderstand (gesamtes Bauteil)

R_{si} innerer Wärmeübergangswiderstand

ϑ_n Temperatur in der n-ten Grenzfläche

R_n Wärmedurchlasswiderstand der n-ten Baustoffschicht (von innen betrachtet)

Tabelle: Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl

Werkstoff	Rohdichte ρ in $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	Wärmeleitfähigkeit λ in $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\right]$	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ^1	spezifische Wärmekapazität c in $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right]$
Putze und Mörtel				
Kalkputz, Kalkzementputz	1800	1	15 - 35	960
Zementputz	2000	1,6	15 - 35	1000
Gipsputz	1200	0,51	10	1000
Gipskartonplatten	800	0,25	4 - 10	1000
Wärmedämmputz WLG 060 WLG 080	≥ 200	0,060 0,080	5 - 20	
Beton				
Normalbeton unbewehrt	2000	1,35	60 - 100	1000
bewehrt (Stahlbeton)	2200 2400	1,65 2	70 - 120 80 - 130	1000 880
Leichtbeton (geschlossenes Gefüge)	800 1000 1200 1400 1600 1800 2000	0,39 0,49 0,62 0,79 1,0 1,3 1,6	70 - 150	1000
Mauerwerk einschließlich Mörtelfugen				
Vollziegel, Hochlochziegel	1200 1400 1600 1800 2000 2200	0,50 0,58 0,68 0,81 0,96 1,2	5 - 10	840
Vollklinker Hochlochklinker	1800 2000 2200 2400	0,81 0,96 1,2 1,4	50 - 100	900
Hochlochziegel (Hz) Lochung AB in Leichtmörtel verlegt	600 800 1000	0,28 0,34 0,40	5-10	840
Leichtlochlochziegel Typ W (HzW), in Leichtmörtel verlegt	700 800 900	0,21 0,23 0,24	5 - 10	840
Kalksandstein (KS)	1000 1200 1400	0,50 0,56 0,70	5 - 10	880
	1600 1800 2000 2200	0,79 0,99 1,1 1,3	15 - 25	880
Porenbetonplansteinen (PP) mit Dünnbettmörtel	400 500 600 800	0,13 0,16 0,19 0,25	5 - 10	1050
Hohlblocksteine aus Leichtbeton (Hbl) mit Normalmörtel	600 800 1000 1200	0,29 0,35 0,45 0,53	5 - 10	1050

Werkstoff	Rohdichte ρ in $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	Wärmeleitfähigkeit λ in $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\right]$	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ^1	spezifische Wärmekapazität c in $\left[\frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right]$
Wärmedämmstoffe				
Mineralwolle, WLG 030....050	15 - 200	0,030 - 0,050	1	920
Polystyrol expandiert (EPS) WLG 030....050	15 - 30	0,030 - 0,050	20 - 100	1500
Polystyrol extrudiert (XPS) WLG 026 ... 040	25 - 45	0,026 - 0,040	80 - 250	1250
Polyurethan (PUR)	30	0,020 - 0,045	40 - 200	1400
Schaumglas WLG 038 055	100 - 160	0,038 - 0,050	dampfdicht	1000
Expandierter Kork WLG 040 ... 055	55 - 130	0,040 - 0,055	5 - 10	1880
Holzfaserdämmplatten WLG 032...060	120 - 280	0,032 - 0,060	3 - 10	2700
Hanf	20 - 25	0,040	1 - 2	1550
Dämmstoffe aus Zellulose	35 - 70	0,040	1 - 2	2100
Stroh (Matten)	150 - 400	0,09 - 0,13	2 - 5	2100
Wolle	20	0,034 - 0,040	1 - 2	1300
Perlit (als Schüttung)	50 - 100	0,045 - 0,07	2 - 3	900
Holzwoleleichtbauplatten	360 - 480	0,07 0,08	2 - 5	2100
Holz und Holzwerkstoffe				
Hartholz	700	0,18	50 - 200	2000 (Buche)
Weichholz	500	0,13	20 - 50	2700 (Fichte)
OSB Platten	650	0,13	30 - 50	2100
Sperrholz	300 500 700 1000	0,09 0,13 0,17 0,24	50 - 150 70 - 200 90 - 200 110 - 250	1900
	300 600 900	0,1 0,14 0,18	10 - 50 15 - 50 20 - 50	1800
Sonstige Stoffe				
Keramikplatten, Fliesen	2300	1,3	dampfdicht	900
Glas	2500	1	dampfdicht	840
Stahl	7800	50	dampfdicht	500
Kupfer	8900	380	dampfdicht	385
Zink	7200	110	dampfdicht	385
Blei	11300	35	dampfdicht	131
Luft (ruhend)	1,293	0,025	1	1000
Wasser	1000	0,64	-	4180
Edelgas Krypton	3,56	0,010	1	248
¹ jeweils den für die Baukonstruktion ungünstigeren Wert einsetzen				

Wasserdampfdruck, Wasserdampfdiffusion

Wasserdampfdruck innen in Pa

$$p_i = p_{si} \cdot \varphi_i$$

p_{si} Sättigungsdampfdruck Luft innen in Pa

φ_i Relative Luftfeuchte innen

Wasserdampfdruck außen in Pa

$$p_e = p_{se} \cdot \varphi_e$$

p_{se} Sättigungsdampfdruck Luft außen in Pa

φ_e Relative Luftfeuchte außen

Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke in m

$$s_D = \mu \cdot d$$

d Baustoffdicke in m

μ Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
(dimensionslos) siehe S. 13

Für die μ -Werte ist jeweils der für die Baukonstruktion ungünstigere Wert einzusetzen.

Achtung: Bei Erstellung des Glaser-Diagramms der Verdunstungsperiode dürfen die gleichen μ -Werte angenommen werden wie in der Tauperiode (DIN 4108-3)

Tabelle Sperrstoffe

Sperrstoffe	Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_D in m
Polyethylenfolie 0,15 mm	50
Polyethylenfolie 0,25 mm	100
PVC Folie	30
Aluminium Folie 0,05 mm	1500
Bitumiertes Papier 0,1 mm	2

Bedingungen Tau- und Verdunstungsperiode

Tauperiode:

$$\vartheta_i = 20^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_e = -5^\circ\text{C}$$

$$t_T = 2160 \text{ h (=90 Tage)}$$

$$\varphi_i = 50 \%$$

$$\varphi_e = 80 \%$$

Verdunstungsperiode:

$$p_i = 1200 \text{ Pa}$$

$$p_e = 1200 \text{ Pa}$$

$$t_V = 2160 \text{ h (=90 Tage)}$$

ϑ_i Innentemperatur in $^\circ\text{C}$

ϑ_e Außentemperatur in $^\circ\text{C}$

t_T Dauer der Tauwasserperiode in h

t_V Dauer der Verdunstungsperiode in h

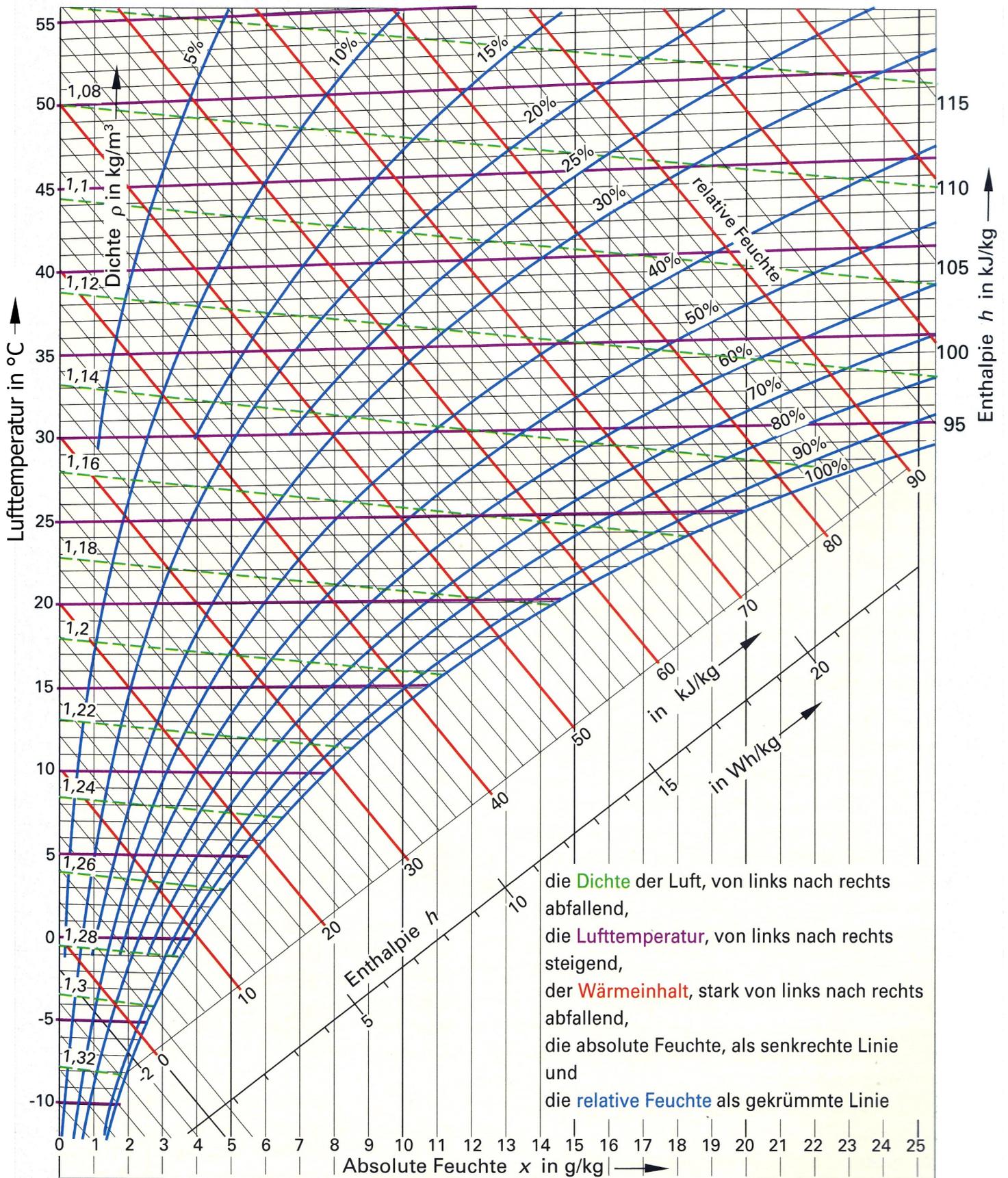
φ_i relative Luftfeuchte innen

φ_e relative Luftfeuchte außen

Tabelle: Wasserdampf-sättigungsdruck p_s

Wasserdampf-sättigungsdruck Pa										
Temperatur in °C	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
30	4244	4269	4294	4319	4344	4369	4394	4419	4445	4469
29	4006	4030	4053	4077	4101	4124	4148	4172	4196	4219
28	3781	3803	3826	3848	3871	3894	3916	3939	3961	3984
27	3566	3588	3609	3631	3652	3674	3695	3717	3793	3759
26	3362	3382	3403	3423	3443	3463	3484	3504	3525	3544
25	3169	3188	3208	3227	3246	3266	3284	3304	3324	3343
24	2985	3003	3021	3040	3059	3077	3095	3114	3132	3151
23	2810	2827	2845	2863	2880	2897	2915	2932	2950	2968
22	2645	2661	2678	2695	2711	2727	2744	2761	2777	2794
21	2487	2504	2518	2535	2551	2566	2582	2598	2613	2629
20	2340	2354	2369	2384	2399	2413	2428	2443	2457	2473
19	2197	2212	2227	2241	2254	2268	2283	2297	2310	2324
18	2065	2079	2091	2105	2119	2132	2145	2158	2172	2185
17	1937	1950	1963	1976	1988	2001	2014	2027	2039	2052
16	1818	1830	1841	1854	1866	1878	1889	1901	1914	1926
15	1706	1717	1729	1739	1750	1762	1773	1784	1795	1806
14	1599	1610	1621	1631	1642	1653	1663	1674	1684	1695
13	1498	1508	1518	1528	1538	1548	1559	1569	1578	1588
12	1403	1413	1422	1431	1441	1451	1460	1470	1479	1488
11	1312	1321	1330	1340	1349	1358	1367	1375	1385	1394
10	1228	1237	1245	1254	1262	1270	1279	1287	1296	1304
9	1148	1156	1163	1171	1179	1187	1195	1203	1211	1218
8	1073	1081	1088	1096	1103	1110	1117	1125	1133	1140
7	1002	1008	1016	1023	1030	1038	1045	1052	1059	1066
6	935	942	949	955	961	968	975	982	988	995
5	872	878	884	890	896	902	907	913	919	925
4	813	819	825	831	837	843	849	854	861	866
3	759	765	770	776	781	787	793	798	803	808
2	705	710	716	721	727	732	737	743	748	753
1	657	662	667	672	677	682	687	691	696	700
0	611	616	621	626	630	635	640	645	648	653
-0	611	605	600	595	592	587	582	577	572	567
-1	562	557	552	547	543	538	534	531	527	522
-2	517	514	509	505	501	496	492	489	484	480
-3	476	472	468	464	461	456	452	448	444	440
-4	437	433	430	426	423	419	415	412	408	405
-5	401	398	395	391	388	385	382	379	375	372
-6	368	365	362	359	356	353	350	347	343	340
-7	337	336	333	330	327	324	321	314	315	312
-8	310	306	304	301	298	296	294	291	288	286
-9	284	281	279	276	274	272	269	267	264	262
-10	260	258	255	253	251	249	246	244	242	239

h,x-Diagramm (Gesamtdruck 1000 hPa)



Quelle: Mathematik Installations- und Heizungstechnik, 4. Aufl., Verlag Europa-Lehrmittel, Haan-Grünten

kontrollierte Wohnraumlüftung

Luftwechselrate β in $\frac{1}{h}$

$$\beta = \frac{\dot{V}_{AUL}}{V_R}$$

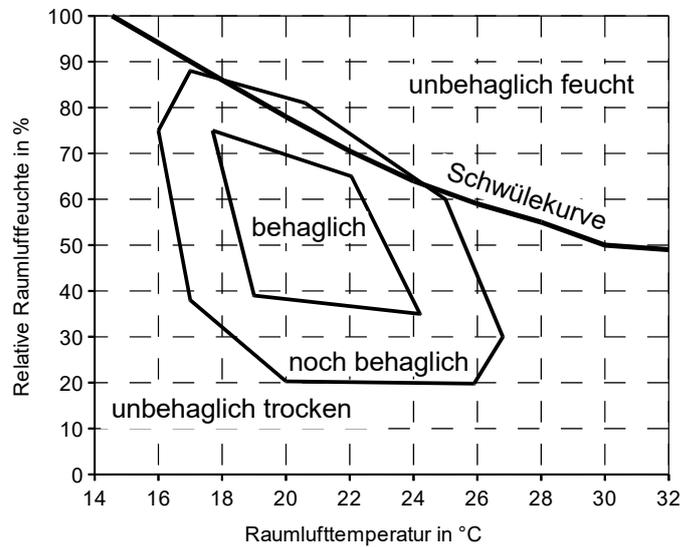
\dot{V}_{AUL} Außenluftvolumenstrom in $\frac{m^3}{h}$

V_R Raumvolumen in m^3

Luftwechselraten, Mindestabluftmengen

Raumbezeichnung	Luftwechselrate β in h^{-1}	Mindest- Abluftmenge in $\frac{m^3}{h}$
Wohn-, Aufenthalts- und Schlafräume	0,5 ... 1,0	
Sanitärräume Bad (mit/ohne WC) WC		45 25
Küchen	0,5 ... 25	45
Hausarbeitsräume	0,5 ... 1	25
Außenluft pro Person	$30 \frac{m^3}{h}$	

Behaglichkeit



Rückwärmezahl bezogen auf die Außenlufttemperatur

$$\Phi = \frac{\vartheta_{zu} - \vartheta_{Au}}{\vartheta_{ab} - \vartheta_{Au}}$$

ϑ_{Au} Temperatur der Außenluft in °C

ϑ_{zu} Temperatur der Zuluft in °C

ϑ_{ab} Temperatur der Abluft in °C

Voraussetzung: $\dot{V}_1 = \dot{V}_2$

\dot{V}_1 Volumenstrom Außenluft (und Zuluft) in $\frac{m^3}{h}$

keine Berücksichtigung der latenten Wärme!

\dot{V}_2 Volumenstrom Abluft (und Fortluft) in $\frac{m^3}{h}$

Φ Rückwärmezahl

relative Luftfeuchte

$$\varphi = \frac{x}{x_s} = \frac{p_D}{p_{D,s}}$$

x absolute Luftfeuchte in $\frac{g}{kg}$

x_s Sättigungfeuchte (max. Dampfgehalt) in $\frac{g}{kg}$

p_D Wasserdampfpartialdruck in Pa

$p_{D,s}$ Sättigungsdampfdruck in Pa

φ relative Luftfeuchte

3 Strömung, Wasserkraft, Windkraft

Strömungen in Rohrleitungen - Volumen- und Massenstrom

Volumenstrom	$\dot{V} = \frac{V}{t}$	V	Volumen in m ³
	$\dot{V} = A \cdot v$	\dot{V}	Volumenstrom in $\frac{m^3}{s}$
		t	Zeit in s
Rohrvolumen	$V = A \cdot \ell$	A	durchströmte Fläche (Rohrquerschnitt) in m ²
		v	Fließgeschwindigkeit in $\frac{m}{s}$
Massenstrom	$\dot{m} = \frac{m}{t}$	ℓ	Länge in m
	$\dot{m} = \rho \cdot \dot{V}$	m	Masse in kg
		\dot{m}	Massenstrom in $\frac{kg}{s}$
		ρ	Dichte der Flüssigkeit in $\frac{kg}{m^3}$

Strömungen in Rohrleitungen - Kontinuitätsgesetz

Massenstrom ist konstant:	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \text{konstant}$	Massenstrom an den Stellen 1 und 2 eines Rohrleitungsabschnitts
<i>bei konstanter Dichte:</i>		
Volumenstrom ist konstant:	$\dot{V}_1 = \dot{V}_2 = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$	

Wasserkraft

Hydraulische Leistung des Wassers	$P_{\text{hydro}} = \rho \cdot g \cdot h \cdot \dot{V}$	P_{hydro}	Leistung in W
		ρ	Dichte in $\frac{kg}{m^3}$ ($\rho_{\text{Wasser}} \approx 1000 \frac{kg}{m^3}$)
Dichte	$\rho = \frac{m}{V}$	g	Erdbeschleunigung $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$
			Einheitenumrechnung $[N = \frac{kg \cdot m}{s^2}]$
		h	Höhe in m
		\dot{V}	Volumenstrom in $\frac{m^3}{s}$
		V	Volumen in m ³

Energieerhaltung mit Zustand 1, Zustand 2:

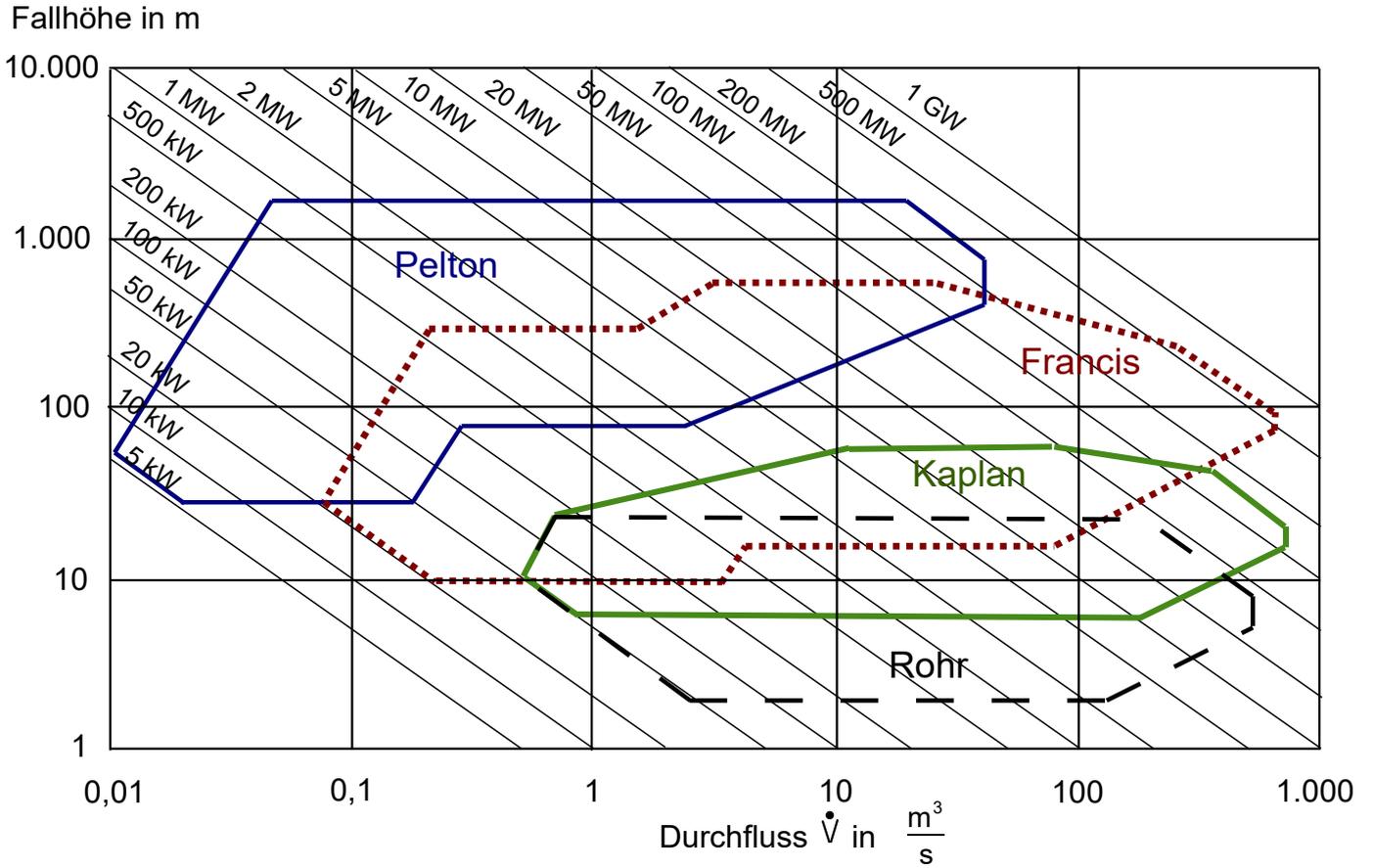
$$W_{\text{pot1}} + W_{\text{kin1}} + W_{\text{p1}} = W_{\text{pot2}} + W_{\text{kin2}} + W_{\text{p2}} = \text{Konst}$$

potentielle Energie, kinetische Energie, Druckenergie

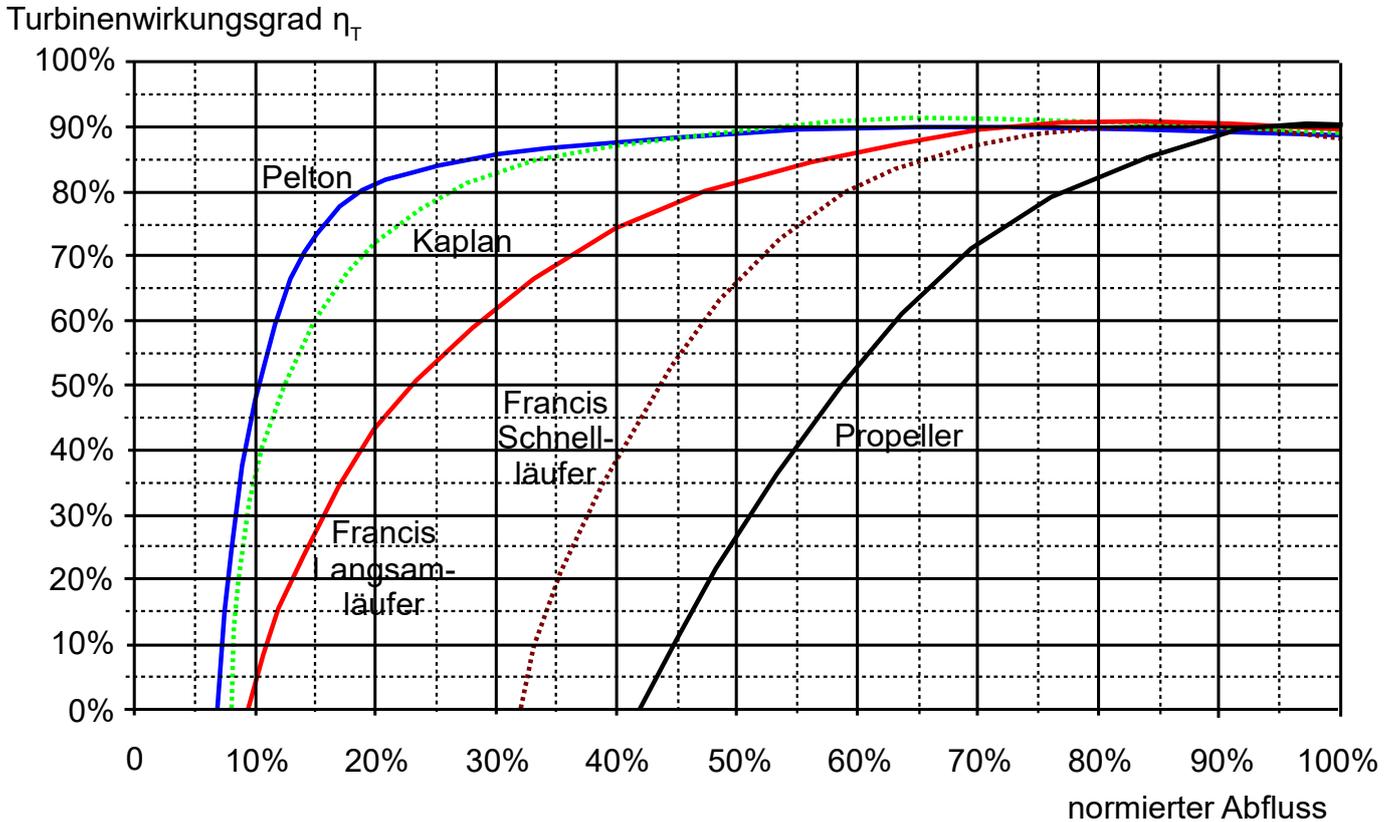
$W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h$	$W_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$	$W_{\text{p}} = p \cdot V$
--------------------------------------	--	----------------------------

m	Masse in kg
v	Geschwindigkeit in $\frac{m}{s}$
p	Druck in Pa = $\frac{N}{m^2}$, 1bar = 10 ⁵ Pa ,
W_{pot}	potentielle Energie in J, 1 J = 1 Ws
W_{kin}	kinetische Energie in J
W_{p}	Druckenergie in J

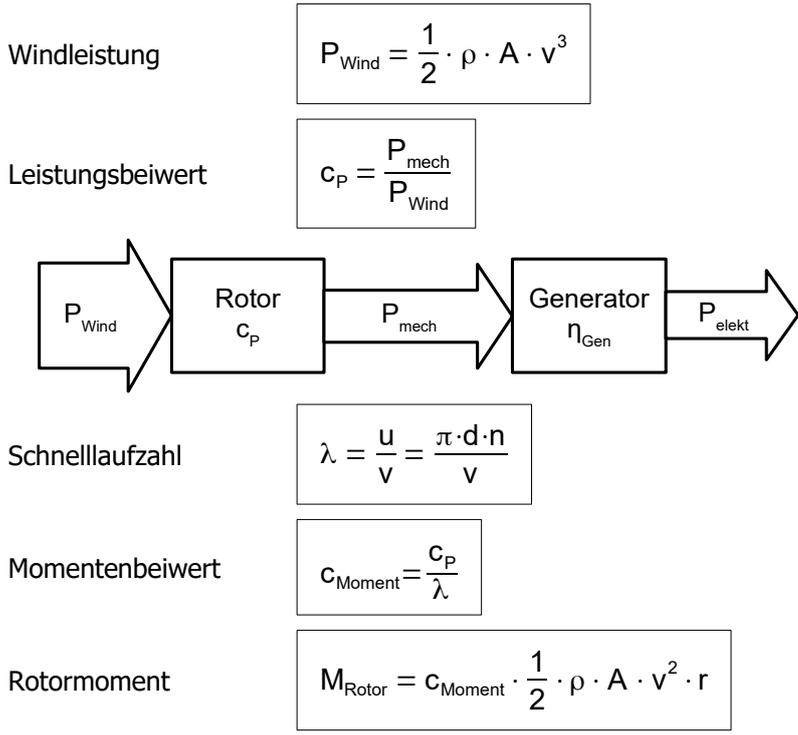
Turbinen Einsatzgebiete



Turbinenwirkungsgrad

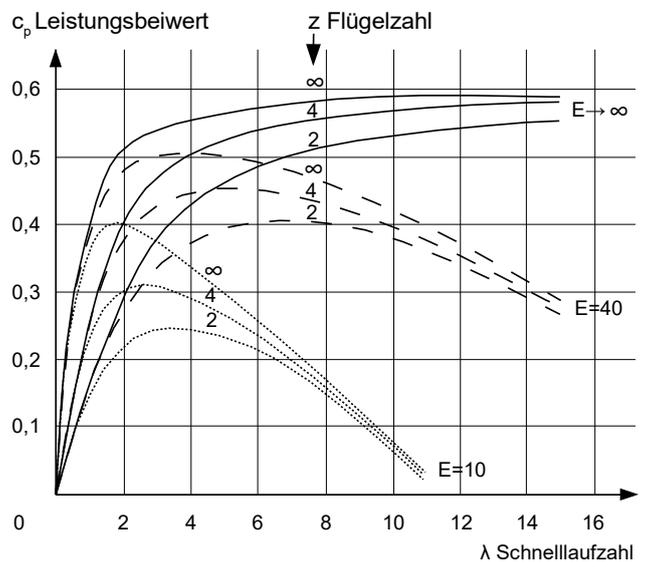
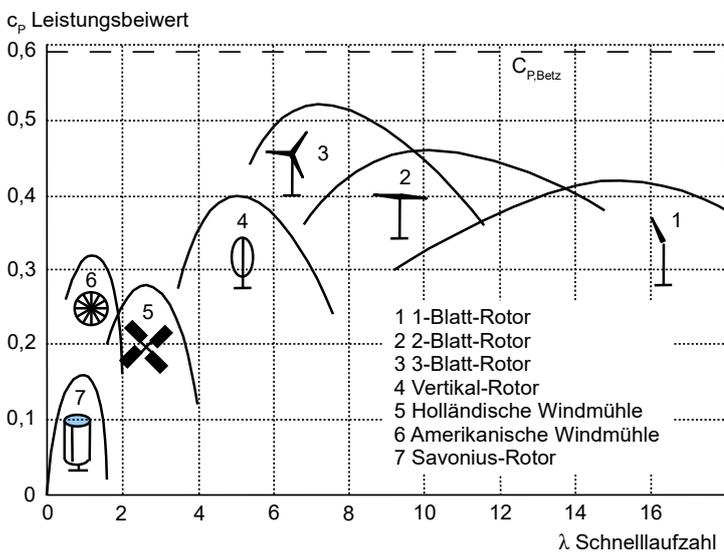


Windkraft



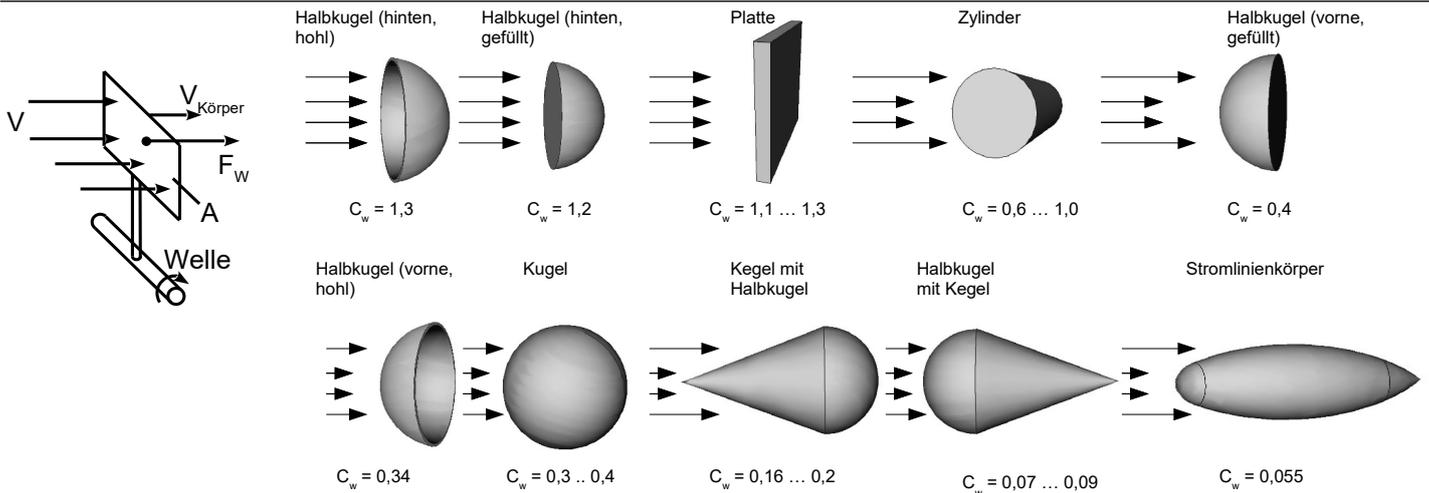
- P_{Wind} Windleistung in W
- ρ Dichte in $\frac{kg}{m^3}$ $\rho_{Luft} \approx 1,2 \frac{kg}{m^3}$
- v Windgeschwindigkeit in $\frac{m}{s}$
- A durchströmte Fläche in m^2
- c_P Leistungsbeiwert
- $c_{P,Betz}$ maximal möglicher Leistungsbeiwert $c_{P,Betz} = 0,593$ wenn Wind auf $\frac{1}{3}$ der Windgeschwindigkeit abgebremst wird
- P_{mech} mechanisch nutzbare Leistung in W
- λ Schnellaufzahl
1..3 Langsamläufer, 4..8 Schnellläufer
- u Umfangsgeschwindigkeit in $\frac{m}{s}$
- d Rotordurchmesser in m
- n Drehzahl in $\frac{1}{s}$
- c_{Moment} Momentenbeiwert
- r Radius in m
- M_{Rotor} Rotormoment in Nm

Windturbinenformen mit Leistungsbeiwert und Schnellaufzahl



Güte des Rotorblatts bestimmt die Gleitzahl E; gut ≥ 60

Widerstandsläufer und Widerstandsbeiwert



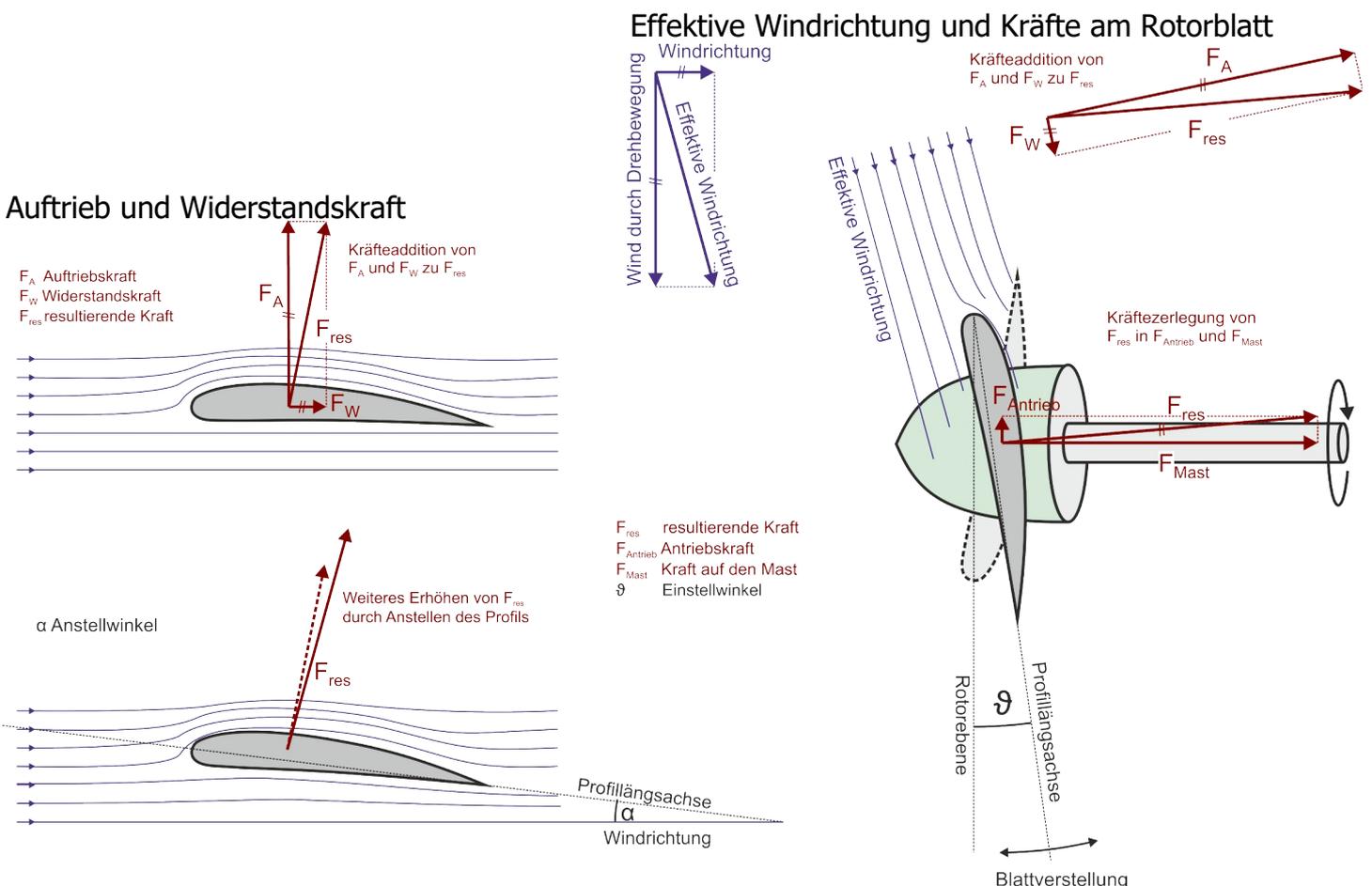
Widerstandsbeiwerte verschiedener Körper

Kraft durch Widerstand
$$F_W = c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v - v_{\text{Körper}})^2$$

Nutzleistung
$$P_{\text{Nutz}} = F_W \cdot v_{\text{Körper}}$$

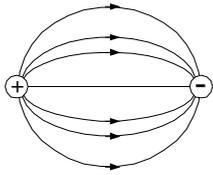
- F_W Widerstandskraft des Körpers in N
- c_w Widerstandsbeiwert
- ρ Dichte in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ $\rho_{\text{Luft}} \approx 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- v Windgeschwindigkeit in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
- $v_{\text{Körper}}$ Geschwindigkeit des bewegten Körpers
- A durchströmte Fläche in m^2
- P_{Nutz} mechanisch nutzbare Leistung in W

Auftrieb und Kräfte am Rotorblatt



4 Elektrotechnik

Ladung Q, Strom I, Spannung U, Arbeit W, Leistung P, Widerstand R



- 2 Arten von Ladungen (positiv und negativ)
- gleichartige Ladungen stoßen sich ab, ungleichartige ziehen sich an
- Ladung ist übertragbar
- im Raum zwischen Ladungen wirken Kräfte auf Ladungen, die durch ein „elektrisches Feld“ erklärt werden

Ladung, Ladungsmenge

$$Q = N \cdot e$$

1 e entspricht $-1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$

- e Elementarladung (kleinstmögliche Ladung)
- N Anzahl der Ladungsträger
- Q Ladung in As = C (Coulomb)
- I Stromstärke in A (Ampere)
- Q Ladungsmenge in As
- t Zeit in s

Stromstärke

$$I = \frac{Q}{t}$$

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

bei Gleichspannung, bei Wechselfpannung

Spannung
= Arbeit beim Transport der Ladung pro Ladungsmenge

$$U = \frac{W}{Q}$$

- U Spannung in V (Volt)
- Q Ladungsmenge in As
- W Arbeit in Js

Elektrische Energie, Energiemenge, Arbeit (engl. Work)

$$W = P \cdot t$$

$$W = U \cdot Q$$

- P Leistung in W (Watt)
- t Zeit in s
- 1 Ws = 1 VAs = 1 J

Elektrische Leistung (engl. Power)

$$P = \frac{W}{t}$$

$$P = U \cdot I$$

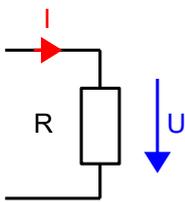
Leistung am Widerstand

$$P = I^2 \cdot R$$

$$P = \frac{U^2}{R}$$

- R Widerstand in Ω

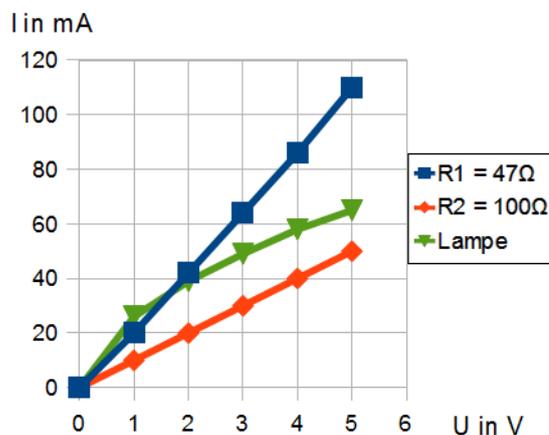
Widerstand R



$$R = \frac{U}{I}$$

$$U = R \cdot I$$

- R Widerstand in Ω
- U Spannung in V
- I Strom in A



Für R1 und R2 gilt: R= Konstant
R1 und R2 sind lineare Widerstände.

$$\frac{U}{I} = \text{Konst Ohm'sches Gesetz}$$

Die Lampe besitzt einen nichtlinearen Widerstand.

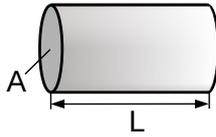
Widerstand

Leitungswiderstand

$$R = \frac{\rho \cdot \ell}{A}$$

- ℓ Leiterlänge in m
- A Leiterquerschnitt in mm^2
- ρ spezifischer Widerstand in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$

elektrische Leitung:



Material	spezifischer Widerstand in $\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$
Kupfer	0,0178
Stahl	0,13
Aluminium	0,028
Gold	0,0244
Kohle	40

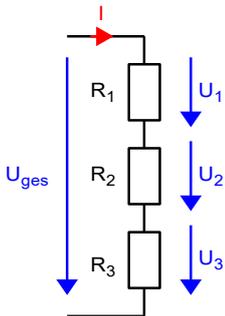
temperaturabhängiger Widerstand

$$\Delta R = \alpha \cdot \Delta T \cdot R_K$$

$$R_W = R_K + \Delta R$$

- ΔR Widerstandsänderung in Ω
- α Temperaturbeiwert $\frac{1}{\text{K}}$
- R_K Kaltwiderstand in Ω
- R_W Warmwiderstand in Ω
- ΔT Temperaturdifferenz in K

Reihenschaltung



$$I_{\text{ges}} = I_1 = I_2 = I_3$$

$$U_{\text{ges}} = U_1 + U_2 + U_3$$

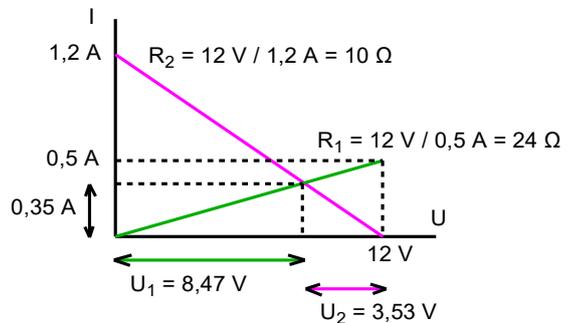
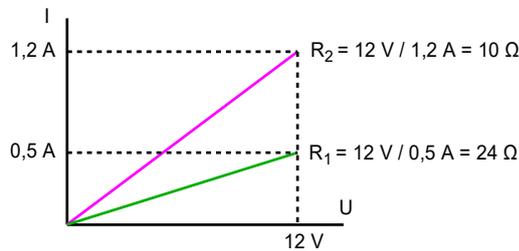
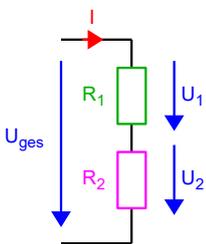
$$R_{\text{ges}} = R_1 + R_2 + R_3$$

$$P_{\text{ges}} = P_1 + P_2 + P_3$$

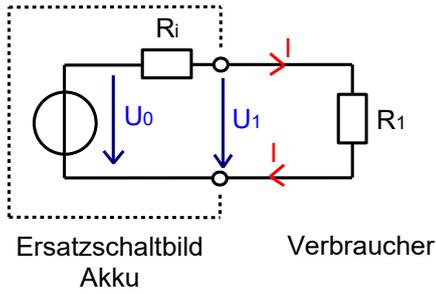
- U Gesamtspannung
- U_1, U_2, U_3 Teilspannungen
- R Gesamtwiderstand
- R_1, R_2, R_3 Einzelwiderstände

Durch jeden Widerstand fließt der selbe Strom I.

grafische Ermittlung der Größen



Innenwiderstand Ri einer Spannungsquelle



$$I = \frac{U_0}{R_i + R_1}$$

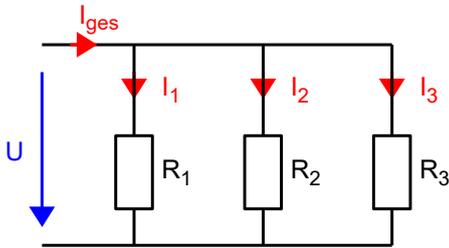
$$R_i = \left| \frac{\Delta U}{\Delta I} \right| = \left| \frac{(U_2 - U_1)}{(I_2 - I_1)} \right|$$

$$R_i = \frac{U_0}{I_k}$$

- I Laststrom
- R_i Innenwiderstand der Spannungsquelle
- R₁ Widerstand des angeschlossenen Verbrauchers
- U₁ Spannung an den Anschluss-Klemmen
- U₀ Leerlauf-Spannung Spannung der idealen Spannungsquelle

Leistungsanpassung: R₁ erhält die maximale Leistung bei R₁ = R_i

Parallelschaltung



$$U_{\text{ges}} = U_1 = U_2 = U_3$$

$$I_{\text{ges}} = I_1 + I_2 + I_3$$

$$\frac{1}{R_{\text{ges}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

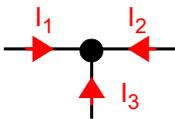
$$P_{\text{ges}} = P_1 + P_2 + P_3$$

- I_{ges} Gesamtstrom
- I₁, I₂, I₃ Teilströme
- R_{ges} Gesamtwiderstand
- R₁, R₂, R₃ Einzelwiderstände

An jedem Widerstand liegt dieselbe Spannung U an.

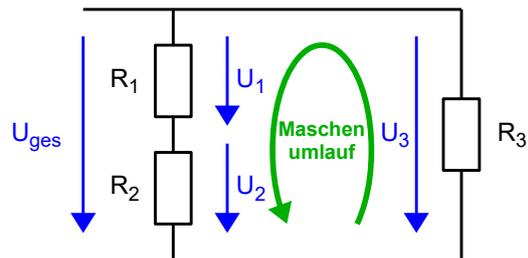
Knoten- und Maschenregel

Knotenregel



$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

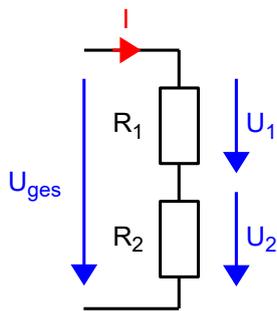
Maschenregel



$$U_1 + U_2 - U_3 = 0$$

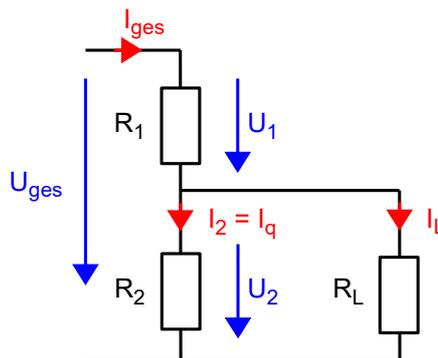
Spannungsteiler

unbelastet (Reihenschaltung)



$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{ges}$$

belastet (Gruppenschaltung)



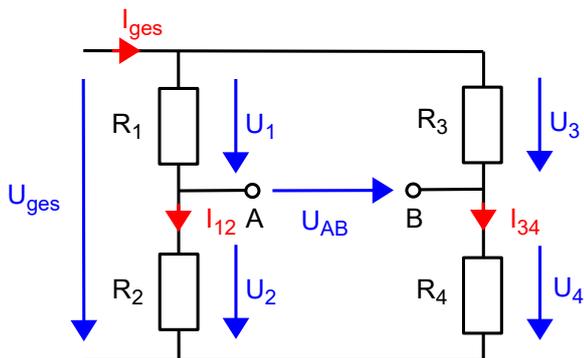
$$U_2 = \frac{R_{2L}}{R_1 + R_{2L}} \cdot U_{ges}$$

$$R_{2L} = \frac{R_2 \cdot R_L}{R_2 + R_L}$$

R_L Lastwiderstand

R_{2L} Ersatzwiderstand für R_2 und R_L

Brückenschaltung



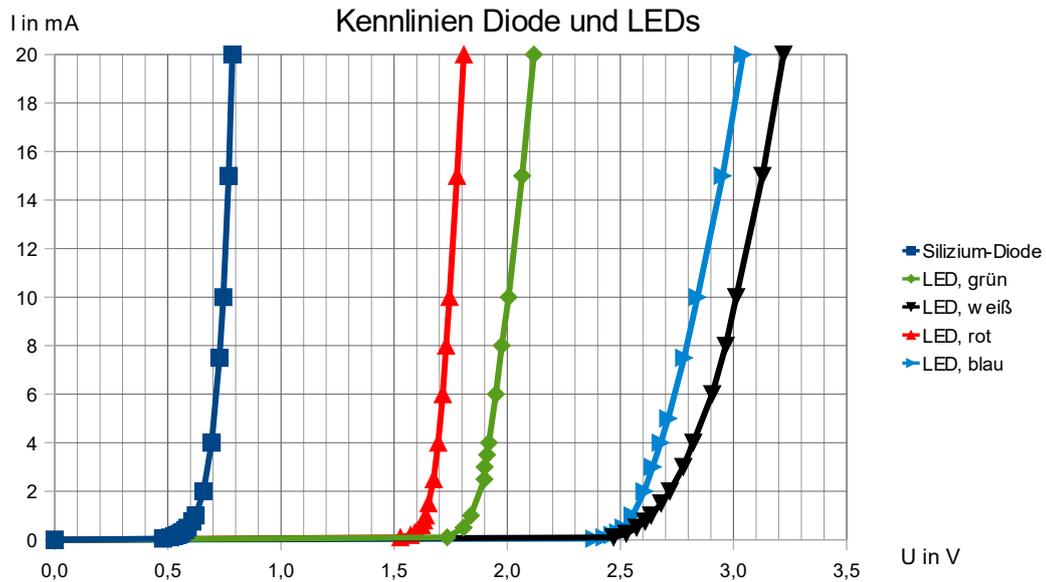
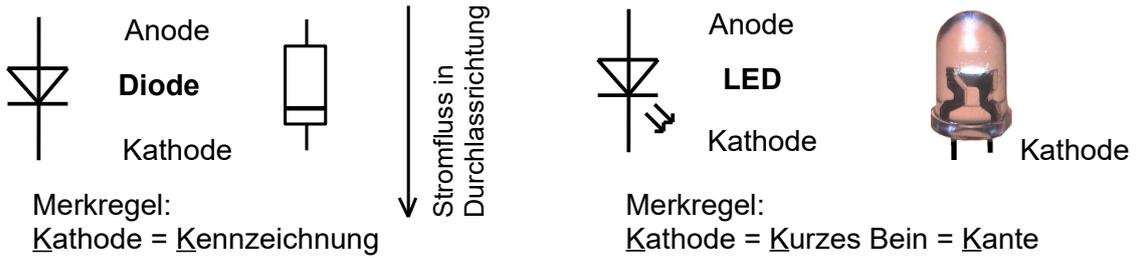
Abgleichbedingung: $U_{AB} = 0$

dann gilt:
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

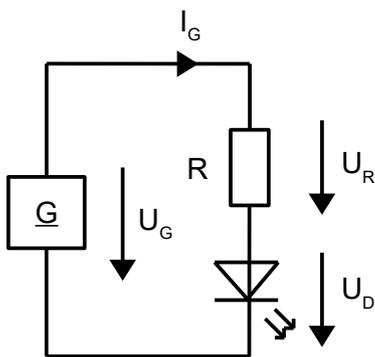
Grundsätzlich gilt:

$$U_{AB} = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot U_{ges}$$

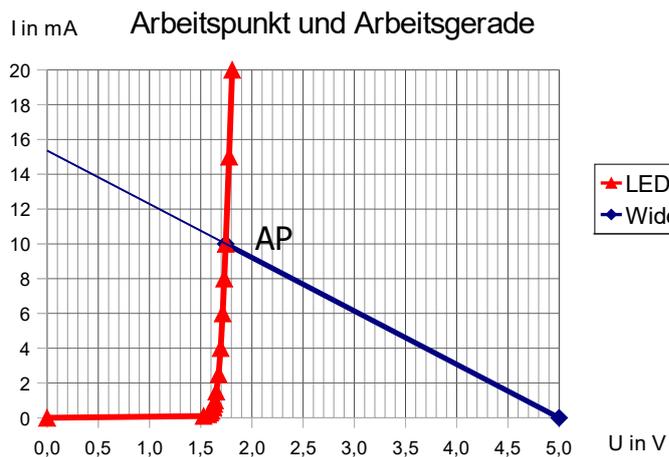
Dioden und LEDs



Arbeitspunkt und Arbeitsgerade



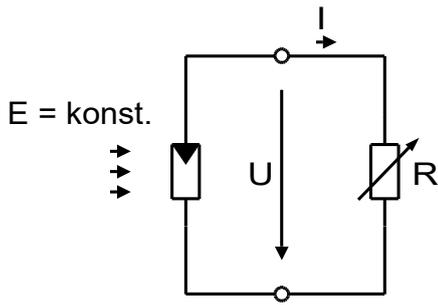
$$R = \left| \frac{\Delta U}{\Delta I} \right|$$



(Kehrwert des Betrags der Steigung der Arbeitsgeraden)

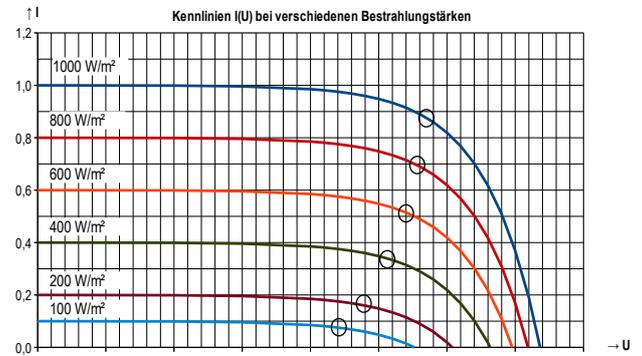
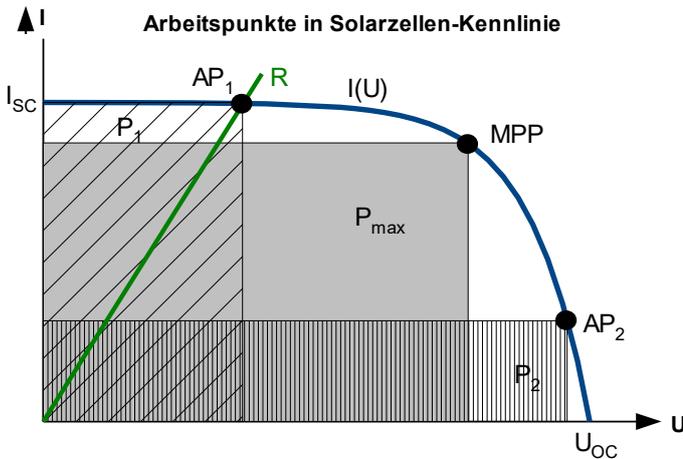
vgl. Reihenschaltung

Photovoltaik, Solarzelle



- E Bestrahlungsstärke
- U Spannung an der Solarzelle
- I Laststrom
- U_{OC} Leerlaufspannung (Open Circuit)
- I_{SC} Kurzschlussstrom (Short Circuit)
- AP_1 Arbeitspunkt 1
- P_1 Leistung im Arbeitspunkt 1
- AP_2 Arbeitspunkt 2
- P_1 Leistung im Arbeitspunkt 2
- MPP Maximum Power Point
- P_{max} Leistung im MPP

Kennlinie



Temperaturabhängigkeit

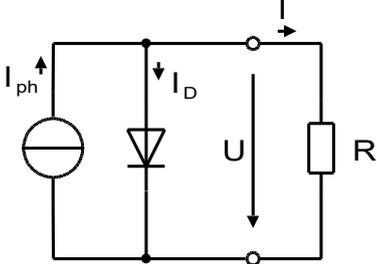
$$U(T_2) = U_{25^\circ C} \cdot \left(1 + \frac{TK_U \cdot \Delta T}{100 \%}\right)$$

$$I(T_2) = I_{25^\circ C} \cdot \left(1 + \frac{TK_I \cdot \Delta T}{100 \%}\right)$$

$$\Delta T = T_2 - 25^\circ C$$

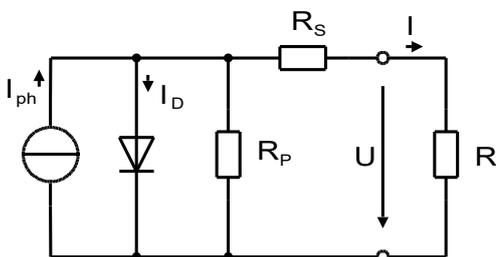
- $U_{25^\circ C}$ Spannung bei 25°C
- $I_{25^\circ C}$ Strom bei 25°C
- TK_U Temperaturkoeffizient der Spannung in %/K
- TK_I Temperaturkoeffizient des Stroms in %/K
- ΔT Temperaturänderung in Kelvin
- T_2 Temperatur in °C

Ersatzschaltbild ideale Solarzelle



- U Spannung an der Solarzelle
- I Laststrom
- I_{ph} Photostrom
- I_D Diodenstrom
- R Lastwiderstand

Ersatzschaltbild reale Solarzelle



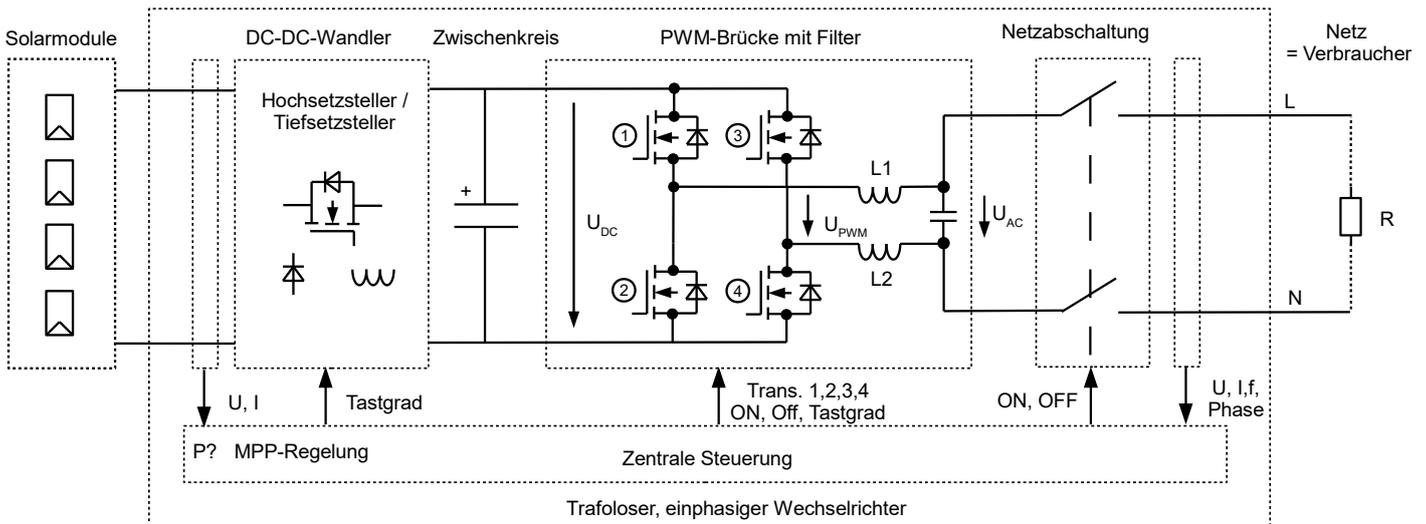
- R_p Parallelwiderstand
- R_s Serienwiderstand

Wechselrichter

Faustformeln zur Anpassung des Wechselrichters an die Solarmodule

$I_{WRmax} = 1,25 \cdot I_{SC@STC}$	I_{WRmax} Maximaler Strom des Wechselrichters
	$I_{SC@STC}$ Kurzschlussstrom Solarmodule bei STC
$U_{WR-MPPmin} = 0,8 \cdot U_{MPP@STC}$	$U_{WR-MPPmin}$ minimale Spannung des Wechselrichters, in der im MPP gearbeitet wird
	$U_{MPP@STC}$ Spannung Solarmodule im MPP bei STC
$U_{WR-MPPmax} = 1,2 \cdot U_{MPP@STC}$	$U_{WR-MPPmax}$ maximale Spannung des Wechselrichters, in der im MPP gearbeitet wird
	$U_{MPP@STC}$ Spannung Solarmodule im MPP bei STC
$U_{WR-max} = 1,2 \cdot U_{OC@STC}$	U_{WR-max} maximale Spannung des Wechselrichters
	$U_{OC@STC}$ Leerlaufspannung Solarmodule bei STC
$P_{WRmax} > 1,2 \cdot P_{MPP@STC}$	P_{WRmax} maximale Leistung des Wechselrichters
	$P_{MPP@STC}$ Leistung Solarmodule im MPP bei STC
	MPP Maximum Power Point (Betriebspunkt maximaler Leistung)
	STC Standard Test Conditions (1000 W/m ² , 25 °C, AM 1,5)
	OC Open Circuit (Leerlauf)
	SC Short Circuit (Kurzschluss)

Blockschaltbild Wechselrichter



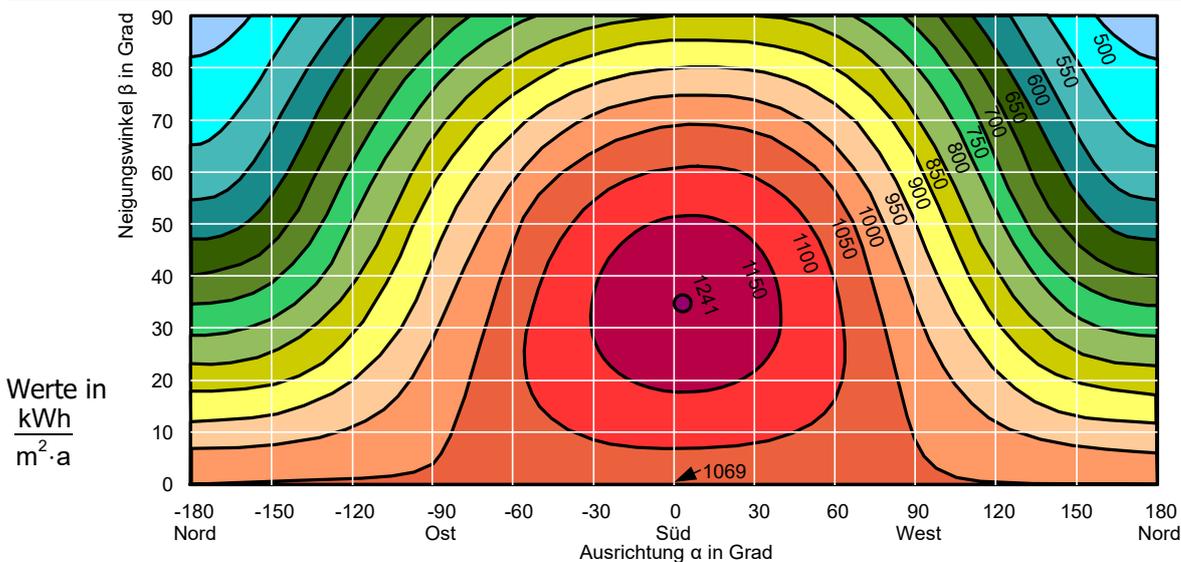
Mittlere tägliche Globalstrahlung auf eine Fläche und Korrekturfaktoren

Mittlere tägliche Globalstrahlung H_h auf eine horizontale Fläche ($\beta=0^\circ$). K_{opt} , β_{opt} bei Südausrichtung												
	Karlsruhe			Berlin			Mailand			Madrid		
	H_h	K_{opt}	β_{opt}	H_h	K_{opt}	β_{opt}	H_h	K_{opt}	β_{opt}	H_h	K_{opt}	β_{opt}
Jan	0,88	1,72	63	0,62	1,83	66	1,24	1,89	65	2,08	1,94	64
Feb	1,62	1,56	58	1,26	1,49	59	2,30	1,69	59	3,13	1,62	56
Mrz	3,08	1,31	47	2,70	1,35	50	3,83	1,34	47	4,69	1,28	44
Apr	4,60	1,14	34	4,33	1,17	37	4,77	1,13	32	5,60	1,09	27
Mai	5,28	1,04	20	5,16	1,05	23	6,01	1,04	20	6,64	1,02	15
Jun	5,95	1,02	15	5,67	1,02	16	6,73	1,02	13	7,67	1,01	7
Jul	5,66	1,03	17	5,27	1,03	19	7,11	1,03	16	8,03	0,94	11
Aug	4,86	1,10	29	4,41	1,11	31	5,86	1,09	27	7,00	1,07	23
Sep	3,56	1,25	43	3,16	1,27	45	4,33	1,26	42	5,37	1,23	39
Okt	2,15	1,47	54	1,80	1,52	56	2,52	1,46	53	3,70	1,48	52
Nov	1,09	1,69	62	0,80	1,77	64	1,41	1,79	63	2,39	1,82	61
Dez	0,68	1,82	65	0,49	1,94	68	1,08	2,11	68	1,91	2,08	66
Jahr	3,28	1,17	37	2,98	1,16	37	3,94	1,17	36	4,86	1,17	35

Korrekturfaktoren $K_{\alpha,\beta}$ für Ausrichtung α und Neigung β Karlsruhe																
$\alpha >$	Süd					Südwest / Südost					West / Ost					
$\beta >$	20°	37°	45°	60°	90°	20°	37°	45°	60°	90°	20°	37°	45°	60°	90°	
Jan	1,36	1,59	1,66	1,72	1,58	1,25	1,38	1,42	1,43	1,25	0,99	0,95	0,93	0,85	0,63	
Feb	1,30	1,48	1,53	1,56	1,37	1,21	1,31	1,33	1,31	1,10	0,98	0,95	0,93	0,85	0,63	
Mrz	1,20	1,30	1,31	1,29	1,04	1,14	1,19	1,19	1,14	0,89	0,98	0,94	0,91	0,84	0,61	
Apr	1,12	1,14	1,13	1,06	0,75	1,08	1,09	1,07	1,00	0,72	0,98	0,93	0,90	0,82	0,59	
Mai	1,04	1,01	0,98	0,88	0,55	1,02	1,00	0,96	0,88	0,59	0,97	0,92	0,88	0,80	0,56	
Jun	1,02	0,97	0,92	0,81	0,48	1,01	0,96	0,93	0,83	0,55	0,97	0,91	0,88	0,79	0,54	
Jul	1,03	0,99	0,95	0,84	0,52	1,02	0,98	0,94	0,85	0,57	0,97	0,91	0,88	0,79	0,55	
Aug	1,09	1,09	1,07	0,98	0,66	1,06	1,05	1,03	0,95	0,66	0,97	0,92	0,88	0,80	0,56	
Sep	1,17	1,24	1,25	1,21	0,93	1,12	1,15	1,15	1,09	0,83	0,98	0,94	0,91	0,83	0,60	
Okt	1,27	1,41	1,45	1,46	1,25	1,18	1,27	1,27	1,25	1,01	0,98	0,95	0,92	0,84	0,62	
Nov	1,35	1,56	1,63	1,69	1,53	1,24	1,37	1,39	1,40	1,20	0,98	0,95	0,93	0,85	0,63	
Dez	1,40	1,65	1,73	1,82	1,70	1,27	1,43	1,48	1,49	1,33	0,99	0,97	0,94	0,86	0,64	
Jahr	1,12	1,17	1,14	1,08	0,79	1,08	1,11	1,07	1,00	0,74	0,98	0,94	0,89	0,81	0,58	

- H_h in kWh / (m² · d) mittlere tägliche Globalstrahlung in kWh pro m² pro Tag (d) auf horizontale Fläche ($\beta = 0^\circ$)
- β_{opt} in Grad optimaler Neigungswinkel in Grad bei Südausrichtung ($\alpha = 0^\circ$)
- K_{opt} Korrekturfaktor für den optimalen Einstrahlungswinkel β_{opt} bei Südausrichtung
- $K_{\alpha,\beta}$ Korrekturfaktor in Abhängigkeit von der Ausrichtung α und Neigungswinkel β

Mittlere jährliche globale Einstrahlungssumme Standort Berlin



Grafische Darstellung der Einstrahlung (Jahresgang) und Dimensionierung Solarthermie s. Seite 9

$$W_{Tag} = P_{Nenn} \cdot \frac{H_h}{1 \frac{kWh}{m^2}} \cdot K_{\alpha,\beta}$$

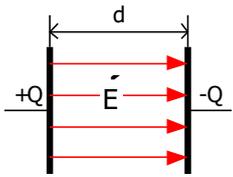
$$W_{Tag} = A_{PV} \cdot \eta_{PV} \cdot H_h \cdot K_{\alpha,\beta}$$

$$W_{Jahr} = W_{Tag} \cdot 365 \cdot \frac{d}{a} \quad (d=Tag, a=Jahr)$$

$$PR = \frac{W_{Jahr-real}}{W_{Jahr}}$$

- W_{Tag} Ertrag in kWh pro Tag
- H_h Globalstrahlungssumme in kWh pro m² pro Tag (d) bei $\beta = 0^\circ$
- P_{Nenn} Nennleistung der Anlage in kWp bei STC; (kWp = kWpeak)
- $K_{\alpha,\beta}$ Korrekturfaktor in Abhängigkeit von Ausrichtung α und Neigung β
- A_{PV} Fläche der Solaranlage in m²
- η_{PV} Wirkungsgrad Solarmodule
- PR Performance Ratio in %
- W_{Jahr} von den Solarmodulen theoretisch gelieferte Jahresarbeit in kWh (= Ertrag)
- $W_{Jahr-real}$ real ins Netz eingespeiste Jahresarbeit in kWh unter Berücksichtigung von Verschattung, Leitungsverlusten, Verschmutzung, ...
- $1 \frac{kWh}{m^2}$ Einstrahlung bei Standard-Testbedingungen STC

Kondensator

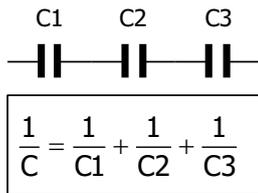


$$C = \frac{Q}{U}$$

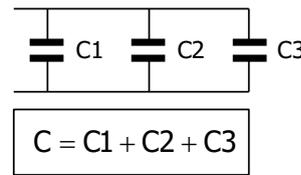
$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

- d Plattenabstand in m
- C Kapazität in F (Farad) = As/V
- Q Ladungsmenge in As = C (Coulomb)
- U Spannung in V
- ϵ_0 Feldkonstante $\epsilon_0 = 0,885 \cdot 10^{-11} \frac{As}{Vm}$
- A Plattenfläche in m²
- ϵ_r Dielektrizitätskonstante
- ϵ_r (Luft) ≈ 1
- ϵ_r (dest. Wasser) ≈ 80
- ϵ_r (Isolation Unterwasserkabel) $\approx 2,4$

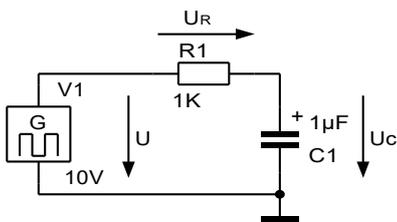
Reihenschaltung von Kondensatoren



Parallelschaltung von Kondensatoren



Auf- und Entladung

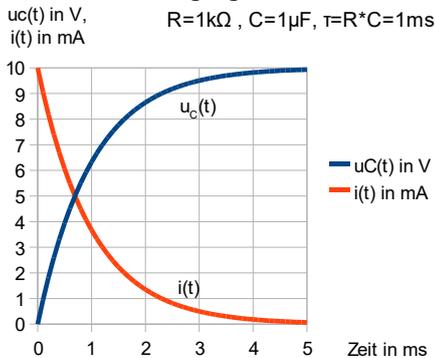


$$\tau = R \cdot C$$

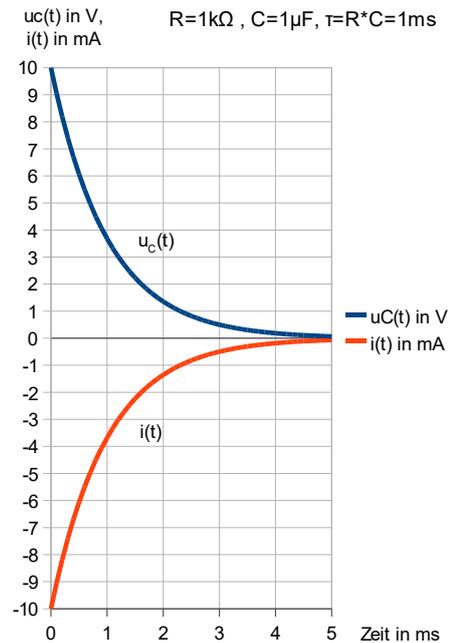
$$I_c = C \cdot \frac{\Delta U_c}{\Delta t}$$

- τ Zeitkonstante in s
- R Widerstand in Ω
- C Kapazität in F

Aufladevorgang Kondensator



Entladevorgang Kondensator



$$U_c(t) = U \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$$U_R(t) = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$I(t) = \frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$U_c(t) = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

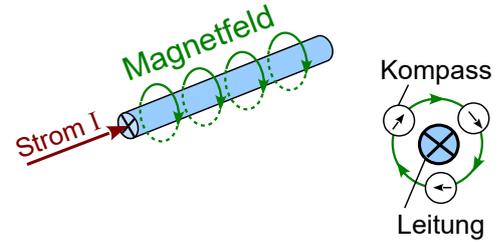
$$I(t) = -\frac{U}{R} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Durchflutung

Ein elektrischer Strom erzeugt ein Magnetfeld, dessen Feldlinien ringförmig um den Leiter verlaufen.

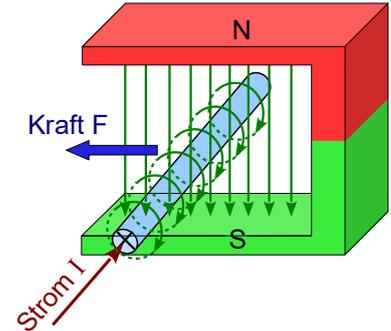
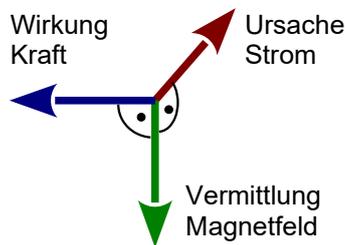
Rechte Handregel:

- Daumen zeigt in Stromrichtung
- Finger zeigen im Magnetfeldrichtung
- Kreuz: Strom fließt nach hinten (Merkregel: Pfeilende)
- Punkt: Strom fließt nach vorne (Merkregel: Pfeilspitze)



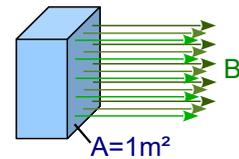
Kraft auf stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld

- Ursache Strom (Daumen nach hinten)
- Vermittlung Magnetfeld (Zeigefinger nach unten)
- Wirkung Kraft (Mittelfinger nach links)



Flussdichte

- B magnetische Flussdichte in Vs/m² = T (T = Tesla)
- Φ magnetischer Fluss in Vs
- A Querschnittsfläche in m²



$$B = \frac{\Phi}{A}$$

Induktion

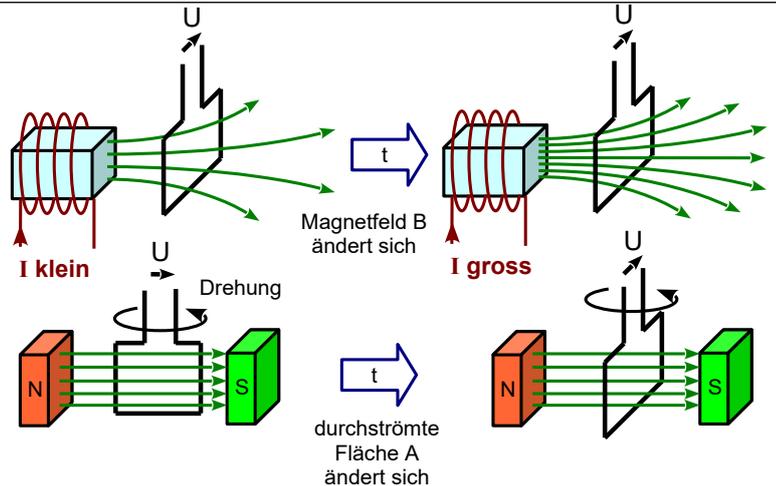
$$U_{\text{ind}} = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

mit

$$\Phi = B \cdot A$$

vom Magnetfeld durchströmte Fläche A ändert sich

Magnetfeld B ändert sich

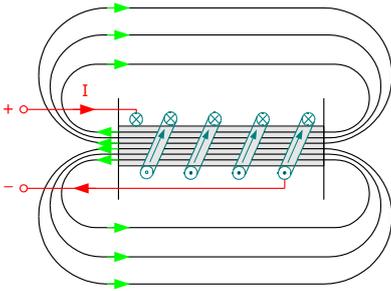


- U_{ind} induzierte Spannung in V
- N Windungszahl
- ΔΦ Flussänderung in Vs
- Δt Zeitdauer der Flussänderung in s
- ΔI Stromänderung in A
- Δt Zeitdauer der Stromänderung in s
- İ Stromänderungsgeschwindigkeit in A/s

Selbstinduktion

$$U_{\text{ind}} = L \cdot \dot{i} = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

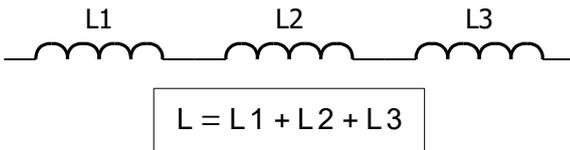
Spule



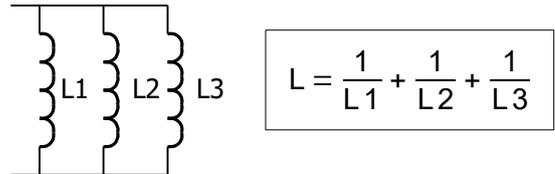
$$L \approx \mu_0 \cdot \mu_r \cdot N^2 \cdot \frac{A}{\ell}$$

- L Induktivität in H $= \frac{V \cdot s}{A}$ (Henry)
- A vom Feld durchsetzte Fläche (Querschnitt)
- μ_0 Feldkonstante des magnetischen Feldes
- ℓ Länge in m
- N Windungszahl
- $\mu_r \hat{=}$ Permeabilitätszahl
- μ_r (Eisen) 200 ... 6000
- μ_r (Elektroblech) 500 ... 7000
- $\mu_0 \hat{=} 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{Vs}{Am}$

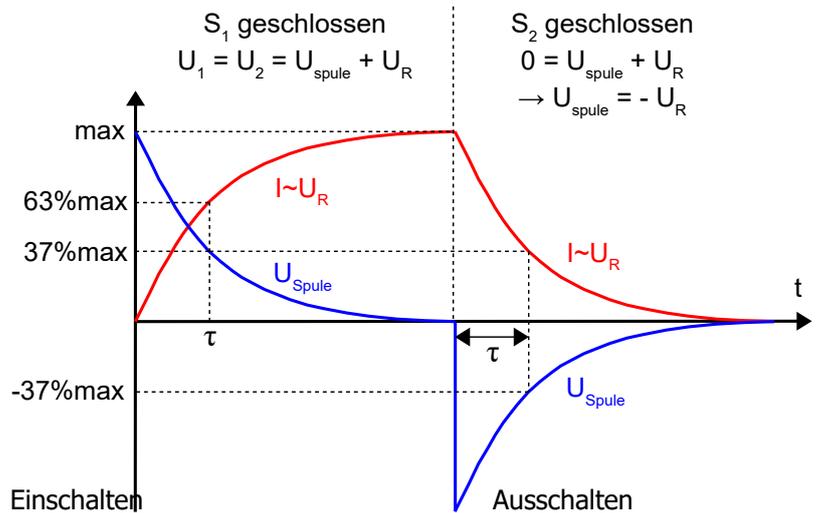
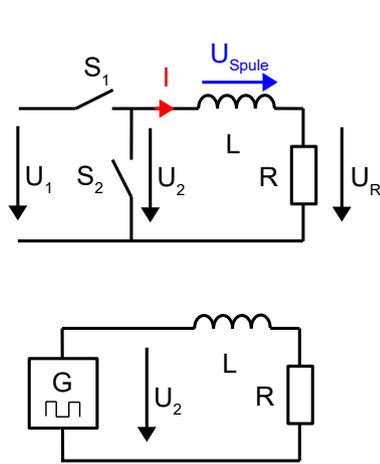
Reihenschaltung von Spulen



Parallelschaltung von Spulen



Spule an Rechteckspannung



Zeitkonstante

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Selbstinduktion

$$U_L = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} = L \cdot i$$

$$U_R(t) = U_{max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$$U_R(t) = U_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$I(t) = \frac{U_{max}}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

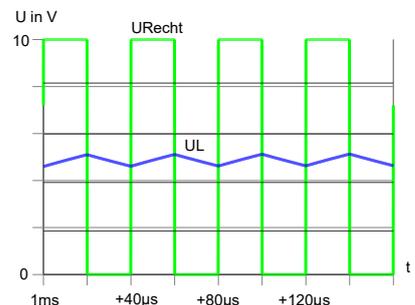
$$U_{Spule}(t) = U_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$I(t) = I_{start} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

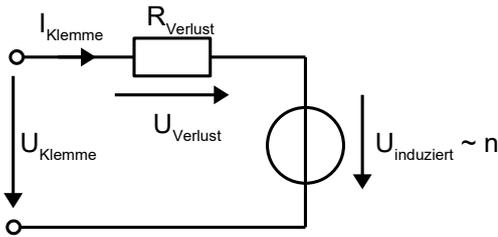
$$U_{Spule}(t) = -U_{max} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Impulszeit $t_i \ll \tau$

eingeschwungener Zustand!



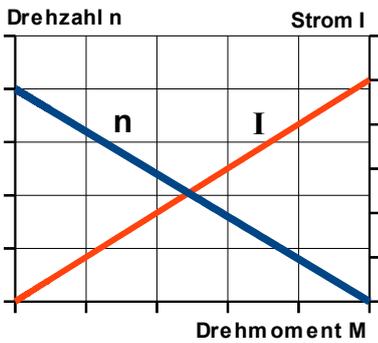
Gleichstrom-Motor: Ersatzschaltbild und Kennlinien (gilt auch im Generatorbetrieb)



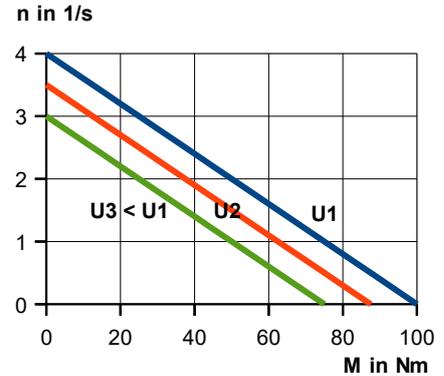
$$\frac{U_{\text{induziert}}}{n} = \text{konst}$$

$$U_{\text{Klemme}} = U_{\text{Verlust}} + U_{\text{induziert}}$$

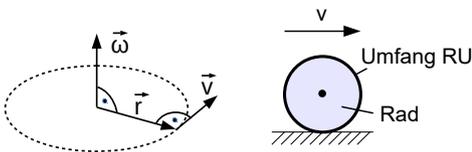
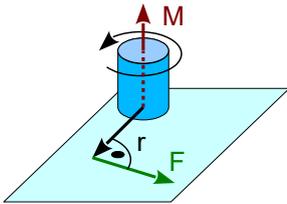
- U_{Klemme} Spannung am Motor in V
- I_{Klemme} Stromaufnahme des Motors in A
- Klemmen die beiden Anschlüsse des Motors
- R_{Verlust} Verlustwiderstand in Ω (Ankerwiderst.)
- n Drehzahl des Motors in 1/s
- $U_{\text{induziert}}$ im Motor induzierte Spannung in V



$$\frac{M}{I_{\text{Klemme}}} = \text{konst}$$



Drehmoment
Mechanische Leistung



$$M = F \cdot r$$

$$P_{\text{mech}} = \frac{\Delta W}{\Delta t} = v \cdot F$$

$$P_{\text{mech}} = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M$$

$$n = \frac{v}{RU}$$

$$v = \omega \cdot r$$

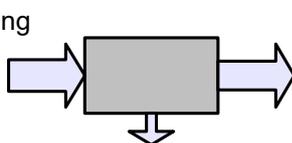
$$v = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r$$

$$F = m \cdot a$$

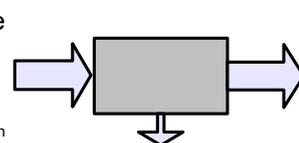
- M_{ab} abgegebenes Drehmoment in Nm
- M Drehmoment in Nm
- F Kraft in N
- r Radius in m
- P_{mech} mechanische Leistung in W = Nm/s
- ΔW Arbeit in Nm
- v Geschwindigkeit in m/s mit F in Bewegungsrichtung
- ω Winkelgeschwindigkeit in 1/s
- n Drehzahl in 1/s
- RU Radumfang in m
- m Masse in kg
- a Beschleunigung in N/kg = m/s²

Gleichstrom-Motor Leistungsbilanz

zugeführte Leistung
 $P_{\text{zu}} = P_{\text{elekt}}$
 $U_{\text{Klemme}} \cdot I_{\text{Klemme}}$



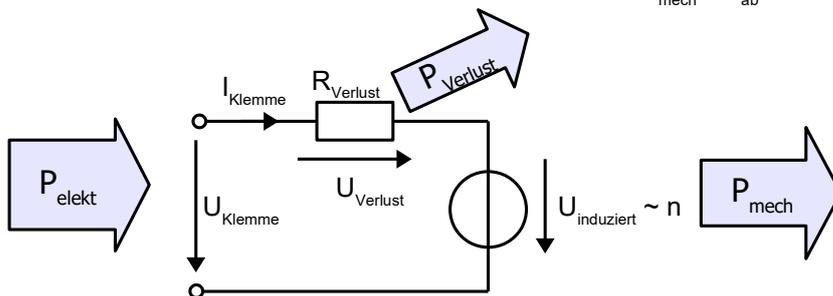
Mechanische Leistung
 P_{mech}
 $2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_{\text{mech}}$



vom Motor
abgegebene
Leistung
 $P_{\text{ab}} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_{\text{ab}}$

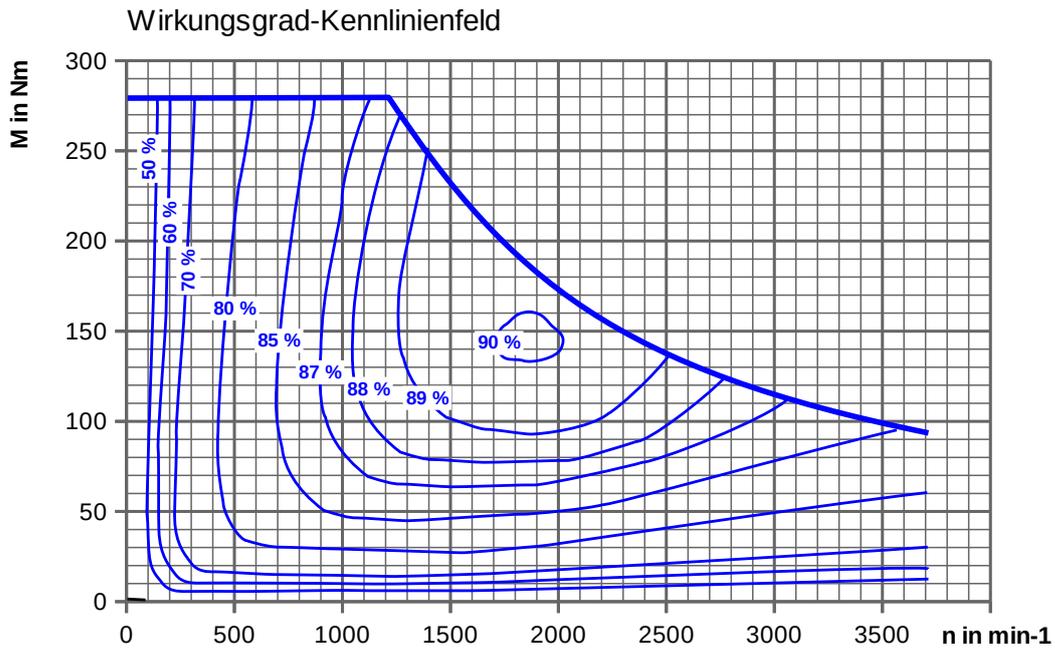
Wärmeverluste
 $P_{\text{verlust}} = U_{\text{R}} \cdot I_{\text{Klemme}}$
 $P_{\text{verlust}} = I_{\text{Klemme}}^2 \cdot R_{\text{Verlust}}$

mechanische Verluste (Lager, Bürsten,...),
hervorgerufen durch Reibung
Bei Vernachlässigung der Reibung gilt:
 $M_{\text{mech}} \approx M_{\text{ab}}$ und $P_{\text{mech}} \approx P_{\text{ab}}$



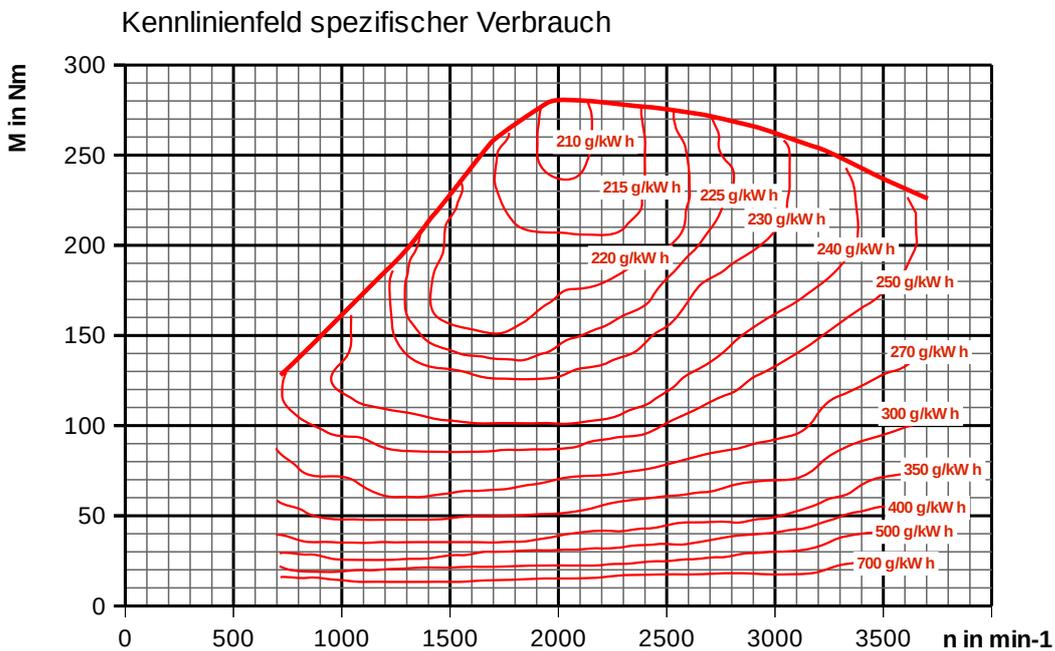
R_{Verlust} Verlustwiderstand der Motorwicklung, auch Ankerwiderstand genannt

Wirkungsgrad-Kennlinienfeld für die Einheit aus Elektromotor und Leistungselektronik



- Linien gleichen Wirkungsgrades in % unterhalb der Vollastkennlinie
- gilt für eine beispielhafte Einheit aus elektrischer Maschine mit Leistungselektronik

Kennlinienfeld des spezifischen Verbrauchs (Muscheldiagramm) Dieselmotor



- Linien gleichen spezifischen Verbrauchs in g/kWh unterhalb der Vollastkennlinie
- gilt für einen beispielhaften Dieselmotor

Umrechnung spezifischer Verbrauch \leftrightarrow Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{spezifische Ausbeute}}{\text{Heizwert}} = \frac{1/\text{spezifischer Verbrauch}}{\text{Heizwert}} = \frac{1}{\text{spezifischer Verbrauch} \cdot \text{Heizwert}}$$

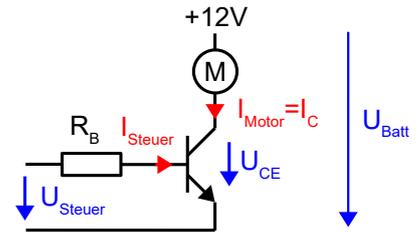
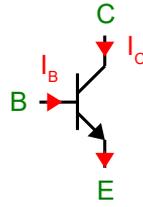
Transistor und Transistorschaltungen

Transistor-Art und -Bezeichnungen Schaltzeichen Schaltungsbeispiel

Bipolar-Transistor

- B Basis
- E Emitter
- C Kollektor

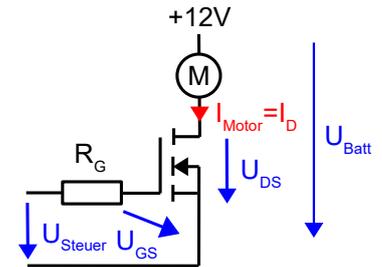
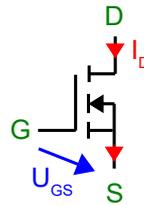
Basisstrom I_B steuert
Kollektorstrom I_C wird gesteuert



Feldeffekt-Transistor, hier MOSFET

- G Gate
- D Drain
- S Source

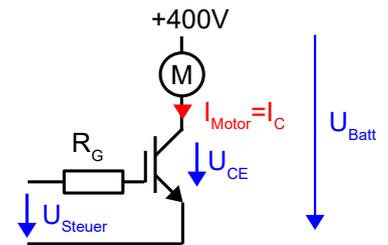
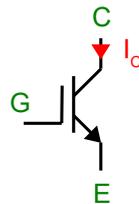
Gate-Source-Spannung U_{GS} steuert
Drainstrom I_D wird gesteuert



IGBT (insulated-gate bipolar transistor)

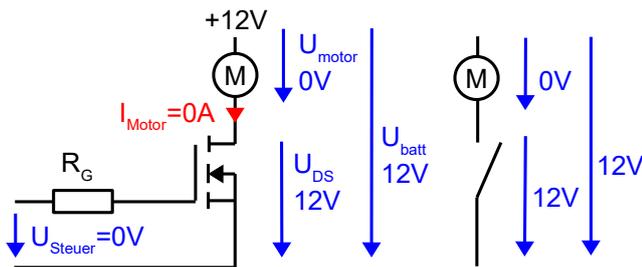
- G Gate
- E Emitter
- C Kollektor

Gate-Emitter-Spannung U_{GE} steuert
Drainstrom I_D wird gesteuert

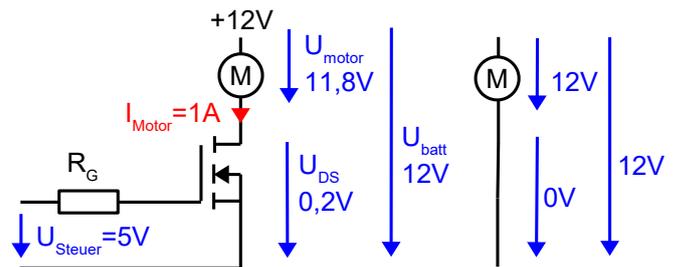


Schaltzustände beim Transistor

Transistor sperrt (wie Schalter offen)



Transistor leitet (wie Schalter geschlossen)



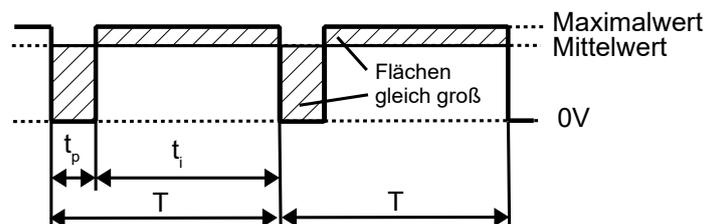
PWM-Signal, Tastgrad

- T Periodendauer
- t_i Impulszeit
- t_p Pausenzeit
- f Frequenz

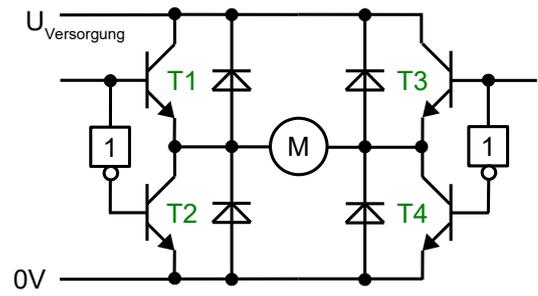
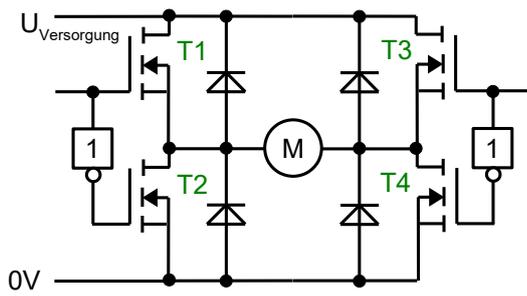
$$\text{Tastgrad} = \frac{t_i}{T} = \frac{U_{\text{Mittelwert}}}{U_{\text{Maximalwert}}}$$

$$f = \frac{1}{T}$$

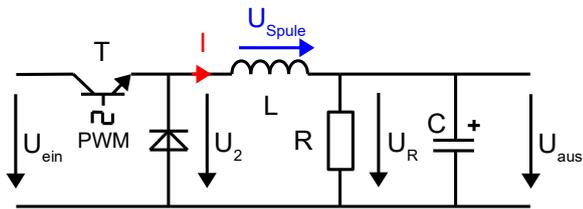
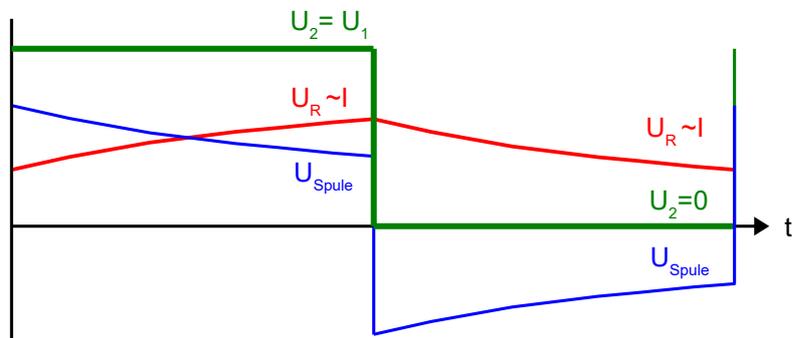
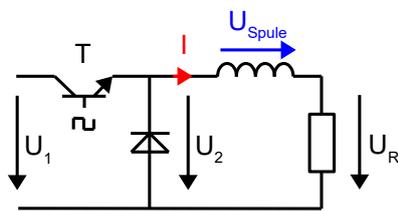
$$\text{Tastgrad} = \frac{t_i}{T} = \left(\frac{U_{\text{Effektivwert}}}{U_{\text{Maximalwert}}} \right)^2$$



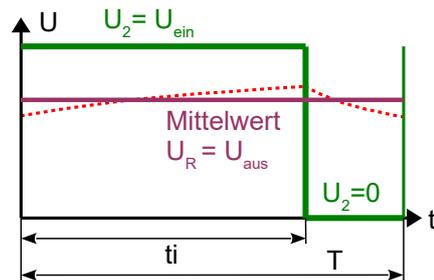
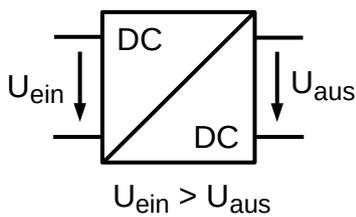
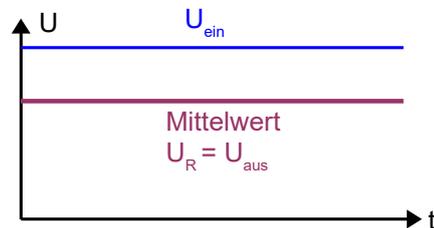
Transistor-Brückenschaltung



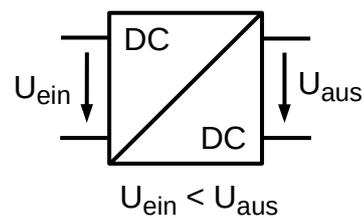
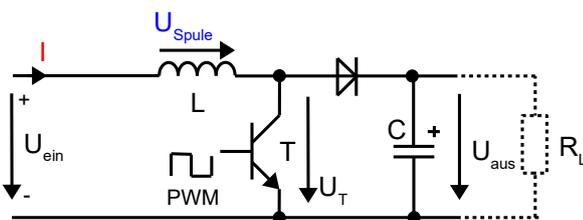
Tiefsetzsteller



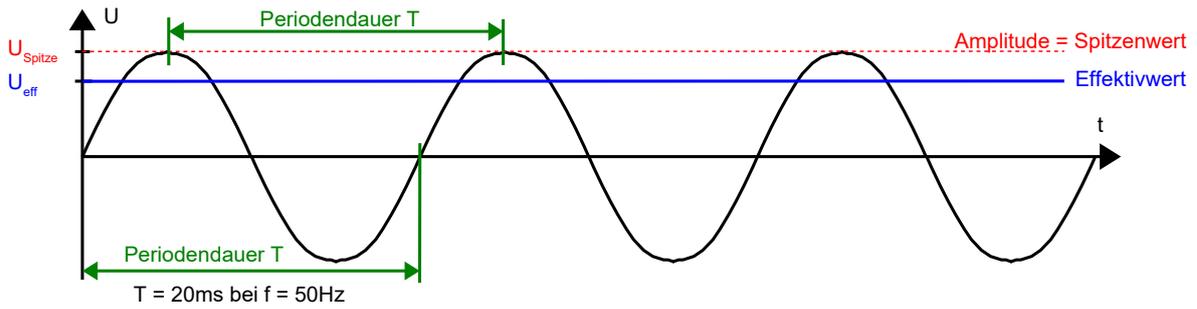
Eingangs-Gleichspannung Ausgangs-Gleichspannung



Hochsetzsteller



Sinusförmige Wechselspannung



Frequenz
 Periodendauer

$$f = \frac{1}{T}$$

f Frequenz in Hz = $\frac{1}{s}$
 T Periodendauer in s

Effektivwert bei sinusförmigen Wechselgrößen

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{Spitze}}}{\sqrt{2}} \quad I_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{Spitze}}}{\sqrt{2}}$$

U_{eff} Effektivwert der Wechselspannung in V
 U_{Spitze} Spitzenwert der Wechselspannung in V
 I_{eff} Effektivwert des Wechselstroms in A
 I_{Spitze} Spitzenwert des Wechselstroms in A

Wirkleistung
 Blindleistung
 Scheinleistung

$$P = U_R \cdot I_R \quad Q_C = U_C \cdot I_C$$

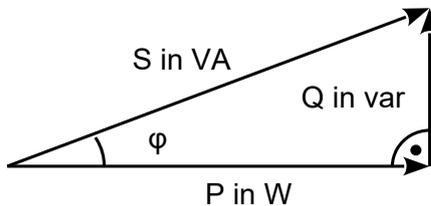
$$Q_L = U_L \cdot I_L \quad S = U_{\text{ges}} \cdot I_{\text{ges}}$$

P Wirkleistung in W
 U_R, I_R Spannung und Strom am Widerstand
 Q_C, Q_L Blindleistungen in var
 U_C, I_C Spannung und Strom am Kondensator
 U_L, I_L Spannung und Strom an der Spule
 S Scheinleistung in VA
 $U_{\text{ges}}, I_{\text{ges}}$ Gesamtspannung und Gesamtstrom an einer Schaltung aus R,L,C

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

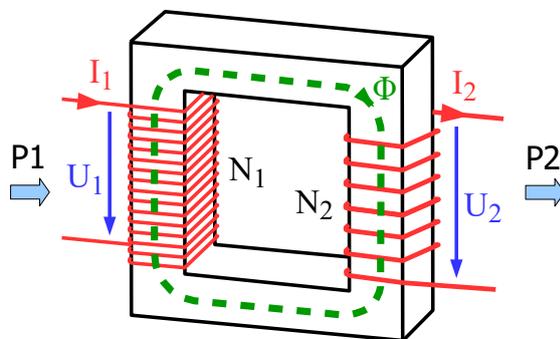
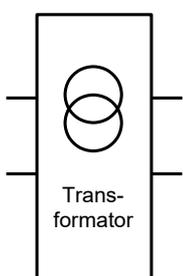
$$\cos(\phi) = \frac{P}{S} = 0..1_{\text{induktiv/kapazitiv}}$$

$\cos(\phi)$ Leistungsfaktor, Verschiebungsfaktor
 ϕ Phasenverschiebungswinkel zwischen U_{ges} und I_{ges}
 ϕ Winkel zwischen S und P



Um an der Einheit sofort zu erkennen, ob Wirk-, Blind- oder Scheinleistung angegeben wird, unterscheidet man W, var und VA.
 Beispiel Geräteaufdruck: 10 VA / 8 W

Transformator

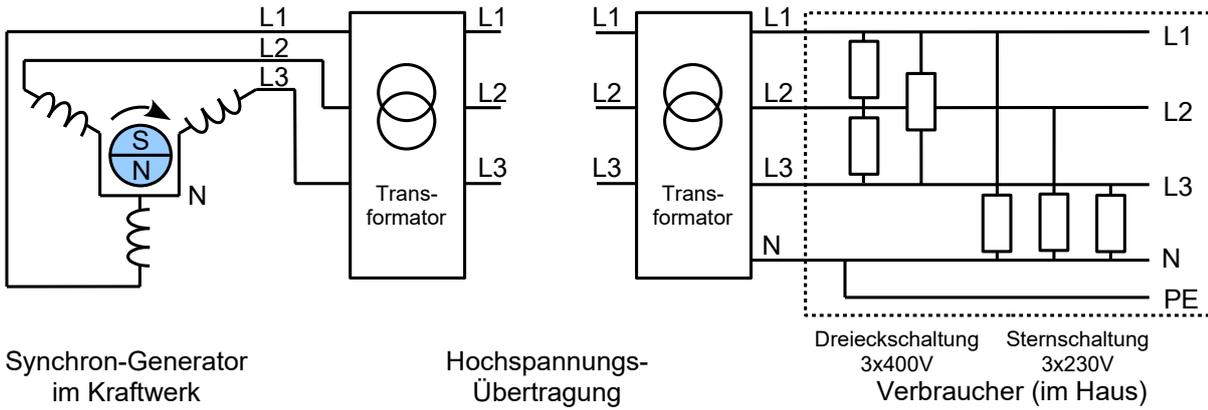


P_1, P_2 Wirkleistungen in W
 U_1, U_2 sinusförmige Wechselspannungen
 I_1, I_2 sinusförmige Wechselströme
 N_1, N_2 Windungszahlen
 Φ magnetischer Fluss im Eisenkern

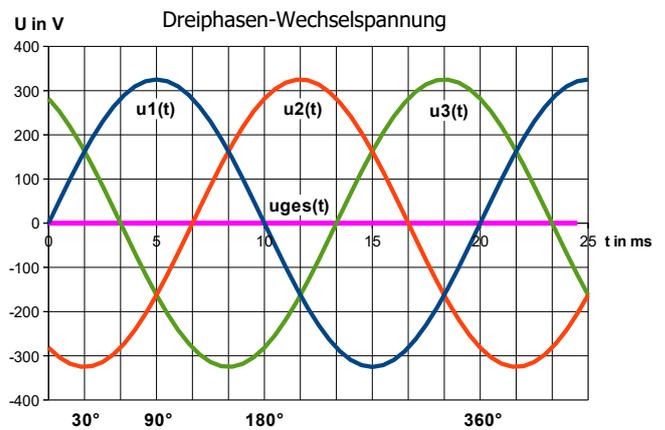
Idealer Transformator

$$P_1 = P_2 \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$

Dreiphasen-Wechselspannung, Drehstrom (symmetrische Belastung)

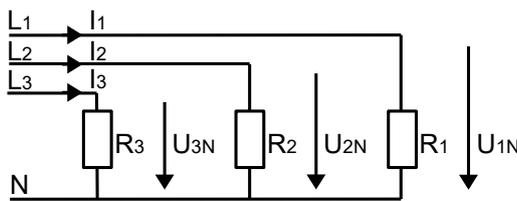


3 Phasen mit 120° Phasenverschiebung
 zu jedem Zeitpunkt gilt: $u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) = 0$



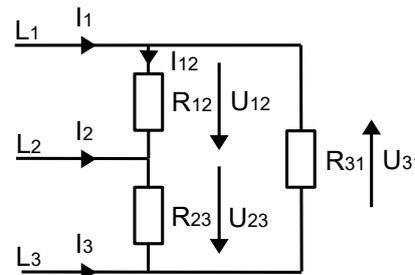
Sternschaltung

Verbraucher zwischen Phase und Nulleiter geschaltet
 Spannung am Verbraucher im Haushalt: 230V



Dreieckschaltung

Verbraucher zwischen zwei Phasen geschaltet
 Spannung am Verbraucher im Haushalt: 400V



Strangstrom

$$I_{12} = \frac{I_1}{\sqrt{3}}$$

$$U_{\text{Stern}} = \frac{U_{\text{Dreieck}}}{\sqrt{3}}$$

$$P_{\text{Stern}} = \frac{P_{\text{Dreieck}}}{3}$$

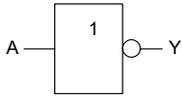
$$P_{\text{ges}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

$$S_{\text{ges}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

- U_{Stern} Spannung in Sternschaltung (zwischen Phase L und Nulleiter N) U_{1N}, U_{2N}, U_{3N}
- U_{Dreieck} Spannung in Dreieckschaltung (zwischen 2 Phasen) U_{12}, U_{23}, U_{31}
- P_{Stern} Gesamtleistung in Sternschaltung in W
- P_{Dreieck} Gesamtleistung in Dreieckschaltung in W
- P_{ges} gesamte Wirkleistung
- S_{ges} gesamte Scheinleistung
- U Spannung zwischen den Außenleitern U_{12}, U_{23}, U_{31}
- I Außenleiterstrom I_1, I_2, I_3
- $\cos(\varphi)$ Leistungsfaktor
- φ Phasenverschiebungswinkel zwischen U und I

Digitaltechnik Symbole und Schaltalgebra

NOT (Negation)

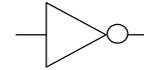


$$Y = \neg A$$

$$Y = \bar{A}$$

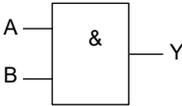
A	Y
0	1
1	0

amerikan. Darstellung, in Labview:



Negation / Complement

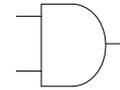
AND (Konjunktion)



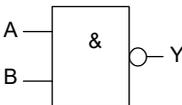
$$Y = A \cdot B$$

$$Y = A \wedge B$$

B	A	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



NAND



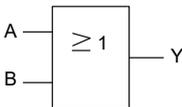
$$Y = \neg(A \cdot B)$$

$$Y = \overline{A \wedge B}$$

B	A	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



OR (Disjunktion)



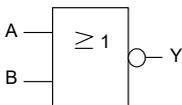
$$Y = A + B$$

$$Y = A \vee B$$

B	A	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1



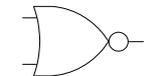
NOR



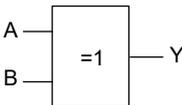
$$Y = \neg(A + B)$$

$$Y = \overline{A \vee B}$$

B	A	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0



XOR (Antivalenz)

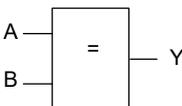


$$Y = (A \cdot \neg B) + (\neg A \cdot B)$$

B	A	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0



XNOR (Äquivalenz)



$$Y = (A \cdot B) + (\neg A \cdot \neg B)$$

B	A	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1



UND / ODER / NAND / NOR
XOR und XNOR

Verknüpfungen können beliebig viele Eingänge haben.
... nur 2 Eingänge.

wichtige Verknüpfungsregeln: **UND** $\hat{=}$ \cdot / **ODER** $\hat{=}$ $+$

$$\overline{A \cdot B \cdot C} = \bar{A} + \bar{B} + \bar{C}$$

$$\overline{A + B + C} = \bar{A} \cdot \bar{B} \cdot \bar{C}$$

$$A \cdot (B \cdot C) = (A \cdot C) \cdot B = C \cdot A \cdot B$$

$$(A \cdot B) + (A \cdot C) = A \cdot (B + C)$$

$$(A \cdot B) + (A \cdot C) = A \cdot B + A \cdot C$$

Codes und Codierer

Dual-Code (8-4-2-1-Code)

Dezi- mal	Hexa- dezimal	Dual			
		$2^3=8$ D	$2^2=4$ C	$2^1=2$ B	$2^0=1$ A
0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1
2	2	0	0	1	0
3	3	0	0	1	1
4	4	0	1	0	0
5	5	0	1	0	1
6	6	0	1	1	0
7	7	0	1	1	1
8	8	1	0	0	0
9	9	1	0	0	1
10	A	1	0	1	0
11	B	1	0	1	1
12	C	1	1	0	0
13	D	1	1	0	1
14	E	1	1	1	0
15	15	1	1	1	1

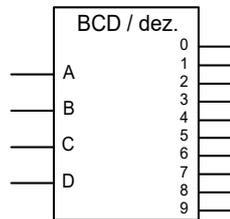
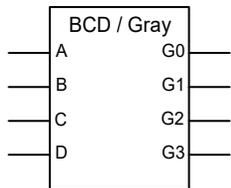
Gray-Code

Dezi- mal	Hexa- dezimal	Grey			
		Keine Gewichtung			
		G3	G2	G1	G0
0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1
2	2	0	0	1	0
3	3	0	0	1	1
4	4	0	1	0	0
5	5	0	1	0	1
6	6	0	1	1	0
7	7	0	1	1	1
8	8	1	0	0	0
9	9	1	0	0	1
10	A	1	0	1	0
11	B	1	0	1	1
12	C	1	1	0	0
13	D	1	1	0	1
14	E	1	1	1	0
15	15	1	1	1	1

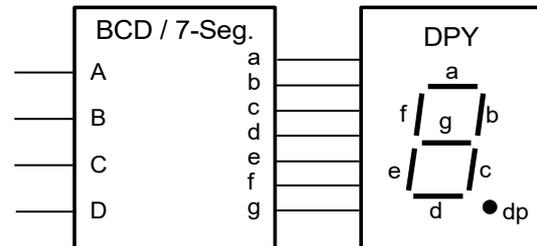
BCD-Code

wie Dual-Code, Ziffern > 9 sind jedoch nicht definiert

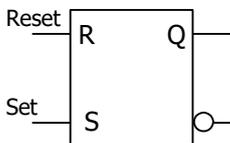
Spezielle Umcodierer



Umcodierer mit 7-Segmentanzeige



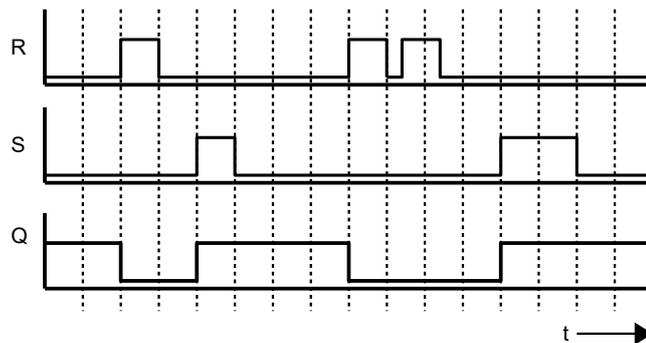
Speicher RS-Flipflop



Zustandsfolgetabelle

S	R	Q^n	Q^{n+1}	
0	0	0	0	speichern
0	0	1	1	
0	1	0	0	Reset (R)
0	1	1	0	
1	0	0	1	Set (S)
1	0	1	1	
1	1	?	?	irregulär

Zeitablaufdiagramm (Impulsdiagramm)

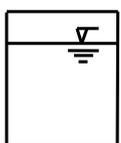


Symbole der Elektrotechnik

Schalten	Taster 	Schalter 	Schließerkontakt 	Öffnerkontakt 	Umschalter
Anzeigen Dioden	Anzeigelampe 	Lampe 	LED 	Diode 	Schottky-Diode
Widerstände	Widerstand 	Veränderbarer Widerstand 	Widerstand mit Schleifkontakt 	PTC Kaltleiter 	NTC Heißeiter
	Spule 	Kondensator 	Kondensator mit Polung 	Batterieelement, Akku 	Masse, Erde
	Sicherung 	Solarzelle 	Relais 	Relais mit Kontakt 	N-Kanal-IGFET
Quellen	ideale Spannungsquelle 	Ideale Stromquelle 	Signalgenerator Gleichspannung 	Signalgenerator Wechselspannung 	Umlaufender Generator
Messgeräte	Spannungsmesser, Voltmeter 	Strommesser, Amperemeter 	Leistungsmesser, Wattmeter 	Leistungsfaktor-Messgerät 	Energiemesser, Wattstundenzähler
Umsetzer	Analog/Digital-Umsetzer, n Bit 		Digital/Analog-Umsetzer, n Bit 		
	Komparator, Schwellwertschalter 		Schmitt-Trigger, Zweipunktregler 		

Symbole im RI-Fließbild

Behälter mit Flüssigkeit



Motor



Heizung / Wärmetauscher



Pumpe



Rührer



Kompressor



Druckluftantrieb



Ventil



Niveauangabe



Messstelle

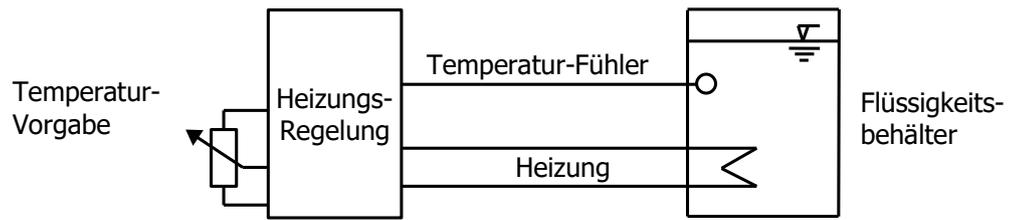


Hauptflussrichtung



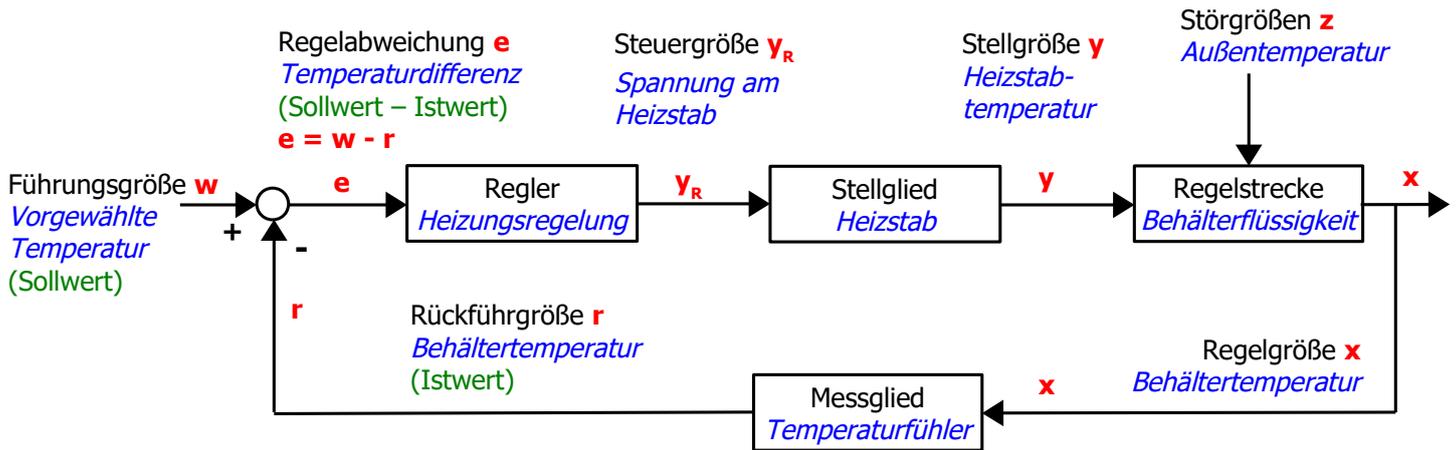
Regelkreis

Beispiel Temperaturregelung



zugehörige Regelkreis-Darstellung

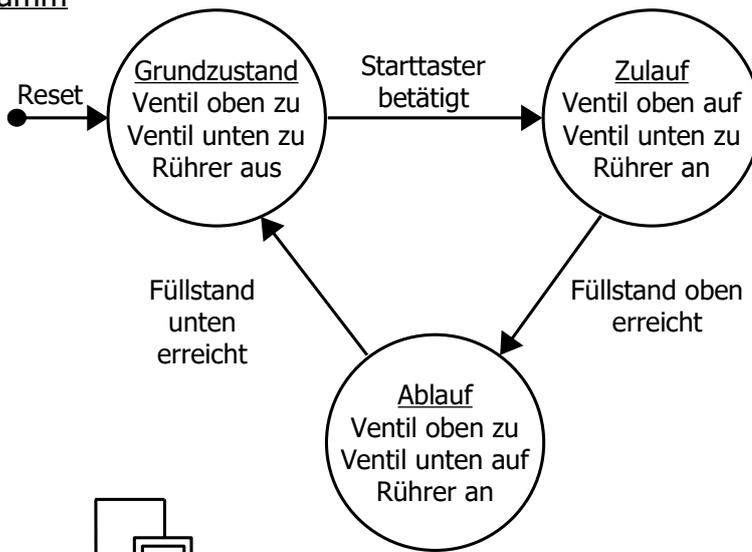
mit Regelkreisbezeichnungen und Bedeutungen im Beispiel



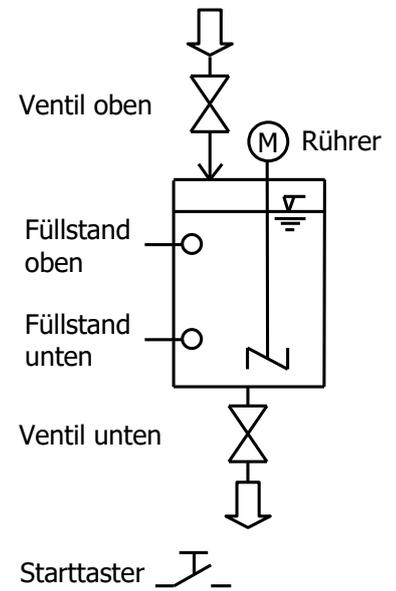
Bezeichnung, Kenngrößen	Sprungantwort	Beispiel	Übertragungsverhalten
P-Strecke $x = K_{ps} \cdot y$		Verstärker, Spannungsteiler, Hebel, Getriebe	Die Ausgangsgröße x folgt proportional unverzögert der Eingangsgröße y
T1-Strecke T_s Zeitkonstante		Drehzahl n eines Motors, Strecken mit einem Energiespeicher	Die Ausgangsgröße x folgt nach einer e-Funktion verzögert der Eingangsgröße y, eine Zeitkonstante
T2-Strecke T_u Verzugszeit T_g Ausgleichszeit mit Tangente im Wendepunkt bestimmen		Drehzahl n eines Motors mit Berücksichtigung der Induktivität, Strecken mit zwei Energiespeichern	Die Ausgangsgröße x folgt mit zwei Zeitkonstanten verzögert der Eingangsgröße y
Tt -Strecke T_t Totzeit		Fließband	Die Ausgangsgröße x folgt proportional um eine Totzeit T_t verzögert der Eingangsgröße y
I-Strecke		Schiebeschlitten an einer Drehspindel	Die Ausgangsgröße x ist das Zeitintegral der Eingangsgröße y

Grafische Darstellungen von Ablaufsteuerungen, Zustandsdiagramm, GRAFCET

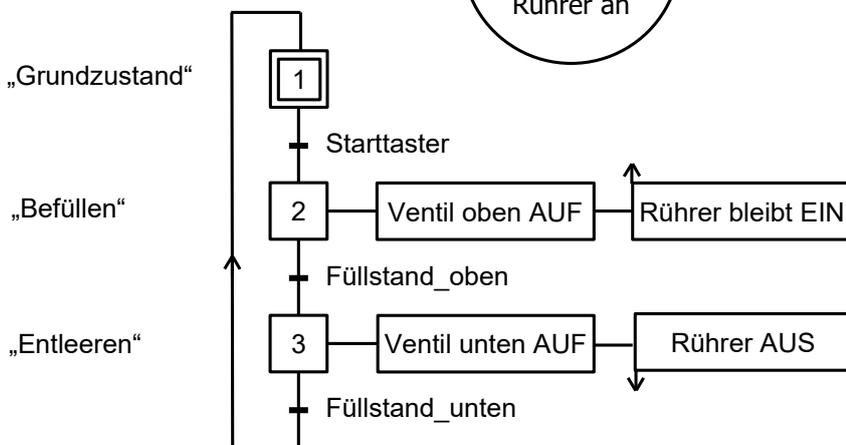
Zustandsdiagramm



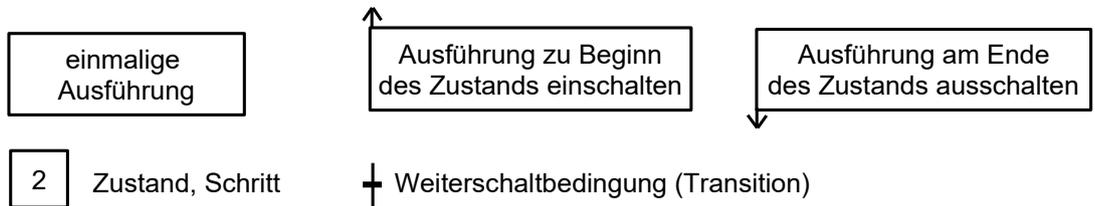
Technologieschema



GRAFCET

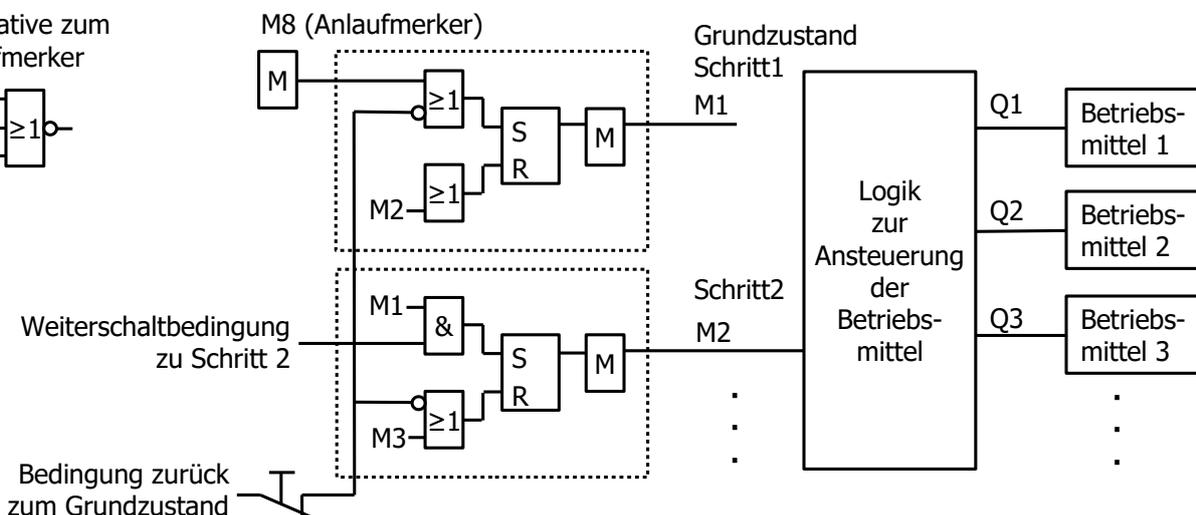
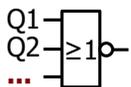


Bedeutung der Symbole:



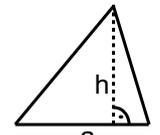
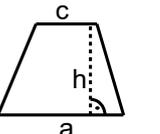
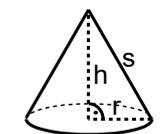
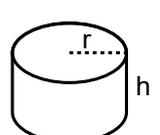
Schritt看te mit RS-Flipflops

Alternative zum Anlaufmerker

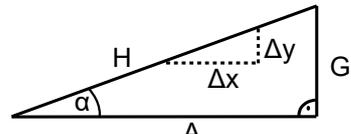


5 Mathematische Grundformeln

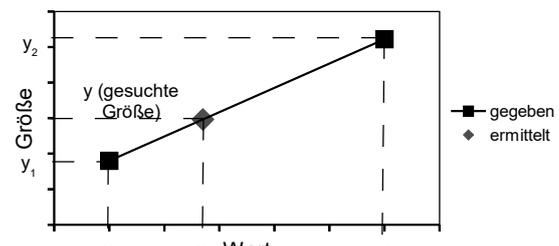
Flächen- und Volumenberechnungen

Kreisfläche	$A = \pi \cdot r^2 = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$		A Fläche in m ² r Kreisradius in m d Kreisdurchmesser in m
Kreisumfang	$U = 2 \cdot \pi \cdot r$		U Umfang in m
Dreiecksfläche	$A = \frac{1}{2} \cdot a \cdot h$		M Mantelfläche in m ² O Oberfläche in m ² V Volumen in m ³
Trapezfläche	$A = \frac{1}{2} \cdot (a + c) \cdot h$		
Kegel	$M = \pi \cdot r \cdot s$		
	$O = \pi \cdot r^2 + \pi \cdot r \cdot s$		
	$V = \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h$		
Zylinder	$O = 2 \cdot \pi \cdot r^2 + 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h$		
	$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$		
Kugel	$O = 4 \cdot \pi \cdot r^2$		G Grundfläche in m ² M Summe der Dreiecksflächen
	$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3$		

Winkelfunktionen

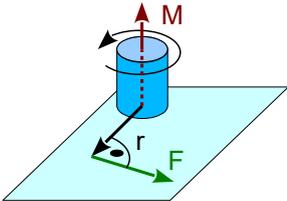
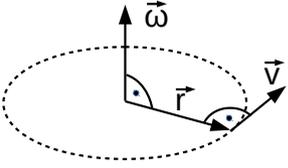
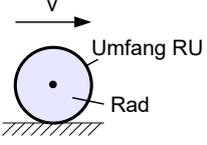
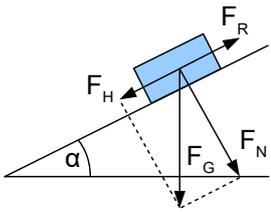
$\sin(\alpha) = \frac{G}{H}$	$\cos(\alpha) = \frac{A}{H}$		H Hypotenuse A Ankathete G Gegenkathete α Winkel zwischen A und H m Steigung
$\tan(\alpha) = \frac{G}{A} = m = \frac{\Delta y}{\Delta x}$			

Lineare Interpolation

	$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \cdot (x - x_1)$	x_1, x_2 gegebene Werte (aus Tabelle)
		y_1, y_2 gegebene Größen (aus Tabelle)
		x Wert für gesuchte Größe (Vorgabe)
		y gesuchte Größe

6 Physikalische Grundformeln und Einheiten

Physikalische Formeln

gleichförmige Bewegung	$v = \frac{s}{t}$		v	Geschwindigkeit in $\frac{m}{s}$
beschleunigte Bewegung	$a = \frac{v}{t}$	$s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$	s	zurückgelegter Weg in m
Arbeit	$W = F \cdot s$		t	Zeit in s
Leistung	$P = \frac{W}{t}$	$P = F \cdot v = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M$	a	Beschleunigung in $\frac{m}{s^2} = \frac{N}{kg}$
Drehmoment	$M = F \cdot r$		W	Arbeit in J = Nm = Ws
Winkelgeschwindigkeit	$v = \omega \cdot r$ $v = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r$		F	Kraft in N = $\frac{kg \cdot m}{s^2}$
			P	Leistung in W = $\frac{Nm}{s}$
			M	Drehmoment in Nm
			ω	Winkelgeschwindigkeit in $\frac{1}{s}$
			n	Drehzahl in $\frac{1}{s}$
			r	Radius in m
				
Drehzahl	$n = \frac{v}{RU}$		RU	Radumfang in m
Wirkungsgrad	$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}}$			
Dichte	$\rho = \frac{m}{V}$		ρ	Dichte in $\frac{kg}{m^3}$
Druck	$p = \frac{F}{A}$	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \frac{N}{m^2}$	m	Masse in kg
Grundgleichung Mechanik	$F = m \cdot a$		V	Volumen in m ³
Gewichtskraft	$F_G = m \cdot g$		p	Druck in $\frac{N}{m^2}$ $\rho_{\text{Luft}} \approx 1,2 \frac{kg}{m^3}$
Hangabtriebskraft	$F_H = F_G \cdot \sin \alpha$		A	Fläche in m ²
Normalkraft	$F_N = F_G \cdot \cos \alpha$		a	Beschleunigung in $\frac{m}{s^2} = \frac{N}{kg}$
Reibungskraft	$F_R = \mu_R \cdot F_N$		F _G	Gewichtskraft in N
Luftwiderstandskraft	$F_W = c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$		g	9,81 $\frac{N}{kg}$ auf der Erde
			F _H	Hangabtriebskraft in N
			F _N	Normalkraft in N (senkrecht zur Reibungsfläche)
			F _R	Reibungskraft in N
			μ_R	Reibungskoeffizient
			F _W	Widerstandskraft in N
			c _w	Widerstandsbeiwert
			v	Windgeschwindigkeit in $\frac{m}{s}$

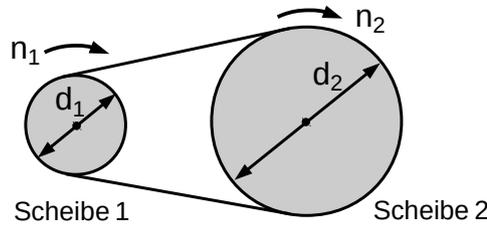
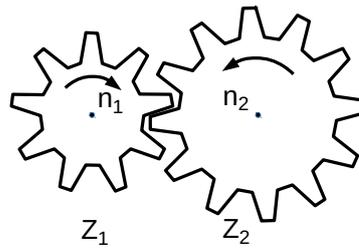
Getriebe, Riemenscheibe, Übersetzungsverhältnis

$$i = \frac{M_2}{M_1} \quad (\text{ideal, } \eta = 1)$$

$$i = \frac{n_1}{n_2}$$

$$i = \frac{z_2}{z_1}$$

$$i = \frac{d_2}{d_1}$$



- i Übersetzungsverhältnis
- z_1, z_2 Zahl der Zähne
- d_1, d_2 Durchmesser der Scheiben
- M_1, M_2 Drehmomente
- n_1, n_2 Drehzahlen
- η Wirkungsgrad

Zehnerpotenzen

Symbol	Name	Wert		
P	Peta	10^{15}	1.000.000.000.000.000	Billiarde
T	Tera	10^{12}	1.000.000.000.000	Billion
G	Giga	10^9	1.000.000.000	Milliarde
M	Mega	10^6	1.000.000	Million
k	Kilo	10^3	1.000	Tausend
h	Hekto	10^2	100	Hundert
da	Deka	10^1	10	Zehn
		10^0	1	Eins
d	Dezi	10^{-1}	0,1	Zehntel
c	Zenti	10^{-2}	0,01	Hundertstel
m	Milli	10^{-3}	0,001	Tausendstel
μ	Mikro	10^{-6}	0,000.001	Millionstel
n	Nano	10^{-9}	0,000.000.001	Milliardstel
p	Piko	10^{-12}	0,000.000.000.001	Billionstel
f	Femto	10^{-15}	0,000.000.000.000.001	Billiardstel

Einheiten

SI-Basiseinheiten			
Name	Einheit	Symbol	Einheitenzeichen
Länge	Meter	l	m
Masse	Kilogramm	m	kg
Zeit	Sekunde	t	s
Stromstärke	Ampere	I	A
Temperatur	Kelvin	T	K
Stoffmenge	Mol	N	mol
Lichtstärke	Candela	I _v	cd

abgeleitete SI-Einheiten				
Name	Einheit	Einheitenzeichen	in anderen SI-Einheiten	in Basiseinheiten
Frequenz	Hertz	Hz		s ⁻¹
Kraft	Newton	N	J/m	m·kg·s ⁻²
Druck	Pascal	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ·kg·s ⁻²
Energie, Arbeit, Wärmemenge	Joule	J	Nm; Ws	m ² ·kg·s ⁻²
Leistung	Watt	W	J/s; VA	m ² ·kg·s ⁻³
elektrische Ladung	Coulomb	C		A·s
elektrische Spannung	Volt	V	W/A; J/C	m ² ·kg·s ⁻³ ·A ⁻¹
elektrische Kapazität	Farad	F	C/V	m ⁻² ·kg ⁻¹ ·s ⁴ ·A ²
elektrischer Widerstand	Ohm	Ω	V/A	m ² ·kg·s ⁻³ ·A ⁻²
elektrischer Leitwert	Siemens	S	1/Ω	m ⁻² ·kg ⁻¹ ·s ³ ·A ²
magnetische Flussdichte	Tesla	T	Vs/m ²	kg·s ⁻² ·A ⁻¹
Induktivität	Henry	H		m ² ·kg·s ⁻² ·A ⁻²
Celsius-Temperatur	Grad Celsius	°C		K

Umrechnungen

$$1 \text{ a} = 365 \text{ d} = 8760 \text{ h}$$

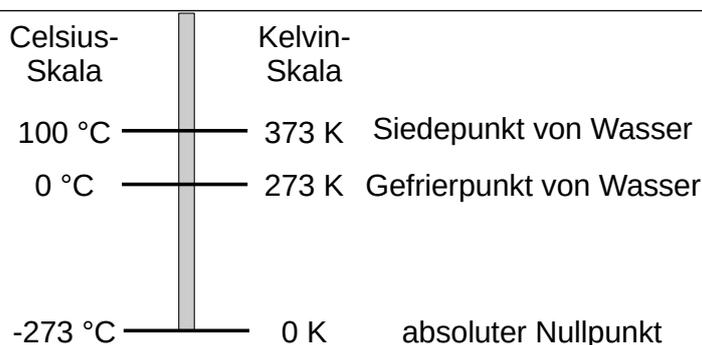
$$1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$$

$$1 \text{ ha} = 100 \text{ ar} = 10\,000 \text{ m}^2$$

a Jahr
 d Tag
 h Stunde
 min Minute
 s Sekunde

ha Hektar
 ar Ar

Temperaturskalen



7 Periodensystem der Elemente

	I	II	IIa	IVa	Va	VIa	VIIa	VIIIa					la	IIa	III	IV	V	VI	VII	VIII
1	1 H Wasserstoff <i>1,0</i>																			2 He Helium <i>4,0</i>
2	3 Li Lithium <i>6,9</i>	4 Be Beryllium <i>9,0</i>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> 13 Al Aluminium <i>27,0</i> </div> Ordnungszahl Elementsymbol Elementname Massenzahl										5 B Bor <i>10,8</i>	6 C Kohlenstoff <i>12,0</i>	7 N Stickstoff <i>14,0</i>	8 O Sauerstoff <i>16,0</i>	9 F Fluor <i>19,0</i>	10 Ne Neon <i>20,1</i>		
3	11 Na Natrium <i>23,0</i>	12 Mg Magnesium <i>24,3</i>											13 Al Aluminium <i>27,0</i>	14 Si Silicium <i>28,0</i>	15 P Phosphor <i>31,0</i>	16 S Schwefel <i>32,0</i>	17 Cl Chlor <i>35,5</i>	18 Ar Argon <i>39,9</i>		
4	19 K Kalium <i>39,1</i>	20 Ca Calcium <i>40,0</i>											21 Sc Scandium <i>44,9</i>	22 Ti Titan <i>46,7</i>	23 V Vanadium <i>50,9</i>	24 Cr Chrom <i>52,0</i>	25 Mn Mangan <i>54,9</i>	26 Fe Eisen <i>55,8</i>	27 Co Cobalt <i>58,9</i>	28 Ni Nickel <i>58,7</i>
5	37 Rb Rubidium <i>85,5</i>	38 Sr Strontium <i>87,6</i>	39 Y Yttrium <i>88,9</i>	40 Zr Zirkonium <i>91,2</i>	41 Nb Niob <i>92,9</i>	42 Mo Molybdän <i>95,9</i>	43 Tc* Technetium <i>(99)</i>	44 Ru Ruthenium <i>101,1</i>	45 Rh Rhodium <i>102,9</i>	46 Pd Palladium <i>106,4</i>	47 Ag Silber <i>107,9</i>	48 Cd Cadmium <i>112,4</i>	49 In Indium <i>114,8</i>	50 Sn Zinn <i>118,7</i>	51 Sb Antimon <i>121,8</i>	52 Te Tellur <i>127,6</i>	53 I Iod <i>126,9</i>	54 Xe Xenon <i>131,3</i>		
6	55 Cs Caesium <i>132,9</i>	56 Ba Barium <i>137,3</i>	57-71 La-Lu Lanthanoide	72 Hf Hafnium <i>178,5</i>	73 Ta Tantal <i>180,9</i>	74 W Wolfram <i>183,8</i>	75 Re Rhenium <i>186,2</i>	76 Os Osmium <i>190,2</i>	77 Ir Iridium <i>192,2</i>	78 Pt Platin <i>195,0</i>	79 Au Gold <i>196,0</i>	80 Hg Quecksilber <i>200,5</i>	81 Tl Thallium <i>204,4</i>	82 Pb Blei <i>207,2</i>	83 Bi Wismut <i>209,0</i>	84 Po* Polonium <i>(210)</i>	85 At* Astat <i>(210)</i>	86 Rn* Radon <i>(222)</i>		
7	87 Fr* Francium <i>(223)</i>	88 Ra* Radium <i>(226)</i>	89-103 Ac-Lr Actinoide	104 Rf* Rutherfordium	105 Db* Dubnium															

8 Typische CO₂-Emissionen und Energieverbräuche

Bezugsgröße	CO ₂ -Ausstoß bei der Herstellung in kg	Bemerkungen
1 t Beton (unbewehrt)	60	CO ₂ -Faktoren BAFA (Mittelwert)
1 t Stahl	2000	CO ₂ -Faktoren BAFA (Mittelwert)
1 t Kupfer	6500	CO ₂ -Faktoren BAFA (Mittelwert)
1 t Aluminium	10000	CO ₂ -Faktoren BAFA (Mittelwert)
PET-Mehrweg-Flaschen pro 1000 L	70	1 Flasche: <u>Transport 258 km, Füllgröße 1 L, Umläufe 15</u>
Mehrweg-Glasflaschen pro 1000 L	80	1 Flasche: <u>Transport 258 km, Füllgröße 0,7 L, Umläufe 40</u>
Weißblechdosen pro 1000 L	300	(DUH)
1 t Papier	1200 / 700	Frischfaser / Recyclingpapier (BAFA)
1 MWh elektrische Energie	1000 / 1100	aus Steinkohle / Braunkohle (Quaschning)
1 MWh elektrische Energie	430	aus Erdgas (Quaschning)
1 MWh elektrische Energie	7,3 / 10,6	aus Windkraft Offshore/Schwachwindstandorte (IBP)
1 MWh elektrische Energie	50	aus Photovoltaik (IBP)
1 MWh elektrische Energie	375	Deutscher Strommix 2020 (UBA)
1 ha Mischwald pro Jahr	- 5.400	Quelle: <u>Bundeswaldinventur</u>

Flugzeug (1000 Personenkilometer)	214	Inlandsflug, 70 % Auslastung ¹⁾
PKW (1000 Personenkilometer)	152	1,4 Personen pro Fahrzeug ¹⁾
Bahn (1000 Personenkilometer)	29	Fernverkehr, 56 % Auslastung ¹⁾
Bahn (1000 Tonnenkilometer)	17	¹⁾
LKW (1000 Tonnenkilometer)	113	¹⁾
Binnenschiff (1000 Tonnenkilometer)	30	¹⁾

Bezugsgröße	Wasserverbrauch bei der Herstellung in L	Bemerkungen
1 kg Weizen	1.100	Quelle: https://de.wikipedia.org/wiki/Virtuelles_Wasser Durchschnittswerte, die sich standortabhängig aus grünem, blauen und grauem Wasser zusammensetzen. Z. B. besteht das virtuelle Wasser bei der Produktion von 1kg Rindfleisch häufig aus überwiegend grünem Wasser (Regenwasser) zur Herstellung der Futtermittel.
1 kg Sojabohnen	1.800	
1 Tasse Kaffee	140	
1 kg Rindfleisch	15.500	
1 Baumwoll-T-Shirt	2.000	

Bezugsgröße	mittlerer Energiebedarf in kWh/a		²⁾ www.co2online.de ³⁾ www.umweltbundesamt.de : 1- / 3+-Personen-Haushalt 68 / 33 m ² /Pers 131 kWh/(m ² ·a) Stand 2018, im Einfamilienhaus je 20 % höhere Werte
	elektrisch	Heizwärme	
1-Personen-Haushalt (Wohnung im Mehrfamilienhaus)	1300 ²⁾	8.900 ³⁾	
4-Personen-Haushalt (Wohnung im Mehrfamilienhaus)	2600 ²⁾	17.000 ³⁾	
4-Personen-Haushalt (Einfamilienhaus)	4000 ²⁾	25.000 ³⁾	

¹⁾ Quelle: www.umweltbundesamt.de, Durchschnittswerte Stand 2019

9 Umweltchemisches Labor und chemisches Rechnen

molare Masse

$$M(X) = \frac{m(X)}{n(X)}$$

$M(X)$ Molare Masse in $\frac{g}{mol}$
 m Masse einer Stoffportion X in g
 $n(X)$ Stoffmenge einer Stoffportion X in mol

molares Volumen

$$V_m = \frac{V(X)}{n(X)}$$

$V_{m,n}$ molares Volumen bei Normbedingungen
 $V_{m,n} = 22,41 \frac{L}{mol}$

Zusammensetzung von Lösungen und Stoffgemischen

Massenkonzentration in $\frac{g}{l}$

$$\beta(X) = \frac{m(X)}{V(Lsg)}$$

Stoffmengenkonzentration in $\frac{mol}{l}$

$$c(X) = \frac{n(X)}{V(Lsg)}$$

$V(Lsg)$... Volumen Lösung

Umrechnung: $\beta = c * M$

Massenanteil

$$w(X) = \frac{m(X)}{m(X) + m(LM)}$$

Volumenanteil

$$\varphi(X) = \frac{V(X)}{V(X) + V(LM)}$$

$m(X)$ Masse gelöste Substanz in g
 $m(LM)$ Masse Lösemittel in g

$V(X)$ Volumen gelöste Substanz in l
 $V(LM)$ Volumen Lösemittel in l

Löslichkeit

$$L(X, \vartheta) = \frac{m_{max}(X)}{V(LM)}$$

$m_{max}(X)$: max. Masse, die sich löst

Leitfähigkeit

Spezifische Leitfähigkeit

$$\kappa = \frac{d}{U \cdot A} \cdot I = \frac{d}{R \cdot A}$$

$$\text{in } \frac{1}{\Omega \cdot cm} = \frac{cm}{\Omega \cdot cm^2} = \frac{S}{cm}$$

d Abstand der Elektroden in cm
 U gemessene Spannung in V
 I gemessener Strom in A
 A Elektrodenfläche in cm^2
 R gemessener Widerstand in Ω

Abscheidegrad (Filter)

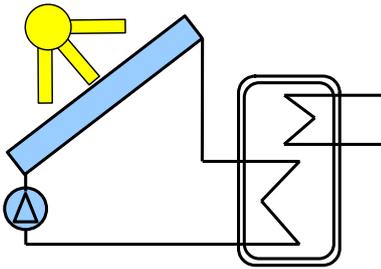
Abscheidegrad

$$\eta = \frac{c_0 - c_{end}}{c_0}$$

η Abscheidegrad
 c_0 Konzentration vor dem Filter
 c_{end} Konzentration nach dem Filter

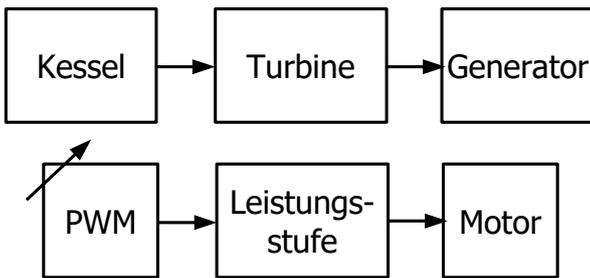
10 Darstellungsarten und Grundbegriffe

Anlagenschema / Technologieschema



Vereinfachte pseudoreale Darstellung mit technischen Symbolen (z.B. Seite 41) und deren Verbindungen (Leitungen, Rohre,...)

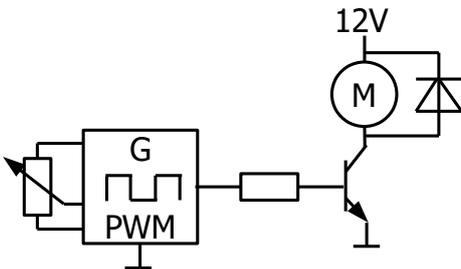
Blockschaltbild



Blöcke = zusammenhängende Baugruppen
Pfeile = Wirkungsrichtungen

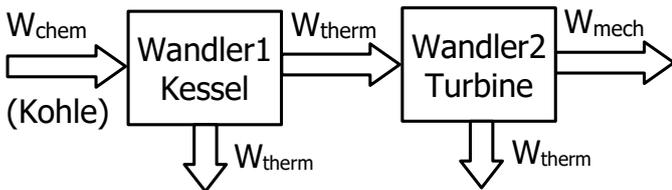
Beispiel: das untere Blockschaltbild könnte die nachfolgende konkrete elektrische „Schaltung“ besitzen.

Schaltung



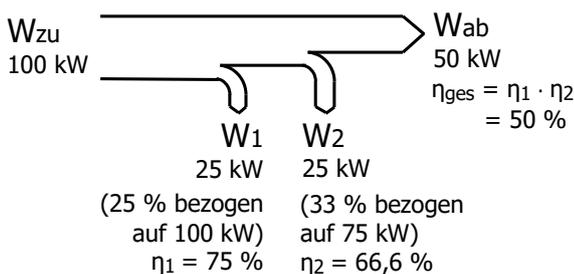
Konkrete Verschaltung von Bauteilen
Elektrotechnische Symbole siehe [Seite 41](#)

energetisches Blockschaltbild



Blöcke = Energiewandler
Pfeile = Wirkungsrichtungen mit Energiearten

Sankeydiagramm / Energieflussdiagramm



Maßstäbliche Darstellung der Energieumwandlungen siehe [Seite 5](#)

Nachhaltigkeit

Nachhaltig ist eine Entwicklung, „die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen.“ (Brundtland)

Treibhausgase (THG, greenhouse gases)

sind strahlungsbeeinflussende gasförmige Stoffe in der Luft, die zum Treibhauseffekt beitragen.

Im Kyoto-Protokoll reglementiert: Kohlendioxid (CO₂, dient als Referenzwert), Methan (CH₄), Distickstoffoxid (Lachgas, N₂O), teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (H-FKW/HFC), perfluorierte Kohlenwasserstoffe (FKW/PFC), Schwefelhexafluorid (SF₆), Stickstofftrifluorid (NF₃).

Dazu: fluorierte Treibhausgase (F-Gase), die wegen der hohen Verweildauer ein hohes Treibhauspotenzial besitzen. Das (relative) Treibhauspotential (Global warming potential, greenhouse warming potential GWP, CO₂-Äquivalent) ist eine Maßzahl, die angibt, wie viel das Treibhausgas im Vergleich zur Menge CO₂ zur globalen Erwärmung beiträgt.

Primärenergie

ist in der Energiewirtschaft die Energie, die mit den ursprünglich vorkommenden Energieformen oder Energiequellen zur Verfügung steht, etwa als Brennstoff (z. B. Kohle oder Erdgas), aber auch als Energieträger wie Sonne, Wind oder Kernbrennstoffe.

Sekundärenergie

ist Energie in Energieträgern, die nicht direkt der Natur entnommen, sondern künstlich hergestellt oder wesentlich verändert wurden. Beispiele: Aus der Primärenergie Wasserkraft wird elektrische Energie als Sekundärenergie erzeugt. Aus der Primärenergiequelle Erdöl werden Sekundärenergieträger wie Benzin und Heizöl hergestellt.

Endenergie

ist die Energieform, die beim Endverbraucher ankommt. Sie kann entweder als Primär- oder Sekundärenergie vorliegen.

Energieamortisation (Energierücklaufzeit, energy payback)

wird angegeben bei der regenerativen Energieerzeugung. Innerhalb der energetischen Amortisationszeit erzeugt die Anlage soviel Energie, wie für die Herstellung der Anlage benötigt wurde. Dabei wird auch der für eine spätere Entsorgung benötigte Energieaufwand berücksichtigt.

Ökologischer Fußabdruck (Ecological Footprint)

ist die Fläche auf der Erde, die notwendig ist, um den Lebensstil und Lebensstandard eines Menschen dauerhaft zu ermöglichen. Das schließt Flächen ein, die zur Produktion oder zur Bereitstellung von Energie benötigt werden, aber auch zur Entsorgung von Müll oder zum Binden des durch menschliche Aktivitäten freigesetzten Kohlenstoffdioxids. Die Werte werden in Globalen Hektar pro Person und Jahr angegeben.

Ökobilanz, Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Assessment LCA)

Bei der Erstellung von Ökobilanzen sind vor allem zwei Grundsätze zu befolgen:

Medienübergreifende Betrachtung: Alle relevanten potenziellen Schadwirkungen auf die Umweltmedien Boden, Luft, Wasser sind zu berücksichtigen.

Stoffstromintegrierte Betrachtung: Alle Stoffströme, die mit dem betrachteten System verbunden sind (Rohstoffeinsätze und Emissionen aus Vor- und Entsorgungsprozessen, aus der Energieerzeugung, aus Transporten und anderen Prozessen) sind zu berücksichtigen.

Die Ökobilanz umfasst die Bereiche Rohstoffgewinnung, Herstellung, Verarbeitung, Transport, Gebrauch, Nachnutzung, Abfall (kommunale Abfallbeseitigung), Abwässerreinigung, Entsorgung.

Untersuchungsrahmen und Systemgrenzen

Es muss zuerst festgelegt werden, wofür die Ökobilanz verwendet werden soll. Die Systemgrenze legt fest, welche Prozesse in die Untersuchungen einbezogen bzw. welche davon ausgeschlossen sind.

Bsp. CO₂-Bilanz einer Tasse Kaffee: Welche Arten der Kaffeeherstellung werden verglichen? Wird neben der Erzeugung der Kaffeebohnen auch die Herstellung der Kaffeemaschine und Arbeitsbedingungen bei der Herstellung berücksichtigt?

Lebenszyklen

Cradle to Grave (von der Wiege bis zur Bahre)

Cradle to Cradle (C2C, von der Wiege bis zur Wiege)

Ein ökoeffektives Produkt, das entweder als biologischer Nährstoff in biologische Kreisläufe zurückgeführt werden kann oder als „technischer Nährstoff“ kontinuierlich in technischen Kreisläufen gehalten wird, erfüllt die C2C-Anforderung.

Well to wheel (WTW, wörtlich: „vom Bohrloch bis zum Rad“) ist die gesamte Wirkkette für die Fortbewegung von der Gewinnung und Bereitstellung der Antriebsenergie bis zur Umwandlung in kinetische Energie. Teilbereiche Well-to-Tank (Energiebereitstellung) und Tank-to-Wheel (Fahrzeugwirkungsgrad).