

**TG Umwelttechnik
Hauptprüfungen
und Übungen**

Lösungsvorschläge

**Abitur 2013/2014
bis
Abitur 2021/2022**

TG Umwelttechnik**Abitur 2013/2014****Hauptprüfung****Lösungsvorschlag**

Arbeitszeit: 270 Minuten

Hilfsmittel: Formelsammlung Umwelttechnik,
Zugelassener Taschenrechner

Stoffgebiet Teil 1: Pflichtbereich
Aufgabe 1: Photovoltaik
Elektromobilität

Aufgabe 2: Wohnklima und Gebäudehülle
Wärme erzeugen
Energieumwandlung in Wärmekraftwerken

Teil 2: Wahlbereich
Aufgabe 3: Elektro- und Hybridfahrzeuge
Abgasreinigung
Wind- und Wasserkraft

Aufgabe 4: Wärme erzeugen
Abgasreinigung
Steuern und regeln

1 Pflichtaufgabe

Photovoltaik

Punkte

1.1 Aufgaben eines Wechselrichters

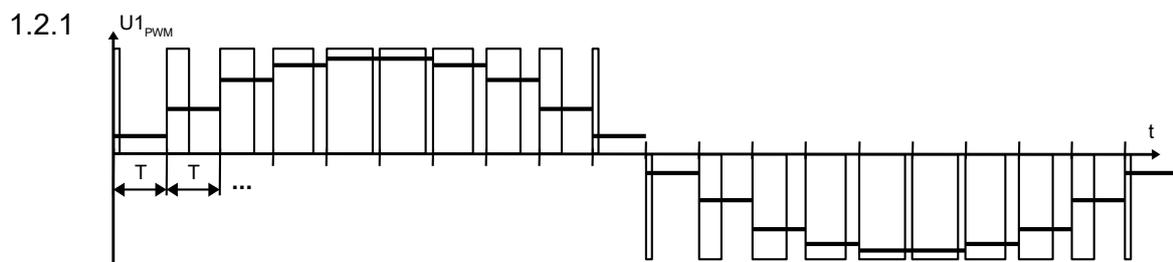
- 1.1.1 - Erzeugung einer sinusförmigen Spannung aus einer Gleichspannung
 - Netzsynchrone Einspeisung
 - Optimale Energieausbeute der Solarmodule (MPP)
 - Trennung der Solaranlage vom Netz bei Netzausfall
 - Trennung der Solaranlage vom Netz bei zu großer oder zu kleiner Netzfrequenz (Überangebot an Energie oder Netzüberlastung)
 - Blindleistungskompensation

2

- 1.1.2 Blindleistung entsteht durch die Speicherwirkung von Leitungen (Kapazität) und durch die induktive Wirkung von Verbrauchern wie z.B. Motoren. Die Entstehung von Blindleistung bewirkt, dass Strom und Spannung nicht mehr phasengleich sind.
 Induktive Blindleistung kann durch Kapazitäten, kapazitive Blindleistung durch Induktivitäten kompensiert werden. Wechselrichter können in gewissen Grenzen Strom und Spannung in der Phase verschieben und dadurch Blindleistung kompensieren.

3

1.2 PWM-Brücke im Wechselrichter



2

sinusförmig eingezeichnete Linie ist ebenfalls richtig.

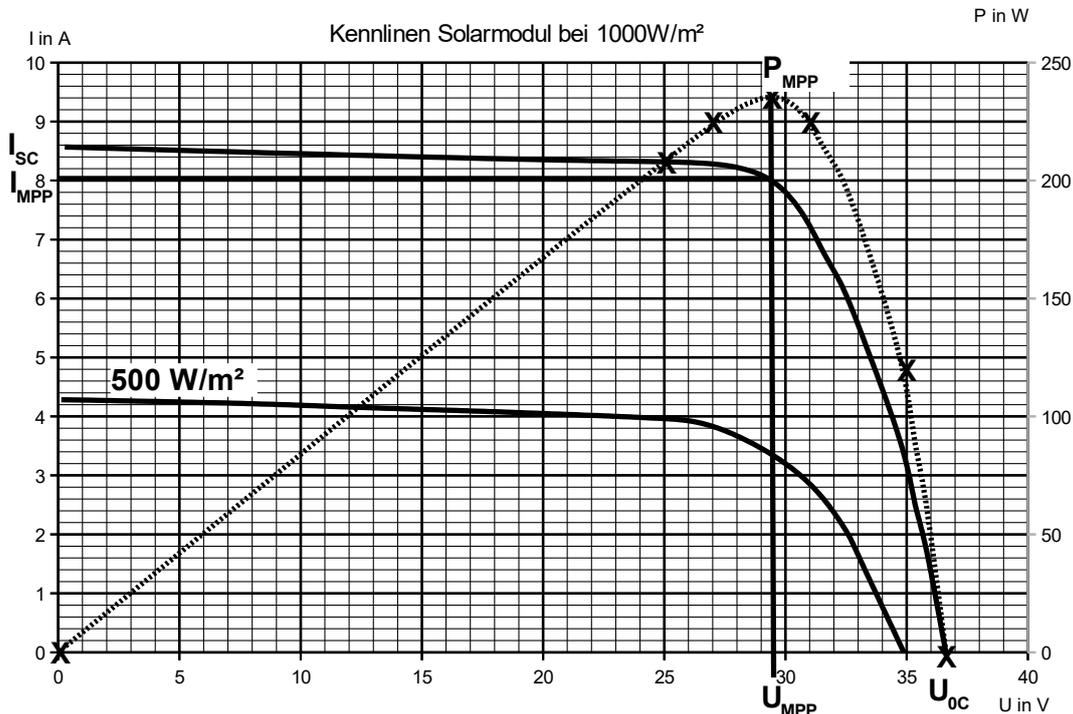
1.3 Kennwerte von Solarzellen

1.3.1

1.3.2

U in V	0	25	27	29,5	31	35	36,6
I in A	0	8,35	8,3	8	7,25	3,5	0
P in W	0	209	224	236	225	122,5	0

3
2



1.3.3 Kennlinienverlauf:

- halbe Bestrahlungsstärke → halber Kurzschlussstrom
- Parallelverschiebung der Kennlinie 1000 W/m² um I_{SC}/2 nach unten.
- Leerlaufspannung ändert sich nur wenig

2

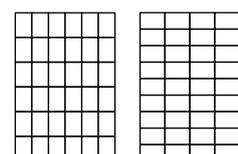
1.3.4 MPP-Tracking bedeutet, dass der Frequenzrichter die Belastung des Solarmoduls immer so ändert, dass die abgegebene Leistung maximal wird. Die Werte von U_{MPP} und I_{MPP} ändern sich ständig mit der Bestrahlungsstärke. Daher kann man das Solarmodul nicht mit einem konstanten Widerstand belasten, sondern der Frequenzrichter muss den Punkt maximaler Energieausbeute ständig „suchen“.

3

1.4 Projektierung der Module auf dem Dach

1.4.1 Bei STC liefert ein Modul 29,5V.
 Für maximal 660V darf man max. $660V / 29,5V = 22$ Module in Reihe schalten.
 Bei NOCT liefert ein Modul 27,5V.
 Für minimal 400V muss man min. $400V / 27,5V = 13,5 \rightarrow 14$ Module in Reihe schalten.
 Auf der Dachfläche haben $6 * 6$ oder $4 * 9 = 36$ Module Platz.

3



Daher schaltet man sinnvollerweise 18 Module in Reihe und parallel dazu noch einmal 18 Module in Reihe.

$$1.4.2 \quad P_{\text{STC}} = 36 \text{ Module} \cdot 235 \text{W}_P = 8460 \text{W}_P$$

Strahlungsleistung durch die Sonne: $6 \cdot 9 \text{m}^2 \cdot 1000 \text{W/m}^2 = 54000 \text{W}$

$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} = \frac{8460 \text{W}}{54000 \text{W}} = 15,7\%$$

Alternative Berechnung bei NOCT:

$$P_{\text{NOCT}} = 36 \cdot 179 \text{W} = 6444 \text{W}$$

Strahlungsleistung durch die Sonne: $6 \cdot 9 \text{m}^2 \cdot 800 \text{W/m}^2 = 43200 \text{W}$

$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} = \frac{6444 \text{W}}{43200 \text{W}} = 14,9\%$$

Elektromobilität: Effektive E-Bike-Nutzung

1.5 Fahrt auf der Ebene

Aufzubringende Leistung bei 25km/h: $230 \text{W} \triangleq 100\%$

$$1 \text{W} \triangleq 0,435\%$$

=> Motor: $130 \text{W} \triangleq 56,5\%$ Motorunterstützung. (Mensch $100 \text{W} \triangleq 43,5\%$)

1.6 Fahrt am Berg

1.6.1

1.6.2 Tretunterstützung 50%: Körper 100W, Motor 100W => $P_{\text{ges}50} = 200 \text{W}$

Abgelesen aus dem Diagramm bei 6% Steigung: $v = 8 \text{ km/h}$

$$v = \frac{s}{t} \Rightarrow t_{50} = \frac{s}{v} = \frac{10 \text{km}}{8 \text{km/h}} = 1,25 \text{h}$$

$$W_{50} = P_{\text{ges}50} \cdot t = 200 \text{W} \cdot 1,25 \text{h} = 250 \text{Wh}$$

Tretunterstützung 75%: Körper 100W, Motor 300W => $P_{\text{ges}75} = 400 \text{W}$

Abgelesen aus dem Diagramm bei 6% Steigung: $v = 15,3 \text{ km/h}$

$$t_{75} = \frac{s}{v} = \frac{10 \text{km}}{15,3 \text{km/h}} = 0,654 \text{h}$$

$$W_{75} = P_{\text{ges}75} \cdot t = 400 \text{W} \cdot 0,654 \text{h} = 261,6 \text{Wh}$$

1.6.3 Da der Körper in beiden Fällen 100W leistet, wird bei 75% Tretunterstützung insgesamt die doppelte Leistung aufgebracht gegenüber 50% Tretunterstützung. Der Motor muss bei 75% aber 3 mal soviel Leistung aufbringen, daher ist der E-Bike-Fahrer zwar viel schneller zu Hause, dem Akku wird aber auch viel mehr Energie entnommen. Um die Akku-Reichweite zu erhöhen, muss er langsamer fahren. Bei der langsameren Fahrt muss der Körper dann aber insgesamt mehr Energie aufbringen (weil er die gleiche Leistung von 100W während einer längeren Zeit aufbringt).

2

2

1

3

2

Σ 30

2 Pflichtaufgabe

2.1 Sanierung eines Wohn- und Geschäftshauses

Punkte

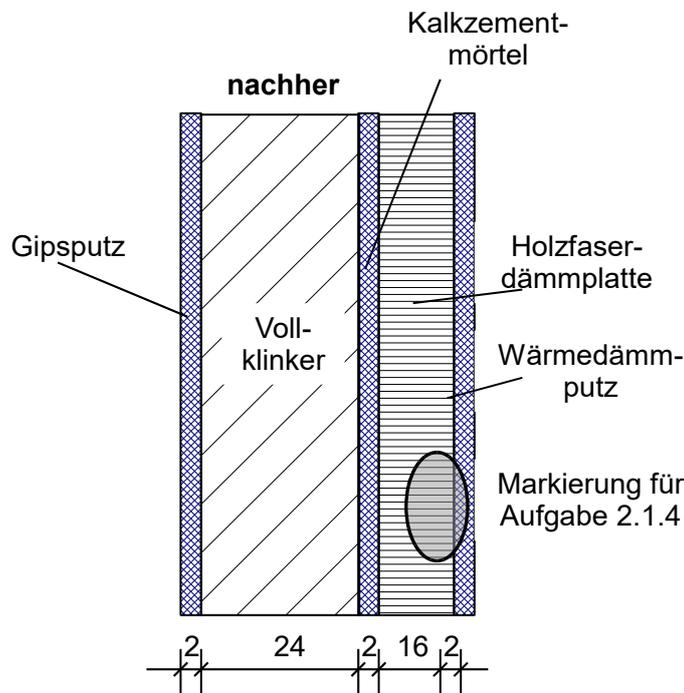
2.1.1 Vorteil: Entfernung einer Wärmebrücke. „Kühlrippeneffekt“ durch das auskragende Bauteil entfällt, die Wand kann komplett gedämmt werden.

2

Nachteil: Sommerlicher Wärmeschutz wird vermindert durch fehlende Abschattung. Dadurch können Probleme durch zu hohe Aufheizung der Räume sowie durch das Ausbleichen der (einzelnen) Schuhe entstehen.

2.1.2

2



2.1.3 $U = \frac{1}{R_T}$, $R_T = R_{si} + \frac{d_{\text{Putz},i}}{\lambda_{\text{Putz},i}} + \frac{d_{\text{Mauer}}}{\lambda_{\text{Mauer}}} + \frac{d_{\text{Putz},a}}{\lambda_{\text{Putz},a}} + R_{sa}$

4

vorher: $R_T = 0,13 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} + \frac{0,02 \text{ m}}{0,51 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,24 \text{ m}}{0,81 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,02 \text{ m}}{1 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + 0,043 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} = 0,529 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$

$U = \frac{1}{0,529 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}} = 1,892 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$

nachher: $R_T = 0,13 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} + \frac{0,02 \text{ m}}{0,51 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,24 \text{ m}}{0,81 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,02 \text{ m}}{1 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,16 \text{ m}}{0,045 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,02 \text{ m}}{0,06 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + 0,043 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} = 4,417 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$

Achtung: Der alte Außenputz bleibt erhalten!

$U = \frac{1}{4,417 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}} = 0,226 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$

$$\frac{\dot{Q}_{\text{nachher}}}{\dot{Q}_{\text{vorher}}} = \frac{U_{\text{nachher}}}{U_{\text{vorher}}} = \frac{0,226 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}}{1,892 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}} = 0,120 = 12,0 \%$$

(Hinweis: $\dot{Q} = A \cdot \frac{\lambda}{d} \cdot \Delta T = A \cdot U \cdot \Delta T$)

Damit hat sich der Wärmestrom um 88 % verringert.

- 2.1.4 im h,x-Diagramm ablesen: ϑ_T ca. 12,3°C (am Schnittpunkt der Kurven $\vartheta = 20^\circ\text{C}$, $\varphi = 60\%$, senkrecht nach unten bis zur Kurve $\varphi = 100\%$, ϑ_T ablesen)

4

rechnerisch:

aus Tabelle: Wasserdampf-sättigungsdruck $p_s = 2340 \text{ Pa} = 23,4 \text{ mbar}$,

Annahme: $p_{\text{amb}} = 1 \text{ bar}$

$$p_D = 0,6 \cdot 23,4 \text{ mbar} = 14,04 \text{ mbar}$$

aus Tabelle: $\vartheta_T = 12,0^\circ\text{C}$

Bis zur Dämmschicht setzen die Baustoffe dem Wärmestrom keinen großen Widerstand entgegen. Der Temperaturabfall ist bis dahin gering. Im Bereich der Dämmschicht ist der Temperaturabfall sehr hoch. Auf der Außenseite der Dämmschicht entspricht die Temperatur nahezu der Außentemperatur. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Taupunkttemperatur im Bereich der Dämmschicht unterschritten wird, ist daher sehr hoch. (Markierung s. Aufgabe 2.1.2)

Die in der Innenluft enthaltene Luftfeuchtigkeit gelangt nicht in den Bereich, in dem der Taupunkt unterschritten wird, da die innenseitig angeordneten Baustoffe als Dampfbremse wirken.

- 2.1.5 Der neue Kessel arbeitet unter Ausnutzung der Kondensationswärme des Wasseranteils im Abgas. Das anfallende Kondensat muss abgeleitet werden.

2

- 2.1.6 $2 \text{ C}_{10}\text{H}_{18} + 29 \text{ O}_2 + 116 \text{ N}_2 \rightarrow 20 \text{ CO}_2 + 18 \text{ H}_2\text{O} + 116 \text{ N}_2$

3

$$\lambda = 1,0: \varphi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{18}{20 + 18 + 116} = 0,12, \quad \varphi_{\text{CO}_2} = 0,13, \quad \varphi_{\text{N}_2} = 0,75$$

Lösung mit linearer Interpolation, Werte aus der Wasserdampf-tafel:

$$\vartheta_T = 45,83^\circ\text{C} + \frac{54^\circ\text{C} - 45,83^\circ\text{C}}{0,15 \text{ bar} - 0,10 \text{ bar}} \cdot (0,12 \text{ bar} - 0,10 \text{ bar}) = 49,1^\circ\text{C}$$

- 2.1.7 Bei zunehmendem Luftüberschuss nimmt der prozentuale Wassergehalt im Abgas bezogen auf das Gesamtabgasvolumen ab. Der Wasserdampfpartialdruck sinkt, somit sinkt auch die Taupunkttemperatur.

1

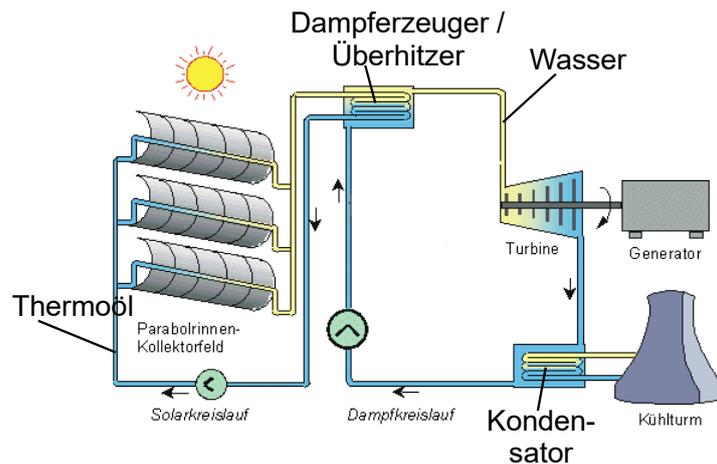
2.2 Solarthermisches Kraftwerk

2.2.1 Es handelt sich bei der im Schaubild dargestellten Anlage um ein System mit Sonnenstrahlungsbündelung (über Konzentratoren wie z. B. Parabolspiegel).

5

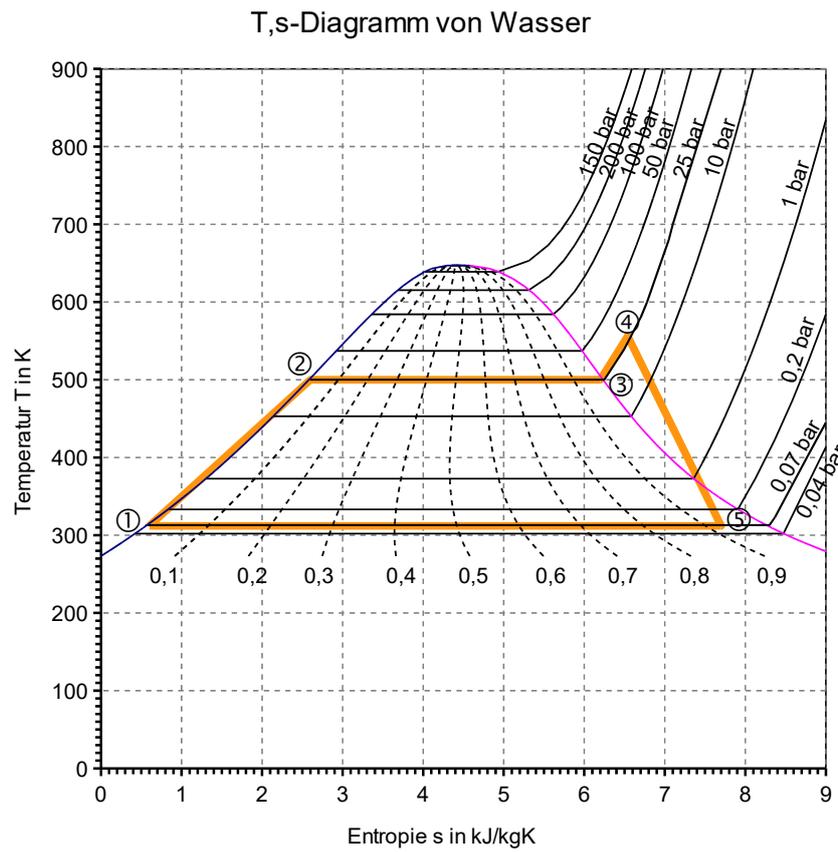
Die konzentrierte Sonnenstrahlung erhitzt das sich in einem Solarkreislauf befindliche Thermoöl. Das erwärmte Thermoöl aus dem Solarkreislauf trifft in einem Dampferzeuger / Überhitzer auf Arbeitswasser, das sich in einem Dampfkreislauf befindet.

Der dort erzeugte überhitzte Dampf wird über eine Dampfturbine mit nachgeschaltetem Stromgenerator zur Stromerzeugung geleitet. Der abgekühlte Dampf wird in einem Kondensator rückverflüssigt und erneut in den Dampfkreislauf geleitet.



2.2.2

2



2.2.3 zugeführte Wärme (Punkt 1→4): Trapezflächen (1 → 2, 3 → 4) und Rechteckfläche (2 → 3) näherungsweise aus dem Diagramm ermittelt:

3

$$q_{zu} = \frac{(315+500)K}{2} \cdot (2,6-0,5) \frac{kJ}{kg \cdot K} + 500K \cdot (6,2-2,6) \frac{kJ}{kg \cdot K} + \frac{(500+550)K}{2} \cdot (6,5-6,2) \frac{kJ}{kg \cdot K} = 2813 \frac{kJ}{kg}$$

abgeführte Wärme (Punkt 5→1): Rechteckfläche näherungsweise aus dem Diagramm ermittelt: $q_{ab} = 315 K \cdot (7,6 \frac{kJ}{kg \cdot K} - 0,5 \frac{kJ}{kg \cdot K}) = 2236,5 \frac{kJ}{kg}$

2.2.4 $w_{Nutz} = q_{zu} - q_{ab} = 576,5 \frac{kJ}{kg}$

2

$$\eta_{th} = \frac{w_{Nutz}}{q_{zu}} = 0,2 = 20 \%$$

3 Wahlaufgabe Windpumpspeicherkraftwerk und Hybrid-PKW

Punkte

3.1 Pumpspeicherkraftwerk

3.1.1

2

$$W_{pot} = m \cdot g \cdot h = \rho \cdot V \cdot g \cdot h$$

$$W_{pot} = \frac{1000 \text{ kg}}{m^3} \cdot 160000 \text{ m}^3 \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 250 \text{ m}$$

$$W_{pot} = 392,4 \cdot 10^9 \text{ Ws} = 109 \text{ MWh}$$

$$\eta_P = \frac{W_e}{W_{pot}} = \frac{70 \text{ MWh}}{109 \text{ MWh}} = 0,642$$

- 3.1.2 Mit den Angaben $h = 250 \text{ m}$ und Durchfluss $\dot{V} = 5,6 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ ergeben sich im Diagramm „Turbinen Einsatzgebiete“ in der Formelsammlung die Möglichkeiten eine Pelton oder eine Francis Turbine einzusetzen. Betrachtet man aber die Turbinenwirkungsgrade, kann nur die Pelton Turbine über einen großen Abflussbereich einen guten Wirkungsgrad erzielen. Somit ist die Pelton Turbine die richtige Wahl.

3.2 Windkraftanlage

- 3.2.1 Die Leistungskurve steigt steil an, da die Windleistung mit v^3 ansteigt. Bei 4,5 MW flacht die Kurve ab, da sie durch die Maximalleistung des Generators begrenzt ist.

3.2.2
$$P_{Wind} = \frac{1}{2} \rho * A * v^3$$

$$\text{mit } A = r^2 * \pi = \frac{d^2}{4} * \pi = \frac{(123 \text{ m})^2}{4} * \pi = 11,9 * 10^3 \text{ m}^2$$

$$P_{Wind} = \frac{1}{2} * 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 11,9 * 10^3 \text{ m}^2 * \left(11 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 = 9,5 \text{ MW}$$

$$c_p = \frac{P_{Nutz}}{P_{Wind}} \text{ mit } P_{Nutz} = \frac{P_e}{\eta} = \frac{4,5 \text{ MW}}{0,95} = 4,74 \text{ MW}$$

$$c_p = \frac{4,74 \text{ MW}}{9,5 \text{ MW}} = 0,5$$

- 3.2.3 Aus Diagramm mit $E \rightarrow \infty \Rightarrow \lambda = 5$
Da die Schnelllaufzahl interpoliert werden muss sind abweichende Werte ebenso gültig.

$$\lambda = \frac{\pi * d * n}{v} \Rightarrow n = \frac{\lambda * v}{\pi * d} = \frac{5 * 11 \text{ m/s}}{\pi * 123 \text{ m}} = 142,3 * 10^{-3} \frac{1}{\text{s}}$$

In Umdrehungen pro Minute:

$$n = 142,3 * 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} * \frac{60 \text{ s}}{\text{min}} = 8,5 \frac{1}{\text{min}}$$

- 3.2.4

$$W_{Jahr} = (P_1 * h_1 + P_2 * h_2 + \dots + P_n * h_n) * T$$

$$W_{Jahr} = (0,25 \text{ MW} * 0,15 + 0,500 \text{ MW} * 0,2 + 1,5 \text{ MW} * 0,25 + 3 \text{ MW} * 0,2 + 4,5 \text{ MW} * 0,1 + 4,5 \text{ MW} * 0,05) * 365 * 24 \text{ h} = 15,7 \text{ GWh}$$

3.3 Gesamtanlage

- 3.3.1 Durch die Kombination beider Kraftwerkstypen kann die Windenergie zwischengespeichert werden. Energie kann dann ins Netz abgegeben werden, wenn sie benötigt wird. Grundlastfähig bedeutet, das Kraftwerk ist in der Lage konstant Energie ins Netz abzugeben.

3.3.2 Der durchschnittliche Tagesertrag der Windkraftanlage kann über den Mittelwert abgeschätzt werden

$$W_T = \frac{W_{Jahr}}{365} = \frac{15,7 \text{ GWh}}{365} = 43 \text{ MWh}$$

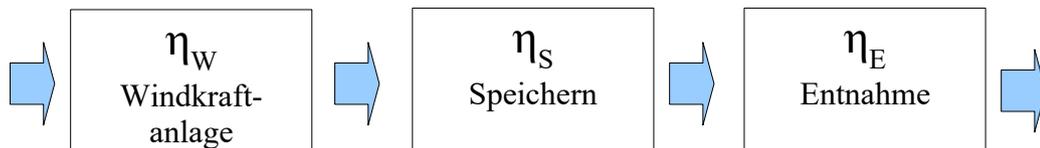
Mit einem maximalen elektrischen Speichervermögen von $W_E = 70 \text{ MWh}$ folgt

$$t = \frac{W_e}{W_t} = \frac{70 \text{ MWh}}{43 \text{ MWh}} = 1,63$$

Damit ergibt sich eine Speicherkapazität von 1,6 Tagen.

2

3.3.3



Der Wirkungsgrad der WKA kann aus dem Leistungsbeiwert errechnet werden.

$$\eta_W = \frac{c_p}{c_{p, \text{Betz}}} = \frac{0,5}{0,593} = 0,84$$

Der Wirkungsgrad Entnahme wurde in der ersten Teilaufgabe ermittelt. Er kann ähnlich zum Wirkungsgrad Speichern angenommen werden. Andere Abschätzungen sind auch zulässig.

$$\eta_S \simeq \eta_E = 0,642$$

Mit diesen Annahmen ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von

$$\eta_g = \eta_w \cdot \eta_s \cdot \eta_e = 0,84 \cdot 0,64 \cdot 0,64 = 0,34$$

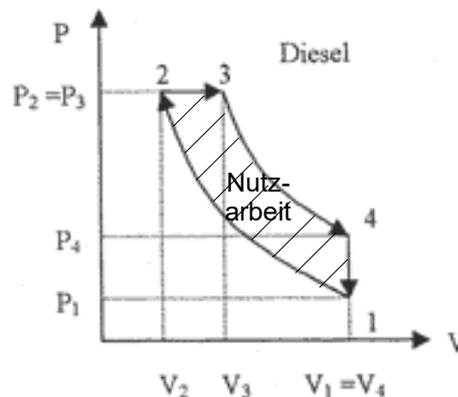
2

3.4 Diesel-Hybrid-PKW

3.4.1

- 1 → 2: Kompression
- 2 → 3: Expansion
- 3 → 4: Expansion
- 4 → 1: Druckminderung

(Markierung der Nutzarbeit für Aufgabe 3.4.3.)



Punkte

2

3.4.2

$$p_1 \cdot V_1 = m_1 \cdot R_i \cdot T_1 \Rightarrow V_1 = \frac{m_1 \cdot R_i \cdot T_1}{p_1}$$

$$V_1 = \frac{1,02 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 343 \text{ K}}{1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 1 \text{ L}$$

Alternative: 12fache Verdichtung $\Rightarrow \frac{V_1}{V_2} = 12$

1

3.4.3 W_{Nutz} Fläche zwischen den Kurven im p,V-Diagramm (s. 3.1.1)

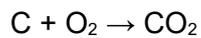
$$W_{\text{zu}} = W_{12} = - \frac{m \cdot R_i}{1 - \kappa} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$= \frac{1,02 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 287 \frac{\text{Nm}}{\text{kg} \cdot \text{K}}}{1 - 1,4} \cdot (928 \text{ K} - 343 \text{ K}) = 428 \text{ J}$$

$$W_{\text{Nutz}} = |W_{\text{ab}}| - |W_{\text{zu}}| = |-1411 \text{ J}| - 428 \text{ J} = 983 \text{ J}$$

3.4.4 Die Dieselrußpartikel werden eingeatmet, sie sind lungengängig und erhöhen das Lungenkrebsrisiko. Die Dieselrußpartikel gelangen über die Lunge oder über die Haut ins Blut und werden bis ins Gehirn getragen.

3.4.5 Drucksensoren im Filter erkennen einen erhöhten Staudruck der Abgase im Filter. Sie veranlassen, dass mit Hilfe des Edelmetallkatalysators der Kohlenstoff bei Abgastemperaturen von mindestens 500 °C zu Kohlendioxid verbrannt wird (z. B. Autobahnfahrten).



4

1

2

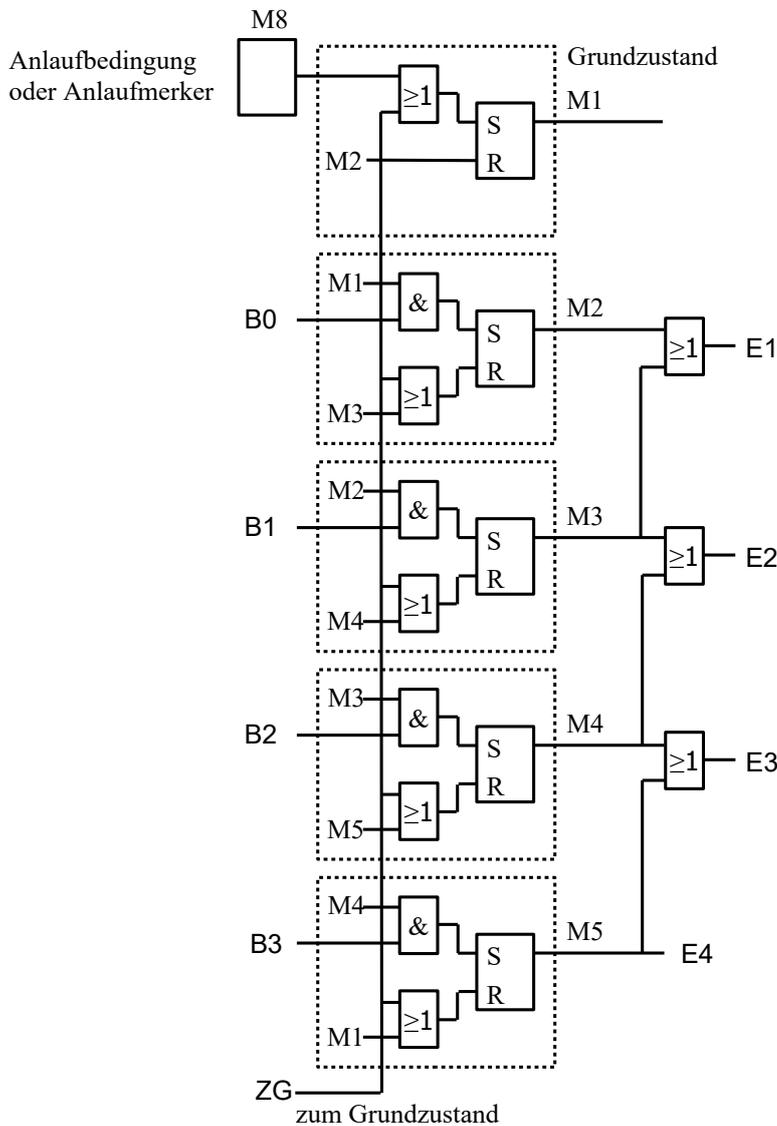
30

4 Wahlaufgabe

4.1 Holzhackschnitzelfeuerung

Punkte

3



4.1.1
$$\dot{m}_{\text{real}} = \frac{\dot{Q}}{H_i \cdot \eta_K} = \frac{50 \text{ kW}}{4,5 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \cdot 0,91} = 12,2 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

4.1.2 Luftverhältniszahl λ : Verhältnis der wirklich zugeführten Luftmenge zur stöchiometrisch erforderlichen Mindestluftmenge

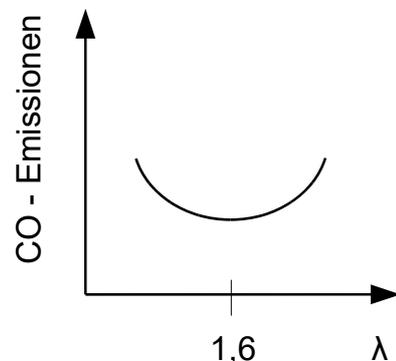
2

4.1.3
$$\lambda = \frac{L_{\text{tats}}}{L_{\text{min}}} \Rightarrow L_{\text{tats}} = \lambda \cdot L_{\text{min}} = 1,6 \cdot 5 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 8 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

2

4.1.4 Annähernd vollständige Verbrennung bei $\lambda = 1,5$
 λ zu klein: unvollständige Verbrennung \Rightarrow hohe CO-Emissionen
 λ zu groß: Abkühlung der Flamme \Rightarrow schlechtere Verbrennung \Rightarrow hohe CO-Emissionen

4



4.2 Solarthermieanlage

4.2.1 Die Ausrichtung nach Süden ist optimal, die maximale Ausnutzung der Einstrahlung ist möglich, ein Korrekturfaktor muss nicht berücksichtigt werden.

3

70° Kollektorneigung ist für die beschriebene Anwendung zu steil. Die Kollektoren sollten daher relativ flach angeordnet werden, z. B. Neigungswinkel 30°, weil die Auslegung für den Sommerbetrieb durchgeführt wurde, wenn die Sonne hoch am Himmel steht.

4.2.2 Vakuumröhrenkollektoren wären für die beschriebene Anwendung zu teuer. Schwimmbadabsorber haben für die beschriebene Anwendung einen zu schlechten Wirkungsgrad. Sinnvollerweise sollten Flachkollektoren eingesetzt werden.

2

Andere gut begründete Antworten sind möglich.

4.2.3
$$A_K = \frac{Q_{\min} \cdot f}{q_{d,\max} \cdot \eta_{Anl}}$$

4

$$Q_{\min} = m \cdot c \cdot \Delta T = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{d}} \cdot 1,163 \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 50 \text{ K} = 58,15 \frac{\text{kWh}}{\text{d}}$$

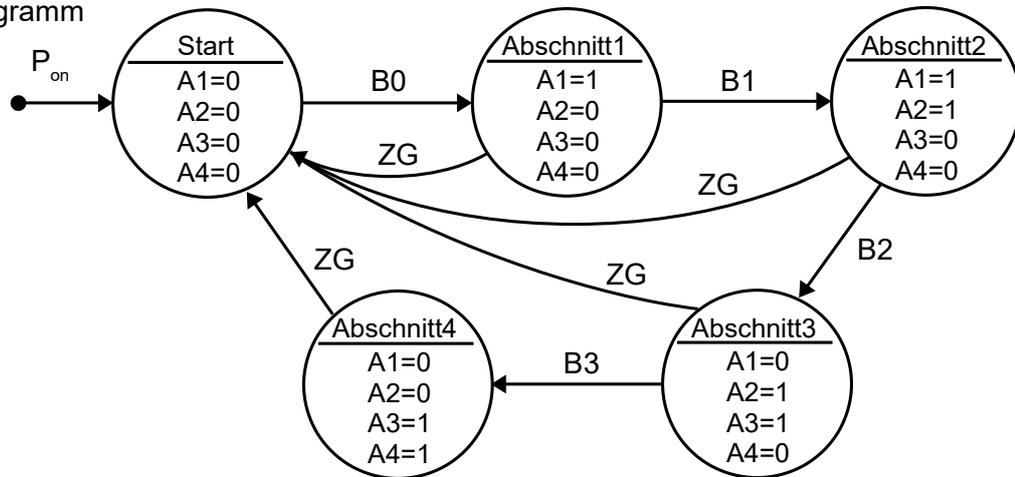
$$A_K = \frac{58,15 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \cdot 1}{4,0 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \cdot 0,5} = 29,1 \text{ m}^2$$

4.3 Steuerung für energiesparende Flurbeleuchtung

4.3.1 Grafische Darstellung

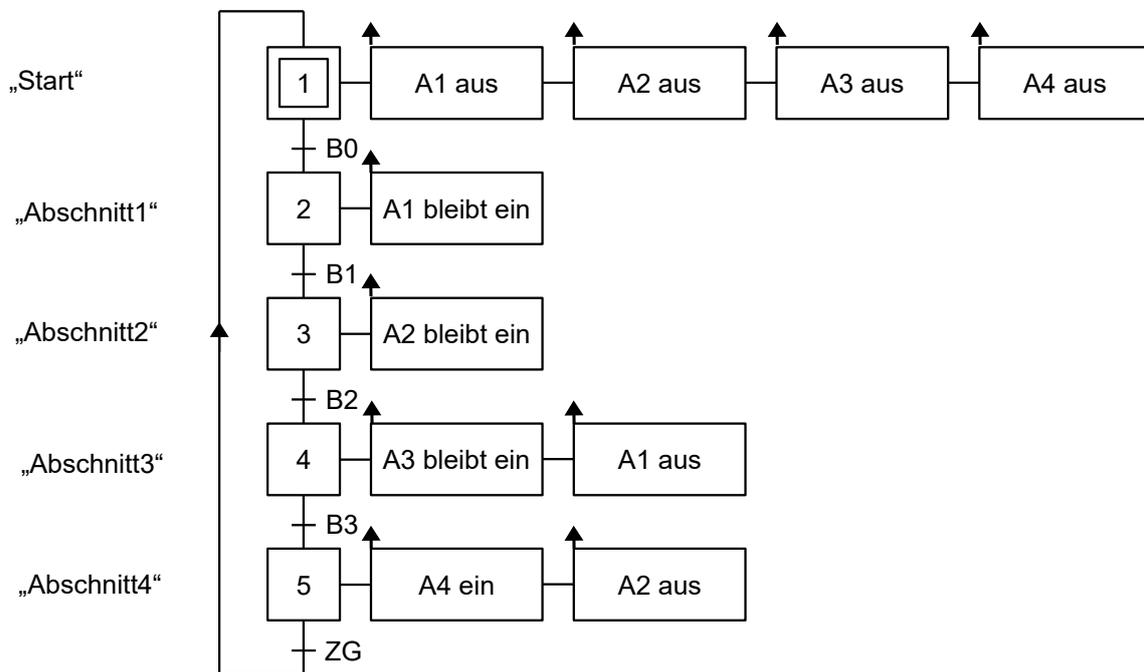
5

Zustandsdiagramm



oder

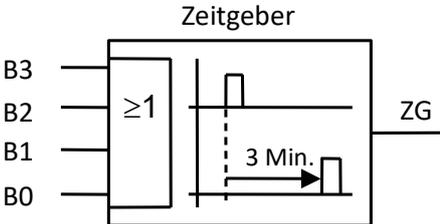
GRAFCET



Bemerkung: Bei ZG=1 fährt die Anlage in den Grundzustand

4.3.2 Schrittkette

5



TG Umwelttechnik

2013/2014

Übung

Lösungsvorschlag

Arbeitszeit: 270 Minuten

Stoffgebiet: Teil 1: Pflichtbereich

Aufgabe 1: Wind- und Wasserkraft

Aufgabe 2: Wohnklima und Gebäudehülle
Wärme erzeugen
Abgasreinigung

Teil 2: Wahlbereich

Aufgabe 3: Wohnklima und Gebäudehülle
Brennstoffzelle
Steuern und regeln

Aufgabe 4: Wärme erzeugen
Elektromobilität
Photovoltaik
Elektro- und Hybridfahrzeuge

1 Pflichtaufgabe**Energieübertragung**

$$1.1.1 \quad R = \rho \cdot \frac{L}{A} \rightarrow A = \rho \cdot \frac{L}{R} = 0,0178 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot \frac{1000\text{m}}{0,0553 \Omega} = 322 \text{mm}^2$$

$$1.1.2 \quad \cos \varphi = 1$$

$$P_{\text{ges}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\vartheta) \rightarrow I = \frac{P_{\text{ges}}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos(\vartheta)} = \frac{100 \text{MW}}{\sqrt{3} \cdot 150 \text{kV} \cdot 1} = 384,9 \text{A}$$

$$P_{\text{Verlust}} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{\text{Leiter}} = 3 \cdot (384,9 \text{A})^2 \cdot 0,0553 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 50 \text{km} = 1,229 \text{MW}$$

$$1.1.3 \quad I = \frac{P_{\text{ges}}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos(\varphi)} = \frac{100 \text{MW}}{\sqrt{3} \cdot 33 \text{kV} \cdot 1} = 1749,6 \text{A}$$

$$P_{\text{Verlust}} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{\text{Leiter}} = 3 \cdot (1749,6 \text{A})^2 \cdot 0,0553 \frac{\Omega}{\text{km}} \cdot 50 \text{km} = 25,39 \text{MW}$$

Man erhält 20 mal höhere Verluste bei Mittelspannung 33kV als bei Hochspannung 150kV.

1.1.4 Zusätzliche Verluste entstehen durch kapazitive Blindleistung, weil das Seekabel wie ein großer Kondensator wirkt. Zusätzliche Blindströme, die nur "zum Auf- und Entladen" des Kabels dienen (Auf- und Abbau des elektrischen Feldes) vergrößern den Gesamtstrom. Dadurch steigen auch die ohm'schen Leitungsverluste.

1.1.5 Bei der HGÜ entsteht keine Blindleistung wie bei der Drehstromübertragung. Allerdings kann Gleichspannung nicht einfach auf eine andere Spannung transformiert werden. Bei den notwendigen Umrichtern entsteht auch Verlustleistung, so dass sich die HGÜ bei Freileitungen preislich erst bei größeren Entfernungen lohnt. Die Drehstrom-Übertragung über Seekabel ist jedoch auf ca. 100km begrenzt, da sonst die Blindleistung zu groß wird. Bei Entfernungen > 100km kann hier die HGÜ sinnvoll sein.

Bemessung eines Laufwasserkraftwerks**1.2 Niedrigwasser**

$$1.2.1 \quad P_{\text{hydro}} = \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot h \cdot \dot{V} = \frac{1000 \text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 12,5 \text{m} \cdot 5 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 613,1 \text{kW}$$

$$1.2.2 \quad P_{\text{nutz}} = \eta_{\text{Gen}} \cdot \eta_{\text{maxTurbine}} \cdot P_{\text{hydro}} = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 613,1 \text{kW} = 496,6 \text{kW}$$

$$\text{Anzahl}_{\text{Haushalte}} = \frac{P_{\text{Nutz}}}{P_{\text{Grundlast}}} = \frac{496,6 \text{kWh}}{0,180 \text{kWh}} = 2759$$

1.3 Normalwasser

5

$$1.3.1 \quad \dot{V} = 16 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \quad h = 12\text{m} \quad P_{\text{hydro}} = \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot h \cdot \dot{V} \Rightarrow P_{\text{hydro}} \sim \dot{V}$$

=> Es reicht aus, die Volumenströme mit den Wirkungsgraden zu multiplizieren und diese Ergebnisse zu vergleichen, die erzeugte Leistung proportional zu diesem Wert.

mögliche Verteilung der Volumenströme:

a) 5 / 5 / 5 / 1 oder b) 5 / 5 / 3 / 3 oder c) 4 / 4 / 4 / 4 (oder d) 5 / 3,6 / 3,6 / 3,6)

Vorgehen: normierte Abflüsse bestimmen und dann die Wirkungsgrade aus der Formelsammlung entnehmen. $5\text{m}^3/\text{s} \triangleq 100\% \Rightarrow 1\text{m}^3/\text{s} \triangleq 20\%$

Durchfluss im m ³ /s	normierter Abfluss	Wirkungsgrad
5	100,00%	0,9
4	4 * 20% = 80%	0,82
3,6	3,6 * 20% = 72%	0,72
3	3 * 20% = 60%	0,53
1	1 * 20% = 20%	0

$$P_{\text{elekt}} = \eta \cdot P_{\text{hydro}} \sim 5 \cdot 0,9 + 5 \cdot 0,9 + 5 \cdot 0,9 + 1 \cdot 0 = 13,5 \quad \text{maximale Leistung!}$$

$$5 \cdot 0,9 + 3,6 \cdot 0,72 + 3,6 \cdot 0,72 + 3,6 \cdot 0,72 = 12,3$$

$$5 \cdot 0,9 + 5 \cdot 0,9 + 3 \cdot 0,6 + 3 \cdot 0,6 = 12,2$$

$$4 \cdot 0,82 * 4 = 13,1$$

Die maximale Leistung erhält man, wenn man nur 4 Maschinensätze einsetzt und das restliche Wasser "über das Wehr" laufen lässt. (Wirkungsgrad 0 bedeutet, dass die Turbine steht)

1.4 Hochwasser

1

Der Wasserstand des Oberwassers ändert sich durch fest Höhe des Wehrs kaum, der Wasserstand des Unterwassers ist jedoch deutlich erhöht. Dadurch sinkt die Fallhöhe. Die erzeugte Leistung ist proportional zur Fallhöhe und nimmt daher bei Hochwasser ab.

$$P_{\text{hydro}} = \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot h \cdot \dot{V}$$

Rotor einer Windkraftanlage

1.5 Vergleich Rotoren

1.5.1	Holländische Windmühle	Moderne WKA
	Flache Struktur	Flügelprofil
	Gerade eckige Form	Verdreht mit unterschiedlicher Breite

1

1.5.2 Unter dem Leistungsbeiwert versteht man das Verhältnis von nutzbarer zu im Wind enthaltener Leistung in der von dem Rotor überstrichenen Fläche.

2

Aus der Tabelle in der Sektion „Windturbinenformen mit Leistungsbeiwert und Schellaufzahl“ der Formelsammlung können folgende Werte entnommen werden.

$$c_{p, \text{Holland}} = 0,28 \quad \text{und} \quad c_{p, 3\text{-Blatt}} = 0,52$$

1.6 Orientierung des Rotors

1.6.1 Beide Rotoren drehen sich in Richtung 2

1

1.6.2 Mit dem Rotor B kann dem Wind mehr Energie entnommen werden. Die sich aus der Rotationsbewegung und der Windrichtung ergebende Strömung erzeugt an diesem Profil eine zusätzliche Auftriebskraft.

2

1.7 Pitcheinstellung und Rotorform

1.7.1 Zu berücksichtigen ist die effektive Windrichtung, die sich aus realer Windrichtung und dem Wind durch die Drehbewegung des Rotors zusammensetzt. Während des Anlaufens ist der Einfluss des Winds durch die Drehbewegung zunächst gering und die effektive Windrichtung entspricht nahezu der wirklichen Windrichtung. Dies wird durch einen großen Einstellwinkel ϑ berücksichtigt.

2

1.7.2 Je nach Entfernung vom Zentrum der Drehbewegung herrscht eine andere Anströmgeschwindigkeit auf das Flügelprofil. Dadurch ist auch ein anderer Winkel nötig. Das Blatt muss daher in sich verdreht sein um die optimale Leistung aus dem Wind nehmen zu können.

2

Σ30

2 Pflichtaufgabe**2.1 Feriendorf – bauliche Überlegungen**

Punkte

- 2.1.1 Südausrichtung der hauptsächlich genutzten Räume mit großen Fensterflächen \Rightarrow passive solare Energiegewinne. Sonnenschutz vorsehen!

2

Günstiges (möglichst geringes) A/V-Verhältnis, um die Wärmeübertragungsflächen zu minimieren.

Weitere: Wärmebrücken vermeiden, um Transmissionswärmeverluste zu verringern, Vollwärmeschutz einplanen, Auswahl einer effizienten Heizungsanlage...

- 2.1.2 Wandquerschnitt 1 \rightarrow Beschreibung B

2

Begründung: Hoher Temperaturabfall auf der warmen Seite, Innendämmung

Wandquerschnitt 2 \rightarrow Beschreibung A

Begründung: Hoher Temperaturabfall auf der kalten Seite, Außendämmung

- 2.1.3 Im Wandquerschnitt 1 fällt in der Tauperiode Tauwasser aus.

2

Begründung: Eine große Menge an feuchter Innenluft diffundiert durch die Gipskartonplatte, da der Dampfdiffusionswiderstand gering ist. Innerhalb des Dämmstoffs ist ein starker Temperaturabfall, die Taupunkttemperatur wird unterschritten, Tauwasser fällt an.

- 2.1.4 Wandquerschnitt 1: Schnelle Aufheizung des Innenraums durch Innendämmung, dadurch geringere Heizkosten,
Gefahr des Tauwasseranfalls auf der Außenseite der Dämmschicht (vgl. 2.1.3).

3

Wandquerschnitt 2: Langsame Aufheizung des Innenraums (kaltes Mauerwerk), geringe Gefahr des Tauwasseranfalls durch Außendämmung.

2.1.5
$$U = \frac{1}{R_T}, R_T = R_{si} + \frac{d_{\text{Putz},i}}{\lambda_{\text{Putz},i}} + \frac{d_{\text{Mauer}}}{\lambda_{\text{Mauer}}} + \frac{d_{\text{Dämm}}}{\lambda_{\text{Dämm}}} + \frac{d_{\text{Putz},a}}{\lambda_{\text{Putz},a}} + R_{se}$$

2

$$R_T = 0,13 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} + \frac{0,0125 \text{ m}}{0,25 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,24 \text{ m}}{0,79 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,14 \text{ m}}{0,038 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,02 \text{ m}}{0,06 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + 0,043 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

$$= 4,5443 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

$$U = \frac{1}{4,5443 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}} = 0,22 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

2.1.6
$$U = 0,18 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad U = \frac{1}{R_T}, R_T = R_{si} + \frac{d_{\text{Putz},i}}{\lambda_{\text{Putz},i}} + \frac{d_{\text{Mauer}}}{\lambda_{\text{Mauer}}} + \frac{d_{\text{Dämm}}}{\lambda_{\text{Dämm}}} + \frac{d_{\text{Putz},a}}{\lambda_{\text{Putz},a}} + R_{se}$$

4

$$\lambda_{\text{Dämm}} = \frac{d_{\text{Dämm}}}{\frac{1}{U} - \left(R_{si} + \frac{d_{\text{Putz},i}}{\lambda_{\text{Putz},i}} + \frac{d_{\text{Mauer}}}{\lambda_{\text{Mauer}}} + \frac{d_{\text{Putz},a}}{\lambda_{\text{Putz},a}} + R_{se} \right)}$$

$$\lambda_{\text{Dämm}} = \frac{d_{\text{Dämm}}}{\frac{1}{0,18 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} - \left(0,13 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} + \frac{0,0125 \text{ m}}{0,25 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,24 \text{ m}}{0,79 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,02 \text{ m}}{0,06 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + 0,043 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right)}$$

$$= 0,0298 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \approx 0,03 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

2.2 Feriendorf – Blockheizkraftwerk

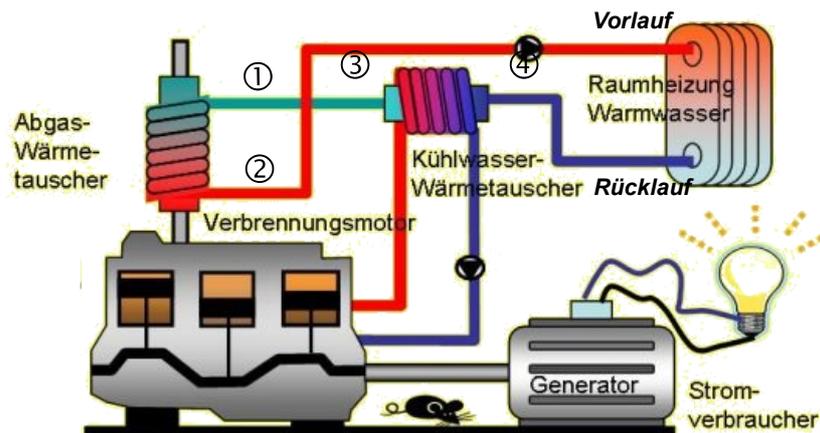
2.2.1 Wegen der hohen Anschaffungskosten ist eine hohe Laufzeit anzustreben (Größenordnung: mind. 4000 Betriebsstunden pro Jahr), daher ist eine möglichst gleichmäßige Wärmeabnahme erforderlich, z. B. Schwimmbadaufheizung

1

2.2.2 (heißerer) Abgas-Wärmetauscher: im heißen Vorlauf

3

(kühlerer) Kühlwasser-Wärmetauscher: im kühlen Rücklauf: möglichst vollständige Ausnutzung der Kühlwasser-Abwärme \Rightarrow nur möglich, wenn die Heizkreistemperatur im Wärmetauscher nicht zu hoch ist.



$$2.2.3 \quad \dot{Q}_{\text{zu}} = \frac{\dot{Q}_{\text{th}} + P_{\text{el}}}{\eta_{\text{ges}}} = \frac{70 \text{ kW}}{0,88} = 79,55 \text{ kW}$$

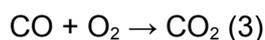
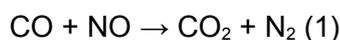
2

$$\eta_{\text{th}} = \frac{\dot{Q}_{\text{th}}}{\dot{Q}_{\text{zu}}} = \frac{45 \text{ kW}}{79,55 \text{ kW}} = 0,57, \quad \eta_{\text{el}} = \frac{P_{\text{el}}}{\dot{Q}_{\text{zu}}} = \frac{25 \text{ kW}}{79,55 \text{ kW}} = 0,31$$

2.2.4 Der Drei-Wege-Katalysator (DWK) besteht aus einem Metall- oder Keramikträger mit Edelmetallbeschichtung (z. B. eine Legierung aus Platin, Rhodium und/oder Palladium).

5

Der DWK konvertiert gleichzeitig die Schadstoffe Kohlenstoffmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickstoffoxide in die unschädlichen Stoffe CO_2 , H_2O und N_2 .

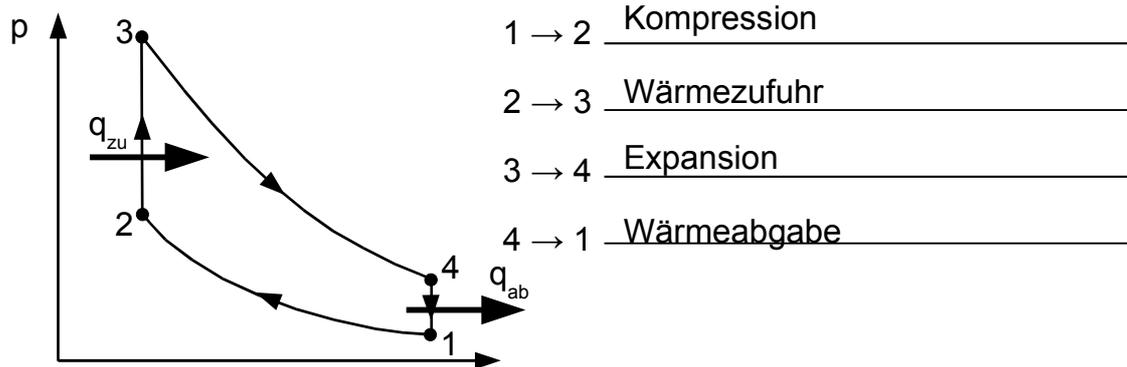


2.2.5 Bei Stoff 1 muss es sich um Stickstoffmonoxid handeln: Die Konvertierungsrate nimmt bei steigendem Luftüberschuss ab. In diesem Fall laufen bevorzugt die Reaktionen (2) und (3) ab. Bei Reaktion (1) liefert NO den Sauerstoff für die Reaktion von CO und C_3H_8 .

2

2.2.6

2



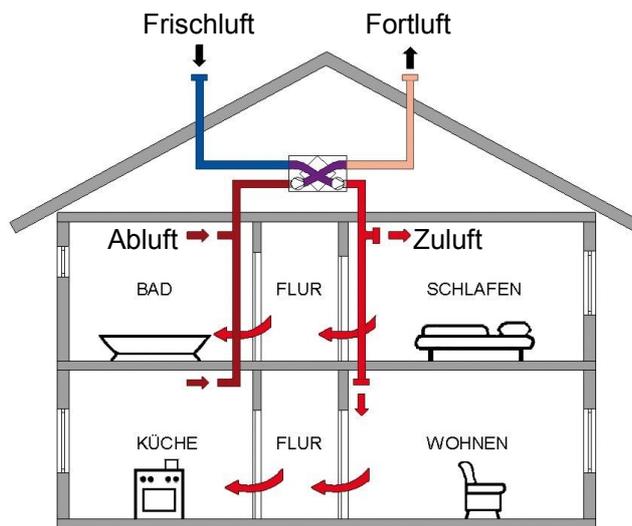
3 Wahlaufgabe

3.1 Lüftungsanlage für den Neubau

Punkte

3.1.1 Lüftungsschema. Überströmöffnungen sind nicht gefragt, müssen nicht beschriftet werden.

3



- Frischluftzufuhr in Wohnräumen (Steigerung der Behaglichkeit)
- Abluftabfuhr in Bad/Küche: Abtransport von Feuchte und Gerüchen

3.1.2 Aufgaben einer systematischen Lüftung (muss nicht durch kontrollierte Wohnraumlüftung erfolgen, systematische Fensterlüftung ebenfalls möglich):

3

- Abfuhr von Schadstoffen und Gerüchen
- Abfuhr von zu großer Luftfeuchtigkeit, Vermeidung von Schimmelbildung
- Frischluftzufuhr

3.1.3 Kontrollierte Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung:

2

- Verringerung der Energieverluste durch Wärmerückgewinnung
- Automatischer Luftaustausch \Rightarrow Gewährleistung des Mindestluftbedarfs, daher sichere Vermeidung von Schimmelbildung

3.1.4 $\beta = \frac{\dot{V}_{AU}}{V_R}$ mit $\beta = 0,5 \frac{1}{h}$ (aus Formelsammlung)

2

$$\dot{V}_{AU} = 0,5 \frac{1}{h} \cdot \beta \cdot V_R = 140 \text{ m}^2 \cdot 2,5 \text{ m} = 175 \frac{\text{m}^3}{h}$$

3.1.5 $\dot{V}_{AU} = \dot{V}_{AU, \min} \cdot n$ mit $\dot{V}_{AU, \min} = 30 \frac{\text{m}^3}{h}$ (aus Formelsammlung)

2

$$n = \frac{\dot{V}_{AU}}{\dot{V}_{AU, \min}} = \frac{180 \frac{\text{m}^3}{h}}{30 \frac{\text{m}^3}{h}} = 6$$

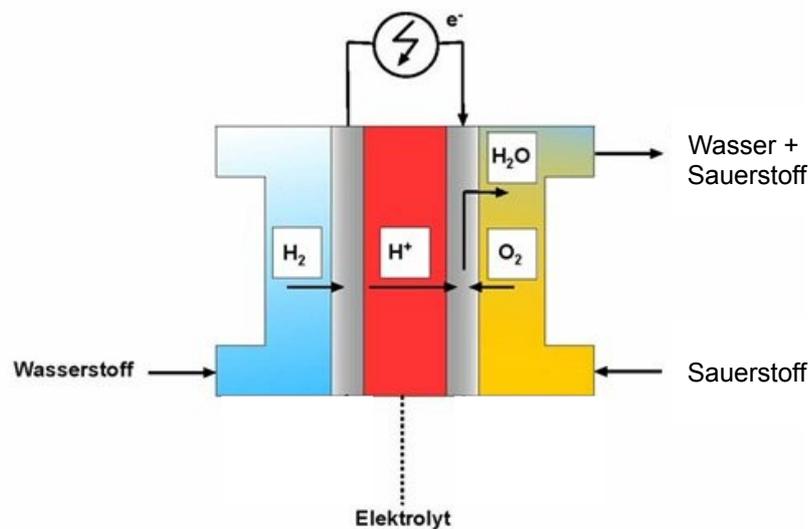
3.2 Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

3.2.1 Wasserstoffwirtschaft: Elektrische Energie wird dazu verwendet, elektrolytisch Wasserstoff zu gewinnen. Dieser kann als Energieträger genutzt werden, z. B. zum Betrieb einer Brennstoffzelle.

2

3.2.2 Gesamtreaktionsgleichung: $2 \text{ H}_2 + \text{ O}_2 \rightarrow 2 \text{ H}_2\text{O}$

2

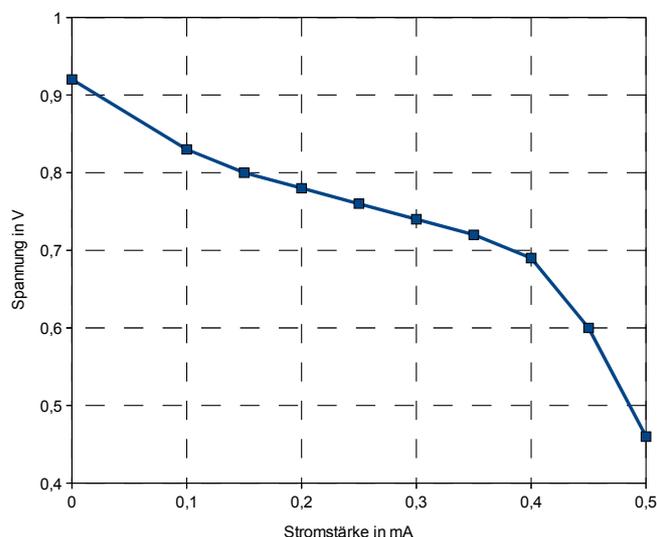


Anmerkung: H⁺-Übergang in der Membran ist nicht gefragt.

3.2.3

U(I)-Kennlinie Brennstoffzelle

2



3.2.4 max. Leistung: vor dem Abbruch der Kennlinie, d. h. bei $I = 0,4 \text{ mA}$.
 maximale Leistung auch durch $P = U \cdot I$ herleitbar
 Widerstand $R = \frac{U}{I} = \frac{0,69 \text{ V}}{0,0004 \text{ A}} = 1725 \Omega$

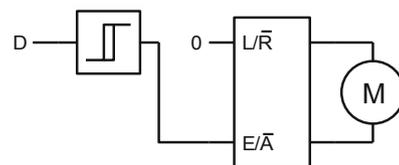
3.3 Photovoltaik-Anlage mit automatischer Nachführung der Module

3.3.1 Führungsgröße: 0 (Das Differenzsignal soll gleich Null sein)
 Messgröße: Differenzsignal D
 Stellgröße: Ausrichtungswinkel der PV-Module
 Störgrößen: Azimuthwinkel der Sonne,
 Reflexion oder Streuung an benachbarten Objekten

3.3.2 Vorteil: - Theoretisch kann ein höherer Ertrag erzielt werden.
 Nachteile: - Eigenverbrauch schmälert den theoretisch höheren Ertrag.
 - Systemkomplexität und Investitionskosten steigen.

3.3.3 Rechts herum, da die Sonnenbahn von Osten über Süden nach Westen verläuft. 0,5

3.3.4 Das Differenzsignal wird auf den Zweipunktregler mit Hysterese gegeben. Ab der im Regler eingestellten Schwelle führt das Differenzsignal zu einer Nachführung. Das Drehrichtungssignal ist dauerhaft auf '0', was einem Rechtslauf entspricht.



Ohne Hysterese würde der Motor in schneller Folge ein- und ausschalten.

3.3.5 Sobald die mit dem Spannungsteiler eingestellte Schwelle des Intensitätssignals überschritten ist, gibt der Komparator eine '1' aus und der Motor wird über die UND-Verknüpfung überhaupt erst freigegeben. 1,5

Laut Vorgabe kann das Summensignal maximal 5 V betragen. Die Freigabe soll bei 20 % hiervon, also bei 1 V erfolgen. Auf diese Spannung muss also der Spannungsteiler die Versorgungsspannung herunterteilen.

$$R_1 + R_2 = \frac{5V}{0,5 \text{ mA}} = 10 \text{ k}\Omega$$

$$\frac{5V}{1V} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \rightarrow R_2 = 2 \text{ k}\Omega, R_1 = 8 \text{ k}\Omega$$

3.3.6 B und C (es wird ständig die Drehrichtung umgeschaltet!) 1

3.3.7 Die Regelung mit zwei Drehrichtungen regelt störende Fremdeinstrahlung schneller aus, da sie nicht erst eine ganze Umdrehung machen muss, wenn aufgrund von Fremdeinstrahlung ein zu großer Ausrichtungswinkel eingestellt wurde. Es reicht ein kurzer Stelleingriff in die entgegengesetzte Richtung. 2

Nachteilig wirkt sich aus, dass ständig der Motor bei wechselnder Drehrichtung in Betrieb ist. → erhöhter Eigenverbrauch

4 Wahlaufgabe

4.1 Wärmepumpe

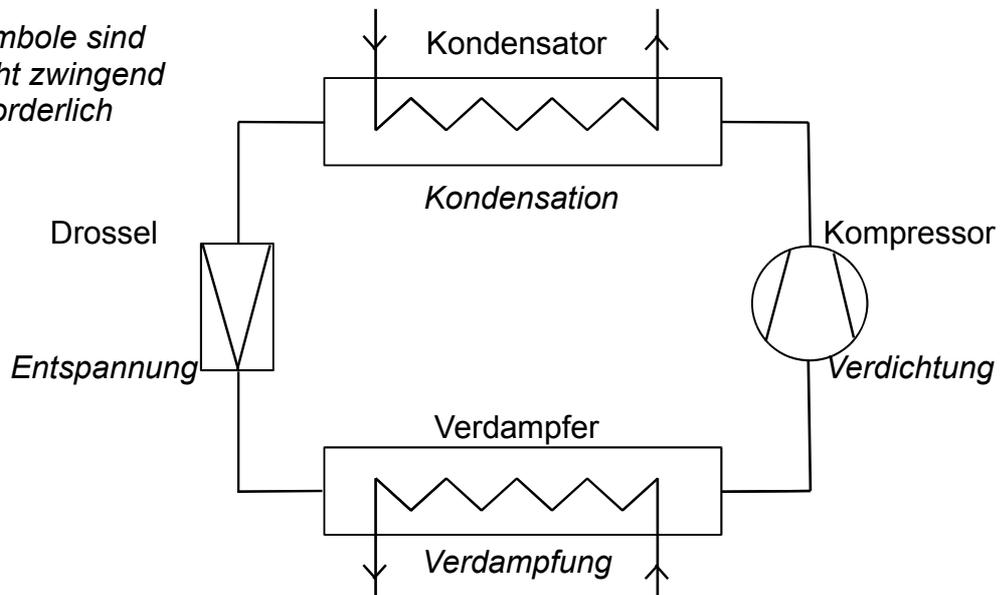
Punkte

- 4.1.1 Wärmequelle Erdreich (Sole-Wasser-Wärmepumpe):
 Vorteil: gleichmäßige Erdreichtemperatur um +10 °C bei Erdwärmesonden in Tiefen bis 100 m.
 Nachteil: höhere Investitionskosten
- Wärmequelle Luft (Luft-Wasser-Wärmepumpe):
 Vorteil: niedrigere Investitionskosten
 Nachteil: schlechte Arbeitszahlen, hoher Bedarf an zusätzlicher elektrischer Energie

3

4.1.2

Symbole sind nicht zwingend erforderlich

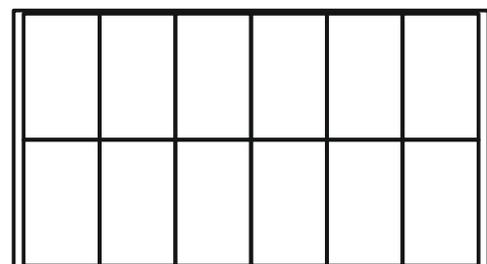


4

- 4.1.3 Sole-Wasser-Wärmepumpe („B“: Boden als Wärmequelle) 1
- 4.1.4 Bei größerer erforderlicher Heizkreistemperatur steigt der Energiebedarf für die Verdichtung, die Effizienz der Wärmepumpe wird schlechter 2

4.2 PV-Module auf einem Garagendach

- 4.2.1 Es passen 12 Module auf das Flachdach. Man muss je 6 Module in Reihe schalten. Zwei solche Stränge werden parallel geschaltet.



4

Die max. mögliche Spannung ergibt sich im Leerlauf unter Standard Test Conditions. Sie beträgt $6 \cdot 38,2 V = 229,2 V$.

Die min. mögliche Spannung ergibt sich im MPP unter Nominal Operating Conditions, also $6 \cdot 28,4 V = 170,4 V$.

Es passen die beiden angebotenen Laderegler. Andere Aufteilungen sind nicht möglich.

- 4.2.2 Von der Spannung her passen beide Laderegler. Jedoch könnte im Sommer bei senkrechter Einstrahlung mit max. Bestrahlungsstärke bei einer Zelltemperatur von 25°C (STC) der zulässige Strangstrom von Modell 1 (kurzzeitig) überschritten werden. Es muss also Modell 2 gewählt werden. 1
- 4.2.3 Die Module auf dem Dach haben eine Nennleistung unter STC von 4

$$P_{MPP, Dach} = n \cdot U_{MPP} \cdot I_{MPP} = 12 \cdot 31,3 V \cdot 8,3 A = 12 \cdot 260 W = 3,12 kW$$

 Wenn die Sonne 1 h lang mit 1 kW/m² scheint, entsteht also ein Ertrag von

$$W = P_{MPP, Dach} \cdot t = 3,12 kW \cdot 1 h = 3,12 kWh$$

 Das Diagramm „Wirksame Globalstrahlung“ aus der zugelassenen Formelsammlung liefert für den 1. Juni: $Globalstrahlung = 5,6 \frac{kWh}{m^2 \cdot d}$
 Dies ist gleichwertig zu 5,6 h Sonnenschein mit 1 kW/m². In dieser Zeit liefern die Module auf dem Dach den Ertrag $W = P_{MPP, Dach} \cdot t = 3,12 kW \cdot 5,6 h = 17,47 kWh$
- 4.2.4 Steigerung möglich durch Schrägstellen der Module auf $\alpha = 60^\circ$ bei gleichzeitiger Südausrichtung. Aus dem Diagramm „Wirksame Globalstrahlung“ (Formelsammlung) ergibt sich für den 1. Januar: $\frac{1,8 kWh/(m^2 \cdot d)}{0,7 kWh/(m^2 \cdot d)} = 2,57$ 1
- 4.3 Elektrofahrzeug**
- 4.3.1 $P = F_w \cdot v = c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot v = 0,32 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,2 \frac{kg}{m^3} \cdot 2,13 m^2 \cdot (22,22 \frac{m}{s})^3 = 4488 W$ 3
- 4.3.2 $s = v \cdot t = v \cdot \frac{W}{P} = 80 \frac{km}{h} \cdot \frac{15,86 kWh}{4,488 kW} = 283 km$ 2
- 4.3.3 Bei der Berechnung wurde davon ausgegangen, dass der gesamte Ertrag des Solardachs für die Überwindung des Luftwiderstandes auf einer ebenen Strecke zur Verfügung steht. In der Praxis müssen jedoch auch Steigungen und der Rollwiderstand zwischen Rädern und Fahrbahn überwunden werden. Auch das Beschleunigen des Fahrzeugs ist zu berücksichtigen. 2
 Tatsächlich steht nicht der gesamte Ertrag des Solardachs hierfür zur Verfügung, sondern nur ein um die folgenden Wirkungsgrade reduzierter Anteil:
 - Wirkungsgrad des Ladereglers
 - Ladewirkungsgrad des Akkus
 - Entladewirkungsgrad des Akkus
 - Wirkungsgrad des Frequenzumrichters
 - Wirkungsgrad des Motors
- 4.3.4 Je langsamer die Rekordfahrt, desto geringer der Luftwiderstand, aber auch umso geringer die innerhalb eines Tages zurückgelegte Strecke. Die Geschwindigkeit ist also gemäß der Vorgabe so zu wählen, dass das Fahrzeug die gesamte zur Verfügung stehende Zeit von 24 h fährt und in dieser Zeit gerade die gesamte verfügbare Energie umsetzt. 3

$$W = P \cdot t \rightarrow P = \frac{W}{t} = \frac{15,86 kWh}{24 h} = 0,66 kW$$

$$P = F_w \cdot v = c_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot v$$

$$v^3 = \frac{2 \cdot P}{c_w \cdot \rho \cdot A} = \frac{2 \cdot 661 \text{ W}}{0,32 \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot 2,13 \text{ m}^2} \rightarrow v = 11,73 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 42,2 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$s = v \cdot t = 42,2 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 24 \text{ h} = 1013 \text{ km}$$

1 Pflichtaufgaben zur Windkraft und Photovoltaik

Punkte

1.1 Windkraftanlage

1.1.1 3-Blattrotor im Vergleich zu einem 2-Blattrotor

1

Vorteile: höherer Leistungsbeiwert c_P
3-Blattrotoren laufen optisch ruhiger

Nachteil: höherer Materialeinsatz

1.1.2 Vor- und Nachteile von Offshore im Vergleich zu Onshore-Windkraftanlagen.

2

Vorteile: große zusammenhängende Flächen für Windparks möglich
höheres Windangebot im Vergleich zu Onshore-Anlagen
gleichmäßigere Windgeschwindigkeit als an Land
höherer Ertrag als Onshore-Anlagen

Nachteile: bei schlechtem Wetter oder hohem Seegang nicht zugänglich für
Wartungsarbeiten (spezielle Schiffe arbeiten nur bei ruhiger See)
die Komponenten müssen besonders geschützt und korrosionsbeständig
sein, da Salzwasser sehr aggressiv ist

Wassertiefe darf nicht zu groß (max. 50 m) sein.

Untergrund darf nicht zu weich sein

Netzanschluss ist aufwändiger als bei Onshore-Anlagen

1.1.3 Mechanisch nutzbare Leistung P_{mech} und Leistungsbeiwert c_P

3

$$P_{\text{mech}} = \frac{P_{\text{el}}}{\eta_G} = \frac{830 \text{ kW}}{0,96} = 864,6 \text{ kW} \quad A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (71 \text{ m})^2}{4} = 3959,2 \text{ m}^2$$

$$P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3959,2 \text{ m}^2 \cdot (9 \frac{\text{m}}{\text{s}})^3 = 1,732 \text{ MW}$$

$$c_P = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{Wind}}} = \frac{864,6 \text{ kW}}{1,732 \text{ MW}} = 0,5$$

1.1.4 Umfangsgeschwindigkeit u und Schnelllaufzahl λ

2

$$u = \pi \cdot d \cdot \frac{n}{60} = \pi \cdot 71 \text{ m} \cdot \frac{17}{60 \text{ s}} = 63,2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad \lambda = \frac{u}{v} = \frac{63,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{9 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 7$$

1.1.5 abgelesen bei $\lambda = 7$ und $E \rightarrow \infty$ und $z = 3 \Rightarrow c_P = 0,52$

2

abgelesen bei $\lambda = 7$ und $E \rightarrow 40$ und $z = 3 \Rightarrow c_P = 0,42$

Der Schnittpunkt $c_P = 0,5$ und $\lambda = 7$ liegt im Diagramm deutlich oberhalb der Kurvenschar $E = 40$ für einen dreiflügeligen Rotor, sodass die Güte des Rotorblatts mit „gut“ bezeichnet werden kann.

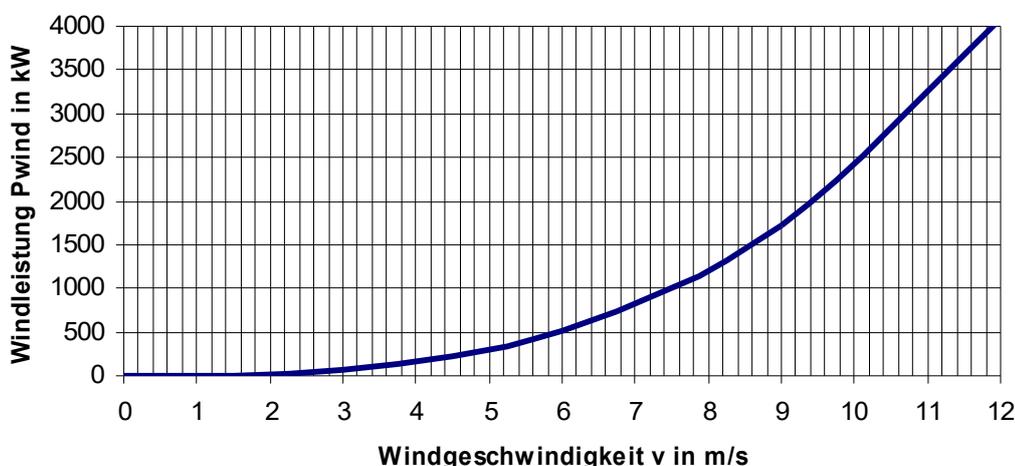
1.1.6 Windleistung in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit

4

$v_0 = 0 \text{ m/s}$	$v_3 = 3 \text{ m/s}$	$v_6 = 6 \text{ m/s}$	$v_9 = 9 \text{ m/s}$	$v_{12} = 12 \text{ m/s}$
$P_0 = 0 \text{ kW}$	$P_3 = 64,1 \text{ kW}$	$P_6 = 513 \text{ kW}$	$P_9 = 1731 \text{ kW}$	$P_{12} = 4100 \text{ kW}$

Die Windgeschwindigkeit geht mit der 3. Potenz in die Berechnung der Windleistung ein, d.h. bei doppelter Windgeschwindigkeit wird die Windleistung verachtfacht.

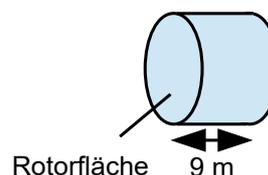
$$P_x = \frac{x^3}{6^3} \cdot 513 \text{ kW}$$



1.1.7 $v = \frac{s}{t} \rightarrow s = v \cdot t = 9 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1 \text{ s} = 9 \text{ m}$

Die Luftmasse legt in 1 Sekunde 9 m zurück.

Volumen = Rotorfläche X zurückgelegter Weg



$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4} ; m = \rho \cdot V = \rho \cdot A \cdot s = 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3959 \text{ m}^2 \cdot 9 \text{ m} = 42757 \text{ kg}$$

2

1.2 Netzgekoppelte PV-Anlage

1.2.1 Für einige Punkte der I(U)-Kennlinien liest man die Wertepaare U und I ab und berechnet $P = U \cdot I$. Werte von P bei den zugehörigen Werten von U eintragen, Punkte durch Kurve verbinden.

1

1.2.2 $I_{SC} = 10,4 \text{ A}$, $U_{OC} = 520 \text{ V}$, $U_{MPP} = 410 \text{ V}$, $I_{MPP} = 9,3 \text{ A}$, $P_{MPP} = 3800 \text{ W}$
siehe Diagramm unten

1,5

1.2.3 $n_{\text{Reihe}} = \frac{U_{OC-\text{Gesamt}}}{U_{OC-\text{Modul}}} = \frac{520 \text{ V}}{43,3 \text{ V}} = 12$ Module in Reihenschaltung

2,5

$$s_{\text{Par}} = \frac{I_{SC-\text{Gesamt}}}{I_{SC-\text{Modul}}} = \frac{10,4 \text{ A}}{5,2 \text{ A}} = 2$$
 Strings parallel geschaltet

-> $12 \cdot 2 = 24$ Module

1.2.4 bei $-10 \text{ }^\circ\text{C}$: $\Delta T = T_2 - 25 \text{ }^\circ\text{C} = (-10 \text{ }^\circ\text{C}) - 25 \text{ }^\circ\text{C} = -35 \text{ K}$

2

bei $+75 \text{ }^\circ\text{C}$: $\Delta T = T_2 - 25 \text{ }^\circ\text{C} = (+75 \text{ }^\circ\text{C}) - 25 \text{ }^\circ\text{C} = +50 \text{ K}$

$$U(T_2) = U_{25^\circ\text{C}} \cdot (1 + TK_U \cdot \Delta T)$$

Leerlaufspannungen pro Modul bei $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ und $+75 \text{ }^\circ\text{C}$ mit $TK_U = -0,35 \text{ \% / K}$:

$$U_{OC}(-10\text{ °C}) = 43,3\text{ V} \cdot (1 + (-0,0035) \cdot (-35\text{K})) = 43,3\text{ V} \cdot 1,1225 = 48,6\text{ V}$$

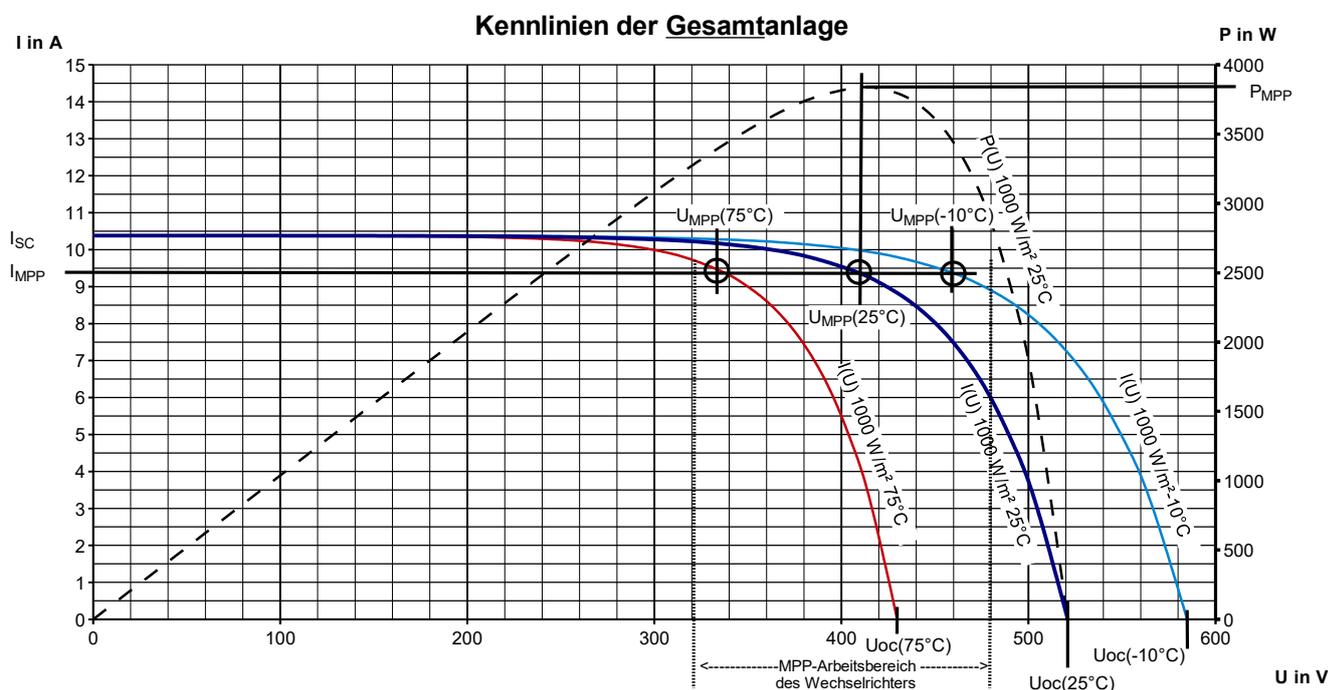
$$U_{OC}(+75\text{ °C}) = 43,3\text{ V} \cdot (1 + (-0,0035) \cdot (50\text{K})) = 43,3\text{ V} \cdot 0,825 = 35,7\text{ V}$$

Gesamtanlage (12 Module in Reihe):

$$U_{OC}(-10\text{ °C}) = 48,6\text{ V} \cdot 12 = 583,2\text{ V} \quad U_{OC}(+75\text{ °C}) = 35,7\text{ V} \cdot 12 = 428,4\text{ V}$$

1.2.5

2



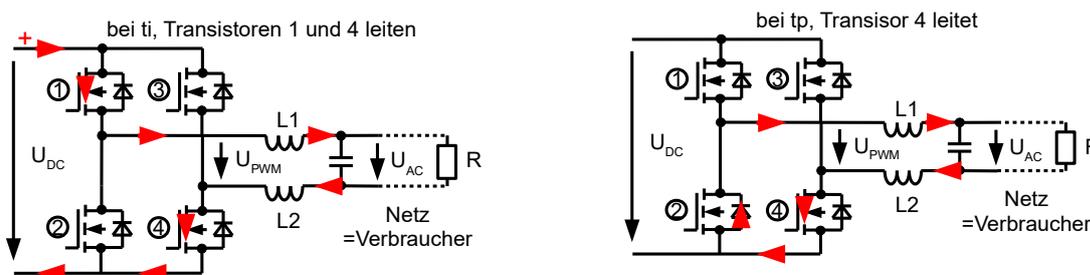
1.2.6 Max. DC-Eingangsspannung 583 V (Leerlauf bei -10 °C) → WR 1 nicht geeignet
 MPP-Spannungsbereich bis 460 V (U_{MPP} bei -10 °C) → WR 2 nicht geeignet
 ebenso bei -10 °C: $P_{MPP} = 460\text{ V} \cdot 9,4\text{ A} = 4324\text{ W}$ → WR 2 könnte nicht im MPP arbeiten (Elektronik würde WR aber vor Überlastung schützen)
 -> nur WR 3 ist geeignet.

2

1.3 Einphasiger Wechselrichter 230 V / 50 Hz

1.3.1

1,5



1.3.2 Die Spulen halten den Stromfluss aufrecht während der Zeit t_p (wenn Transistor 1 sperrt). Der Kondensator glättet den Kurvenverlauf weiter.

1,5

30

2 Sanierung einer historischen Villa

Punkte

2.1 Wärmedämmung des Gebäudes

2.1.1 Der rechte Wandquerschnitt ist innen gedämmt. Grund: Großer Temperaturabfall auf warmer Seite. 1

2.1.2 Vorteile der Außendämmung gegenüber der Innendämmung: 2

- Wärmebrücken wie beispielsweise Bodenplatten werden überdämmt
- Tauwasseranfall im Bauteil unwahrscheinlich, da hoher Temperaturabfall im Wandquerschnitt auf kalter Außenseite, innenseitig angeordnete Bauteile wirken als Dampfbremse

Weitere mögliche Antworten: Massige Bauteile auf Wandinnenseite dienen als Speichermasse für Wärme (sommerlicher Wärmeschutz), Schutz der Wandkonstruktion vor starken Temperaturschwankungen ...

Nachteile der Außendämmung gegenüber der Innendämmung:

- hohe Kosten, da Gerüst notwendig
- langsames Aufheizen der Räume, da kalte Außenwände wie träge Speichermasse wirken (kritisch bei sporadischer Nutzung)

Weitere mögliche Antworten: keine Anwendung bei denkmalgeschützten Fassaden möglich...

2.1.3 $U = \frac{1}{R_T} \Rightarrow R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + R_{se}$ 3

$$R = R_T - R_{si} - R_{se} = 5 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} - 0,13 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} - 0,043 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} = 4,827 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}},$$

$$R = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} \Rightarrow \frac{d_2}{\lambda_2} = R - \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} \right)$$

$$\lambda_2 = \frac{d_2}{R - \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} \right)} = \frac{0,14 \text{ m}}{4,827 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} - \left(\frac{0,015 \text{ m}}{0,51 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}} + \frac{0,24 \text{ m}}{0,81 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}} + \frac{0,015 \text{ m}}{0,06 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}} \right)} = 0,033 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

2.1.4 Erläuterung der Größen im Glaser-Diagramm 2

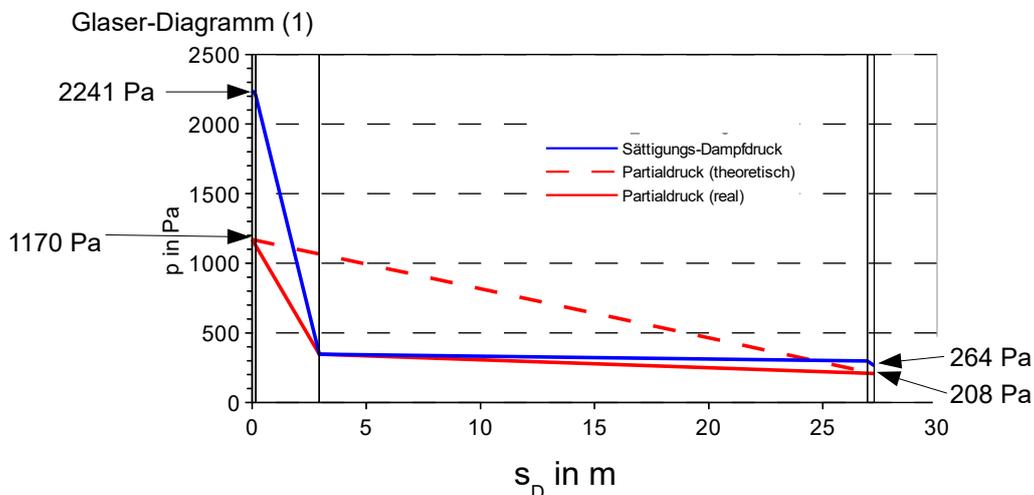
Ordinate: p: Dampfdruck: eingezeichnet ist der Verlauf des Sättigungsdampfdrucks über das Bauteil. Abhängig von der Temperatur und der Dampfdurchlässigkeit der Baustoffe

Abszisse: s_D : Wasserdampfdiffusionsäquivalente Luftschichtdicke: die Durchlässigkeit der einzelnen Baustoffschichten wird hier auf die Wasserdampf-Durchlässigkeit von Luft bezogen und in m angegeben.

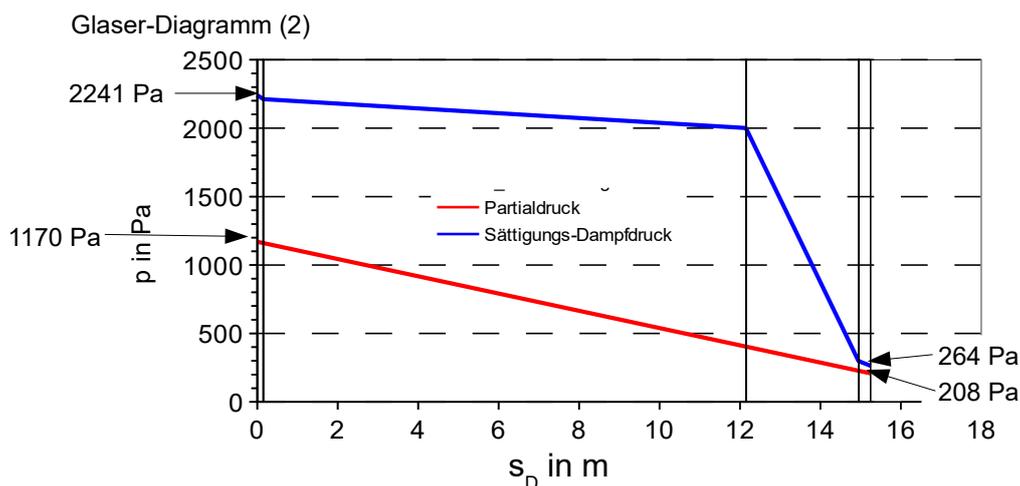
2.1.5 Wenn der Partialdampfdruck die Sättigungsdampfdrucklinie im Bauteilquerschnitt berührt oder schneidet, fällt Tauwasser an.

3

Obere Abbildung (Innendämmung): Im Bereich der Dämmschicht fällt der Sättigungsdampfdruck stark ab und schneidet dabei die Partialdampfdrucklinie. Daher kommt es zu Tauwasseranfall. Der reale Verlauf der Partialdampfdrucklinie wird nicht verlangt.



Untere Abbildung (Außendämmung): Die Partialdampfdrucklinie ist über den gesamten Wandquerschnitt unterhalb der Sättigungsdampfdrucklinie. Es kommt daher zu keiner Tauwasserbildung.



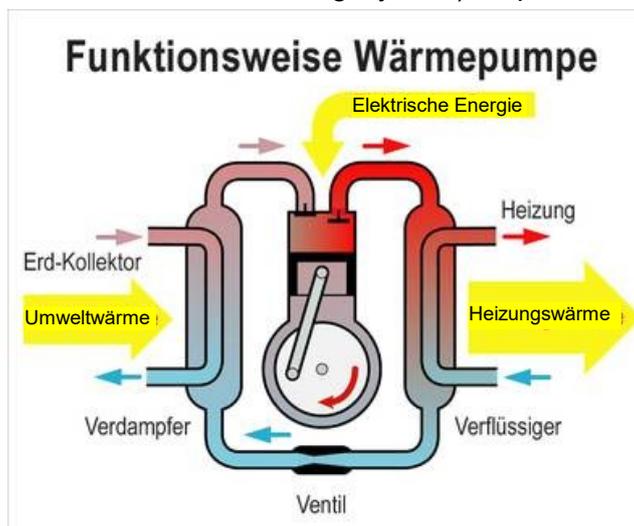
2.1.6 Beim Aufbringen einer Innendämmung muss eine Dampfbremse auf der warmen Seite der Dämmung eingebaut werden. Dadurch wird verhindert, dass die warme feuchte Innenluft in den Wandquerschnitt diffundiert, dort abkühlt und der Wasserdampf kondensiert.

2

2.2 Beheizung mit einer Kompressionswärmepumpe

2.2.1 Bauteile: Verdampfer (Wärmetauscher zur Umweltwärmequelle), Kompressor, Kondensator (Wärmetauscher zum Heizungssystem), Expansionsventil

2



Hinweis: Eine entsprechend vereinfachte Darstellung ist ausreichend.

2.2.2 $\dot{Q} = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{t} \Rightarrow t = \frac{m \cdot c \cdot \Delta T}{\dot{Q}}$

3

aus FS: $\epsilon = \frac{\dot{Q}_{WP}}{P_{el} \cdot V} \Rightarrow \dot{Q} = 3,5 \cdot 0,5 \text{ kW} = 1,75 \text{ kW}$, Annahme: $\rho_w = 1 \text{ kg/dm}^3$

$$t = \frac{100 \text{ kg} \cdot 1,163 \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 40 \text{ K}}{1750 \text{ W}} = 2,66 \text{ h}$$

2.2.3 Je höher die Außentemperatur ist, desto stärker steigt die Heizleistung der Wärmepumpe an \Rightarrow Wärmequelle Außenluft. Die anderen Umweltwärmequellen haben ein konstantes Temperaturniveau.

1

2.2.4 Links des Schnittpunkts (niedrige Außentemperatur): der Wärmebedarf des Gebäudes ist höher als die Heizleistung der Wärmepumpe, eine zusätzliche Wärmequelle ist erforderlich.

3

Rechts des Schnittpunkts (hohe Außentemperatur): der Wärmebedarf des Gebäudes ist niedriger als die Heizleistung der Wärmepumpe, die Wärmepumpe dient als alleiniger Wärmeerzeuger.

2.2.5 $\vartheta_{VL} = 35^\circ\text{C} \quad \epsilon = \frac{9,6 \text{ kW}}{3,0 \text{ kW}} = 3,2$, $\vartheta_{VL} = 60^\circ\text{C} \quad \epsilon = \frac{10,5 \text{ kW}}{5,0 \text{ kW}} = 2,1$

2

2.2.6 Sehr schlecht gedämmtes Gebäude \Rightarrow sehr hohe Vorlauftemperatur im alten Heizungssystem (kleine Heizkörperflächen) erforderlich.

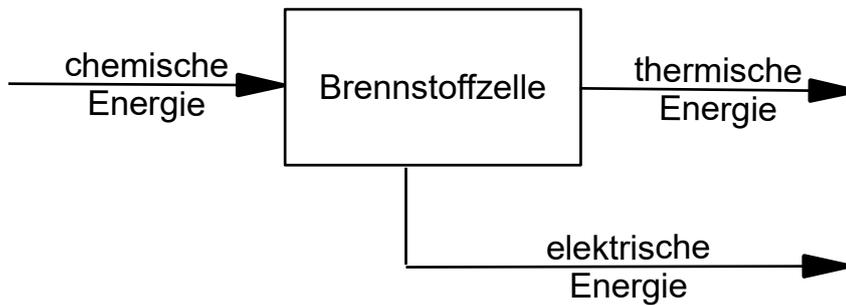
2

Effizienz der Wärmepumpe sinkt stark bei großer Temperaturdifferenz zwischen Vorlauftemperatur und Umweltwärmequellentemperatur

Für die beschriebene Anwendung ist eine Luft-Wasser-Wärmepumpe daher nicht geeignet, weil zu wenig Umweltwärme genutzt werden kann.

2.3 Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk

2.3.1



1

2.3.2 Der elektrische Wirkungsgrad des Brennstoffzellen-BHKWs ist deutlich höher als bei einem Verbrennungsmotor-BHKW: Bei der chemischen Reaktion wird direkt elektrische Energie freigesetzt, es ist kein Generator erforderlich.

1

$$2.3.3 \quad \eta_{\text{el}} = \frac{P_{\text{el}}}{\dot{Q}_{\text{B},i}} = \frac{P_{\text{el}}}{\dot{V}_{\text{B}} \cdot H_i} \Rightarrow \dot{V}_{\text{B}} = \frac{P_{\text{el}}}{\eta_{\text{el}} \cdot H_i} = \frac{\frac{4 \text{ kWh}}{0,5 \text{ h}}}{0,6 \cdot 10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} = 1,3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

2

30

3 Elektrofahrzeug mit Range Extender

Punkte

3.1 Elektrofahrzeug

3.1.1 Die Antriebskraft wird bei gleichförmiger Fahrt auf ebener Strecke benötigt, um die Luftwiderstandskraft und die Rollreibungskraft der Räder zu überwinden. 1

3.1.2 $M = F \cdot r = 214,4 \text{ N} \cdot 1/2 \cdot 0,653 \text{ m} = 70 \text{ Nm}$ 3

$P = F \cdot v = M \cdot \omega = M \cdot 2 \cdot \pi \cdot n$

$$n = \frac{F \cdot v}{M \cdot 2 \cdot \pi} = \frac{214,4 \text{ N} \cdot (80/3,6) \text{ m/s}}{70 \text{ Nm} \cdot 2 \cdot \pi} = 10,83 \text{ s}^{-1} = 650 \text{ min}^{-1}$$

Lösungsalternative für Drehzahlberechnung über Radumfang U:

$$v = U \cdot n \rightarrow n = \frac{v}{U} = \frac{v}{\pi \cdot d} = \frac{(80/3,6) \text{ m/s}}{\pi \cdot 0,653 \text{ m}} = 10,83 \text{ s}^{-1} = 650 \text{ min}^{-1}$$

3.1.3 $P_{mech} = F \cdot v = 214,4 \text{ N} \cdot (80/3,6) \text{ m/s} = 4,764 \text{ kW}$ 3

Aus dem Wirkungsgradkennfeld abgelesen: $\eta_{ges} = 0,7$

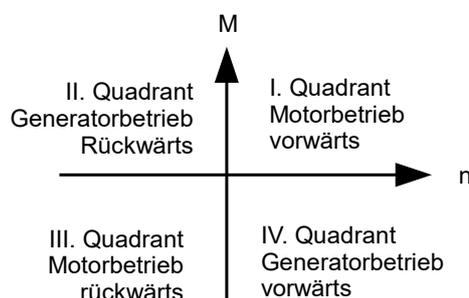
$$\eta_{ges} = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{mech}}{P_{el}} \rightarrow P_{el} = \frac{P_{mech}}{\eta} = \frac{4,764 \text{ kW}}{0,7} = 6,806 \text{ kW}$$

$$P_{el} = U \cdot I \rightarrow I = \frac{P_{el}}{U} = \frac{6,806 \text{ kW}}{360 \text{ V}} = 18,9 \text{ A}$$

3.1.4 $\eta = \frac{W_{ab}}{W_{zu}} = \frac{0,8 \cdot W_A}{P_{Lade} \cdot t} = \frac{0,8 \cdot 20 \text{ kWh}}{50 \text{ kW} \cdot 0,5 \text{ h}} = 0,64 = 64\%$ 2

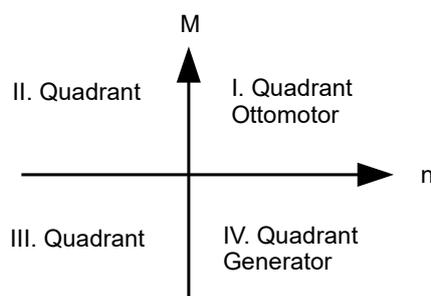
3.2 Range Extender

3.2.1



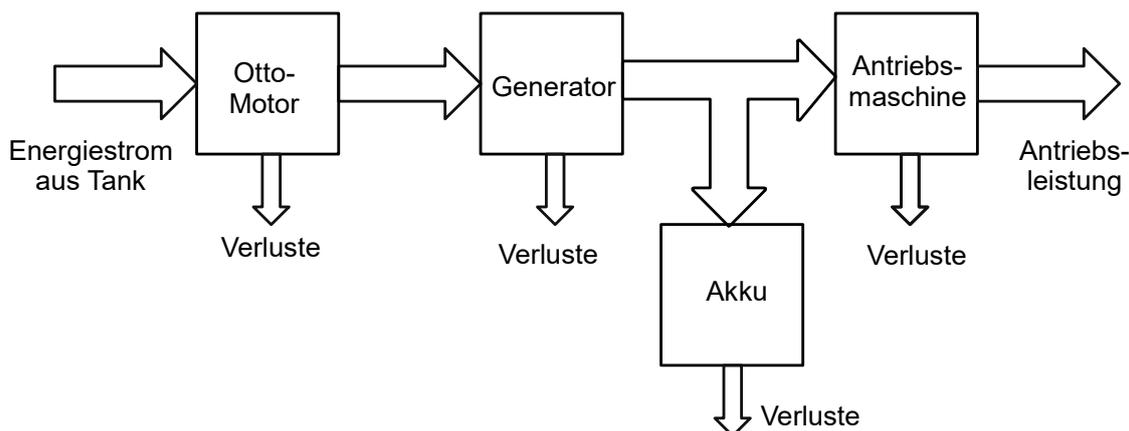
2

3.2.2



1

3.2.3



3

3.2.4 $P_N = M_N \cdot \omega_N = M_N \cdot 2 \cdot \pi \cdot n_N \rightarrow M_N = \frac{P_N}{2 \cdot \pi \cdot n_N} = \frac{15 \text{ kW}}{2 \cdot \pi \cdot (3600/60) \text{ s}^{-1}} = 39,8 \text{ Nm}$

3

aus Verbrauchskennfeld abgelesen: $Verbrauch = 0,25 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$

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

$$\eta = \frac{1}{\text{spezifischer Verbrauch} \cdot H_i} = \frac{1}{0,25 \text{ kg/kWh} \cdot 11,3 \text{ kWh/kg}} = 35,4\%$$

3.2.5 Als Range Extender im seriellen Hybridfahrzeug wird der Verbrennungsmotor ausschließlich im verbrauchsoptimalen Nennbetriebspunkt betrieben. Die in einer Fahrsituation nicht benötigte Energie wird in der Batterie gespeichert. Im Teillastbereich dagegen steigt der Verbrauch stark an. Wäre der Verbrennungsmotor (über Kupplung und Getriebe) mit der Antriebsachse gekoppelt, so würde er je nach Fahrsituation häufig im Teillastbereich bei ungünstigen Verbrauchswerten arbeiten.

2

3.3 Müllheizkraftwerk

3.3.1 1-1' Speisewasserpumpe; Das Prozessmedium Wasser wird auf den Arbeitsdruck komprimiert.

2

1'-2 Dampferzeuger; Das Wasser wird im Dampferzeuger erwärmt.

2-3 Dampferzeuger; Das Wasser wird im Dampferzeuger verdampft.

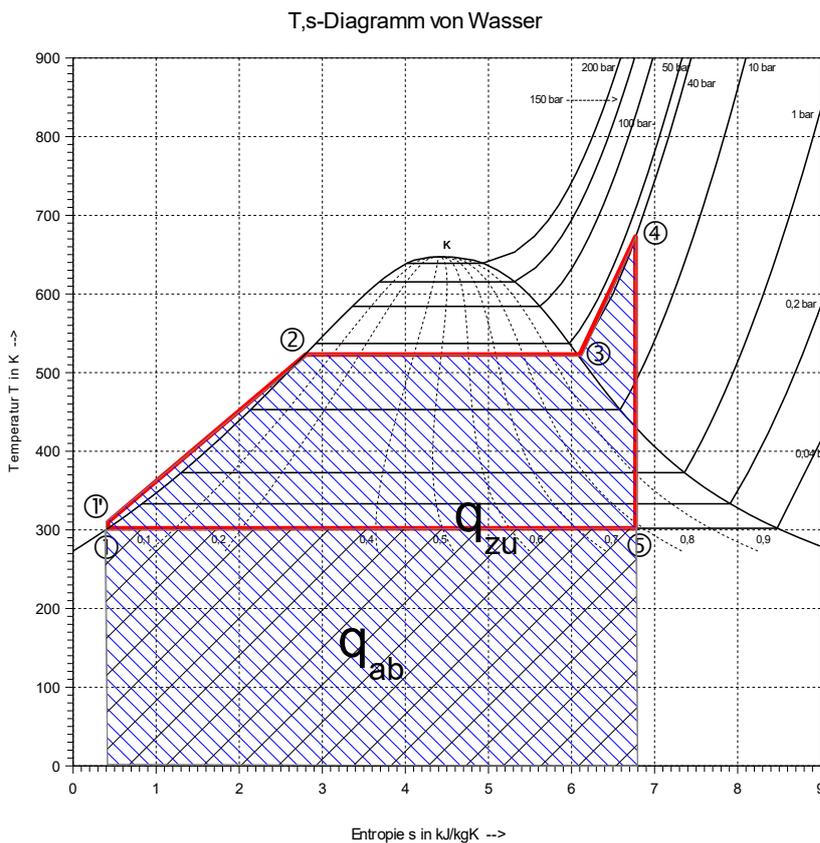
3-4 Dampferzeuger; Der Wasserdampf wird überhitzt.

4-5 Turbine; Der überhitzte Wasserdampf wird in der Turbine entspannt.

5-1 Kondensator; Der Wasserdampf wird im Kondensator verflüssigt.

3.3.2

2



q_{zu} : gesamte Fläche, q_{ab} : unteres Rechteck

3.3.3

2

$$q_{zu} = q_{12} + q_{23} + q_{34}$$

$$q_{zu} = \left(2,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - 0,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right) \cdot \frac{520\text{K} + 300\text{K}}{2}$$

$$+ \left(6,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - 2,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right) \cdot 520\text{K} + \left(6,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - 6,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right) \frac{670\text{K} + 520\text{K}}{2} = 3116,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_{th} = \frac{q_{zu} - |q_{ab}|}{q_{zu}} = \frac{3116,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 1920 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3116,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,38 = 38\%$$

3.3.4

2

Der anfallende Müll muss thermisch verwertet werden. Die energetische Verwertung des Mülls spart Primärenergie zur Erzeugung elektrischer Energie.

Durch die Auskopplung von Fernwärme für eine Kleinstadt wird der Kraftwerkswirkungsgrad erhöht und dadurch die im Müll vorhandene Energie optimal ausgenutzt. Gleichzeitig wird Geld für dezentrale Heizanlagen und den dafür benötigten Brennstoff gespart.

Die Abgase des Müllheizkraftwerkes werden gereinigt, die dezentralen Heizanlagen haben keine Rauchgasreinigung.

3.3.5 Lösungsvorschlag (Tail-End-Anordnung, bei Müllverbrennungsanlagen gebräuchlich); andere Lösungen, z.B. High-Dust-Verfahren sind möglich:

Entstaubung → Entschwefelung → Entstickung

Zuerst müssen mithilfe der Entstaubung die groben Staubpartikel entfernt werden. Die Rauchgasreinigung geht vom Groben zum Feinen um die nachfolgenden Reinigungsanlagen vor zu großer Belastung zu schützen.

Als zweites folgt die Entschwefelung. Deren Aufgabe ist es, im Waschprozess gasförmige Säurebildner und restliche Feinstäube zu entziehen. Die nachfolgenden Rauchgasreinigungsstufen werden dadurch geschont.

Zum Schluss folgt die Entstickung. In der Entstickungsanlage werden die Stickstoffoxide zu Stickstoff und Wasser umgewandelt. Die Reaktionstemperatur des Rauchgases muss vor der Entstickung durch einen Wärmetauscher angehoben werden.

2

3.3.6

30

4 Beheizung und Belüftung einer komfortablen Etagenwohnung	Punkte
4.1 Erdgas-Brennwertgerät	
4.1.1 Im Abgaswärmetauscher wird das heiße Abgas durch den (kühlen) Heizkreis-Rücklauf abgekühlt. Dabei wird das Heizungswasser aufgeheizt.	1
4.1.2 Aus Diagramm Formelsammlung: Kesselwirkungsgrad ca. 109 %.	1
4.1.3 Aus Diagramm Formelsammlung: Kondensatmenge ca. 1,4 l/m ³ Gas,	3
$\dot{Q}_{B,s} = \dot{V}_B \cdot H_s \text{ mit } H_s = 11,1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \quad \dot{V}_B = \frac{\dot{Q}_{B,s}}{H_s} = \frac{7,5 \text{ kW}}{11,1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} = 0,676 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	
$\text{Kondensatvolumenstrom } \dot{V}_{\text{Kondensat}} = \dot{V}_B \cdot \dot{V}_{\text{Kondensat,bezogen}} = 0,676 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 1,4 \frac{\text{l}}{\text{m}^3} = 0,946 \frac{\text{l}}{\text{h}}$	
4.1.4 Aus Diagramm Formelsammlung: Ab einer Abgastemperatur von ca. 60 °C findet keine Kondensation mehr statt. Die Kondensatmenge ist dementsprechend 0 l/m ³ Gas.	2
Der Kondensationspunkt (Taupunkt) des Wasserdampfes im Abgasstrom wird nicht mehr unterschritten, weil bei sehr kalten Außentemperaturen das Heizungssystem hohe Vor- und Rücklauftemperaturen benötigt.	
4.1.5 Die Kesselvorlauftemperatur sinkt bei zunehmender Außentemperatur da der Wärmebedarf geringer wird. Dadurch ist auch die Kesselrücklauftemperatur auf einem niedrigeren Niveau. Das Abgas wird daher vom Wärmetauscher stärker abgekühlt.	2
4.2 Behaglichkeit in Wohnräumen	
4.2.1 Die Behaglichkeit des Menschen ist unter anderem abhängig von der im Raum herrschenden Luftgeschwindigkeit und der vorherrschenden Raumtemperatur. Ist die Luftgeschwindigkeit gering, reicht eine Raumtemperatur von 18 bis 23 °C, um Behaglichkeit zu erzeugen.	2
Ab einer Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/s kann eine Behaglichkeit nur noch durch eine Erhöhung der Raumtemperatur erreicht werden, da die Umgebung sonst als „zugig“ empfunden wird.	
Bei hohen Raumtemperaturen sorgt eine erhöhte Luftgeschwindigkeit (bis max. 0,5 m/s) für ein Behaglichkeitsempfinden, weil die Luftbewegung für eine gewisse Abkühlung sorgt.	
4.2.2 Wandtemperatur: Eine geringe Wandoberflächentemperatur führt zu freier Konvektion der Raumluft und wird als Zug wahrgenommen.	3
Luftfeuchtigkeit: zu gering: trockene Luft führt zu einer Austrocknung der Schleimhäute und evtl. zu Atemwegserkrankungen	
zu hoch: Schimmelbildung, schwüle Raumluft.	
Luftqualität: CO ₂ -Anteil zu hoch kann zu Kopfschmerz und Müdigkeit führen, Ausdünstungen führen zu Geruchsbelastungen	

4.3 Entlüftung eines Badezimmers

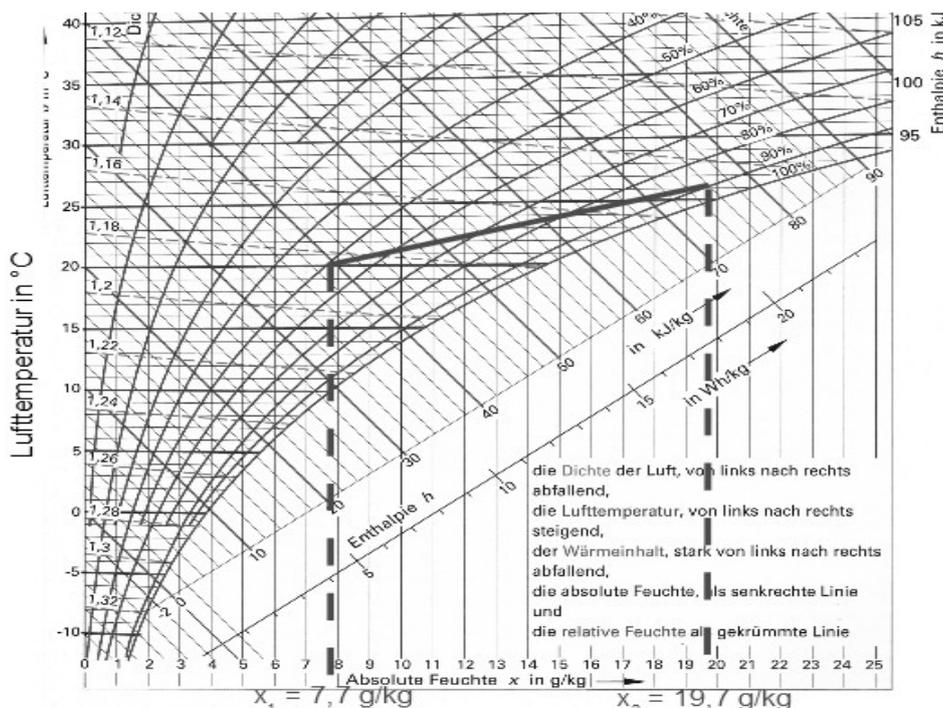
4.3.1 Die relative Luftfeuchte gibt an, wieviel Prozent des maximalen Wasserdampfgehaltes die Luft bei vorhandener Temperatur enthält. 1

4.3.2 An Außenwänden oder Fenstern könnte sich aufgrund der geringeren Temperatur Feuchtigkeit absetzen und zu Bauschäden und/oder Schimmelbildung führen. 2

Spiegel könnten beschlagen.

Unbehaglichkeit aufgrund zu hoher relativer Feuchtigkeit im Raum.

4.3.3 Alle Zustände auf der (schrägen) Mischungslinie können eintreten. 2



4.3.4 aus h,x-Diagramm: $\Delta x = 12 \frac{\text{g}}{\text{kg Luft}}$, $V_{\text{Raum}} = 15 \text{ m}^3$, $\rho_{\text{Luft}} = 1,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ 2

$$m_{\text{Luft,Raum}} = V_{\text{Raum}} \cdot \rho_{\text{Luft}} = 15 \text{ m}^3 \cdot 1,17 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 17,55 \text{ kg}$$

$$m_{\text{Wasser}} = \Delta x \cdot m_{\text{Luft,Raum}} = 12 \frac{\text{g}}{\text{kg Luft}} \cdot 17,55 \text{ kg Luft} = 210,6 \text{ g}$$

4.4 Badezimmerentlüftung mit Abluftventilator

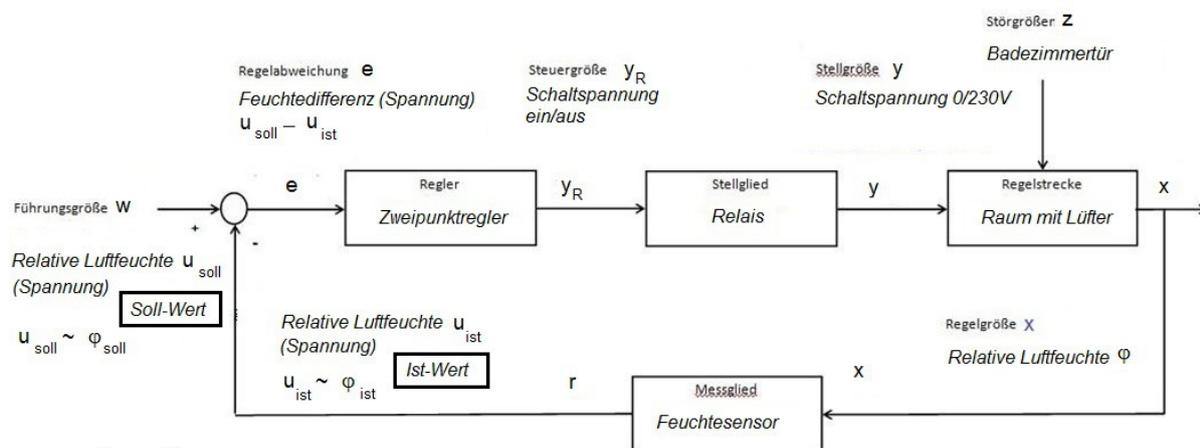
4.4.1 Der Lüfter läuft nur dann, wenn ein Feuchtigkeitsausgleich mit der übrigen Wohnungsluft überhaupt notwendig ist. Das

1

- spart Energie
- minimiert die Lärmbelastigung
- erhöht die Lebensdauer des Lüfters

4.4.2

4

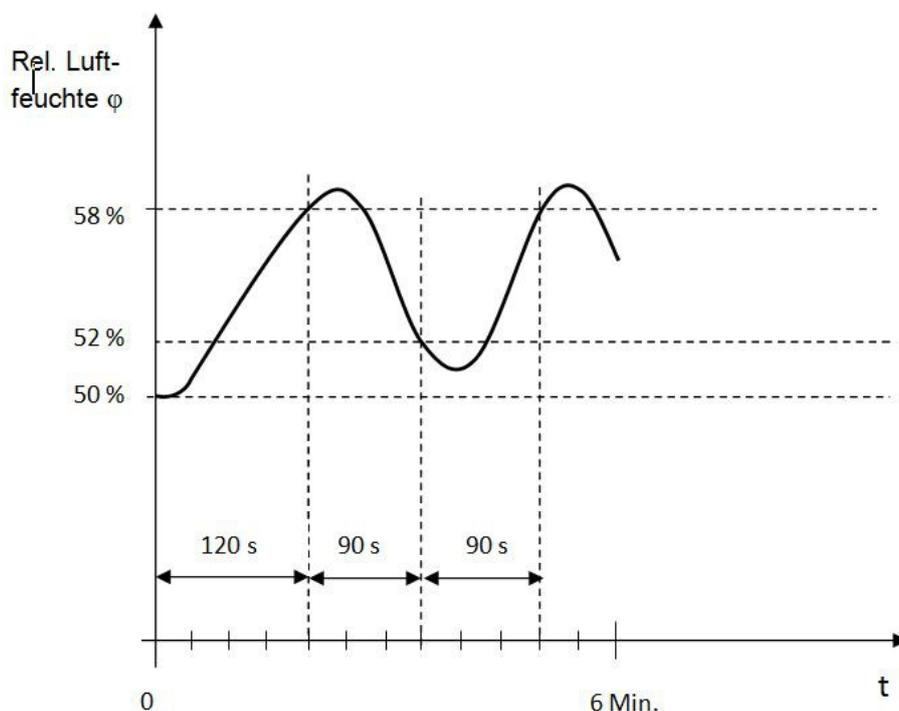


4.4.3 Als Störgröße, allerdings im positiven Sinn, wirkt die Badezimmertüre, die im geöffneten Zustand die Entlüftung des Raumes unterstützt.

1

4.4.4

3



TG Umwelttechnik

2014/2015

Übung

Lösungsvorschlag

Stoffgebiete

Teil 1: Pflichtbereich

Aufgabe 1: Elektromobilität
Elektro- und Hybridfahrzeuge
Photovoltaik-Ertragsberechnung

Aufgabe 2: Heizkraftwerk-Fernwärmeversorgung
Brennwerttechnik
Blockheizkraftwerk

Teil 2: Wahlbereich

Aufgabe 3: Steuerungstechnik
Transistorbrücke
Solarthermie

Aufgabe 4: Wohnraumlüftung
Windkraft
Bauphysik

1 Elektromobilität, Elektro- und Hybridfahrzeuge und Photovoltaik

Punkte

1.1 Selbstfahrendes Transportsystem

$$1.1.1 \quad m = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{h}{x} \quad s_1 = \frac{10 \text{ m}}{0,1} = 100 \text{ m} \quad s_2 = \frac{10 \text{ m}}{0,05} = 200 \text{ m}$$

1

$$1.1.2 \quad v = 5 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{5 * 1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 1,389 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

2

$$t_{\text{Weg}} = t_b + 2 * t_{\text{Fahrtdauer}} + t_e \quad \text{mit} \quad t_{\text{Fahrtdauer}} = \frac{s}{v}$$

$$t_{\text{Fahrtdauer}1} = \frac{100 \text{ m}}{1,389 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 72 \text{ s}$$

$$t_{\text{Fahrtdauer}2} = \frac{200 \text{ m}}{1,389 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 144 \text{ s}$$

$$t_{\text{Weg}1} = 5 \text{ s} + 2 * 72 \text{ s} + 4 \text{ s} = 153 \text{ s}$$

$$t_{\text{Weg}2} = 5 \text{ s} + 2 * 144 \text{ s} + 4 \text{ s} = 297 \text{ s}$$

1.1.3 abgelesen P_{Antrieb} bei $v = 5 \text{ km/h}$

1

$$P_1 = 175 \text{ W}$$

$$P_2 = 80 \text{ W}$$

1.1.4

3

$$W_{\text{Weg}} = P_{\text{Steuerung}} * t_{\text{Weg}} + P_{\text{Antrieb}} * t_{\text{Fahrtdauer}}$$

$$W_1 = 4,14 \text{ Wh} = 14,9 \text{ kWs} \quad W_2 = 15 \text{ W} * 297 \text{ s} + 80 \text{ W} * 144 \text{ s}$$

$$W_2 = 16,0 \text{ kWs}$$

$$\text{Akku- Energieinhalt} \quad W_{\text{Akku}} = 120 \text{ Wh} = 432 \text{ kWs}$$

$$\text{Anzahl der Fahrten} \quad N = \frac{W_{\text{Akku}}}{W_{\text{Weg}}}$$

$$N_{\text{Weg}1} = 29$$

$$N_{\text{Weg}2} = \frac{432 \text{ kWs}}{16,0 \text{ kWs}} = 27$$

1.1.5

6

Durch die Bergabfahrt verfügbare Energie

$$W_{\text{bergab}} = P_{\text{Antrieb}} * t_{\text{Fahrtdauer}} * \eta$$

$$W_{\text{bergab}1} = 175 \text{ W} * 72 \text{ s} * 0,7 = 8,82 \text{ kWs} \quad W_{\text{bergab}2} = 80 \text{ W} * 144 \text{ s} * 0,7 = 8,06 \text{ kWs}$$

$$Q_1 = \frac{W_{\text{bergab}1}}{U_{\text{Akku}}} = \frac{8,82 \text{ kWs}}{12 \text{ V}} = 735 \text{ As} \quad Q_2 = \frac{W_{\text{bergab}2}}{U_{\text{Akku}}} = \frac{8,06 \text{ kWs}}{12 \text{ V}} = 671,7 \text{ As}$$

$$I_1 = \frac{Q_1}{t} = \frac{735 \text{ As}}{72 \text{ s}} = 10,2 \text{ A}$$

$$I_2 = \frac{Q_2}{t} = \frac{671,7 \text{ As}}{144 \text{ s}} = 4,66 \text{ A}$$

$$I_1 > I_{L\text{max}} \rightarrow I_{\text{rekup}1} = 5 \text{ A}$$

$$I_2 < I_{L\text{max}} \rightarrow I_{\text{rekup}2} = I_2$$

Einspeisbare Energie durch die Bergabfahrt

$$W_{\text{rekup}} = U * I_{\text{rekup}} * t_{\text{Fahrtdauer}}$$

$$W_{\text{rekup}1} = 12 \text{ V} * 5 \text{ A} * 72 \text{ s} \quad W_{\text{rekup}2} = 12 \text{ V} * 4,66 \text{ A} * 144 \text{ s}$$

$$W_{\text{rekup}1} = 4,32 \text{ kWs} \quad W_{\text{rekup}2} = 8,05 \text{ kWs}$$

Benötigte Energie pro Fahrt $W_r = W_{\text{Weg}} - W_{\text{rekup}}$

$$W_{1R} = 14,9 \text{ kWs} - 4,32 \text{ kWs}$$

$$W_{2R} = 16,0 \text{ kWs} - 8,05 \text{ kWs}$$

$$W_{1R} = 10,58 \text{ kWs}$$

$$W_{2R} = 7,95 \text{ kWs}$$

Anzahl Fahrten mit Rekuperation $N_R = \frac{W_{Akku}}{W_R}$

$$N_{IR} = \frac{432 \text{ kWs}}{10,58 \text{ kWs}} = 40,8$$

Es sind 40 Fahrten möglich

$$N_{2R} = \frac{432 \text{ kWs}}{7,95 \text{ kWs}} = 54,3$$

Es sind 54 Fahrten möglich

1.1.6

$$W_{pot} = m * g * h = 50 \text{ kg} * 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} * 10 \text{ m} = 4905 \text{ Nm} = 4,905 \text{ kWs}$$

$$\eta_1 = \frac{4,90 \text{ kWs}}{10,58 \text{ kWs}} = 46,6\%$$

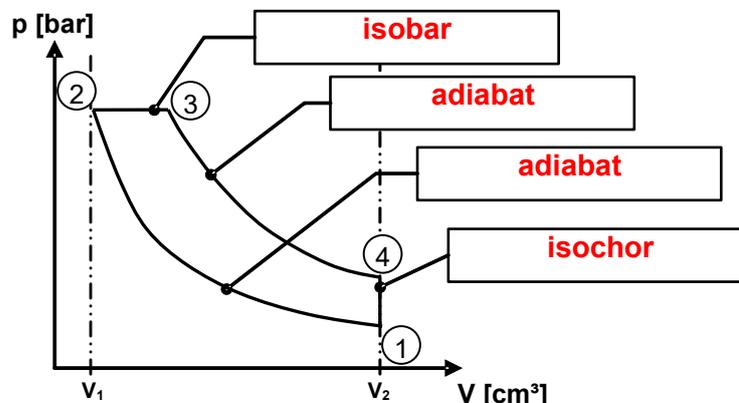
$$\eta_2 = \frac{4,90 \text{ kWs}}{7,95 \text{ kWs}} = 61,6\%$$

1.1.7

- | | |
|---|--|
| + Schnellere Taktzeiten möglich | + Energieeffizienter |
| - nur ein Teil der bei der Talfahrt erzeugten Energie wird rückgespeist | + größere Rückspeisung möglich wegen langsamerer Fahrt |
| | - langsamer |

1.2 Dieselmotor in einem Hybridfahrzeug

1.2.1



1.2.2

	T [°C]	P [bar]	V [m³]
1	100	1	$0,4 * 10^{-3}$
2	917,05 (1190,05 K)	58	$2,2 * 10^{-5}$
3	1911,5	58 (58 * 10⁵ N/m²)	$4,04 * 10^{-5}$
4	600	2,34	$0,4 * 10^{-3}$

$$V_1 = \frac{1,6 \text{ l}}{4 \text{ Zylinder}} = 0,4 \text{ l} = 0,4 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{mit } \epsilon = \frac{V_1}{V_2} \rightarrow V_2 = \frac{V_1}{\epsilon} = \frac{0,4 * 10^{-3} \text{ m}^3}{18} = 2,22 * 10^{-5} \text{ m}^3$$

Adiabat von 1 nach 2

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

$$T_2 = \frac{T_1}{\left[\frac{V_2}{V_1} \right]^{\kappa-1}} = \frac{373 \text{ K}}{\left[\frac{2,22 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3}{0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} \right]^{1,4-1}} = 1185,7 \text{ K}$$

Isoabar von 2 nach 3

$$P_2 = P_3 = 58 \text{ bar}$$

$$\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3}$$

$$V_3 = \frac{V_2}{T_2} \cdot T_3 = \frac{2,2 \cdot 10^{-4}}{1190,05 \text{ K}} \cdot 2184,5 \text{ K} = 4,04 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Isochor von 4 nach 1

$$V_4 = V_1 = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

1.3 Ertragsberechnung an PV-Anlagen

1.3.1 Jahreserträge beider Häuser in kWh.

3

abgelesen aus Formelsammlung S.27 Tabelle Mittlere tägliche Globalstrahlung Karlsruhe Jahr $H_h = 3,28 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{ d})$ und $K_{\alpha,\beta} = 1,17$ bei $\beta = 37^\circ$

$$\text{Haus A: } W_{\text{Tag}} = P_{\text{Nenn}} \cdot \frac{H_h}{1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} \cdot K_{\alpha,\beta} = 4 \text{ kW}_p \cdot \frac{3,28 \text{ kWh}}{1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot \text{d}} \cdot 1,17 = 15,35 \frac{\text{kWh}}{\text{d}}$$

$$\text{Haus A: } W_{\text{Jahr}} = 15,35 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \cdot 365 \text{ d} = 5603 \text{ kWh} \text{ bei } 37^\circ \text{ Südausrichtung}$$

$$\text{Haus B: } W_{\text{Jahr}} = 5603 \text{ kWh} \cdot \frac{0,92}{1,17} = 4406 \text{ kWh} \quad K_{\alpha,\beta} = 0,92 \text{ bei } 37^\circ \text{ Westausrichtung}$$

1.3.2 Fläche in m^2 bei Haus B zusätzlich mit Solarzellen belegt?

3

$$\frac{5603 \text{ kWh}}{4406 \text{ kWh}} = 1,27 \quad 1,27\text{-fache Fläche notwendig bei Haus B}$$

$$W_{\text{Jahr-ideal}} = A_{\text{PV}} \cdot H_{h\text{-Jahr}} \cdot K_{\alpha,\beta} \cdot \eta_{\text{PV}}$$

$$\rightarrow A_{\text{PV}} = \frac{W_{\text{Jahr-ideal}}}{H_{h\text{-Jahr}} \cdot K_{\alpha,\beta} \cdot \eta_{\text{PV}}} = \frac{5603 \text{ kWh}}{3,28 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \cdot 365 \text{ d} \cdot 0,92 \cdot 0,9} = 4,44 \text{ m}^2$$

$$\text{Haus B: } 4,44 \text{ m}^2 \cdot 1,27 = 5,64 \text{ m}^2$$

$$\text{zusätzliche Fläche: } 5,64 \text{ m}^2 - 4,44 \text{ m}^2 = 1,2 \text{ m}^2$$

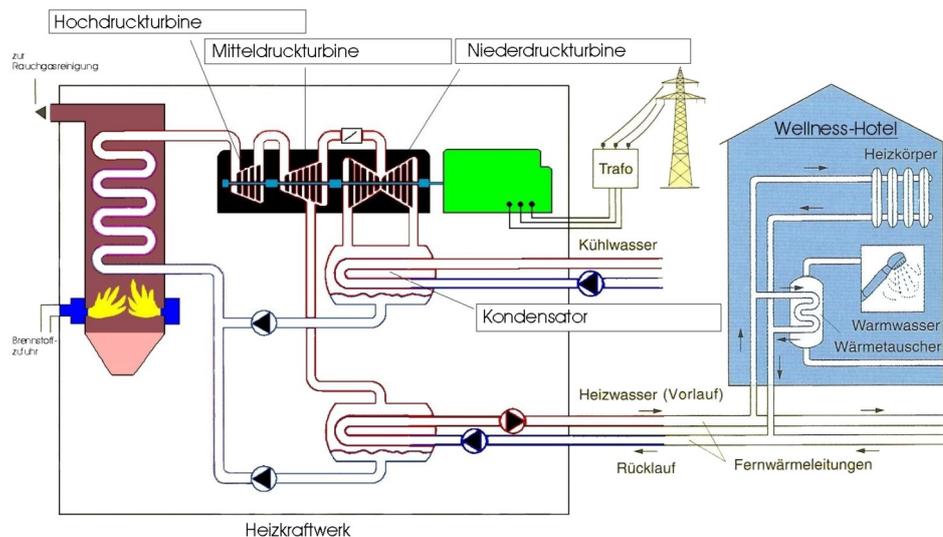
30

2 Beheizung eines Wellness-Hotels

Punkte

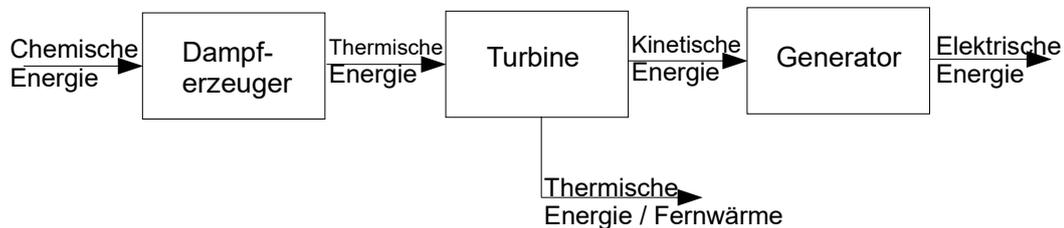
2.1 Fernwärmeversorgung

2.1.1



2

2.1.2



2

2.1.3 $\eta_{Ges} = \eta_{DE} \cdot \eta_T \cdot \eta_G = 0,84 \cdot 0,45 \cdot 0,98 = 0,37 = 37 \%$

$$\eta_{Ges} = \frac{P_{ab}}{P_{zu}}$$

$$P_{zu} = \frac{P_{ab}}{\eta_{Ges}} = \frac{230 \text{ MW}}{0,37} = 621,6 \text{ MW}$$

3

$$P_{zu} = \frac{W_{zu}}{t} = \frac{Q_{zu}}{t}$$

$$Q_{zu} = P_{zu} \cdot t = 621,6 \text{ MW} \cdot 3600 \text{ s} = 2,24 \cdot 10^{12} \text{ J} = 76353,2 \text{ kg SKE} = 76,35 \text{ t SKE}$$

2.2 Erdgas-Brennwertgerät

2.2.1 unterschiedliche Bezugsgröße: Heizwert entspricht der bei der Verbrennung freierwerdenden Energie (bei der Verbrennung gebildetes Wasser bleibt dampfförmig). Brennwert berücksichtigt zusätzlich die Kondensationsenergie.

Der Normnutzungsgrad bezogen auf den Brennwert ist daher ca. 10 % kleiner als bezogen auf den Heizwert.

1

2.2.2 niedrigere Heizkreistemperatur \Rightarrow nahezu bei jeder Außentemperatur sind Vor- und Rücklauf­temperatur niedriger als der Taupunkt des Abgas, die Kondensationswärmenutzung ist nahezu komplett. Bei höheren Heizkreistemperaturen kann nur ein Teil der Kondensationswärme genutzt werden.

2

2.2.3 Betrachtung der angegebenen Kondensatmenge:

$$\dot{Q}_{\text{eingespart}} = \dot{Q}_v = \dot{m} \cdot r = 6,4 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 0,6272 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 4,01 \text{ kW}$$

4

Einsparung: $\dot{V}_{G, \text{eingespart}} = \frac{\dot{Q}_{\text{eingespart}}}{H_i} = \frac{4,01 \text{ kW}}{10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} = 0,401 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$

2.2.4 $\lambda = 1,0$: $\text{CH}_4 + 2 \text{O}_2 + 8 \text{N}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 8 \text{N}_2$

Luftüberschuss 20 % $\Rightarrow \lambda = 1,2$: $\text{CH}_4 + 2,4\text{O}_2 + 9,6\text{N}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 0,4\text{O}_2 + 9,6\text{N}_2$

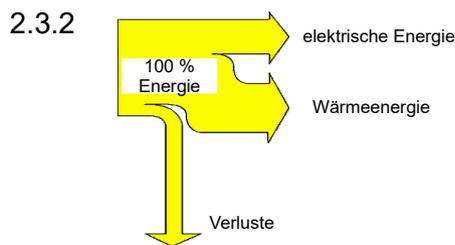
4

$$\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{amb}}} = \varphi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2}{1 + 2 + 0,4 + 9,6} = 0,15, \text{ aus Tabelle FS: } \vartheta_T = 54 \text{ }^\circ\text{C}$$

2.3 Blockheizkraftwerk

2.3.1 hoher Bedarf an Heizwärme über das ganze Jahr, hoher Bedarf an elektrischer Energie. Es sind lange Betriebszeiten und eine hohe Eigennutzung der elektrischen Leistung zu erwarten. Daher ist der Gesamtwirkungsgrad sehr hoch, die Anlage kann sehr wirtschaftlich betrieben werden.

1

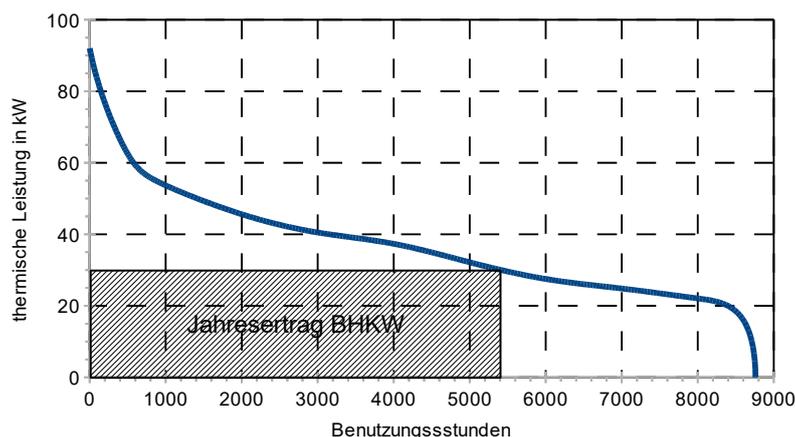


2

2.3.3 $\eta_{\text{el}} = \eta_{\text{mech}} \cdot \eta_{\text{Gen}} = 0,35 \cdot 0,95 = 0,33$, $\eta_{\text{therm}} = \eta_{\text{ges}} - \eta_{\text{el}} = 0,92 - 0,33 = 0,59$

3

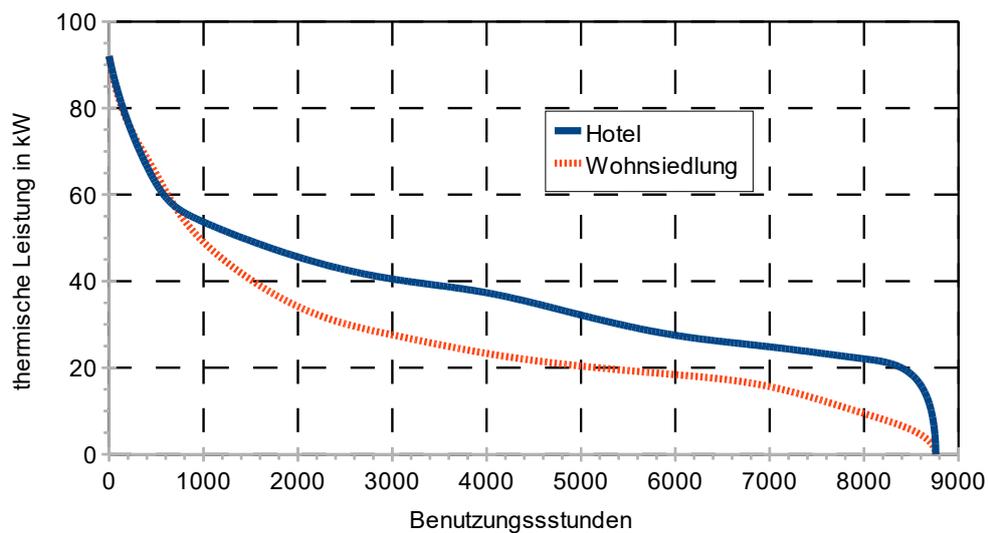
2.3.4 $Q = \dot{Q} \cdot t = 30 \text{ kW} \cdot 5400 \text{ h} = 162 \text{ 000 kWh}$



Die Eintragung des Wärme­ertrages im Diagramm ist nicht erforderlich.

4

2.3.5 Verlauf Wohnsiedlung deutlich steiler: Wärmebedarf in der Übergangszeit und v. a. im Sommer viel geringer.



4

Anwendung des BHKW im Hotel: sehr lange Laufzeiten, effizienter Betrieb des BHKW möglich. Zusätzlich auch hoher Strombedarf im Hotel, hohe Eigennutzung zu erwarten.

Mögliche Laufzeiten des BHKW in der Wohnsiedlung sehr viel kürzer (ca. 2200 Vollbenutzungsstunden bei der eingezeichneten Linie) \Rightarrow effizienter Betrieb des BHKW bei den beschriebenen Randbedingungen nicht möglich.

30

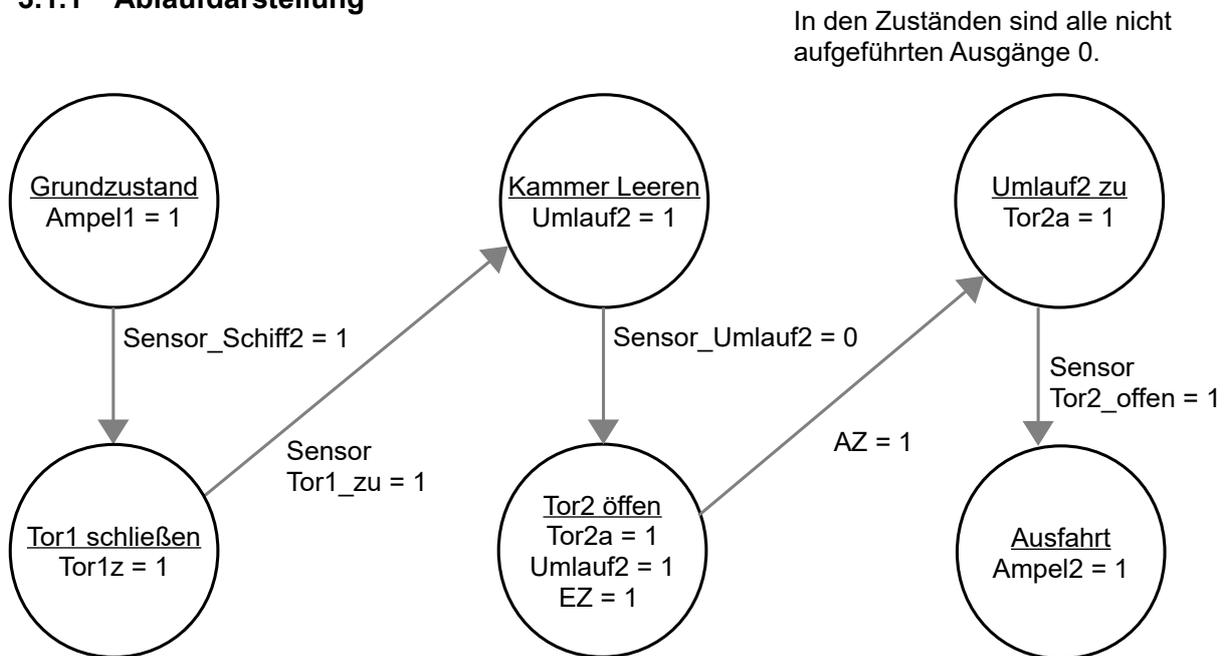
3 Wahlaufgabe

3.1 Ablaufsteuerung einer Schleuse

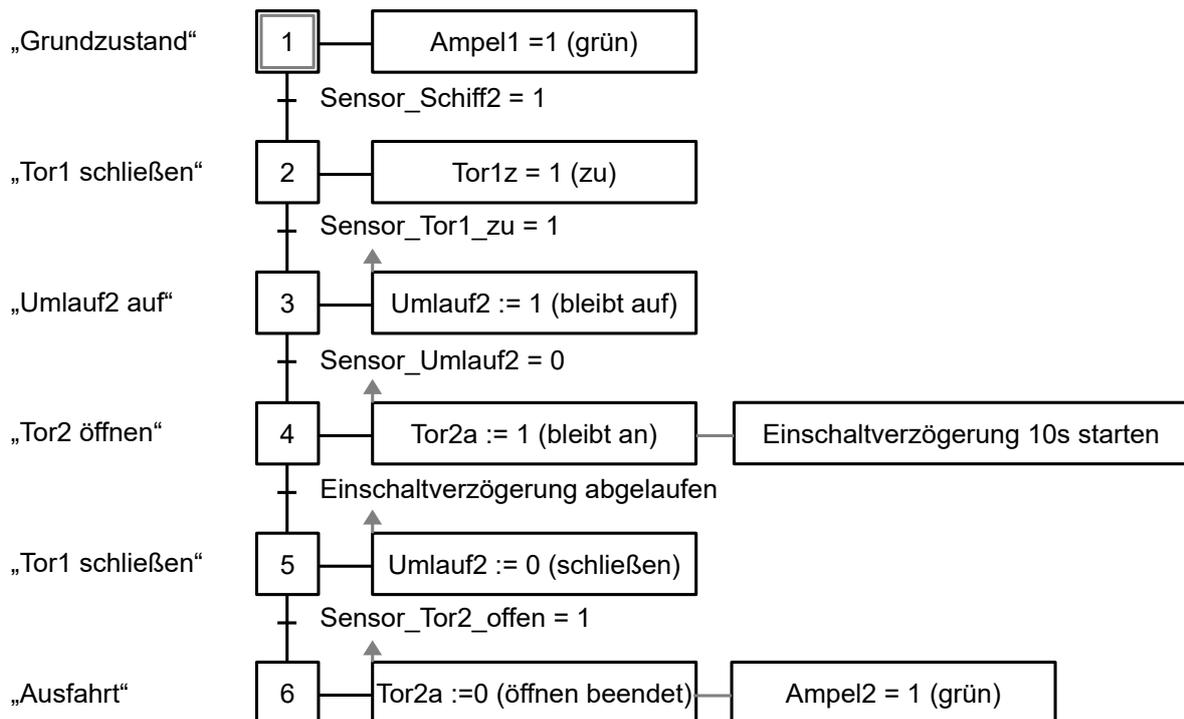
3.1.1 Ablaufdarstellung

Punkte

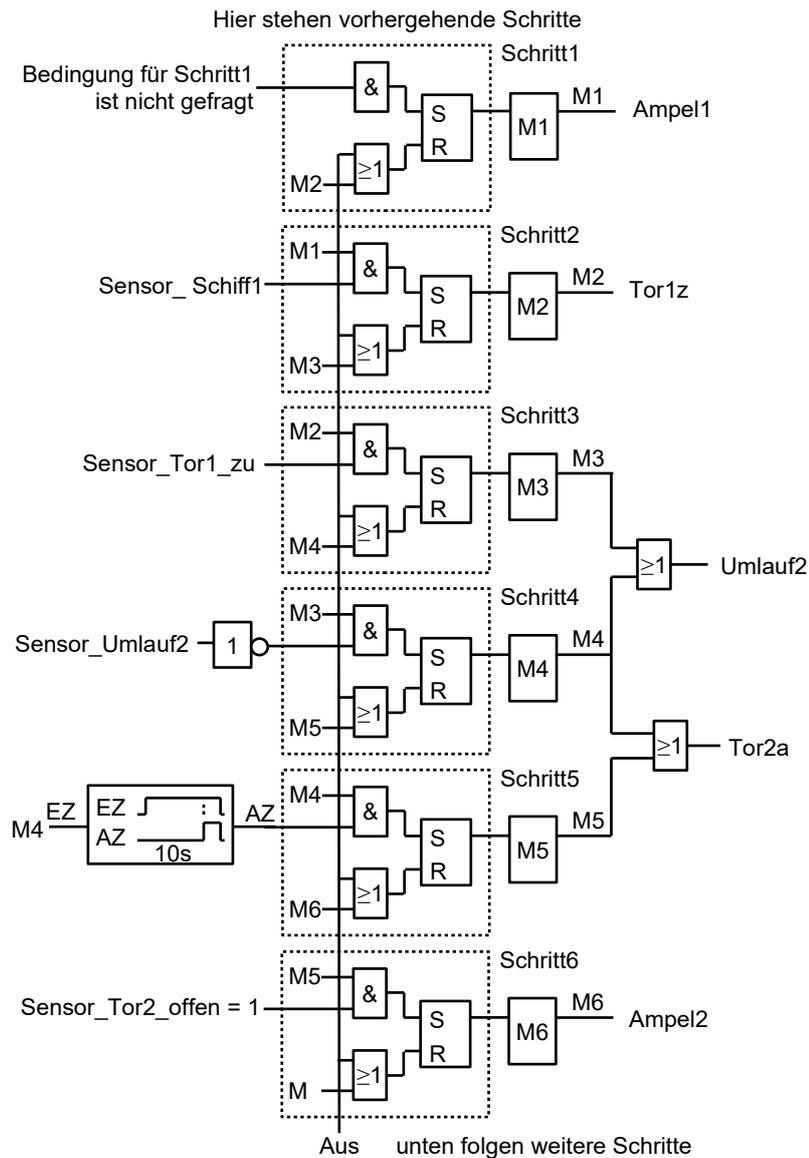
6



Alternative Darstellung in GRAFCET

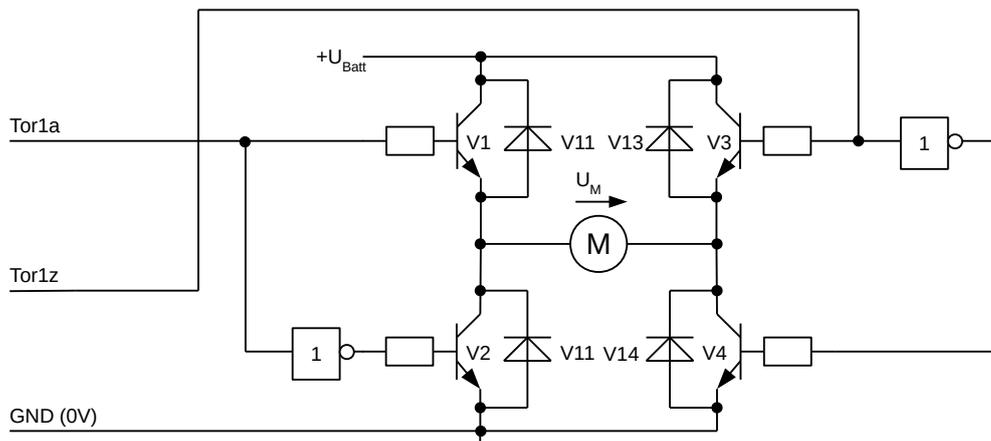


3.1.2 Schrittkette



5

3.1.3 Motoransteuerung für die Tore



3

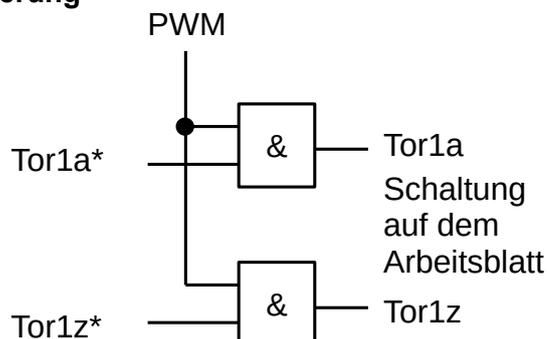
3.1.4 Freilaufdioden

Beim Ein- und Ausschalten des Motor entstehen Spannungsspitzen, die umgekehrt

2

gepolt sind, wie die Durchlassrichtung der Transistoren. Daher leiten die Dioden wenn diese Spannungsspitzen entstehen und schließen sie kurz.

3.1.5 PWM-Ansteuerung



3

Das PWM-Signal ist zu Beginn nur sehr kurz eingeschaltet (kleiner Tastgrad). Die Einschaltzeit (bzw. der Tastgrad) wird langsam bis zum Maximum erhöht.

3.2 Solarthermie-Anlage mit Heizungsunterstützung

3.2.1



4

3.2.2 Es wird ein Vakuum-Röhrenkollektor gewählt, da dieser bei kalten Außentemperaturen einen höheren Wirkungsgrad besitzt als ein Flachkollektor. Mit größer werdender Differenz zwischen Kollektortemperatur und Außentemperatur nimmt der Wirkungsgradvorteil zu.

2

3.2.3 Der Kollektor sollte Richtung Süden ausgerichtet werden. Für eine sinnvolle Heizungsunterstützung ist es notwendig, den Kollektor möglichst steil aufzuständern, z.B. 60-70°. Somit wird im Winterhalbjahr, wenn die Sonne flach steht, der maximale Ertrag erreicht. Im Sommerhalbjahr, wenn die Sonne hoch und die Solarenergie im Überfluss zur Verfügung steht, hat man trotz der steilen Aufständigung genug Ertrag.

3

3.2.4 Im Sommerbetrieb hat man mit der größtmöglichen Kollektorfläche das Problem, dass man mehr Wärme erzeugt als man benötigt. Wird der Kollektor zu heiß, geht die Solarflüssigkeit in Dampf. Der entstehende Überdruck wird von einem Membranausdehnungsgefäß aufgenommen, damit das Leitungssystem nicht platzt.

2

4 Neubau eines Eigenheims

Punkte

4.1 Bauphysikalische Überlegungen

4.1.1 $U = \frac{1}{R_T} \Rightarrow R_T = \frac{1}{U} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + R_{se}$

$$R_T = 0,13 \frac{m^2 \cdot K}{W} + \frac{0,02 m}{0,51 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,24 m}{2 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,12 m}{0,03 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,02 m}{1 \frac{W}{m \cdot K}} + 0,043 \frac{m^2 \cdot K}{W} = 4,35 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

2

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{4,35 \frac{m^2 \cdot K}{W}} = 0,23 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

4.1.2 $U = 0,2 \frac{W}{m^2 \cdot K}$, $R_T = \frac{1}{U} = 5 \frac{m^2 \cdot K}{W}$, $R = R_T - R_{s,i} - R_{s,e} = 4,827 \frac{m^2 \cdot K}{W}$

$$R = \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3}, \quad d_2 = \left(R - \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} \right) \cdot \lambda_2,$$

3

$$d_2 = \left(4,827 \frac{m^2 \cdot K}{W} - \frac{0,02 m}{0,51 \frac{W}{m \cdot K}} - \frac{0,02 m}{1 \frac{W}{m \cdot K}} \right) \cdot 0,13 \frac{W}{m \cdot K} = 0,62 m$$

4.1.3 Das A/V-Verhältnis beschreibt die Oberfläche der thermischen Gebäudehülle dividiert durch beheiztes Volumen. Je kleiner dieses Verhältnis ist, desto kompakter (energiesparender) ist das Haus. Je größer die raumumschließende Außenfläche, desto höher sind die Transmission-Wärmeverluste.

2

Gebäudevorschlag: „Würfelförmig“ bzw. möglichst kompakte Bauweise

4.1.4 Aus Diagramm ausgelesen: Februar mit Ausrichtung Norden ca. $15 \frac{kWh}{m^2 \cdot \text{Monat}}$
 Ausrichtung Süden ca. $60 \frac{kWh}{m^2 \cdot \text{Monat}}$

Berechnung monatlicher Ertrag: Norden: $15 \frac{kWh}{m^2 \cdot \text{Monat}} \cdot 8 m^2 = 120 \frac{kWh}{\text{Monat}}$
 Süden: $60 \frac{kWh}{m^2 \cdot \text{Monat}} \cdot 8 m^2 = 480 \frac{kWh}{\text{Monat}}$

1

4.1.5 Aus Tabelle Formelsammlung:

	Rohdichte in $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$	Wärmeleitfähigkeit $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$
Holzfaserdämmplatten	1120 - 280	0,032 – 0,060
Hanf	20 - 25	0,040

2

Aufgrund der ähnlichen Wärmeleitfähigkeit von Hanf und Holzfaserdämmplatten ist das winterliche Wärmedämmverhalten von beiden Werkstoffe ungefähr gleich.

Die Rohdichte der Holzfaserdämmplatten ist deutlich höher als die des Hanfes. Dadurch ergibt sich eine größere flächenbezogene Masse und damit eine höhere Wärmespeicherfähigkeit. Die Holzfaserdämmplatten eignen sich daher besser für den sommerliche Wärmeschutz.

4.2 Zentrale Kontrollierte Wohnraumlüftung mit Wärmerückgewinnung

4.2.1 falsch:

Bad: Die zugeführte Luft verteilt die oft feuchte Luft des Badezimmers im ganzen Gebäude. Richtig: Die feuchte Luft des Badezimmers an die Umgebung abführen.

Schlafen: Die verbrauchte Luft aus dem Gebäude wird über das Schlafzimmer abgeführt. Richtig: Außenluft über das Schlafzimmer einbringen.

Gut:

Wohnen: Außenluft wird in das Wohnzimmer eingebracht und sorgt so für gute Luftqualität.

Küche: Die mit Gerüchen belastete und oft feuchte Luft wird an die Umgebung abgegeben.

2

4.2.2 Durch Ventilatoren wird Außenluft in das Gebäude geführt, die in einem Platten-Wärmetauscher aufgewärmt wird. Sie wird dann als Zuluft in die Wohn- und Schlaf-räume zugeführt.

Die Abluft aus Bad und Küche gibt im Platten-Wärmetauscher ihre Wärme ab und wird durch einen Ventilator als Fortluft abgeführt.

2

4.2.3 gegeben: $A = 152 \text{ m}^2$, $h = 2,5 \text{ m}$

$$V_R = A \cdot h = 152 \text{ m}^2 \cdot 2,5 \text{ m} = 380 \text{ m}^3, \quad \dot{V}_{AU} = \beta \cdot V_R = 0,5 \frac{1}{\text{h}} \cdot 380 \text{ m}^3 = 190 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

erforderliche Außenluftfrate: $4 \text{ Personen} \cdot 30 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{Person}} = 120 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \Rightarrow$ ausreichend

$$4.2.4 \quad \dot{Q} = \frac{\dot{V} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \Delta T}{\eta} = \frac{190 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 1,33 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 30 \text{ K}}{0,8} = 9524 \text{ kJ}$$

2

4.2.5 aus h,x-Diagramm: $x_1 = 0,9 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$, $x_2 = 9,1 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$.

Pro kg Luft sind $\Delta x = 8,2 \text{ g}$ Wasser zuzuführen.

4.3 Schalenkreuzanemometer

4.3.1 Es handelt sich um einen Widerstandsläufer, da der Wind eine Widerstandskraft auf die beiden Halbkugeln ausübt. Dabei unterscheidet sich die Widerstandskraft der oberen Halbkugel von derjenigen der unteren Halbkugel aufgrund unterschiedlicher Widerstandsbeiwerte.

2

4.3.2 Der Widerstandsbeiwert der oberen Halbkugel beträgt $c_{WO} = 1,3$, der der unteren Halbkugel $c_{WU} = 0,34$ (siehe Formelsammlung: Widerstandsläufer und Widerstandsbeiwert). Dadurch ist die Widerstandskraft $F_{WO} < F_{WU}$, das Anemometer dreht sich also in Richtung B (im Uhrzeigersinn).

2

$$4.3.3 \quad A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot (0,05\text{m})^2}{4} = 1,963 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$F_{WO} = c_{WO} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot (v - v_{\text{Körper}})^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot F_{WO}}{c_{WO} \cdot \rho \cdot A}} + v_{\text{Körper}}$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 25,2 \text{ mN}}{1,3 \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,963 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2}} + 1,94 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

2

4.3.4 Bei dieser Form eines Widerstandsläufers kann die Umfangsgeschwindigkeit nie größer als die Windgeschwindigkeit sein, deshalb muss das Verhältnis $v_{\text{Körper}} / v$ (Schnellaufzahl) kleiner 1 sein

$$\lambda = \frac{v_{\text{Körper}}}{v} = \frac{1,94 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{6 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \frac{1,94}{6} = 0,3233$$

2

4.3.5 Da der Widerstandsbeiwert c_w einer gefüllten Halbkugel kleiner ist als der Widerstandsbeiwert einer hohlen Halbkugel, verringert sich die Kraft F_w auf die Halbkugel. Eine geringere Kraft führt zu einer geringeren Umfangsgeschwindigkeit.

2

30

TG Umwelttechnik**Abitur 2015/2016****Hauptprüfung****Lösungsvorschlag**

Arbeitszeit: 270 Minuten
Hilfsmittel: Formelsammlung Umwelttechnik
Zugelassener Taschenrechner

Stoffgebiet Teil 1: Pflichtbereich
Aufgabe 1: Windkraft
Photovoltaik

Aufgabe 2: Wärmeerzeugung
Wärme­kraftwerke

Teil 2: Wahlbereich
Aufgabe 3: Hybridfahrzeug
Dieselmotor
Klimaanlage und Abgasreinigung

Aufgabe 4: Bauphysik
Steuerungstechnik

1 Windkraft, Photovoltaik

Punkte

1.1 Repowering einer Windkraftanlage

$$1.1.1 \quad \eta_G = \frac{P_{N1}}{P_{mech1}} \quad c_P = \frac{P_{mech1}}{P_{W1}}$$

$$P_{W1} = \frac{P_{mech1}}{c_P} = \frac{P_{N1}}{\eta_G \cdot c_P} = \frac{1,5 \text{ MW}}{0,96 \cdot 0,5} = 3,125 \text{ MW}$$

2

$$1.1.2 \quad A_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot (70 \text{ m})^2}{4} = 3848,45 \text{ m}^2$$

1,5

$$P_{W1} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_1 \cdot v^3 \quad \rightarrow \quad v = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot P_{W1}}{\rho \cdot A_1}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 3,125 \text{ MW}}{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3848,45 \text{ m}^2}} = 11,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

1.1.3 $v = 12,7 \text{ m/s}$ bei Nabenhöhe $h_2 = 135 \text{ m}$ aus dem Diagramm abgelesen

2,5

$$A_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = \frac{\pi \cdot (127 \text{ m})^2}{4} = 12668 \text{ m}^2$$

$$P_{W2} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_2 \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 12668 \text{ m}^2 \cdot (12,7 \frac{\text{m}}{\text{s}})^3 = 15,57 \text{ MW}$$

$$P_{N2} = P_{W2} \cdot \eta_G \cdot c_P = 15,57 \text{ MW} \cdot 0,96 \cdot 0,5 = 7,5 \text{ MW}$$

1.1.4 Die Veränderung der Nabenhöhe bewirkt eine Vergrößerung der Windgeschwindigkeit von $v_1 = 11,1 \text{ m/s}$ auf $v_2 = 12,7 \text{ m/s}$

2,5

Die Windgeschwindigkeit geht in der 3. Potenz in die Formel für die Windleistung ein.

$$\frac{v_2^3}{v_1^3} = \frac{(12,7 \frac{\text{m}}{\text{s}})^3}{(11,1 \frac{\text{m}}{\text{s}})^3} = 1,5$$

Damit ist der Einfluss der größeren Nabenhöhe und die damit verbundene Vergrößerung der Windgeschwindigkeit nicht so groß wie die Verlängerung der Rotorblätter mit der damit verbundenen Vergrößerung der Fläche.

Alternativ kann die Auswirkung der Rotorblattvergrößerung untersucht werden:

Die vom Wind durchströmte Fläche ist proportional zur Windleistung, der Durchmesser der Rotorblätter geht quadratisch in die Fläche ein.

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\pi \cdot \frac{d_2^2}{4}}{\pi \cdot \frac{d_1^2}{4}} = \frac{d_2^2}{d_1^2} = \frac{(127 \text{ m})^2}{(70 \text{ m})^2} = 3,3 \quad \text{Probe: } 1,5 \cdot 3,3 = 5$$

Damit ist der Einfluss der längeren Rotorblätter und die damit verbundene Vergrößerung der Windgeschwindigkeit größer als die Leistungssteigerung durch den mit der größeren Nabenhöhe einhergehende Windgeschwindigkeitszuwachs.

$$1.1.5 \quad \lambda = \frac{u}{v} = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{v} \rightarrow n = \frac{\lambda \cdot v}{\pi \cdot d} \quad n_1 = \frac{7 \cdot 11,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{70 \text{ m} \cdot \pi} = 0,3533 \frac{1}{\text{s}} = 21,2 \frac{1}{\text{min}}$$

$$n_2 = \frac{7 \cdot 12,7 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{127 \text{ m} \cdot \pi} = 0,2228 \frac{1}{\text{s}} = 13,4 \frac{1}{\text{min}}$$

Bei gleicher Schnelllaufzahl hat das größere Windrad eine kleinere Drehzahl. (Dies wirkt optisch ruhiger.)

$$1.1.6 \quad W_2 = P_{N2} \cdot t = 7,5 \text{ MW} \cdot 2000 \text{ h} = 15 \text{ GWh} = 15 \cdot 10^6 \text{ kWh} \quad 2$$

$$\text{Vergütung} = 15 \cdot 10^6 \text{ kWh} \cdot 0,088 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 1\,320.000 \text{ €}$$

$$\text{Anzahl der Haushalte} = \frac{W_2}{W_{\text{Haushalt}}} = \frac{15 \cdot 10^6 \text{ kWh}}{4600 \text{ kWh}} = 3260$$

1.1.7 Mit einem Windrad alleine könnte sich kein Dorf autark versorgen, auch wenn die rechnerisch ermittelte Anzahl der versorgten Haushalte dies vermuten lässt. Eine Windkraftanlage liefert aufgrund unterschiedlicher Windgeschwindigkeiten keinen konstanten Energiebetrag. Es müsste zusätzlich ein großer Speicher für die elektrische Energie vorgehalten werden, in dem überschüssige Energie gespeichert werden kann, wenn das Energieangebot den Energiebedarf übersteigt. Damit könnten die Haushalte auch bei Windflaute weiterhin mit Energie versorgt werden. 2,5

1.2 Photovoltaik-Anlage

$$1.2.1 \quad W_{\text{Jahr-ideal}} = A_{\text{PV}} \cdot H_{\text{h-Jahr}} \cdot K_{\alpha,\beta} \cdot \eta_{\text{PV}} \quad 4$$

$$A_{\text{PV}} = \frac{W_{\text{Jahr-ideal}}}{H_{\text{h-Jahr}} \cdot K_{\alpha,\beta} \cdot \eta_{\text{PV}}} = \frac{15 \cdot 10^6 \text{ kWh}}{3,28 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \cdot 365 \text{ d} \cdot 1,17 \cdot 0,18} = 59.493 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{ges}} = 1,7 \cdot A_{\text{PV}} = 101.138 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{Fußball}} = 105 \cdot 68 \text{ m}^2 = 7.140 \text{ m}^2$$

$$\frac{A_{\text{ges}}}{A_{\text{Fußb}}} = 14,2 \quad \text{Die Fläche entspricht der Größe von 14,2 Fußballfeldern.}$$

$$1.2.2 \quad W_{\text{Tag}} = P_{\text{Nenn}} \cdot \frac{H_{\text{h}}}{1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} \cdot K_{\alpha,\beta} = \frac{W_{\text{Jahr}}}{365} = A_{\text{PV}} \cdot \frac{H_{\text{h-Jahr}}}{365} \cdot K_{\alpha,\beta} \cdot \eta_{\text{PV}} \quad | :k \quad | :H_{\text{h}} \quad 2$$

$$\frac{P_{\text{Nenn}}}{1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} = A_{\text{PV}} \cdot \eta_{\text{PV}} = 59.493 \text{ m}^2 \cdot 0,18$$

$$P_{\text{Nenn}} = 10.710 \text{ kW} = 10,7 \text{ MW}$$

1.2.3 $\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{Nenn}}{P_{Sonne}}$ 2,5

$$P_{Nenn} = P_{Sonne} \cdot \eta = 1000 \frac{W}{m^2} \cdot 0,18 = 180 \frac{W}{m^2}$$

$$P_{Nenn} = 180 \frac{W}{m^2} \cdot 1,5 m^2 = 270 W$$

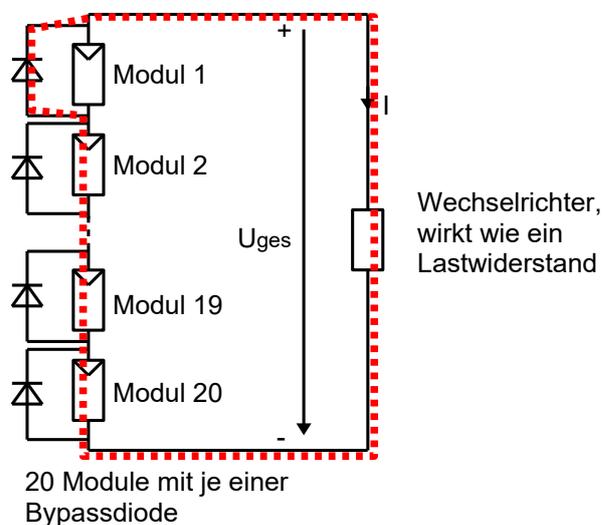
$$\text{Anzahl} = \frac{10,8 MW}{270 W} = 40.000 \quad (\text{bzw. } 39630 \text{ bei } P_{Nenn} = 10,7 MW)$$

Alternativ:

$$N = \frac{A_{PV}}{A_{Modul}} = \frac{59.500 m^2}{1,5 m \cdot 1 m} = 39.700$$

$$P_{Modul} = \frac{P_N}{N} = \frac{10,8 MW}{39700} = 272 W$$

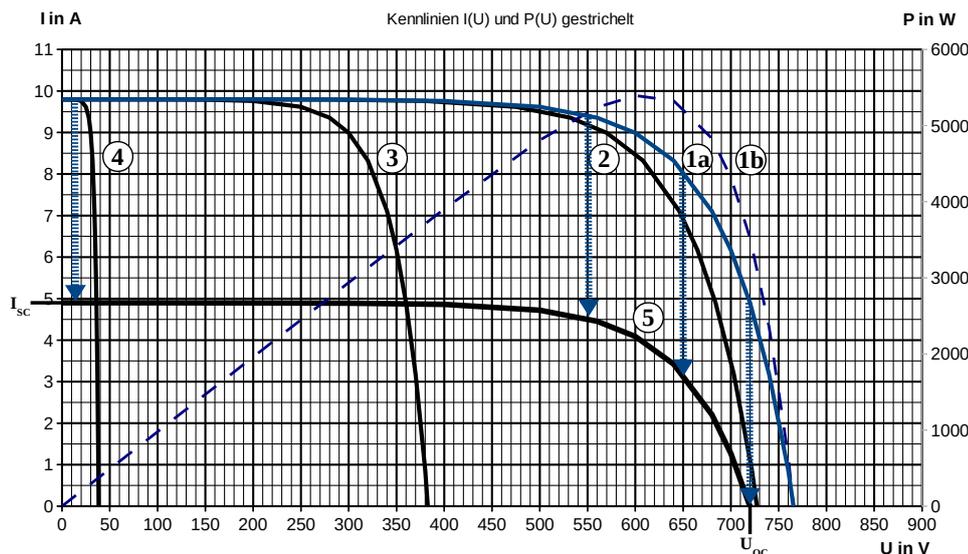
1.2.4 1



1.2.5 Ein Modul wird durch eine Bypassdiode überbrückt. Dadurch sinkt die Gesamtspannung eines Strings um eine Modulspannung. Es addieren sind also nur noch die Spannungen von 19 Modulen. Daher ergibt sich Kennlinie 2 für den gesamten String. (Kennlinie 1 ist die eines Moduls.) 2

1.2.6 $U_{MPP-Anlage}$ abgelesen beim Maximum von $P(U)$: $U_{MPP} = 600 V$
 $\rightarrow 1 \text{ Modul: } U_{MPP-Modul} = 600 V / 20 = 30 V$
 $I_{MPP} = 9 A$ (mit $I(U)$ -Kennlinie bei 600 V abgelesen) 1

1.2.7



2,5

Halbe Bestrahlungsstärke (500 W/m² statt 1000 W/m²) → halber Kurzschlussstrom
 Die Kurve bei STC wird so nach unten verschoben, dass sich der halbe Kurzschlussstrom ergibt.

Abgelesene Werte: I_{sc} = 4,9 A und U_{oc} = 720 V

30

2 Wärme erzeugen, Wärmekraftwerke

2.1 Sanierung eines Altbaus

2.1.1 z. B. FS S. 27: ablesen in der Grafik für Berlin: mittlere jährliche globale Einstrahlung: 850 kWh(m²a).

1

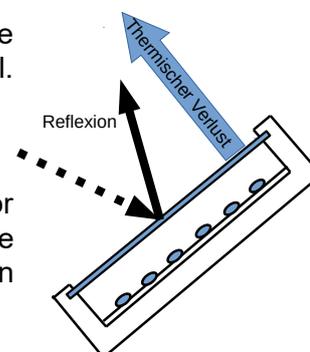
Alternativ: Ermittlung aus Monatswerten für Würzburg (FS S. 7) 1150 kWh(m²a)

2.1.2 Optische Verluste durch Reflexion (25%), thermische Verluste (25%) durch Abstrahlung (Front + Seite), evtl. Konvektion durch Wind,

3

Zahlenwerte aus Tabelle/Diagramm FS. S. 7:

Bei einer Temperaturdifferenz von 0 K zwischen Kollektor und Umgebung (y-Achse) betragen die optischen Verluste ca. 25 %. Dadurch ergibt sich ein thermischer Verlust von ebenfalls ca. 25 %.



2.1.3 Berechnung der Aufheizzeit:

3

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} \Rightarrow t = \frac{400 \text{ kg} \cdot 1,16 \frac{\text{Wh}}{\text{kg K}} \cdot 40 \text{ K}}{800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 6 \text{ m}^2 \cdot 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 9,5 \text{ h}$$

2.1.4 Sehr starke Schwankungen im Energieertrag zwischen Sommer und Winter.

1

2.1.5 Kollektor 1: Hoher Deckungsgrad: Der Warmwasserbedarf kann über das ganze Jahr von der Solarthermieanlage gedeckt werden. Geringer Nutzungsgrad: Ein großer Teil der gewonnenen Energie ist nicht nutzbarer „Überschuss“.

Kollektor 2: sehr hoher Nutzungsgrad, geringer Deckungsgrad: Nur in den Sommermonaten wird kein zusätzliche Wärmeerzeuger für die Trinkwassererwärmung benötigt.

Beiden Kollektoren kann bei entsprechender Begründung der Vorzug gegeben werden.

2.2 Gas-Brennwertgerät

2.2.1 Das Verhältnis von tatsächlicher Luftmenge zur theoretisch benötigten Verbrennungsluftmenge. 1

2.2.2 $\lambda = 1: C_3H_8 + 5 O_2 + 20 N_2 \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O + 20 N_2$ 4

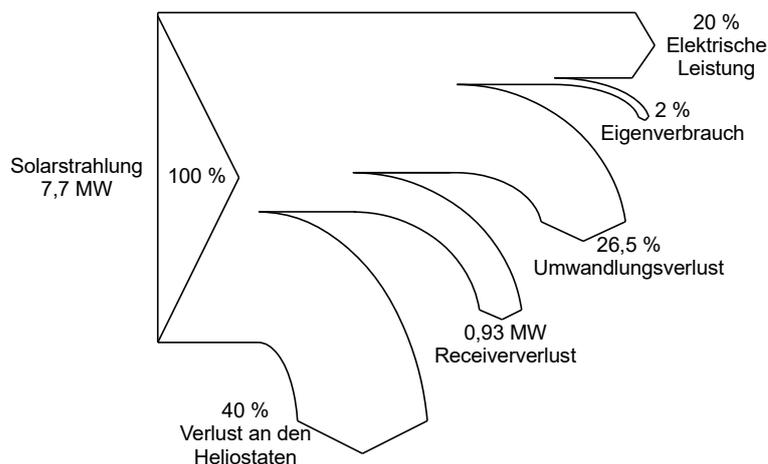
$\lambda = 1,2: C_3H_8 + 6 O_2 + 24 N_2 \rightarrow 3 CO_2 + 4 H_2O + O_2 + 24 N_2$

$$\varphi(H_2O) = \frac{4}{3+4+1+24} = 0,125, p_{H_2O} = 0,125 \text{ bar} \implies \text{abgelesen: } \vartheta_T = 49,9 \text{ }^\circ\text{C}$$

2.2.3 Mögliche Ursache: Sehr kleine Heizflächen setzen bei hohem Wärmebedarf sehr hohe Vorlauftemperaturen voraus. Dies hat zur Folge, dass die Rücklauftemperatur höher ist als der Taupunkt des im Abgas enthaltenen Wasserdampfs. 2

2.3 Solarthermische Kraftwerke

2.3.1 Energieflussdiagramm: 4



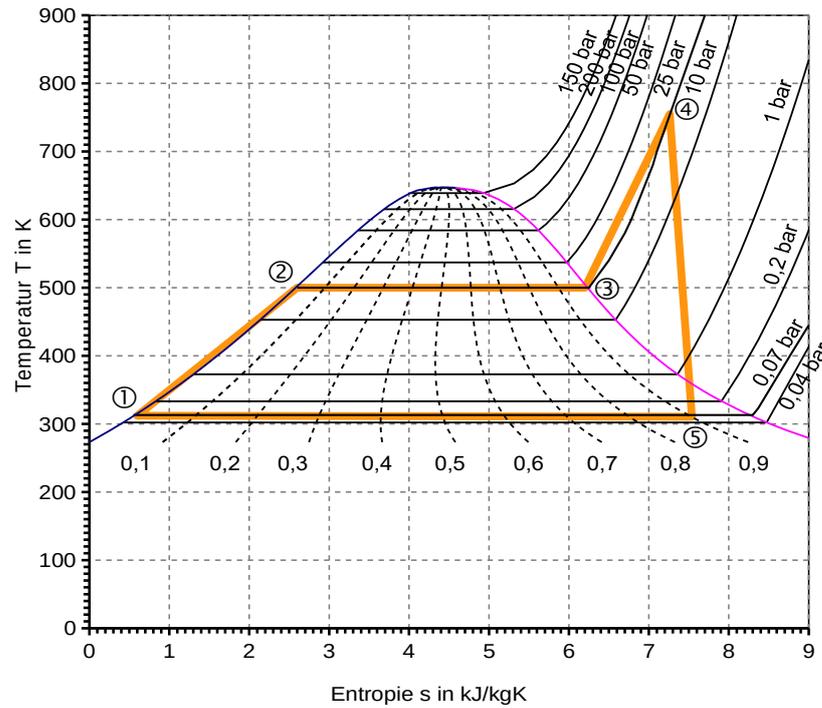
$$\begin{aligned} P_{El} &= P_{Solar} - P_{Kollektor} - P_{Receiver} - P_{Umwandlung} - P_{Eigenverbrauch} \\ &= P_{Solar} - 0,4 \cdot P_{Solar} - 0,93 \text{ MW} - 0,265 \cdot P_{Solar} - 0,02 \cdot P_{Solar} \\ &= 7,7 \text{ MW} - 0,4 \cdot 7,7 \text{ MW} - 0,93 \text{ MW} - 0,265 \cdot 7,7 \text{ MW} - 0,02 \cdot 7,7 \text{ MW} \\ &= 1,5 \text{ MW} \end{aligned}$$

Oder $\eta = \frac{P_{El}}{P_{Solar}} \rightarrow P_{El} = \eta \cdot P_{Solar} = 0,20 \cdot 7,7 \text{ MW} = 1,5 \text{ MW}$ (aus Sankey-Diagramm)

Zahlenwerte sind für die Lösungserstellung erforderlich, müssen in der Lösung aber nicht explizit angegeben werden.

2.3.2

T,s-Diagramm von Wasser



2

2.3.3 Der Dampf sollte nicht mehr als 10 % Wasseranteil besitzen, da die Wassertropfchen beim Aufprall auf die sich schnell drehenden Turbinenschaufeln diese abrasiv schädigen.

2

2.3.4

$$\begin{aligned}
 q_{zu} &= q_{12} + q_{23} + q_{34} \\
 &= \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) (s_2 - s_1) + T_{23} (s_3 - s_2) + \left(\frac{T_3 + T_4}{2} \right) (s_4 - s_3) \\
 &= \left(\frac{315 \text{ K} + 500 \text{ K}}{2} \right) \cdot \left(2,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - 0,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) + 500 \text{ K} \cdot \left(6,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - 2,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \\
 &+ \left(\frac{500 \text{ K} + 753 \text{ K}}{2} \right) \cdot \left(7,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - 6,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \\
 &= 3250,75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\
 w_{\text{Nutz}} &= q_{zu} - |q_{ab}| = 3250,75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2173,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1077,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}
 \end{aligned}$$

4

30

3 Paralleles Hybridfahrzeug

Punkte

3.1 Hybridantrieb

3.1.1 Die Antriebskraft wird zur Überwindung der Rollreibungskraft und der Luftwiderstandskraft benötigt. 1

3.1.2 $P_{mech} = F \cdot v = 220 \text{ N} \cdot \frac{40 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} = 2,44 \text{ kW} < P_{Nenn} = 20 \text{ kW} \rightarrow$ Betriebsart (1) möglich. 1

3.1.3 $P_{el} = \frac{P_{mech}}{\eta} = \frac{2,44 \text{ kW}}{0,85} = 2,87 \text{ kW} \quad t = \frac{W_A}{P_{el}} = \frac{0,8 \text{ kWh}}{2,87 \text{ kW}} = 0,279 \text{ h}$
 $s = v \cdot t = 40 \text{ km/h} \cdot 0,279 \text{ h} = 11,2 \text{ km}$ 2

3.1.4 Fahrsituation (b): Betriebsart (2) sinnvoll, da hier der höhere Energieinhalt des Kraftstofftanks benötigt wird. Außerdem wird bei der schnellen Autobahnfahrt der stärkere Dieselantrieb benötigt. Die elektrische Maschine kann zur Lastpunktverschiebung genutzt werden. 2

Fahrsituation (c): Betriebsart (3) sinnvoll, da so ein höheres Antriebsmoment für den Überholvorgang zur Verfügung steht, der damit schneller abgeschlossen werden kann.

3.1.5 Antriebsleistung: $P = F \cdot v = 720 \text{ N} \cdot \frac{130 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} = 26 \text{ kW}$ 3

Antriebsmoment: $P = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M \quad M = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{26 \text{ kW}}{2 \cdot \pi \cdot 1500/60 \text{ s}^{-1}} = 165 \text{ Nm}$

Die elektrische Maschine wird als Generator betrieben, der durch sein zusätzliches Lastmoment das für die Fahrsituation benötigte Moment von 165 Nm auf den verbrauchsoptimalen Wert von ca. 270 Nm erhöht.

$$M_{zusätzlich} = M_{optimal} - M = 270 \text{ Nm} - 165 \text{ Nm} = 105 \text{ Nm}$$

Die Werte sind zusätzlich in das Kennlinienfeld eingezeichnet, was aber nicht verlangt war (siehe 3.1.7).

3.1.6 Die Kennlinie lässt sich zusammensetzen aus einem Teil mit maximalem Drehmoment und einer Konstantleistungshyperbel. 2

Das maximale Drehmoment von 250 Nm wird ab der Drehzahl 0 min^{-1} erreicht und reicht bis $P = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M \rightarrow n = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot M} = \frac{20 \text{ kW}}{2 \cdot \pi \cdot 250 \text{ Nm}} = 12,7 \text{ s}^{-1} = 764 \text{ min}^{-1}$.

Wertetabelle Konstantleistungshyperbel:

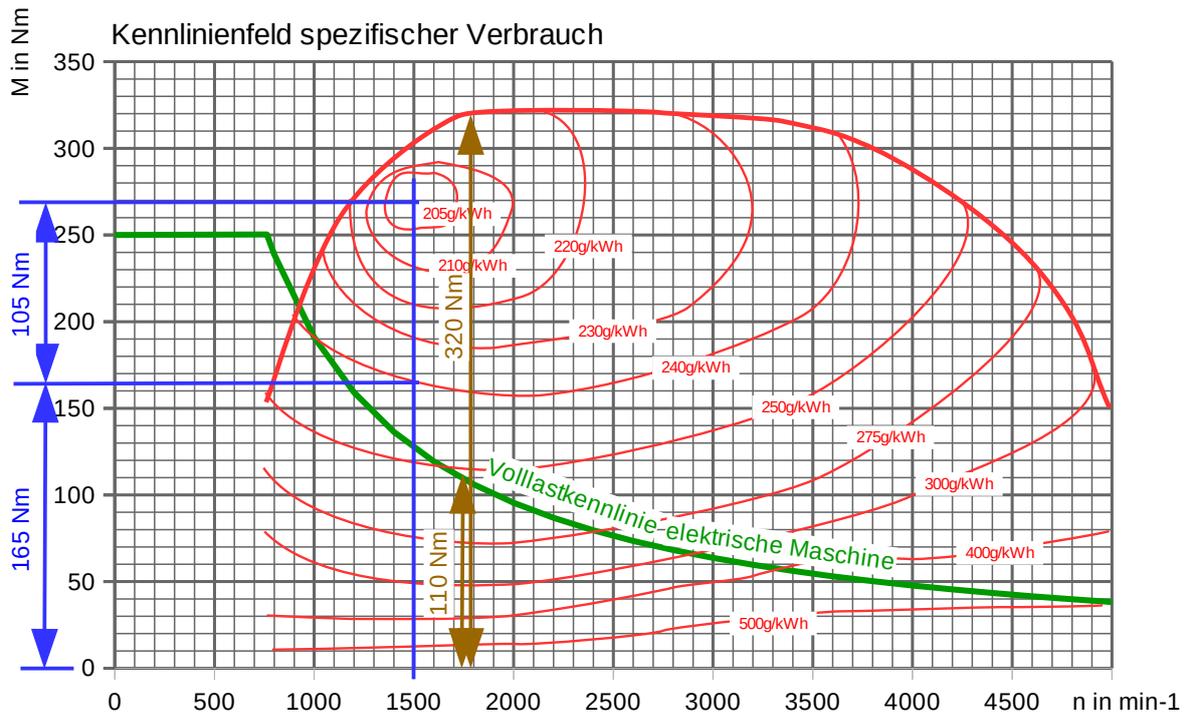
n in min^{-1}	764	1000	2000	3000	4000	5000
M in Nm	250	191	95	64	48	38

Die Kennlinie ist in das Kennlinienfeld eingezeichnet (siehe 3.1.7)

3.1.7 Das maximal zur Verfügung stehende Antriebsmoment ergibt sich im „Boost“-Betrieb bei einer Drehzahl von 1750 min^{-1} . Es beträgt insgesamt 1

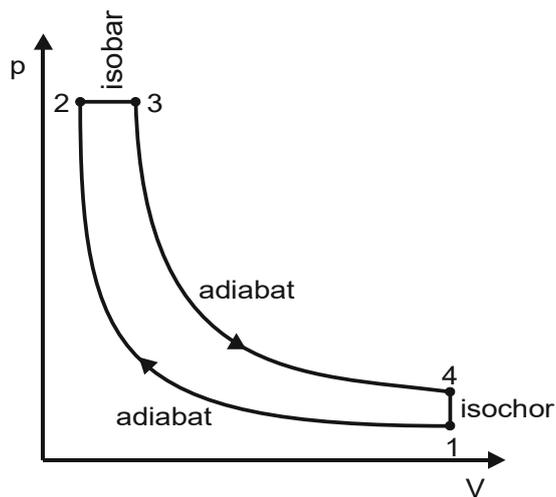
$$M_{ges, max} = M_{el.}(1750 \text{ min}^{-1}) + M_{Diesel}(1750 \text{ min}^{-1}) = 110 \text{ Nm} + 320 \text{ Nm} = 430 \text{ Nm}$$

Anmerkung: Im gesamten Drehzahlbereich $900 \text{ min}^{-1} \dots 1750 \text{ min}^{-1}$ erhält man $M_{\text{ges}} = 420 \dots 430 \text{ Nm}$. Daher sind Lösungen in diesem Bereich korrekt.



3.2 Dieselmotor

3.2.1



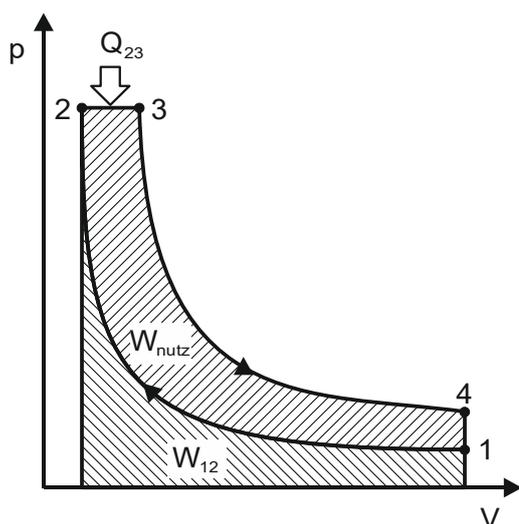
3.2.2 $p_1 \cdot V_1 = m \cdot R_s \cdot T_1 \rightarrow$

$$p_1 = \frac{m \cdot R_s \cdot T_1}{V_1} = \frac{1033 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 358 \text{ K}}{0,000531 \text{ m}^3} = 199880 \text{ Pa} \approx 2 \text{ bar}$$

2

2

3.2.3



$$Q_{23} = Q_{zu}$$

$$W_{12} = W_{Kompression}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_{nutz}}{Q_{23}} = \frac{897 \text{ J}}{1484 \text{ J}} = 0,604 = 60,4\%$$

2

3.2.4

$$P_{ges} = z \cdot \frac{n_N}{2} \cdot W_{nutz} = 4 \cdot 897 \text{ J} \cdot 2000 \frac{1}{60 \text{ s}} = 120 \text{ kW}$$

2

3.3 Klimaanlage und Abgasreinigung im Diesel-Hybrid-PKW

3.3.1 Der Kompressor saugt gasförmiges Kältemittel an und verdichtet es. Das durch den Verdichtungsprozess ca. 65 °C heiß gewordene gasförmige Kältemittel wird mit einem Druck von ca. 16 bar zum Kondensator gedrückt. In ihm wird das heiße Kältemittel von der Umgebungsluft (Fahrtwind/Lüfter) auf ca. 55 °C abgekühlt. Dabei geht es in den flüssigen Zustand über, es kondensiert. Das Expansionsventil sprüht das Kältemittel in den Verdampfer. Der Druck sinkt auf ca. 1,2 bar ab. Durch diese Entspannung sinkt die Temperatur des Kältemittels rasch auf -7 °C. Dem Verdampfer wird vom Gebläse Um- oder Frischluft an der Oberfläche zugeführt. Das Kältemittel entzieht dieser Luft Wärme und verdampft dadurch. Die abgekühlte Luft strömt in den Innenraum des Fahrzeuges. Das gasförmige, ca. -3 °C kalte Kältemittel wird vom Kompressor angesaugt und der Kreislauf ist geschlossen.

3

Die angegebenen Zahlenwerte sind typisch, werden aber nicht verlangt.

Fließrichtung: Kompressor → Kondensator → Expansionsventil → Verdampfer

3.3.2 Aus h,x-Diagramm:

3

$$\Delta x = x(30^\circ \text{C}, 80\%) - x(21^\circ \text{C}, 100\%) = 21,8 \frac{\text{g}}{\text{kg}} - 15,5 \frac{\text{g}}{\text{kg}} = 6,3 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$

$$\dot{V}_{Luft} = 500 \frac{\text{L}}{\text{min}} = 30 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$\dot{m}_{Wasser} = \dot{m}_{Luft} \cdot \Delta x = 30 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 1,16 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 3 \text{ h} \cdot 6,3 \frac{\text{g}}{\text{kg}} = 657,72 \text{ g}$$

3.3.3 Die aus der Umgebungsluft anfallenden Verunreinigungen (Pollen, Schmutz, usw.) setzen sich am Verdampfer fest. Durch das zudem anfallende Kondensat sind ideale Bedingungen für Schimmel-, Keim-, Bakterien- und Mikroorganismenbildung am Verdampfer gegeben. Die dem Innenraum zugeführte Luft wird dadurch belastet.

1

- 3.3.4 Das Abgas mit Partikeln muss durch die porösen Filterwände des Partikelfilters strömen. Die Partikel bleiben hängen und werden dadurch herausgefiltert. Die Poren des Filters setzen sich langsam zu, wodurch der Abgasgegendruck allmählich steigt. Der Differenzdrucksensor misst den Druck vor und nach dem Partikelfilter und kann damit diesen steigenden Abgasgegendruck messen und an das Steuergerät weiterleiten.
- Durch eine gezielte Nach- oder Mehreinspritzung wird die Abgastemperatur auf ca. 600 °C angehoben. Die Kohlenstoffpartikel im Diesel-Partikel-Filter verbrennen mit dem Restsauerstoff im Abgas.
- Weitere korrekte Antworten:
- Absenken der Partikelabbrenntemperatur durch Zugabe von Kraftstoff-Additiven.
- Volllastbetrieb („Autobahnfahrt“) über eine bestimmte Zeit (Herstellerangaben).

3

30

4 Bauphysik und Steuerungstechnik

Punkte

4.1 Bauphysik - Altbausanierung

- 4.1.1 Lösungsvorschlag: Tauwasseranfall auf der Bauteiloberfläche, durch Taupunktunterschreitung. (Tau)wasser stellt Lebensgrundlage für Schimmelpilze dar. Schimmelpilze bilden sich bereits bei einer rel. Luftfeuchte von 80%.
- 4.1.2 Lösungsvorschlag: Im h,x-Diagramm auf Taulinie bei 12,5 °C, senkrecht nach oben bis zum Schnitt mit der 20 °C-Linie. Aus h-x Diagramm $\varphi = 60\%$
- 4.1.3 Rauminnenecken sind geometrisch bedingte Wärmebrücken, dadurch wird die Wandinnenoberflächentemperatur abgesenkt. An kalten Wintertagen besteht die Gefahr, dass die Taupunkttemperatur der wärmeren, feuchten Innenraumluft unterschritten wird und Tauwasser anfällt.

1

2

2

Konstruktions- bzw. materialbedingte Wärmebrücken, z. B. Stahlbetonskelettwand, auskragende Platten. Am Werkstoff mit der höheren Wärmeleitfähigkeit kühlt die Wandoberfläche stärker ab. Fällt diese Temperatur unter die Taupunkttemperatur, bildet sich dort Tauwasser.

$$4.1.4 \quad \vartheta_{si} = \vartheta_i - \frac{\Delta T}{R_T} \cdot R_{si} \implies R_T = \frac{\Delta T \cdot R_{si}}{\vartheta_i - \vartheta_{si}} = \frac{30 \text{ K} \cdot 0,13 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}}{20^\circ \text{C} - 12,5^\circ \text{C}} = 0,52 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}$$

4

$$4.1.5 \quad U = \frac{1}{R_T}; \quad R_{T(\text{neu})} = R_{T(\text{alt})} + \frac{d_D}{\lambda_D}$$

$$\implies d_D = (R_{T(\text{neu})} - R_{T(\text{alt})}) \cdot \lambda = \left(\frac{1}{0,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}} - \frac{1}{1,92 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}} \right) \cdot 0,035 \frac{\text{W}}{\text{m K}} = 0,157 \text{ m}$$

3

$$4.1.6 \quad \dot{Q}_{\text{alt}} = \Delta T \cdot A \cdot U = 30 \text{ K} \cdot 200 \text{ m}^2 \cdot 1,92 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} = 11\,520 \text{ W}$$

$$\dot{Q}_{\text{neu}} = \Delta T \cdot A \cdot U = 30 \text{ K} \cdot 200 \text{ m}^2 \cdot 0,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} = 1\,200 \text{ W}$$

$$\Delta \dot{Q} = \dot{Q}_{\text{alt}} - \dot{Q}_{\text{neu}} = 10\,320 \text{ W}$$

3

$$\text{Einsparung } Q = \Delta \dot{Q} \cdot t = 10\,320 \text{ W} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} = 247,7 \frac{\text{kWh}}{\text{d}}$$

$$247,7 \frac{\text{kWh}}{\text{d}} \cdot 0,1 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 24,77 \frac{\text{€}}{\text{d}}$$

- 4.1.7 Südausrichtung für die größtmöglichen solaren Energiegewinne im Winter. 1
- 4.1.8 Aufheizung des Innenraums im Sommer bei Südausrichtung, größere Wärmeverluste (schlechterer U-Wert als das Anschlussmauerwerk) im Winter. 2
- 4.1.9 Eine Außendämmung führt dazu, dass die Temperatur im Innenraum nicht so stark schwankt und die Hoch- und Tieftemperaturen zeitlich verzögert im Innenraum ankommen (Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung). Der Effekt der Wärmespeicherung und Kühlung durch das innen liegende Mauerwerk entfällt bei einer Innendämmung. 2

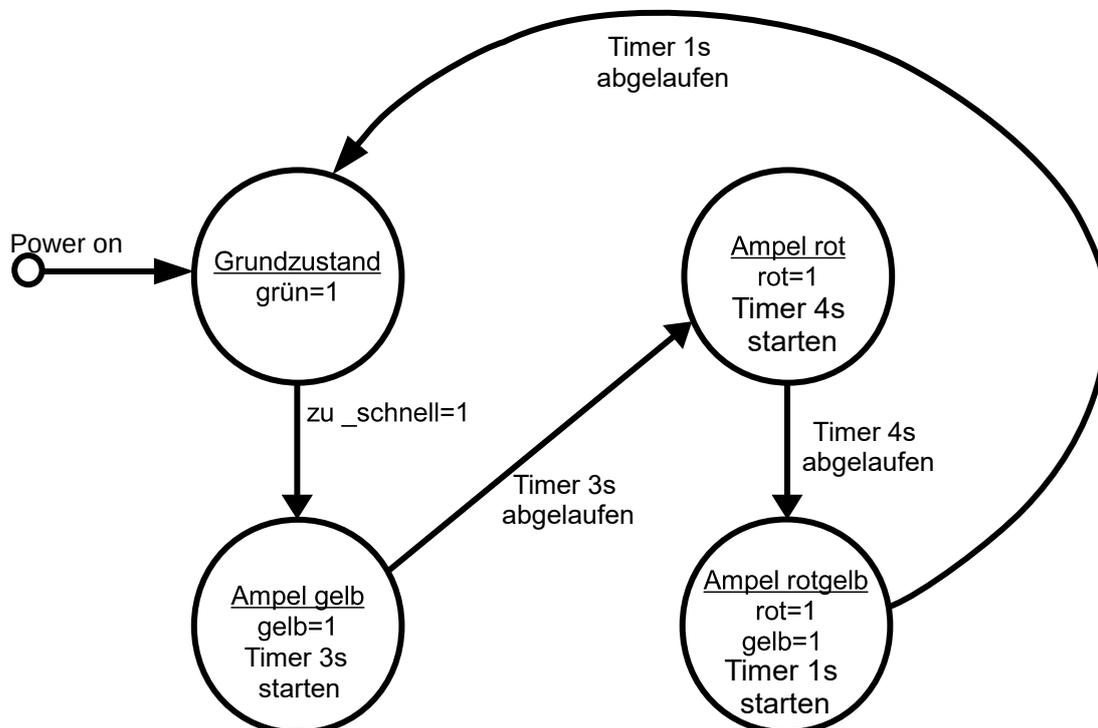
4.2 Geschwindigkeitsabhängige Ampelsteuerung

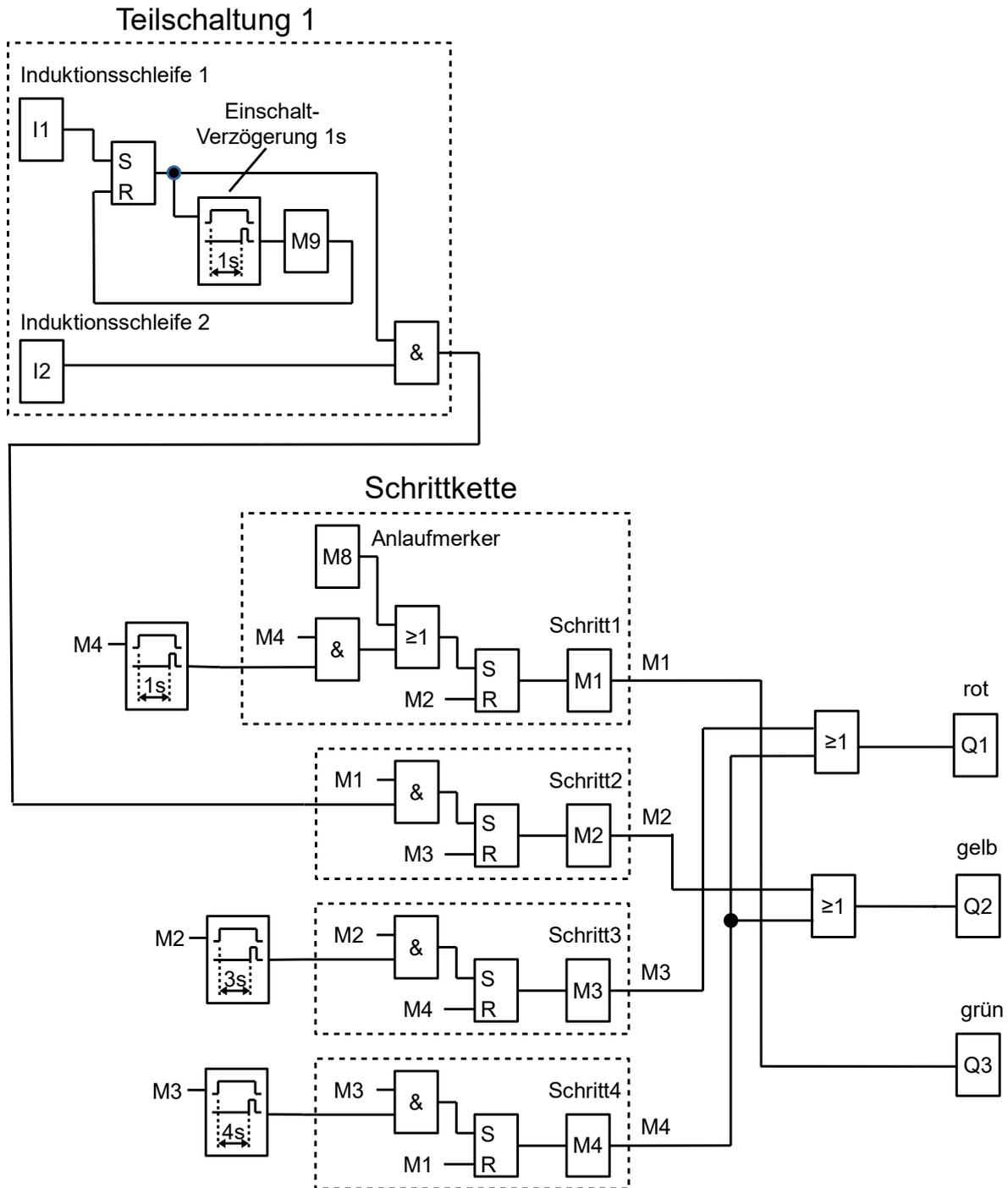
- 4.2.1 $s = v \cdot t$ 1
 $d = 30 \text{ km/h} \cdot 1 \text{ s} = (30.000 \text{ m}/3.600 \text{ s}) \cdot 1 \text{ s} = 8,33 \text{ m}$

Die Induktionsschleifen I1 und I2 sind im Abstand von 8,33m anzubringen.

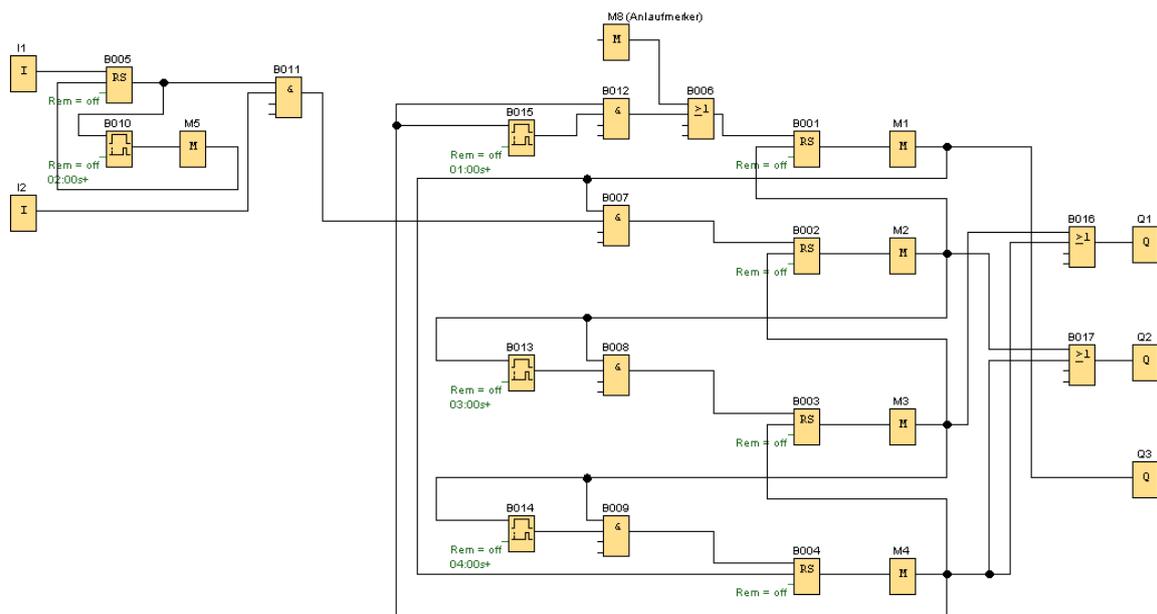
- 4.2.2 Die Induktionsschleife I1 setzt das RS-Flipflop und startet eine Einschaltverzögerung von einer 1s. Gleichzeitig wird die UND-Verknüpfung freigegeben. Sollte nun ein Fahrzeug schneller als 30 km/h sein und daher die Induktionsschleife I2 vor Ablauf der Verzögerungszeit $T_v=1 \text{ s}$ erreichen, wird am Ausgang der UND-Verknüpfung eine 1 erscheinen (zu_schnell=1). Damit geht die Ablaufsteuerung in den Schritt 2 über. Ist das Fahrzeug langsamer als 30 km/h wird das RS-Flipflop nach 1s durch $A_EVZ=1$ zurückgesetzt und die UND-Verknüpfung gesperrt. Die Schaltung ist bereit für eine neue Messung. 2

- 4.2.3 4





Hinweis: Realisierung in LOGO!



TG Umwelttechnik

2015/2016

Übung

Lösungsvorschlag

Arbeitszeit: 270 Minuten
Hilfsmittel: Formelsammlung Umwelttechnik
Zugelassener Taschenrechner

Stoffgebiet: Teil 1: Pflichtbereich
Aufgabe 1: Wasserkraft
Elektromobilität

Aufgabe 2: Feuchte- und Wärmeschutz
Kontrollierte Wohnraumlüftung
BHKW und Brennwerttechnik

Teil 2: Wahlbereich
Aufgabe 3: Photovoltaik und Windkraft
Brennstoffzelle
Abwasser

Aufgabe 4: Kohlekraftwerk
Rauchgasreinigung
Steuerungstechnik

1 Wasserkraft und Elektromobilität

Punkte

1.1 Pumpspeicherkraftwerk

1.1.1 Jede Pelton-turbine hat insgesamt 6 Düsen

$$\dot{V}_D = \frac{\dot{V}}{6} = \frac{8 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{6} = 1,33 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{V}_D = A_D \cdot v_D \rightarrow v_D = \frac{\dot{V}_D}{A_D} = \frac{4 \cdot \dot{V}_D}{\pi \cdot d_D^2} = \frac{4 \cdot 1,33 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi \cdot (0,12 \text{ m})^2} = 117,9 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 424,4 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$v_R = \frac{\dot{V}}{A_R} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot d_R^2} = \frac{4 \cdot 8 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{\pi \cdot (2,2 \text{ m})^2} = 2,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 7,58 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$1.1.2 \quad P_{\text{hydro}} = \rho \cdot g \cdot h \cdot \dot{V} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 357 \text{ m} \cdot 16 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 56 \text{ MW}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{hydro}}} = \frac{45 \text{ MW}}{56 \text{ MW}} = 0,8$$

$$1.1.3 \quad \text{Rohrvolumen } V_R = A_R \cdot l_R = \frac{\pi \cdot d_R^2}{4} \cdot l_R = \frac{\pi \cdot (2,2 \text{ m})^2}{4} \cdot 526 \text{ m} = 2.000 \text{ m}^3$$

Das Rohrvolumen $V_R = 2000 \text{ m}^3$ entspricht 2 Millionen Liter

1.1.4

$$W = m \cdot g \cdot h = \rho \cdot V \cdot g \cdot h = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 14,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 357 \text{ m} = 5 \cdot 10^{13} \text{ Nm}$$

$$W = 5 \cdot 10^{13} \text{ Nm} = 5 \cdot 10^{13} \text{ Ws} = 14 \cdot 10^6 \text{ kWh}$$

$$W = P_{\text{hydro}} \cdot t \rightarrow t = \frac{W}{P_{\text{hydro}}} = \frac{14 \cdot 10^6 \text{ kWh}}{56 \cdot 10^6 \text{ W}} = 250 \text{ h} = 10,4 \text{ Tage}$$

$$\text{Alternativ: } \dot{V} = \frac{V}{t} \rightarrow t = \frac{V}{\dot{V}} = \frac{14,4 \cdot 10^6 \text{ m}^3}{16 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 900.000 \text{ s} = 250 \text{ h}$$

1.1.5 Formelsammlung S.17: Turbinen-Einsatzgebiete

Eine Francis-Turbine könnte ebenfalls eingesetzt werden, da sowohl Fallhöhe, Leistung und Durchfluss mit dem Einsatzgebiet von Francis-Turbinen übereinstimmen.

1.1.6 An dem Verlauf der Verbrauchskurve ist ersichtlich, dass der Energiebedarf im Tagesverlauf schwankend ist. Beispielsweise wird nachts deutlich weniger Energie angefordert als zur Mittagszeit. Neben den Kraftwerken, die ständig im Betrieb sind und die Grundlast abdecken, gibt es Kraftwerkstypen, die für die Mittellast eingesetzt werden. Dabei unterliegt insbesondere das Energieangebot von Windkraftanlagen und Photovoltaikanlagen den augenblicklichen Wetterverhältnissen (Windflaute \leftrightarrow Sturm, wolkenfrei \leftrightarrow Sonne von Wolken verdeckt). Die besondere Herausforderung beim Energiemanagement besteht darin, die Energienachfrage mit dem Energieangebot in Einklang zu bringen. Die Einspeisung von Solarstrom deckt die Mittagsspitzen ab. Früher liefen in dieser Zeit Pumpspeicherkraftwerke im

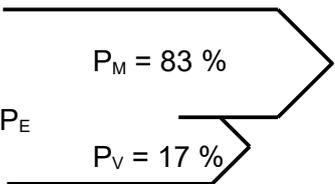
Generatorbetrieb. Heute decken diese die Abendspitzen (siehe Grafik) und arbeiten im Pumpbetrieb z.B. bei Überschuss von Windenergie bei Nacht. Außerdem kann an windigen und sonnigen Tagen überschüssige Energie für den Pumpbetrieb genutzt werden. Der große Vorteil von Pumpspeicherkraftwerken liegt in der kurzen Anlaufzeit der Maschinen, sodass schnell auf Schwankungen reagiert werden kann.

1.1.7 Steinkohlekraftwerk, Braunkohlekraftwerk, Kernkraftwerk, Laufwasserkraftwerk 1

1.2 Elektromobilität

1.2.1 $v = 25 \frac{km}{h} = 416,66 \frac{m}{min}$ 1,5
 $n = \frac{v}{U_{Rad}} = \frac{416,66 \frac{m}{min}}{1,98 m} = 210,4 \frac{1}{min} = 3,5 \frac{1}{s}$

1.2.2 2,5



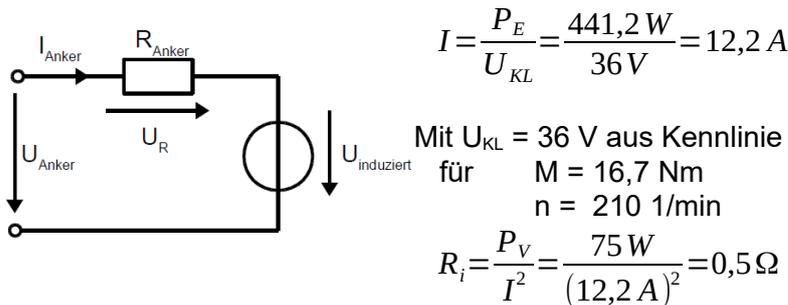
$$P_E = \frac{P_V}{1-\eta} = \frac{75 W}{1-0,83} = 441,2 W$$

$$P_M = P_E - P_V = 441,2 - 75 W = 366,2 W$$

1.2.3 $P_M = 2 * \pi * n * M$ 1
 $M = \frac{P_M}{2 * \pi * n} = \frac{366,2 W}{2 * \pi * 3,5 \frac{1}{s}} = 16,7 Nm$

1.2.4 $t = \frac{W}{P_E} = \frac{500 Wh}{441,2 W} = 1,13 h$ 1,5
 $s = v * t = 25 \frac{km}{h} * 1,13 h = 28,3 km$

1.2.5 3,5



Alternativ aus Kennlinie

$$U_0 = 30 V$$

$$U_{Ri} = U_{Kl} - U_{Ind} = 36 V - 30 V = 6 V$$

bei $M = 0 Nm$ und $n = 210 \frac{1}{min}$

$$R_i = \frac{U_{Ri}}{I_{Kl}} = \frac{6 V}{12,2 A} = 0,49 \Omega$$

1.2.6 $I_2 = \sqrt{\frac{P_{V2}}{R}} = \sqrt{\frac{50 W}{0,5 \Omega}} = 10 A$ 2
 aus $\frac{M_1}{I_1} = \frac{M_2}{I_2}$ $M_2 = \frac{M_1}{I_1} * I_2 = \frac{16,6 Nm}{12,2 A} * 10 A = 13,6 Nm$

1.2.7 $V_2 = 16 \frac{km}{h} = 266,6 \frac{m}{min}$ 3
 $n_2 = \frac{v_2}{U_{Rad}} = \frac{267 \frac{m}{min}}{1,98 m} = 134,7 \frac{1}{min} = 2,24 \frac{1}{s}$
 Aus Kennlinie $U_{Kl} = 24 V$ $P_e = U_{kl} * I_2 = 24 V * 10 A = 240 W$

$$t = \frac{W}{P_e} = \frac{500 \text{ Wh}}{240 \text{ W}} = 2,08 \text{ h} \quad s = v * t = 16 \frac{\text{km}}{\text{h}} * 2,08 \text{ h} = 33,3 \text{ km}$$

30

2 Bauphysikalische Aspekte und Gebäudetechnik eines Mehrfamilienhauses

Punkte

2.1 Feuchte- und Wärmeschutz

2.1.1 Wärmedurchgangswiderstand R_T

3

$$R_T = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + R_{se}$$

$$= 0,13 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} + \frac{0,015 \text{ m}}{0,51 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,24 \text{ m}}{2 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,16 \text{ m}}{0,03 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,015 \text{ m}}{1 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + 0,043 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} = 5,671 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}$$

$$\text{Wärmedurchgangskoeffizient } U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{5,671 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}} = 0,176 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) ist ein Maß für den Wärmedurchgang von der Innenluft durch eine Außenwand zur Außenluft. Ursache für den Wärmestrom ist der Temperaturunterschied zwischen Innenluft und Außenluft. Der U-Wert gibt den Wärmestrom (Wärmeenergie pro Zeit) je Fläche der Wand und je Kelvin Temperaturunterschied zwischen der Außen – und Innenluft an. Er ist abhängig von den Wärmeübergangskoeffizienten zwischen dem festen Körper und der Luft sowie der Wärmeleitfähigkeit und Schichtdicken der Außenwand. Je geringer der U-Wert, umso größer die Dämmwirkung der betrachteten Außenwand.

$$2.1.2 \quad \vartheta_4 = \vartheta_i - \frac{\Delta T}{R_T} \cdot (R_{si} + R_1 + R_2 + R_3)$$

1

$$= 20^\circ \text{C} - \frac{30 \text{ K}}{5,671 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}} + 0,13 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}} + \frac{0,015 \text{ m}}{0,51 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,24 \text{ m}}{2 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,16 \text{ m}}{0,03 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = -9,7^\circ \text{C}$$

2.1.3 Gepunktete Linie: Verlauf des tatsächlich vorhandenen Wasserdampfdrucks über den Wandquerschnitt.

3

Gestrichelte Linie: Verlauf des Wasserdampf-sättigungsdampfdruck über den Wandquerschnitt.

Im Wandquerschnitt 1 fällt Tauwasser an, da sich hier der tatsächlich vorhandene Dampfdruck und der Wasserdampf-sättigungsdruck berühren/schneiden.

2.1.4 Wandquerschnitt 2

3

Der Verlauf des Wasserdampf-sättigungsdrucks korreliert mit dem Temperaturverlauf über den Wandquerschnitt. Ein starker Temperaturabfall und damit ein starker Abfall des Wasserdampf-sättigungsdrucks tritt im Bereich eines Dämmstoffes auf. Bei Wandquerschnitt 2 tritt dieser starke Abfall auf der kalten Seite des Wandquerschnitts auf, insofern handelt es sich hierbei um eine außen gedämmte Wand, wie in der Aufgabenstellung beschrieben.

2.2 Kontrollierte Wohnraumlüftung

2.2.1 Luftqualität (Reduktion von CO₂, Anhebung O₂ Gehalt, Reduktion von Gerüchen)
Wärmerückgewinnung

$$2.2.2 \quad \dot{V}_{\text{AUL}} = \beta \cdot V_R = 1,0 \frac{1}{\text{h}} \cdot 150 \text{ m}^3 = 150 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

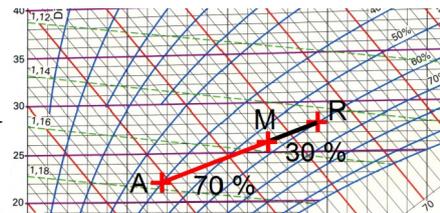
Die Luftwechselrate gibt an, wie oft das gesamte Luftvolumen eines Raumes ausgetauscht wird.

2.2.3 Raumluf R, Außenluft A.

Ermittlung der Mischluft nach dem „Gesetz der abgewandten Hebelarme“: Der Zustand der Mischluft liegt im h,x-Diagramm auf der Gerade zwischen den beiden Punkten. 30% der Raumluf wurden ersetzt, d. h. 70 % sind noch übrig

=> der Mischungspunkt M muss näher am Punkt R liegen.

Abgelesen: Temperatur $\vartheta_M = 26 \text{ }^\circ\text{C}$, relative Feuchte $\varphi_M = 56 \%$



$$2.2.4 \quad \Phi = \frac{\vartheta_{\text{zu}} - \vartheta_{\text{AU}}}{\vartheta_{\text{ab}} - \vartheta_{\text{AU}}},$$

$$\vartheta_{\text{zu}} = (\vartheta_{\text{ab}} - \vartheta_{\text{AU}}) \cdot \Phi + \vartheta_{\text{AU}} = (18^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) \cdot 0,6 + 0^\circ\text{C} = 10,8^\circ\text{C}$$

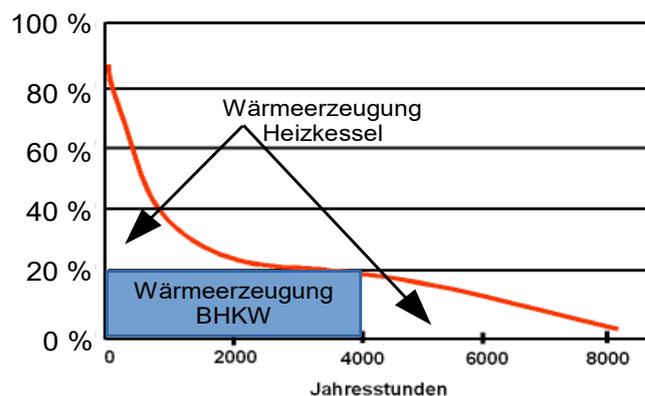
2.3 Blockheizkraftwerk mit Brennwertnutzung

2.3.1 Der Pufferspeicher ist mit Heizungswasser gefüllt. Dieses wird abwechselnd oder parallel von beiden Wärmeerzeugern erwärmt. Mit dem im Pufferspeicher enthaltenen Heizungswasser wird in einem Wärmetauscher das Trinkwasser erwärmt und der Heizkreis betrieben. Der Mischer dient dazu, die Heizkreistemperatur nach Bedarf zu regulieren. Das MAG nimmt das sich bei Aufheizung ausdehnende Heizungswasser auf. Die Pumpen sorgen für die Zirkulation der einzelnen Kreise.

2.3.2 Annahme: Auswahl der Laufzeit des BHKW 4000 h (andere sinnvoll begründete Annahmen möglich).

y-Achsen-Beschriftung: analoge kW-Angaben möglich.

Jahresdauerlinie des Heizwärmebedarfs



- 2.3.3 Im Pufferspeicher sind im unteren Teil die Temperaturen so niedrig, dass im BHKW-Rücklauf die Taupunkttemperatur des Abgases sicher unterschritten wird. Wenn das BHKW direkt zur Trinkwassererwärmung oder direkt in den Heizkreis eingepflanzt wird, ist dies oft nicht der Fall. Daher gäbe es häufig Betriebssituationen ohne Kondensationswärmenutzung.

Zudem wird die Gesamtlaufzeit des BHKW verlängert.

$$2.3.4 \quad \eta_{\text{ges}} = \frac{\dot{Q}_{\text{el}} + \dot{Q}_{\text{th}}}{\dot{Q}_{\text{Aufnahme}}} = 0,99$$

Gasbrennwertheizgeräte haben (bezogen auf den Heizwert) einen Wirkungsgrad von über 100 %. Dafür ist die erzeugte Energie aber ausschließlich „wertlosere“ Wärme und keine „wertvolle“ elektrische Energie

- 2.3.5 Kondensationswärme: Differenz zwischen Betrieb mit und ohne Brennwertnutzung:

$$Q_{\text{Kond}} = (\dot{Q}_{\text{mit}} + \dot{Q}_{\text{ohne}}) \cdot t_{\text{Betrieb}} = (14,8 \text{ kW} - 12,5 \text{ kW}) \cdot 4000 \text{ h} = 9 \text{ 200 kWh}$$

$$Q_{\text{V}} = Q_{\text{Kond}} = m \cdot r \rightarrow m = \frac{Q_{\text{Kond}}}{r} = \frac{9 \text{ 200 kWh}}{0,6272 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = 14 \text{ 668 kg}$$

3 Photovoltaik, Brennstoffzelle, Abwasser, Windkraft

3.1 Photovoltaik

3.1.1	Gebäude 1 & 2	Gebäude 3 & 4	Gebäude 5 & 6
Ausrichtung	0° (Süd)	45° (Südwest)	-70°
Neigungswinkel	65°	37°	30°
Abgelesen	1050-1100 kWh/(m²a)	1100-1150 kWh/(m²a)	1050 kWh/(m²a)

Gebäude 3 & 4 haben die höchste Einstrahlungssumme und liefern daher den größten Jahresertrag.

- 3.1.2 Korrekturfaktor bei $\alpha = 45^\circ$ (Südwest) und $\beta = 37^\circ$ im Oktober: $K_{\alpha,\beta} = 1,30$

Tägliche Globalstrahlung Berlin im Oktober: $H_h = 1,7 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$

$$P_{\text{Nenn}} = \frac{P_{\text{MPP}}}{1 \text{ Modul}} \cdot \text{Anzahl Module} = 236 \text{ W} \cdot 54$$

$$W_{\text{Tag}} = P_{\text{Nenn}} \cdot \frac{H_h}{1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} \cdot K_{\alpha,\beta} = 236 \text{ W} \cdot 54 \cdot \frac{1,7 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}}{1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} \cdot 1,3 = 28,16 \frac{\text{kWh}}{\text{d}}$$

54 Module erzeugen den gewünschten Tagesbedarf im Oktober.

$$3.1.3 \quad W_{\text{Jahr}} = 365 \frac{\text{d}}{\text{a}} \cdot W_{\text{Tag}} = P_{\text{Nenn}} \cdot \frac{H_{h-\text{Jahr}}}{1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} \cdot K_{\alpha,\beta-\text{Jahr}}$$

$$W_{\text{Jahr}} = 365 \frac{\text{d}}{\text{a}} \cdot 236 \text{ W} \cdot 54 \cdot \frac{2,93 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}}{1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}} \cdot 1,09 = 14.855 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

$$3.1.4 \quad \frac{P_{\text{Sonne}}}{1 \text{ Modul}} = 800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 1,5 \text{ m}^2 = 1200 \text{ W} \quad 2$$

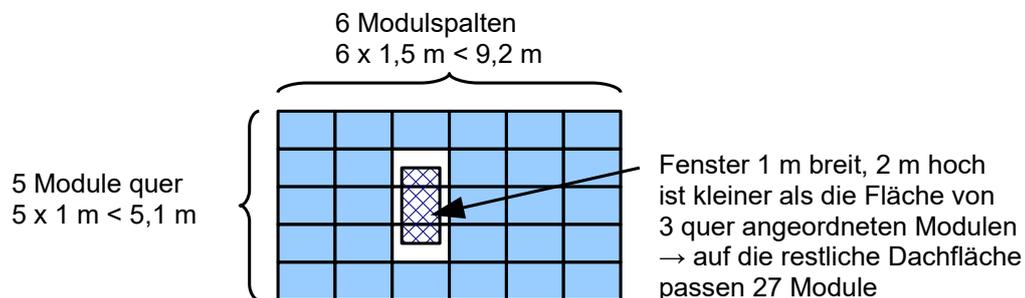
$$\eta = \frac{P_{\text{Modul}}}{P_{\text{Sonne}}} = \frac{180 \text{ W}}{1200 \text{ W}} = 0,15 = 15 \%$$

3.1.5 1 Gebäude erhält 27 Module 2

$$\text{Faustformel: } U_{\text{WR-max}} = 1,2 U_{\text{OC@STC}} \rightarrow \frac{410 \text{ V}}{1,2 \cdot 36,7 \text{ V}} = 9,3 \text{ Module pro String}$$

$$\frac{27 \text{ Module}}{9 \text{ Module/String}} = 3 \text{ Strings mit je 9 Modulen}$$

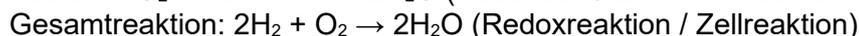
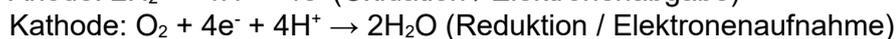
3.1.6 2



3.2 PEM-Brennstoffzelle

3.2.1 Wasserstoff (H_2) wird an der Anode katalytisch (Katalysator: Platin) in Protonen und Elektronen zerlegt. Durch die Kunststoffmembran (proton exchange membrane) gelangen nur die Protonen auf die andere Seite. Für die Elektronen ist die Membran unpassierbar. Sie werden aus der Brennstoffzelle abgeleitet und fließen über einen Verbraucher zur Kathode. An der Kathode nimmt der zugeführte Sauerstoff (O_2 , Oxidationsmittel) aus der Luft die Elektronen auf und reagiert unmittelbar mit den durch die Membran geführten Wasserstoffionen zu Wasser (H_2O). 4

Reaktionsgleichungen:



3.2.2 Unter einem Stack versteht man das Zusammenschalten mehrerer Brennstoffzellen in Reihe. Durch diese Verschaltung addieren sich die niedrigen Einzelspannungen einer Brennstoffzelle (max. 1 V) zu in der Praxis meist notwendigen höheren Spannungen. 2

3.3 Abwasserreinigung

Filtration (Rechen und Siebe): Holzteile, Kunststoffteile, Faserstoffe, usw..

Sedimentation (Absetzen): Sand, mineralische Bestandteile des Abwassers, usw..

Flotation (Aufschwimmen): Öle, Fette, usw..

3.4 Windturbine mit Vertikal-Rotor

3.4.1 Aus dem c_p - λ -Diagramm für verschiedene Rotor-Bauformen lässt sich für den Vertikal-Rotor für $\lambda = 5$ ein Leistungsbeiwert von $c_p = 0,4$ ablesen.

1

3.4.2
$$P_{Wind} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (2 \cdot r \cdot h) \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \frac{kg}{m^3} \cdot (2 \cdot 2,5 m \cdot 3 m) \cdot (10 m/s)^3 = 9 kW$$

2

3.4.3
$$P_{el} = P_{Wind} \cdot c_p \cdot \eta = 9 kW \cdot 0,4 \cdot 0,95 = 3,42 kW$$

2

3.4.4 Nr 1 Resultierende Kraft Nr 2 Wind durch Drehbewegung
 Nr 3 Windrichtung Nr 4 Effektive Windrichtung
 Drehrichtung: Gegen den Uhrzeigersinn

2

3.4.5 Vertikal-Rotoren (VR) müssen im Gegensatz zu Rotoren mit horizontaler Achse (HR) nicht entsprechend der Windrichtung ausgerichtet werden, was technischen Aufwand einspart.

3

Der Generator eines VR muss nicht in großer Höhe über Grund und damit schwer zugänglich platziert werden, sondern befindet sich in Bodennähe. Dies ist ein weiterer Vorteil des VR.

Allerdings ist der Leistungsbeiwert eines VR immer geringer als der eines modernen HR mit großer Schnelllaufzahl.

Im Gegensatz zum VR strömt beim HR der effektive Wind immer in optimalem Winkel um die Rotorblätter, die von Nabe zu Blattspitze verwunden entsprechend verwunden sind. Dies gilt unabhängig von der Winkellage auf dem überstrichene Kreis. Beim VR ist die Anströmung abhängig von der Winkelposition auf dem überstrichenen Kreis und damit nicht immer optimal.

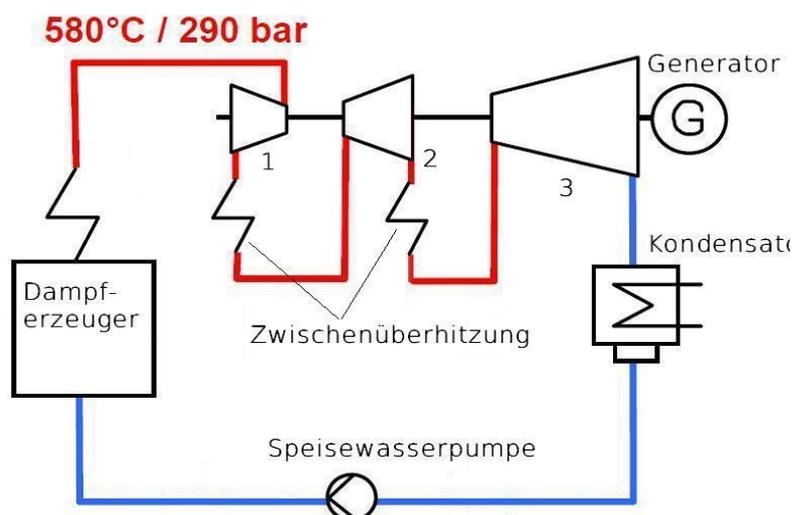
30

4 Kohlekraftwerk, Rauchgasreinigung und Steuerungstechnik

4.1 Kohlekraftwerk

4.1.1 Die Zwischenüberhitzung erfolgt in der Realität im oberen Bereich des Dampferzeugers. Der Übersichtlichkeit halber ist sie im Lösungsvorschlag räumlich getrennt dargestellt. Andere Darstellungen sind möglich.

3



- 4.1.2 1 Hochdruckturbine 2
 2 Mitteldruckturbine
 3 Niederdruckturbine

- 4.1.3 Zur Steigerung des Wirkungsgrades könnte man neben der Erzeugung elektrischer Energie auch die im Dampf enthaltene thermische Energie verwenden. Man könnte einen Teil des Dampfes zur Erzeugung von Prozesswärme für die Industrie oder für Fernwärme verwenden. 2

- 4.1.4 Auf der Oberfläche der Turbinenschaufeln ist eine Beschädigung (abrasiver Materialabtrag) zu erkennen. Die Beschädigung ist durch Wassertröpfchen im Dampf entstanden, welche im Betrieb auf die sich schnell drehenden Turbinenschaufeln prallen und Materialschäden verursachen. 2

$$q_{ab} = T_{71} \cdot (s_1 - s_7)$$

$$\rightarrow T_{71} = \frac{q_{ab}}{(s_1 - s_7)} = \frac{\left(-2280 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)}{\left(0,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - 8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)} = 300 \text{ K}$$

Hinweis: Mit dem T,s-Diagramm der Formelsammlung kann man den Kondensatordruck bestimmen.

$$p_{\text{Kond}} = 0,04 \text{ bar}$$

4.2 Rauchgasreinigung

- 4.2.1 Beschriftung von links: 3

Entschwefelung: In einem Rauchgaswäscher reagiert SO_2 mit einer Kalksuspension. Als Produkt entsteht Gips.

Entstaubung: Im Elektrofilter werden die Staubpartikel elektrostatisch aufgeladen und an Platten abgeschieden. Das Produkt nennt sich Flugasche und kann als Zement verwendet werden.

Entstickung: Bei der selektiven katalytischen Reduktion reagieren Stickstoffoxide mit Ammoniak. Die Produkte sind Stickstoff und Wasser.

- 4.2.2 Alternativ: Entstickung nach der Entstaubung (Low-Dust-Verfahren). 2

Vorteil: weniger Katalysator-Verschleiß

Nachteil: geringere Abgastemperatur, dadurch schlechtere Reinigungsleistung.

- 4.2.3 $4 \text{ NO} + 4 \text{ NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4 \text{ N}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$ 3

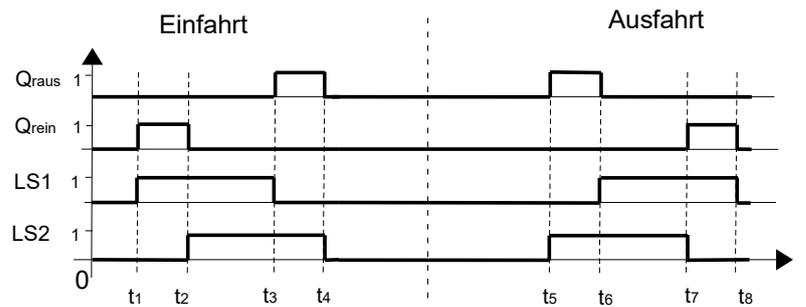
$$\dot{m}(\text{NO}) = 1\,000 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \cdot 1\,500\,000 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{mg}} = 1\,500 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \Rightarrow$$

$$\dot{n}(\text{NO}) = \frac{\dot{m}(\text{NO})}{M(\text{NO})} = \frac{1\,500 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{30 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} = 50 \frac{\text{kmol}}{\text{h}}, \text{ aus Reaktionsgleichung: } \dot{n}(\text{NH}_{3,\text{stoch}}) = \dot{n}(\text{NO}),$$

$$\dot{m}(\text{NH}_{3,\text{real}}) = 0,9 \cdot \dot{n}(\text{NH}_3) \cdot M(\text{NH}_3) = 700 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 0,9 \cdot 50 \frac{\text{kmol}}{\text{h}} \cdot 14 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} = 630 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

4.3 Steuerung für eine Tiefgarage

4.3.1

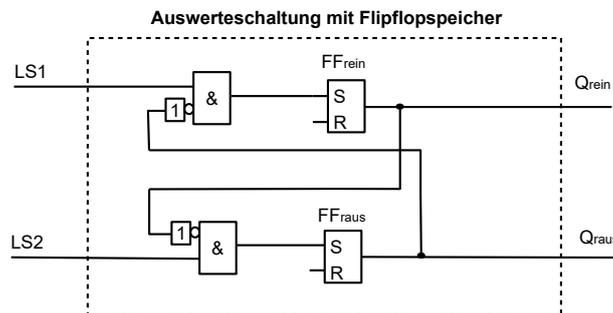


3

4.3.2 Zur eindeutigen Fahrtrichtungserkennung müsste die zeitliche Reihenfolge der Signalimpulse Q_{rein} und Q_{raus} berücksichtigt werden. Das ist z.B. durch die Speicherung der Impulsreihenfolge möglich. Tritt z.B. ein Impuls an Q_{rein} vor dem Impuls an Q_{raus} auf, liegt eine Einfahrt vor. Nach dem Verlassen des Lichtschrankenbereichs müssen die Speicher zurückgesetzt werden.

1

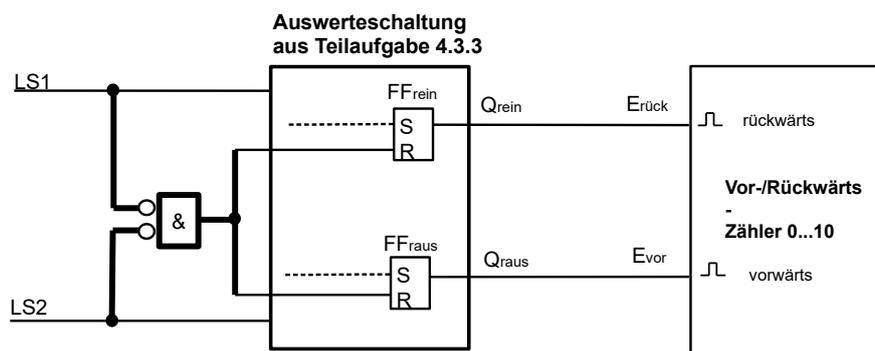
4.3.3



2

4.3.4

4.3.5



2

4.3.6 Einfahrt: (LS1, LS2, LS3) Ausfahrt: (LS1, LS2, LS3)

(0 , 0 , 0)	(0 , 0 , 0)
(1 , 0 , 0)	(0 , 0 , 1)
(1 , 1 , 0)	(0 , 1 , 1)
(1 , 1 , 1)	(1 , 1 , 1)
(0 , 1 , 1)	(1 , 1 , 0)
(0 , 0 , 1)	(1 , 0 , 0)
(0 , 0 , 0)	(0 , 0 , 0)

2

Die bei einer Ein- oder Ausfahrt auftretenden Eingangskombinationen sind identisch, d.h. es gibt z.B. keine Eingangskombination, die nur bei der Einfahrt auftritt.

30

TG Umwelttechnik

Abitur 2016/2017

Hauptprüfung

Lösungsvorschlag

Arbeitszeit: 270 Minuten
Hilfsmittel: Formelsammlung Umwelttechnik
Zugelassener Taschenrechner

Stoffgebiet

Teil 1: Pflichtbereich

Aufgabe 1: Laufwasserkraftwerk (4 Seiten)
Photovoltaik

Aufgabe 2: Solarthermie (4 Seiten)
Kontrollierte Wohnraumlüftung
Gebäudehülle

Teil 2: Wahlbereich

Aufgabe 3: Paralleles Hybridfahrzeug (3 Seiten)
Abgasreinigung

Aufgabe 4: Energieversorgung (4 Seiten)
Wärmeleistungwerk
Steuerungstechnik

1 Pflichtaufgabe zu Wasserkraft, Photovoltaik

Punkte

1.1 Laufwasserkraftwerk

1.1.1 Der Abfluss (Volumenstrom) des Flusses wird kontinuierlich erfasst. Dadurch erhält man die Abflussganglinie (Jahresganglinie) für den Abfluss eines Jahres. Ordnet man die Abflusswerte nach der Größe, erhält man die Abflussdauerlinie (Jahresdauerlinie). Abflussdauerlinien werden über mehrere Jahre ermittelt.

2

1.1.2 An ca. 120 Tagen (Schnittpunkt zwischen Abflussdauerlinie und Ausbauabfluss).

1

1.1.3
$$P_{el} = \dot{V} \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot \eta_{ges} = 13 \frac{m^3}{s} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 7,5 m \cdot 0,73 = 698,2 kW$$

2

1.1.4 Rechen, Turbine, Generator, Transformator, Reibungsverluste in den Zu- und Ablaufleitungen der Turbine, normierter Abfluss, Höhendifferenz.
Bei mehreren Turbinen: Betriebsweise.

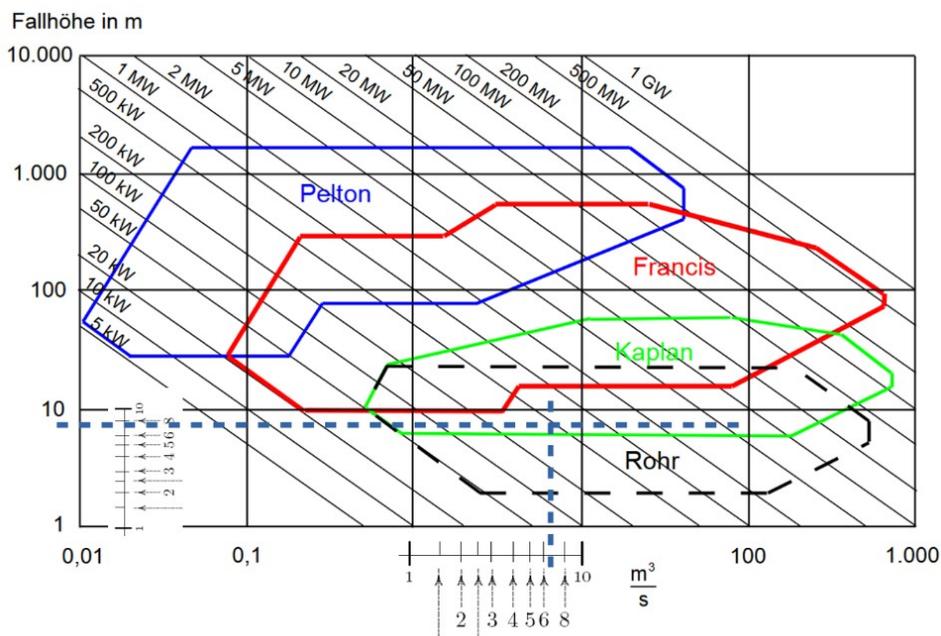
2

1.1.5 Der Pegelstand des Oberwassers kann nur bis zum Stauziel ansteigen. Der Pegelstand des Unterwassers steigt aber immer mehr an. Dadurch nimmt die Fallhöhe zunehmend ab.
Oberhalb des Ausbauabflusses geht ein Teil des Wassers ungenutzt über das Wehr. Die Leistung steigt bis zum Erreichen des Ausbauabflusses an, danach fällt sie auf Grund der kleiner werdenden Fallhöhe ab.

2

1.1.6 Bei zwei Turbinen beträgt der Abfluss jeweils 6,5 m³/s. Bei einer Fallhöhe von 7,5 m ist nach dem Diagramm sowohl die Kaplan- als auch die Rohrturbine geeignet. Die Kaplan-turbine arbeitet aber am unteren Rand ihrer Fallhöhe. Die Rohrturbine kann mit kleineren Fallhöhen umgehen und eignet sich daher in diesem Fall besser.

3



1.2 Photovoltaik

1.2.1 Aufstellung der Module: hochkant 1

Je Dachhälfte 12 Module

Insgesamt: 24 Module

1.2.2 Durch die Ost-West-Ausrichtung des Geräteschuppens erhalten die beiden Dachhälften unterschiedliche Sonneneinstrahlung im Tagesverlauf. Damit gibt es unterschiedliche MPP, sodass für jede Dachhälfte ein eigener MPP-Tracker notwendig ist, um die maximale Leistung der PV-Anlage zu entnehmen. 2

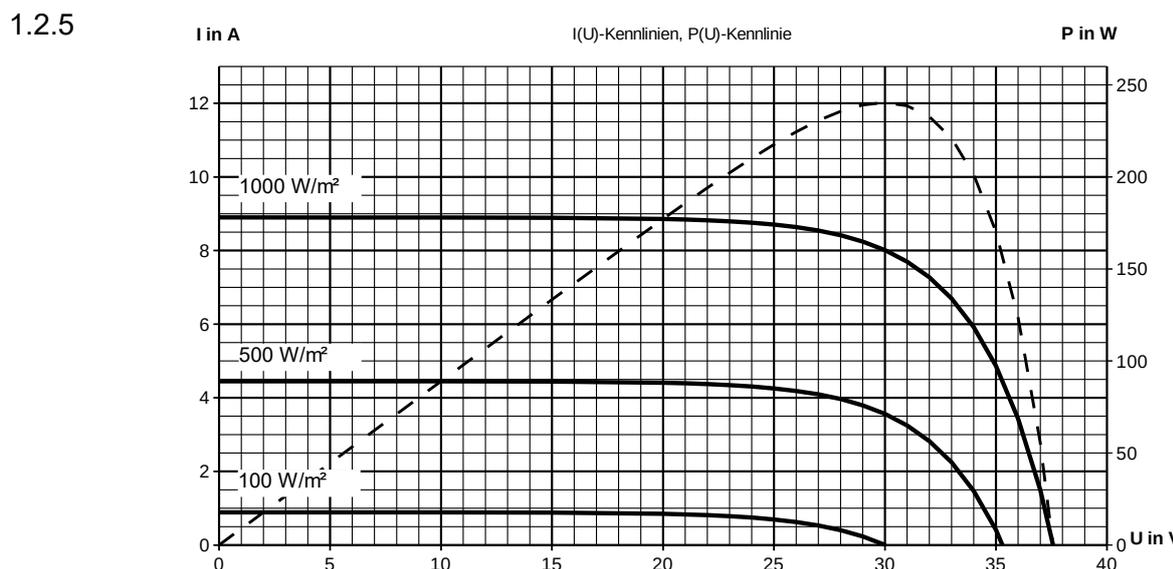
1.2.3 Strang: $U = 12 \cdot U_{MPP} = 12 \cdot 30 \text{ V} = 360 \text{ V}$ $I = I_{MPP} = 8,0 \text{ A}$ 2

Anlage: $P_N = 24 \cdot P_{MPP} = 24 \cdot 240 \text{ W} = 5760 \text{ W}$

1.2.4

U in V	0	25	29	30	31	32	35	36	37,5
I in A	8,9	8,7	8,2	8,0	7,7	7,3	4,9	3	0
P in W	0	217,5	237,8	240	238,7	233,6	171,5	108	0

1



1.2.6 Bei einer Sonnenstrahlung von $P_{tot} = 500 \text{ W/m}^2$ liegt der MPP bei $P_{MPP} = 112 \text{ W}$. 3

→ $I_{MPP} = P_{MPP} / U_{MPP} = 112 \text{ W} / 28 \text{ V} = 4 \text{ A}$

Der Kurzschlussstrom liegt bei dem halben Wert der STC: $I_{SC500} = 4,45 \text{ A}$

Die STC- Kennlinie verschiebt sich an jedem Punkt um 4,45 A nach unten

Abgelesen: $U_{OC500} = 35,3 \text{ V}$

- 1.2.7 $\eta_{PV} = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{P_{N500}}{P_{tot} \cdot A_{PV}} = \frac{24 \cdot 112W}{500 \frac{W}{m^2} \cdot 24 \cdot 1,6 m \cdot 1 m} = 0,14$ 2
- 1.2.8 Der Jahresertrag errechnet sich nach folgender Formel (FOSA S. 27): 2
- $$W_{Jahr-ideal} = A_{PV} \cdot H_{h-Jahr} \cdot k_{\alpha,\beta} \cdot \eta_{PV}$$
- Bis auf den Korrekturfaktor $k_{\alpha,\beta}$ bleiben alle Werte gleich, wenn die PV-Anlage in Richtung Süden ausgerichtet ist.
- Südausrichtung: $k_{\alpha,\beta \text{ Süd}} = k_{opt} = 1,17$
- Ost-Westausrichtung: $k_{\alpha,\beta \text{ OW}} = 0,94$ (Werte aus FOSA S. 27)
- $$\frac{k_{opt}}{k_{\alpha,\beta \text{ OW}}} = \frac{1,17}{0,94} = 1,245$$
- Der Jahresertrag der PV-Anlage in Südausrichtung ist um den Faktor 1,245 höher als in Ost-West-Ausrichtung.
- 1.2.9 Eigenverbrauch, Speicherung der elektrischen Energie 1
- 1.2.10 Wenn der MPP-Tracker den Arbeitspunkt aus dem Maximum Power Point schiebt wird der Anlage weniger Leistung entnommen. 1
- 1.2.11 Verluste = $1000 \frac{kWh}{kWp} \cdot 5,76 kW \cdot 0,1231 \frac{\text{Euro}}{kWh} \cdot 0,05 = 35,45 \text{ Euro}$ 1

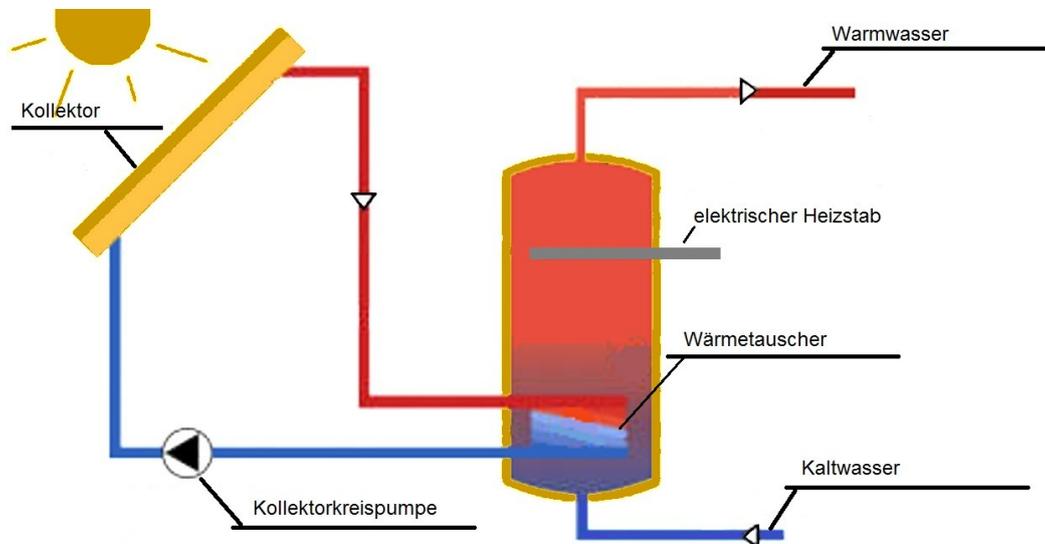
2 Pflichtaufgaben zu Solarthermie, kontrollierter Wohnraumlüftung und Gebäudehülle

Punkte

2.1 Solarthermie

2.1.1 Aufbau solarthermische Anlage

3



2.1.2 Flachkollektoren haben aufgrund ihrer geringeren optischen Verluste bis zu einer Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Kollektor von ca. 30 K einen höheren Wirkungsgrad als Vakuumröhrenkollektoren. Erst über einer Temperaturdifferenz von 30 K weisen die Vakuumröhrenkollektoren aufgrund ihrer besseren Wärmedämmung einen höheren Wirkungsgrad auf als die Flachkollektoren. Flachkollektoren sind deutlich günstiger in der Anschaffung.

2

2.1.3 Flachkollektor, Begründung: Günstig in der Anschaffung, hoher optischer Wirkungsgrad, für Warmwasserbereitung ohne Heizungsunterstützung ausreichend. Andere Lösungen können bei passender Erklärung ebenfalls als richtig bewertet werden.

1

2.1.4 Punkt A: Hier gibt es keine Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Kollektor, es gibt keine thermischen Verluste.

2

Punkt B: Wird bei maximaler solarer Einstrahlung erreicht. Die Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und Kollektor liegt bei ca. 145 K. Der Wirkungsgrad sinkt auf 0 %, da hier eine zu hohe Anlagentemperatur erreicht wird, schaltet die Anlage ab.

2.1.5 Belastungen:

2

Hohe Temperatur führt zu hohem Druck, der die Anlagenbauteile beschädigen kann.

Hohe Temperatur führt zu Zersetzung/Alterung des Frostschutzmittels (Glykol) in der Solarflüssigkeit.

2.1.6 Speichergröße

3

$$V_{\text{WW},40^{\circ}\text{C}} = 33 \text{ Pers} \cdot 6 \frac{\text{L}}{\text{Pers} \cdot \text{d}} \cdot 2 \text{ d} = 396 \text{ L} \Rightarrow m_{40} = 396 \text{ kg}$$

$$\Delta T_{40} = 40^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C} = 30 \text{ K}$$

$$Q_{40} = m_{40} \cdot c \cdot \Delta T_{40} = 396 \text{ kg} \cdot 1,16 \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 30 \text{ K} = 13780,8 \text{ Wh}$$

$$\Delta T_{60} = 60^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C} = 50 \text{ K} \quad Q_{60} = Q_{40} = m_{60} \cdot c \cdot \Delta T_{60}$$

$$m_{60} = \frac{Q_{40}}{c \cdot \Delta T_{60}} = \frac{13780,8 \text{ Wh}}{1,16 \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 50 \text{ K}} = 237,6 \text{ kg} \Rightarrow V_{\text{Sp},60^{\circ}\text{C}} = 237,6 \text{ L}$$

2.1.7 Erforderliche Kollektorfläche A_K

2

$$V = 300 \text{ L} \rightarrow m = 300 \text{ kg}$$

$$Q_{\text{min}} = m \cdot c \cdot \Delta T = 300 \text{ kg} \cdot 1,16 \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 50 \text{ K} = 17400 \text{ Wh} = 17,4 \text{ kWh}$$

$$q_{\text{d,max}} = 4,6 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}, \quad f = 1,0 \text{ ablesen aus Diagramm und Tabelle}$$

$$A_K = \frac{Q_{\text{min}} \cdot f}{q_{\text{d}} \cdot \eta_{\text{Anl}}} = \frac{17,4 \text{ kWh} \cdot 1,0}{4,6 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \cdot 0,55} = 6,88 \text{ m}^2$$

2.2 Kontrollierte Wohnraumlüftung

2.2.1 Wegen der innen liegenden Toilettenräume ist keine Fensterlüftung möglich. Eine mechanische Lüftung ist daher zwingend erforderlich.

1

2.2.2 Raumvolumen $V_{\text{Raum}} = 72 \text{ m}^2 \cdot 2,5 \text{ m} = 180 \text{ m}^3$

2

$$\text{Außenluftvolumenstrom: } \dot{V}_{\text{AUL}} = \beta \cdot V_{\text{Raum}} = 4 \frac{1}{\text{h}} \cdot 180 \text{ m}^3 = 720 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

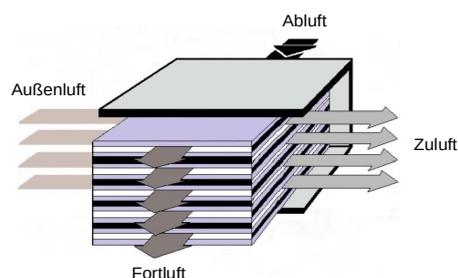
Aber: erforderliche Außenluftfrate = $30 \text{ m}^3 / (\text{Person} \cdot \text{h})$

$$\text{Bei 33 Personen: } 30 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot \text{Pers}} \cdot 33 \text{ Pers} = 990 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Bewertung: Der Außenluftvolumenstrom ist um $990 \text{ m}^3/\text{h} - 720 \text{ m}^3/\text{h} = 270 \text{ m}^3/\text{h}$ (ca. 25 %) zu gering.

2.2.3 Die verbrauchte Raumluft wird als Abluft in den Kreuzwärmetauscher geleitet, darin abgekühlt und als kalte Fortluft nach außen geleitet.

Die kalte Außenluft wird im Wärmetauscher erwärmt und als Zuluft in die Räume geleitet. Die Luftströme werden durch dünne Platten getrennt, so dass ein Wärme- jedoch kein Stoffaustausch erfolgen kann. Durch die Anordnung der Öffnungen des Plattenwärmetauschers wird ein Kreuzstrom der Luftströme erzwungen.



2

2.2.4 Zulufttemperatur: $\vartheta_{zu} = 13\text{ °C}$

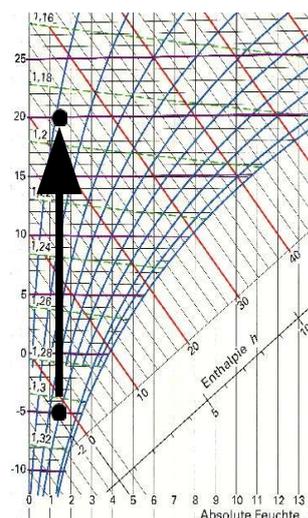
Außenlufttemperatur $\vartheta_{au} = -5\text{ °C}$

Relative Feuchte $\varphi_{au} = 60\%$,

Ablesen aus Diagramm: $\varphi_i = 11\%$

Die Luft ist in diesem Zustand unbehaglich trocken.

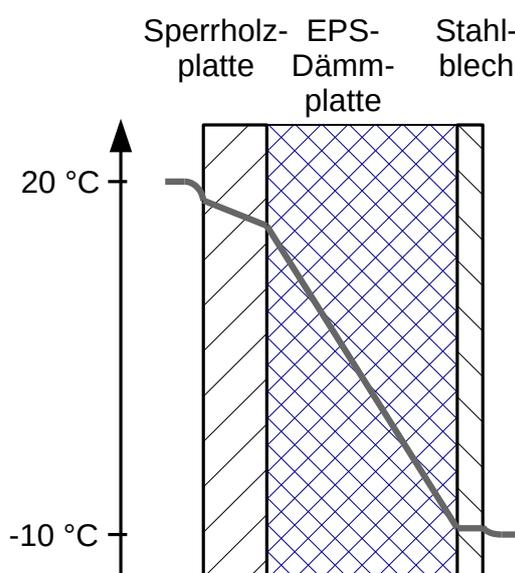
Mögliche Konsequenz: Dadurch kann es zum Austrocknen der Schleimhäute kommen.



2

2.3 Gebäudehülle

2.3.1 Hinweis zum Temperaturverlauf: Die Temperatur im Stahlblech verläuft nahezu komplett waagrecht; der Temperaturverlauf über die Sperrholzplatte hat ungefähr ein Drittel der Steigung wie über die Dämmung.



2

- 2.3.2 Bestimmung der Taupunkttemperatur mit dem h,x-Diagramm (Punkt 20 °C / 65 %, senkrecht nach unten): $\vartheta_T = 13,5 \text{ °C}$

4

Sobald diese Innenwandtemperatur ϑ_{si} erreicht wird, fällt Tauwasser aus.

$$\vartheta_{si} = \vartheta_i - \frac{\Delta T}{R_T} \cdot R_{si} = \vartheta_i - \frac{\vartheta_i - \vartheta_e}{R_T} \cdot R_{si} \quad \text{Gesuchte Größe: } \vartheta_e$$

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

$$R_T = 0,13 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} + \frac{0,01 \text{ m}}{0,13 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,03 \text{ m}}{0,05 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,004 \text{ m}}{50 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + 0,043 \text{ m}^2\text{K} = 0,85 \text{ m}^2\text{K}$$

$$\Delta T = \left(\frac{\vartheta_i - \vartheta_{si}}{R_{si}} \right) \cdot R_T = \left(\frac{20 \text{ °C} - 13,5 \text{ °C}}{0,13 \text{ m}^2\text{K}} \right) \cdot 0,85 \text{ m}^2\text{K} = 42,5 \text{ K}$$

$$\vartheta_e = \vartheta_i - \Delta T = -22 \text{ °C}$$

- 2.3.3 Keine massigen Außenwände, sondern leichte Containerwände
 ==> keine Wärmespeicherfähigkeit der Wände
 ==> starke Aufheizung der Innenräume („Barackenklima“)

2

30

3 Wahlaufgabe Paralleles Hybridfahrzeug und Abgasreinigung	Punkte
3.1 Paralleles Hybridfahrzeug	
3.1.1 Maximale Motorleistung: $P_{\max} = 150 \text{ kW @ } n = 4150 \text{ min}^{-1}$ Motorleistung im Verbrauchsoptimum: $P_{\text{opt}} \approx 40 \text{ kW}$	2
3.1.2 Gewählt: Punkt maximaler Motorleistung Aus der Volllastkennlinie abgelesen: $n = 4150 \text{ min}^{-1}$ $M = 345 \text{ Nm}$ Leistung berechnet: $P = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot \frac{4150}{60} \text{ s}^{-1} \cdot 345 \text{ Nm} = 150 \text{ kW}$ (Die aus der Volllastkennlinie berechnete Leistung stimmt mit der abgelesenen überein. Volllastkennlinie und Leistungsverlauf passen also zueinander.)	2
3.1.3 Die Konstantleistungshyperbeln sind einfach Punkte im M-n-Diagramm, für die die Gleichung gilt $P = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M = \text{konst} \rightarrow M = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n}$. Diese Hyperbelgleichungen beschreiben nicht einen bestimmten Motor – sie sind also bei verschiedenen Motoren gleich. Der Schnittpunkt von Volllastkennlinie und Leistungsverlauf hat keine Bedeutung, da die y-Achsen beider Graphen verschiedene Einheiten tragen.	2
3.1.4 Für 10 kW Antriebsleistung bei einer Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h ist der 6. Gang optimal.	2
3.1.5 Aus dem Diagramm lässt sich für 100 km/h im 6. Gang $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ ablesen. Eine Vertikale bei $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ schneidet die 10 kW-Hyperbel bei einem spezifischen Verbrauch von ca. 350 g/kWh. 100 km werden in 1 h zurückgelegt. Die während einer Stunde verrichtete Arbeit beträgt $W = P \cdot t = 10 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h} = 10 \text{ kWh}$.	3
Der Verbrauch in kg/100km beträgt: $\text{Verbrauch} = \frac{10 \text{ kWh} \cdot 0,35 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}}{100 \text{ km}} = 3,5 \frac{\text{kg}}{100 \text{ km}}$	
Der Verbrauch in L/100km beträgt: $\text{Verbrauch} = \frac{3,5 \frac{\text{kg}}{100 \text{ km}}}{0,82 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 4,27 \frac{\text{L}}{100 \text{ km}}$	
3.1.6 Der Lastpunkt sollte bei $n = 2000 \text{ min}^{-1}$ von der 10 kW- zur 50 kW-Hyperbel verschoben werden. Dann sinkt der spezifische Verbrauch von ca. 350 g/kWh auf 215 g/kWh. Dazu wird die elektrische Maschine als Generator betrieben, der eine zusätzliche Last von 40 kW darstellt.	2
3.1.7 Der Akkumulator wird mit 40 kW aufgeladen. Er ist nach $t = \frac{W}{P} = \frac{4 \text{ kWh}}{40 \text{ kW}} = 0,1 \text{ h}$ voll. Die dabei zurückgelegte Strecke beträgt $s = v \cdot t = 100 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 0,1 \text{ h} = 10 \text{ km}$. Dabei beträgt der Verbrauch $\text{Verbrauch} = 50 \text{ kW} \cdot 0,1 \text{ h} \cdot 0,215 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = 1,075 \text{ kg}$	3

Dabei beträgt der Verbrauch in L:
$$\text{Verbrauch} = \frac{1,075 \text{ kg}}{0,82 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 1,31 \text{ L}$$

3.1.8 Der Akkumulator wird also mit 10 kW entladen.

2

Er ist nach
$$t = \frac{W}{P} = \frac{4 \text{ kWh}}{10 \text{ kW}} = 0,4 \text{ h}$$
 leer.

Die dabei zurückgelegte Strecke beträgt
$$s = v \cdot t = 100 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 0,4 \text{ h} = 40 \text{ km}$$
.

Dabei wird kein Kraftstoff verbraucht.

3.1.9 Nach der folgenden Zyklenabfolge sind 100 km zurückgelegt:

2

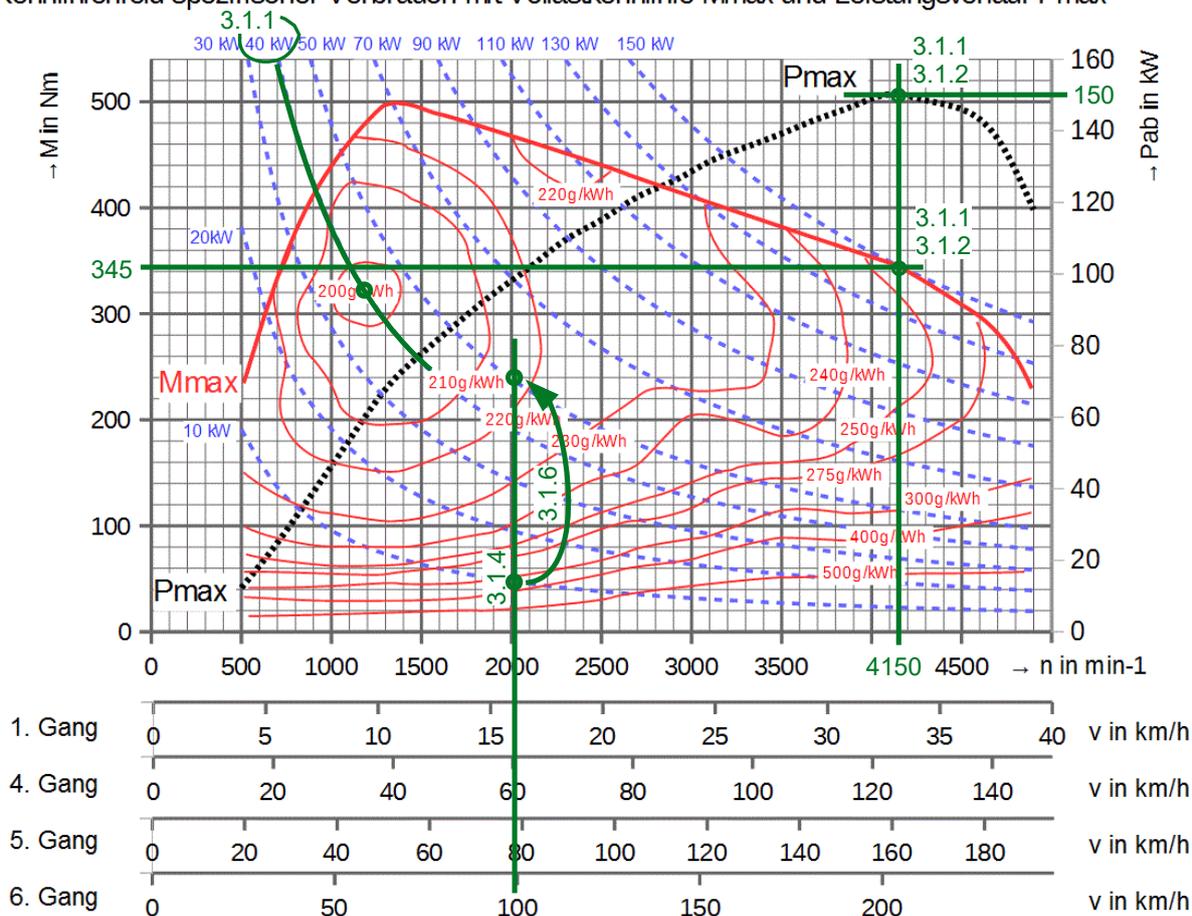
„Lastpunktverschiebung“
$$t = \frac{W}{P} = \frac{4 \text{ kWh}}{40 \text{ kW}} = 0,1 \text{ h}$$
 (10 km) → „Segeln“ (40 km)

→ „Lastpunktverschiebung“ (10 km) → „Segeln“ (40 km)

Dabei werden 2 x 1,31 L = 2,62 L verbraucht.

Der Verbrauch in L/100km beträgt also
$$\text{Verbrauch} = \frac{2,62 \text{ L}}{100 \text{ km}}$$

Kennlinienfeld spezifischer Verbrauch mit Vollastkennlinie Mmax und Leistungsverlauf Pmax



3.2 Abgasreinigung

- 3.2.1 Mögliche Antworten: Stickstoffoxide: NO₂ wirkt als Reizgas und kann Herz-Kreislaufkrankungen verursachen, Stickstoffoxide sind Vorläufersubstanzen für bodennahes Ozon (Reizgas) und Mitverursacher des sauren Regens. Feinstaub ist lungengängig, kann die inneren Organe schädigen und verursacht Atemwegserkrankungen. Dieselruß ist krebserregend. 2
- 3.2.2 Stickoxide werden bevorzugt bei hohen Verbrennungsmotoren gebildet (thermisches NO). Durch Absenkung der Temperatur können die Emissionen gesenkt werden. 1
- 3.2.3 Bei zu niedrigen Verbrennungstemperaturen wird die Verbrennung unvollständig, die Rußemissionen steigen. Andere mögliche Antworten: Bei zu niedrigen Temperaturen sinkt der Wirkungsgrad des Motors; bei sehr niedrigen Temperaturen kann die Selbstzündung nicht ablaufen. 2
- 3.2.4 $4\text{NH}_3 + 4\text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$, auch möglich: $4\text{NH}_3 + 6\text{NO} \rightarrow 5\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$ 1
- 3.2.5 Zu Beginn einer Fahrt reichen die Temperaturen im Abgassystem nicht aus. Die ablaufenden Reaktionen im Katalysator benötigen eine gewisse Mindesttemperatur. Der Katalysator sollte möglichst nahe am Motor eingebaut werden. 2
- 3.2.6 Der Dieselmotor wird mit sehr großem Luftüberschuss betrieben. Die Luftverhältniszahl λ ist 1,5 (oder auch sehr viel höher). Die Konversionsrate für Stickstoffoxide ist in diesem Bereich nahe 0. 2

30

4 Wahlaufgaben zu Energieversorgung und Wärmekraftwerk

Punkte

4.1 Energieversorgung

- 4.1.1 Die Energieeffizienz ist bei der gekoppelte Wärme- und Stromerzeugung (System 2) größer, die Verluste sind deutlich geringer. Bei der getrennten Wärme- und Stromerzeugung (System 1) führen die Wärmeübertragungsverluste zu großen Wirkungsgradeinbußen. 3

Bei der gekoppelten Wärme- und Stromerzeugung wird das „Abfallprodukt“ Wärme des Kraftwerks zum Heizen eingesetzt, dadurch geht weniger Energie verloren, d.h. der Wirkungsgrad ist größer.

- 4.1.2 Der Heizbedarf und damit der Wärmebedarf eines Einfamilienhauses unterliegt starken jahreszeitabhängigen Schwankungen, der Stromverbrauch hingegen ist relativ konstant. Dies führt gerade im Sommer zu einer großen Diskrepanz zwischen Wärme- und Strombedarf. Wirtschaftlich und auch ökologisch arbeitet eine gekoppelte Wärme- und Stromerzeugung nur, wenn beides über das ganze Jahr gleichmäßig benötigt wird. 2

4.2 Wärmekraftwerk

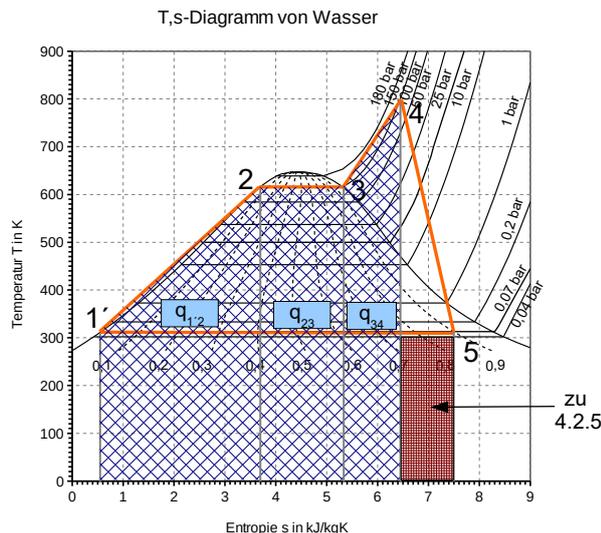
- 4.2.1 s. Diagramm in Aufgabe 4.2.4, nur Teilstücke 1' → 2, 2 → 3, 3 → 4 3
 1' → 2 Erwärmen des Wassers (flüssig) auf Siedetemperatur
 2 → 3 Verdampfen des Wassers
 3 → 4 Überhitzen des Dampfes

4.2.2 $q_{ab} = (s_1 - s_5) \cdot T_{51}$ 3
 $s_5 = s_1 - \frac{q_{ab}}{T_{51}} = 0,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - \frac{-2170 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{315 \text{K}} = 7,49 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$

Werte für s_1 und T_{51} aus T,s-Diagramm bei 0,07 bar, Vervollständigung Kreisprozess siehe 4.2.4

- 4.2.3 Der aus der Turbine austretende Wasserdampf besitzt eine Temperatur von ca. 315 K (42 °C) und ist damit zu kühl, um noch sinnvoll für die Fernwärmeversorgung genutzt zu werden. 2

- 4.2.4 4



$$q_{zu} = (s_2 - s_1) \cdot \left(\frac{T_2 + T_1}{2} \right) + (s_3 - s_2) \cdot T_{23} + (s_4 - s_3) \cdot \left(\frac{T_4 + T_3}{2} \right)$$

$$q_{zu} = \left(3,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - 0,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right) \cdot \left(\frac{620 \text{K} + 315 \text{K}}{2} \right) + \left(5,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - 3,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right) \cdot 620 \text{K}$$

$$+ \left(6,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - 5,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right) \cdot \left(\frac{800 \text{K} + 620 \text{K}}{2} \right) = 3284,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_{th} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{q_{zu} - q_{ab}}{q_{zu}} \quad \eta_{th} = \frac{3284,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2170 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3284,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,34 = 34 \%$$

4.2.5 Verluste durch Verwirbelungen, Kennzeichnung siehe 4.2.4

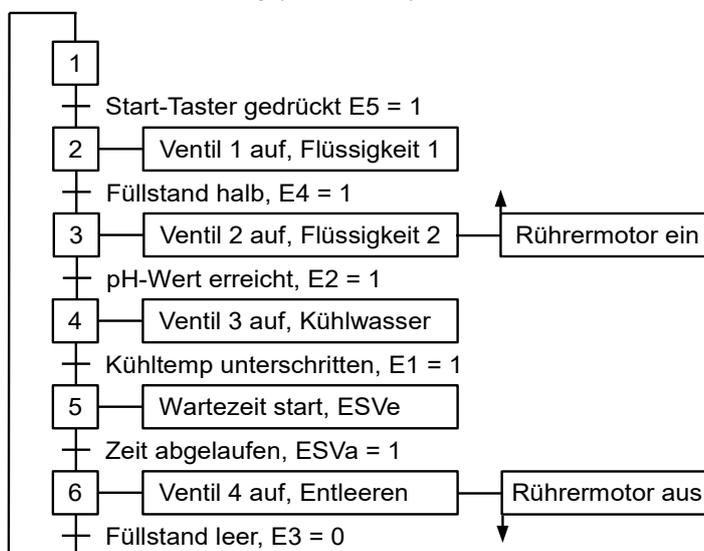
2

4.3 Steuerungstechnik

4.3.1

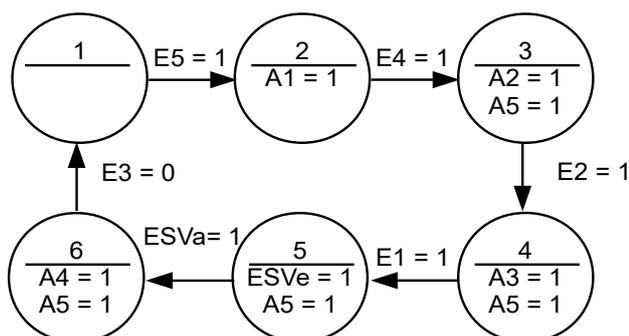
6

GRAFSET-Darstellung (vereinfacht)



ESV = Einschaltverzögerung
 ESVe = ESV-Eingang
 ESVa = ESV-Ausgang

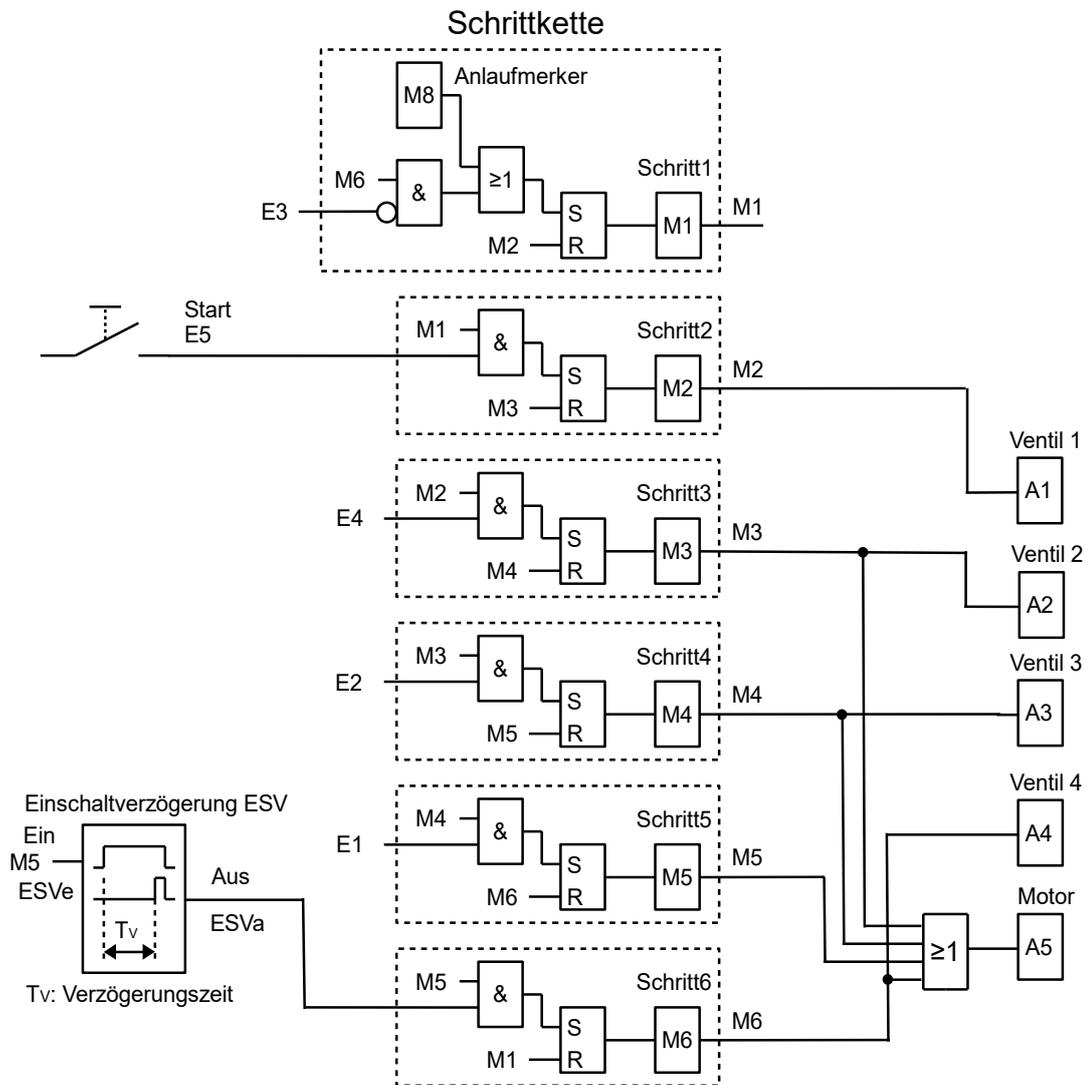
Zustandsdiagramm



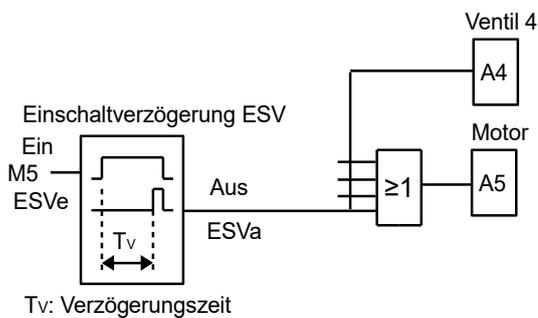
Alle in den Zuständen nicht angegebenen Ausgänge sind 0.

4.3.2

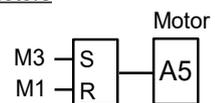
4



Alternative ohne Schritt 6



Alternative Ansteuerung des Motors



TG Umwelttechnik

2016/2017

Übungsaufgabe

Lösungsvorschlag

Arbeitszeit: 270 Minuten
Hilfsmittel: Formelsammlung Umwelttechnik
Zugelassener Taschenrechner

Stoffgebiet

Teil 1: Pflichtbereich

Aufgabe 1: Photovoltaik (3 Seiten)
Elektromobilität

Aufgabe 2: Wärme erzeugen (3 Seiten)
Abgasreinigung
Gebäudehülle

Teil 2: Wahlbereich

Aufgabe 3: Wasserkraft (3 Seiten)
Wärmeleistungwerke

Aufgabe 4: Blockheizkraftwerk (4 Seiten)
Trink- und Abwasser
Regelungstechnik

1 Pflichtaufgaben zur Elektromobilität, Photovoltaik	Punkte
1.1 PV-Inselanlage	
1.1.1 Funktionen des Wechselrichters und des Ladegerätes: Wechselrichter: Spannungsumsetzung von kleiner Gleichspannung auf große Wechselspannung MPP-Tracking um maximale Leistung der Solarzellen auszunutzen. Ladegerät: Spannungsumsetzung von großer Wechselspannung auf kleine Gleichspannung Überladeschutz, Strom- und Spannungsanpassung für optimalen Ladevorgang	2
1.1.2 Lithium-Ionen-Akku: $\text{Energiedichte}_{\text{Akku}} = \frac{51 \text{ V} \cdot 29 \text{ Ah}}{10 \text{ kg}} = 147,9 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}} = 0,148 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ $\text{Dieselkraftstoff: Energiedichte}_{\text{Diesel}} = \frac{\text{Heizwert}}{\text{Dichte}} = 10 \frac{\text{kWh}}{\text{L}} \cdot \frac{\text{L}}{0,83 \text{ kg}} = 12,05 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ Die Energiedichte von Diesel ist ca. 80 x größer als die des Lithium-Ionen-Akkus, daher sind Akkus verglichen mit Dieseltanks, welche die gleiche Energiemenge beinhalten viel größer und schwerer.	2
1.1.3 Von PV-Modulen zu liefernde Energiemenge für Akku-Aufladung 40 % bis 100 %: $W = \frac{51 \text{ V} \cdot 29 \text{ Ah} \cdot 0,6}{0,9 \cdot 0,92} = 1,072 \text{ kWh}$	2
1.1.4 $W_{\text{Tag}} = P_{\text{Nenn}} \cdot \frac{H_h}{1 \text{ kW/m}^2} \cdot K_{\alpha, \beta} \rightarrow P_{\text{Nenn}} = \frac{W_{\text{Tag}} \cdot 1 \text{ kW/m}^2}{H_h \cdot K_{\alpha, \beta}}$ $P_{\text{Nenn}} = \frac{1070 \text{ Wh} \cdot 1 \text{ kW/m}^2}{3,56 \text{ kWh/m}^2 \cdot 1,15} = 261,4 \text{ W}$	3
1.1.5 Für ca. 270 W Anlagenleistung werden 2 Module mit jeweils 150 W benötigt → 300 W Die Module liefern maximal 22,3 V, die maximale Eingangsspannung des Wechselrichter beträgt laut Blockschaltbild 25 V → Parallelschaltung der 2 Module.	2
1.1.6 Vom Ladegerät zu liefernde Energiemenge für Akku-Aufladung 40 % bis 100 %: $W = \frac{51 \text{ V} \cdot 29 \text{ Ah} \cdot 0,6}{0,92} = 964,6 \text{ Wh}$	1
1.1.7 $\frac{630 \text{ €}}{0,30 \text{ €/kWh}} = 2100 \text{ kWh}$ sind notwendig bis zur Amortisation $\frac{2100 \text{ kWh}}{0,965 \text{ kWh}} = 2176 \text{ Ladungen}$ (≙ ca. 22 Jahre bei 100 Arbeitstagen April bis September)	3
1.1.8 $P_{\text{Akku}} = 51 \text{ V} \cdot 3 \text{ A} = 153 \text{ W} \rightarrow P_{\text{PV}} = \frac{153 \text{ W}}{0,92 \cdot 0,9} = 184,8 \text{ W}$ $I_{\text{PV}} = \frac{P_{\text{PV}}}{U_{\text{PV}}} = \frac{184,8 \text{ W}}{17,8 \text{ V}} = 10,4 \text{ A}$	2

$$1.1.9 \quad P_{\text{Sonne}} = \frac{P_{\text{PV}}}{\eta} = \frac{10,4 \text{ A} \cdot 17,8 \text{ V}}{0,167} = 1108,5 \text{ W}$$

$$P_{\text{Sonne}} = E \cdot \text{Fläche}_{\text{PV}}$$

$$E = \frac{P_{\text{sonne}}}{\text{Fläche}_{\text{PV}}} = \frac{1108,5 \text{ W}}{0,67 \cdot 1,34 \cdot 2} = 617,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad \text{Notwendige Mindesteinstrahlung}$$

1.2 Elektroroller

1.2.1 Die Kommutierung erfolgt elektronisch. Daher sind keine Schleifringe und Bürsten erforderlich. Der Motor ist direkt in der Radnabe verbaut.

$$1.2.2 \quad t = \frac{s}{v} = \frac{36 \text{ km}}{45 \text{ km/h}} = 0,8 \text{ h}$$

$$P_{\text{elektr}} = \frac{W}{t} = \frac{51 \text{ V} \cdot 29 \text{ Ah}}{0,8} = 1,85 \text{ kW}$$

$$P_{\text{mech}} = \eta \cdot P_{\text{elekt}} = 1,48 \text{ kW}$$

$$1.2.3 \quad P_{\text{mech}} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot \frac{v}{U} \cdot M \quad U = 2 \cdot \pi \cdot r = 0,9425 \text{ m}$$

$$M = \frac{P_{\text{mech}} \cdot U}{2 \cdot \pi \cdot v} = \frac{1,48 \text{ kW} \cdot 0,9425 \text{ m}}{2 \cdot \pi \cdot 45 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}}} = 17,8 \text{ Nm}$$

$$1.2.4 \quad M_{30} = F \cdot r = 64,4 \text{ N} \cdot 0,15 \text{ m} = 9,66 \text{ Nm} \quad (\text{Drehmoment bei } 30 \text{ km/h})$$

$$I_{45} = \frac{Q}{t_{45}} = \frac{29 \text{ Ah}}{0,8 \text{ h}} = 36,25 \text{ A} \quad (\text{Strom bei } 45 \text{ km/h})$$

$$\frac{M_{30}}{I_{30}} = \frac{M_{45}}{I_{45}} \rightarrow I_{30} = M_{30} \cdot \frac{I_{45}}{M_{45}} = 9,66 \text{ Nm} \cdot \frac{36,25 \text{ A}}{17,8 \text{ Nm}} = 19,7 \text{ A}$$

$$P_{\text{elekt } 30} = U_{\text{motor}} \cdot I_{\text{Motor}} = 32,8 \text{ V} \cdot 19,7 \text{ A} = 646,2 \text{ W}$$

$$t = \frac{W}{P} = \frac{51 \text{ V} \cdot 29 \text{ Ah}}{646,2 \text{ W}} = 2,29 \text{ h}$$

$$s = v \cdot t = 30 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 2,29 \text{ h} = 68,7 \text{ km}$$

Alternativer Lösungsweg über die mechanische Leistung möglich:

$$P_{\text{mech } 30} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_{30} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{v_{30}}{U} \cdot M_{30} = 537 \text{ W}$$

$$P_{\text{elekt } 30}^* = \frac{P_{\text{mech } 30}}{\eta} = \frac{537 \text{ W}}{0,8} = 670,8 \text{ W}$$

Abweichung zu $P_{\text{elekt } 30}$ entsteht durch die Annahme, dass der Wirkungsgrad über alle Betriebszustände konstant sei. Der Wirkungsgrad bei $v=30 \text{ km/h}$ beträgt jedoch $\eta=83\%$. Eine Herleitung ist nicht verlangt.

$$I_{\text{elekt } 30}^* = \frac{P_{\text{elekt } 30}^*}{U_{\text{Motor}}} = \frac{670,8 \text{ W}}{32,8 \text{ V}} = 20,45 \text{ A}$$

3

1

3

2

4

2 Pflichtaufgaben zu Wärme erzeugen, Abgasreinigung und Gebäudehülle	Punkte
2.1 Ölheizung	
2.1.1 In einer zentralen Anlage kann die geforderte Leistung (kosten-)günstiger erzeugt werden, als in mehreren kleineren Anlagen. Nachteilig sind z. B. Leitungsverluste.	2
2.1.2 $\dot{V} = \frac{\dot{Q}_B}{H_i} = \frac{\dot{Q}_L}{H_i \cdot \eta_{K,i}} = \frac{500 \text{ kW}}{10 \frac{\text{kWh}}{\text{L}} \cdot 0,95} = 52,63 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ („alter Ölkessel“ impliziert einen auf den Heizwert bezogenen Wirkungsgrad)	2
2.2 Pelletsheizungsanlage	
2.2.1 bei $\lambda = 1,0$: $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5 + 6\text{O}_2 + 24\text{N}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O} + 24\text{N}_2$	2
2.2.2 Luftvolumenstrom bei 20 % Luftüberschuss $\rightarrow \lambda = 1,2$, aus FS: $L_{\min} = 4 \text{ m}^3/\text{kg}$ $\dot{V} = \dot{m} \cdot \lambda \cdot L_{\min} = 500 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 1,2 \cdot 4 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 2400 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$	2
2.2.3 Wärmeleistung $\dot{Q}_L = \eta_i \cdot \dot{m} \cdot H_i = 0,9 \cdot 500 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 4,9 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 2205 \text{ kW}$	1
2.2.4 Im Abgas enthaltenes Wasser (aus der Verbrennung) kann theoretisch kondensieren. Die Wirkungsgraderhöhung durch Kondensationswärmenutzung entspricht dem Verhältnis von Brennwert zu Heizwert: $\frac{H_s}{H_i} = \frac{5,21 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}}{4,9 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = 1,06$	3
2.3 Abgasreinigung	
2.3.1 Nachwachsende Rohstoffe, zu denen auch Holz zählt, sind ein wesentlicher Bestandteil einer nachhaltigen Energiewirtschaft. Nachhaltigkeit bedeutet, dass sich die Energiequelle nicht aufbraucht sondern nachwächst und dabei so viel CO_2 bindet wie bei der Verbrennung freigesetzt wird..	1
2.3.2 Feinstäube: Die Schadwirkung inhalierter Staubpartikel hängt davon ab, wie tief die Teilchen in den Atemtrakt eindringen. Feinstaub verursacht Atemwegserkrankungen und kann Ursache für Krebs sein. Unverbrannte Kohlenwasserstoffe: Manche Kohlenwasserstoffverbindungen haben krebserregende Wirkung. Kohlenwasserstoffe sind maßgeblich am Entstehen von Sommersmog beteiligt. Des weiteren können Geruchsbelästigungen verursacht werden.	3

- 2.3.3 Elektrofilter sind Anlagen zur Abscheidung von Partikeln aus Gasen, die auf dem elektrostatischen Prinzip beruhen.

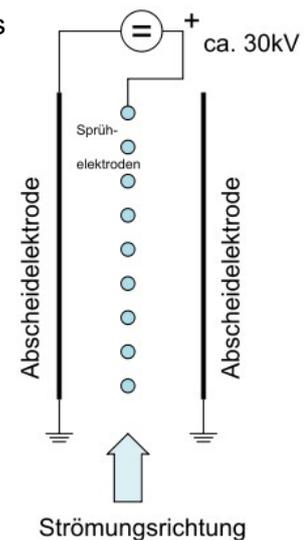
Funktionsweise:

Freisetzung von elektrischen Ladungen und Aufladung der Staubpartikel durch Sprühelektroden,

Transport der geladenen Staubteilchen zur Abscheideelektrode,

Anhaftung der Staubpartikel an der Abscheideelektrode,

Entfernung der Staubschicht von der Abscheideelektrode durch Klopferwerk.



3

- 2.3.4 Staubbelastung im Rohgas: $\dot{m}_{100} = \frac{100\%}{93,7\%} \cdot 1125 \frac{\text{g}}{\text{h}} = 1201 \frac{\text{g}}{\text{h}}$

$$\text{Rohgasstaubgehalt: } \frac{\dot{m}_{\text{roh}}}{\dot{V}} = \frac{1201 \frac{\text{g}}{\text{h}}}{1500 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 800,4 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Reingasstaubgehalt: } \frac{\dot{m}_{\text{rein}}}{\dot{V}} = (100\% - 93,7\%) \cdot \frac{\dot{m}_{\text{roh}}}{\dot{V}} = 50,4 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

2

2.4 Energetische Sanierung

- 2.4.1 Bestimmung mit Hilfe des h,x-Diagramms:

Von Zustand 20°C und $\varphi = 60\%$ senkrecht nach unten, beim Schnittpunkt mit $\varphi = 100\%$ nach links und Taupunkttemperatur ablesen:

Taupunkttemperatur $\vartheta_{\text{Tau}} = 12,3\text{ °C}$

2

- 2.4.2 Tauwasser fällt in den Bereichen an, in denen die Taupunkttemperatur unterschritten wird. Dies kann an Wärmebrücken der Fall sein. Zum Beispiel in Rauminnecken.

In einer Rauminnecke wird die Wärme an kalten Tagen schneller nach außen transportiert als in der restlichen Wand.

Weitere Wärmebrücken als Schülerantwort möglich.

1

2.4.3 Berechnung der Wandtemperatur:

$$\vartheta_{si} = \vartheta_i - \frac{\Delta T}{R_{T,neu}} \cdot R_{si} \implies R_{T,neu} = \frac{R_{si} \cdot \Delta T}{\vartheta_i - \vartheta_{si}} = \frac{0,13 \frac{m^2K}{W} \cdot 30K}{1K} = 3,9 \frac{m^2K}{W}$$

$$R_{T,neu} = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_{Dämm}}{\lambda_{Dämm}} + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{se}$$

$$d_{Dämm} = \lambda_{Dämm} \cdot \left(R_{T,neu} - \left(R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{se} \right) \right)$$

$$d_{Dämm} = 0,035 \frac{W}{mK} \cdot \left(3,9 - \left(0,13 + \frac{0,02}{0,51} + \frac{0,24}{2} + \frac{0,02}{1} + \frac{0,02}{0,06} + 0,043 \right) \frac{m^2K}{W} \right)$$

$$d_{Dämm} = 0,113 \text{ m (Ausklammerung der Einheit aus Platzgründen)}$$

2.4.4 Die Transmissionswärmeverluste werden durch die energetische Sanierung stark verringert.

Der Anteil der Lüftungswärmeverluste am Gesamtwärmeverlust ist nach der Sanierung im Verhältnis größer als der Anteil der Transmissionswärmeverluste.

4

2

30

3 Wahlaufgabe Wasserkraft und GUD-Kraftwerk

Punkte

3.1 Vergleich zweier Wasserräder

$$3.1.1 \quad P_{mech} = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot \frac{30}{60} s^{-1} \cdot 6000 Nm = 18850 W = 18,9 kW$$

2

$$3.1.2 \quad \dot{m} = \rho \cdot \dot{V} \rightarrow \dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} = \frac{m}{\frac{80}{360} \cdot T \cdot \rho} = \frac{m \cdot n}{\frac{80}{360} \cdot \rho} = \frac{400 kg \cdot 0,5 s^{-1}}{\frac{80}{360} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3}} = 0,9 \frac{m^3}{s}$$

2

Alternativer Lösungsweg:

Drehzahl = 30 min⁻¹ → Pro Sek ½ Umdrehung → 18 gefüllte Kammern pro Sek
 1 Kammer besitzt die Masse von 400 kg / 8 = 50 kg
 → Damit werden 18 x 50 kg = 900 kg Wasser pro Sek transportiert.
 900 kg / s ≙ 0,9 m³ / s

3.1.3 Die hydraulische Leistung des Kanals könnte vollständig genutzt werden, wenn die potentielle Energie des Oberwassers beim Durchlaufen der Höhendifferenz von 5 m vollständig genutzt werden würde. Da das Wasser die Schaufeln jedoch ca. auf halber Höhe verlässt, bleibt die Hälfte der Fallhöhe ungenutzt. Sicherlich sorgen auch Reibungsverluste für eine Verschlechterung des Wirkungsgrads. Deshalb kann das Wasserrad nur weniger als die Hälfte der hydraulischen Leistung des Wasserkanals nutzen.

3

$$3.1.4 \quad P_{hydro} = \rho \cdot g \cdot h \dot{V} = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,81 \frac{N}{kg} \cdot 5 m \cdot 0,9 \frac{m^3}{s} = 44145 W = 44,1 kW$$

3

$$\text{Wirkungsgrad} \quad \eta = \frac{P_{mech}}{P_{hydro}} = \frac{18,9 kW}{44,1 kW} = 0,428 = 42,8 \%$$

3.1.5 Widerstandskraft auf die Schaufel

3

$$F_w = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot (v - v_{Körper})^2 = 1,2 \cdot \frac{1000 kg/m^3}{2} \cdot 0,64 m^2 \cdot \left(1 \frac{m}{s} - 1/3 \frac{m}{s}\right)^2 = 170,7 N$$

Radius senkrecht auf Widerstandskraft $r_{WIRKSAM} = r = 2 m$

$$\text{Drehmoment} \quad M = F_w \cdot r_{WIRKSAM} = 170,7 N \cdot 2 m = 341 Nm$$

$$3.1.6 \quad \text{Drehzahl} \quad u = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot n \rightarrow n = \frac{u}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{v_{Körper}}{2 \cdot \pi \cdot r} = \frac{1/3 \frac{m}{s}}{2 \cdot \pi \cdot 2 m} = 0,0265 s^{-1}$$

2

$$\text{Leistung} \quad P_{mech} = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot 0,0265 s^{-1} \cdot 341 Nm = 56,8 W$$

3.1.7 Die Leistung des in Abb. 2 gezeigten unterschlächtigen Wasserrades ist viel geringer, da es nur die kinetische und nicht die potentielle Energie des Kanals nutzt. Die kinetische Energie eines fließenden Gewässers ist jedoch gering gegenüber der potentiellen Energie an einer Staustufe.

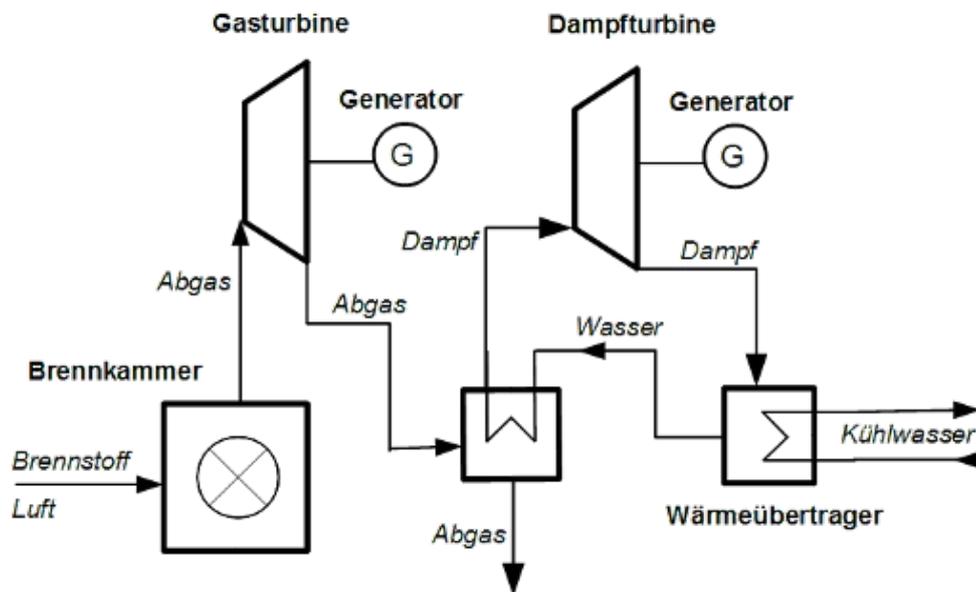
2

3.1.8 Ideal wäre, den Kanal zu stauen, und die 5 m Höhendifferenz und 0,9 m³/s Volumenstrom durch eine passende moderne Wasserturbinen-Bauform zu nutzen. Nach dem Schaubild in der Formelsammlung wäre keine der modernen Turbinenbauformen direkt passend. Am nächsten liegend wäre jedoch die Rohrturbine. Der Wirkungsgrad der modernen Bauformen liegt bei ca. 90 % im Nennbetriebsfall, was eine deutliche Effizienzsteigerung bedeutet.

3

3.2 Gas- und Dampfturbinenkraftwerk

3.2.1



2

3.2.2 Funktionsweise eines GuD-Kraftwerks:

Gas wird in einer Gasturbine verbrannt und treibt diese und den angeschlossenen Generator an → elektrische Energie.

Die anfallende Wärme bei der Gasverbrennung (Abgase) wird genutzt, um Wasserdampf zu überhitzen und damit eine Dampfturbine anzutreiben. Mit der erzeugten kinetischen Energie wird ein Generator angetrieben → elektrische Energie.

Vorteile: Höherer Wirkungsgrad, flexibel einsetzbar als Spitzenlastkraftwerk (schnelles Hoch- bzw. Runterfahren des Kraftwerkes), geringere Baukosten und Bauzeit.

2

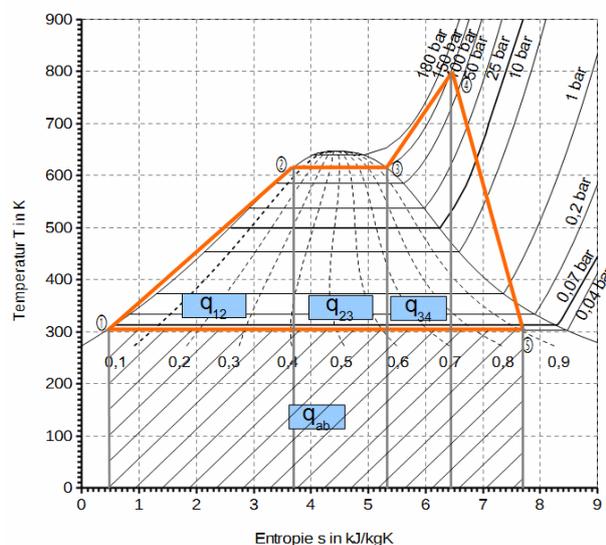
3.2.3 Abgelesene Werte aus Prozessverlauf:

- $T_1 = 300\text{K}$
- $T_2 = 615\text{K}$
- $T_3 = 800\text{K}$
- $s_1 = 0,5 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- $s_2 = 3,7 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- $s_3 = 5,4 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- $s_4 = 6,5 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
- $s_5 = 7,7 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$$w_{\text{Nutz}} = q_{\text{zu}} - |q_{\text{ab}}|$$

$$q_{\text{zu}} = q_{12} + q_{23} + q_{34}$$

T,s-Diagramm von Wasser



4

$$\begin{aligned}
 q_{zu} &= \left(\frac{(T_1 + T_2)}{2} \right) \cdot (s_2 - s_1) + T_{23} \cdot (s_3 - s_2) + \left(\frac{(T_3 + T_4)}{2} \right) \cdot (s_4 - s_3) \\
 &= \left(\frac{(300\text{K} + 615\text{K})}{2} \right) \cdot \left(3,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} - 0,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right) + 615\text{K} \cdot \left(5,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} - 3,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right) \\
 &\quad + \left(\frac{(615\text{K} + 800\text{K})}{2} \right) \cdot \left(6,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} - 5,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right) \\
 q_{zu} &= 3287,75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\
 q_{ab} &= T_1 \cdot (s_5 - s_1) \\
 q_{ab} &= 300\text{K} \cdot \left(7,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} - 0,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right) \\
 q_{ab} &= 2160 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad w_{\text{Nutz}} = 3287,75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2160 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 1127,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\
 \eta_{\text{therm}} &= \frac{W_{\text{Nutz}}}{q_{zu}} \quad \eta_{\text{therm}} = \frac{1127,25 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3287,75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,34
 \end{aligned}$$

3.2.4 Der Wirkungsgrad der Dampfturbine sinkt, da in der Turbine weniger Wärmeenergie in kinetische Energie umgesetzt werden kann.

2

30

4 Wahlaufgaben zu Blockheizkraftwerk, Trink- und Abwasser, Regelungstechnik

Punkte

4.1 Blockheizkraftwerk (BHKW)

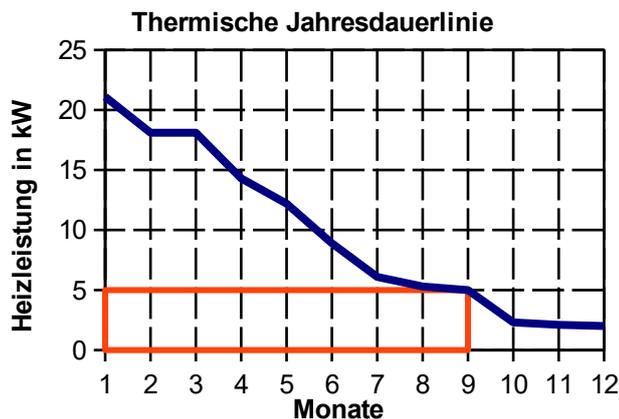
4.1.1 Wärmegeführte Betriebsweise: Das BHKW ist solange in Betrieb wie thermische Energie angefordert wird. Überschüssige elektrische Energie kann idealerweise gespeichert oder in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Diese Betriebsweise eignet sich sehr gut für Wohngebäude.

2

Stromgeführte Betriebsweise: Das BHKW ist solange in Betrieb wie elektrische Energie angefordert wird. Da bei stromgeführter Betriebsweise überschüssige thermische Energie entsteht, die nur in geringem Umfang gespeichert werden kann und der Rest z. B. in einem Kühlturm „vernichtet“ werden muss, ist diese Betriebsweise für den Einsatz in Wohngebäuden normalerweise nicht gut geeignet.

4.1.2

4



Leistungsempfehlung: z B. Wärmeleistung des BHKW: 5 kW.

Begründung: Eine große Vollastbetriebsdauer wird erreicht (ca. 6000 h), der wirtschaftliche Betrieb ist gewährleistet.

Es sind alle Lösungen mit einer Betriebsdauer > 4000 h als richtig zu werten.

$$4.1.3 \quad \dot{Q}_{B,i} = \frac{V_{\text{Gas}}}{t} \cdot H_i \quad \eta = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_{B,i}} \quad V_{\text{Gas}} = \frac{\dot{Q}_L \cdot t}{\eta \cdot H_i} = \frac{6,1 \text{ kW} \cdot 720 \text{ h}}{0,8 \cdot 10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} = 549 \text{ m}^3$$

3

4.1.4 Der thermische Wirkungsgrad des BHKW ist nur etwas mehr als halb so groß wie der Wirkungsgrad der alten Gasheizung. Da neben der thermischen Energie aber noch (höherwertige) elektrische Energie erzeugt wird, ist die Primärenergie-Ausnutzung im BHKW wesentlich günstiger.

2

$$4.1.5 \quad W_{\text{el}} = V_{\text{Gas}} \cdot H_i \cdot \eta_{\text{el}} = \frac{\dot{Q}_L \cdot t \cdot \eta_{\text{el}}}{\eta_{\text{th}}} = \frac{6,1 \text{ kW} \cdot 720 \text{ h} \cdot 0,35}{0,45} = 3416 \text{ kWh}$$

2

4.2 Trink- und Abwasser

- 4.2.1 Erste Reinigungsstufe: mechanische Reinigung. Zwei der folgenden Schritte müssen beschrieben werden: 2
Rechen: Entfernt grobe Verschmutzungen (z. B. Laub, Steine, Äste...).
Sandfang: Entfernt feinere absetzbare Verschmutzungen (z.B. Sand, kleine Steine).
Vorklärbecken: ungelöste Stoffe setzen sich ab (z. B. Papier, Fäkalien).
- 4.2.2 Ohne Phosphatentfernung wird das Gewässer überdüngt. Übermäßiges Pflanzen- bzw. Algenwachstum führt zu Sauerstoffmangel, das Gewässer „kippt um“. 1
- 4.2.3 Lösliche Phosphatverbindungen werden in eine unlösliche Form überführt. Die gebildeten unlöslichen Phosphatflocken müssen durch Absetzen aus dem Abwasser entfernt werden. 2
- 4.2.4 In beiden beschriebenen Reaktionsgleichungen dient eine Stickstoff-Sauerstoff-Verbindung als Sauerstofflieferant für die ablaufende Reaktion. Steht Luft-Sauerstoff zur Verfügung, wird dieser für den Abbau der Kohlenstoffverbindung (CH_2O bzw. CO) verwendet. Die Stickstoffverbindung kann dann nicht abgebaut werden. 2
Voraussetzung für die beschriebenen Reaktionsgleichungen ist daher das Fehlen von Luft-Sauerstoff (anoxische Bedingungen in der Kläranlage bzw. $\lambda \leq 1$ im Dreiwegekatalysator).

4.3 Regelungstechnik

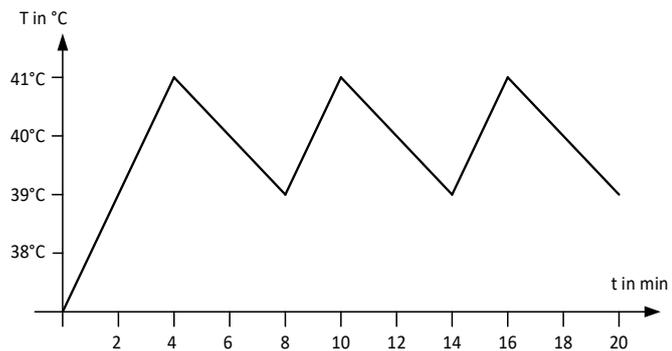
4.3.1 Bei einer Steuerung findet kein Vergleich zwischen Soll- und Istwert statt. Der Wirkungsweg ist offen. Bei einer Regelung wird aus der Regel- und Führungsgröße eine Stellgröße zur Beeinflussung der Regelstrecke gebildet. Der Wirkungsweg ist geschlossen. Im Vergleich des Reglers wird aus der Differenz von Soll- und Istwert die Regelabweichung gebildet. 1

4.3.2 Bei einem stetigen Regler ist die Stellgröße y zu jedem Zeitpunkt eine direkte Funktion der Regeldifferenz e . Ein Zweipunktregler ist ein schaltender Regler, der nur die beiden Zustände EIN und AUS ausgibt. 1

4.3.3 Führungsgröße $w = 40^\circ\text{C}$
 Hysterese = oberer Grenzwert – unterer Grenzwert = $41^\circ\text{C} - 39^\circ\text{C} = 2^\circ\text{C}$ 2

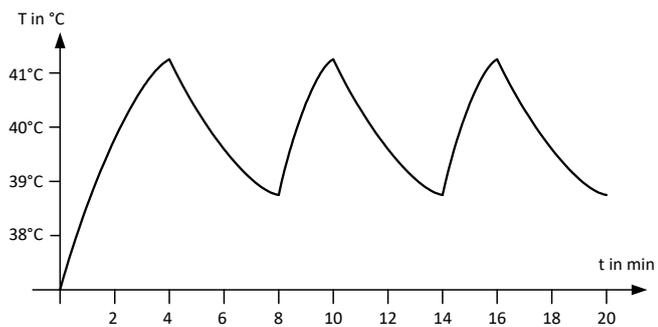
4.3.4 3

Idealisierter Verlauf der Temperatur der Behälterflüssigkeit bei linearen Temperaturänderungen und ohne Berücksichtigung der Trägheit

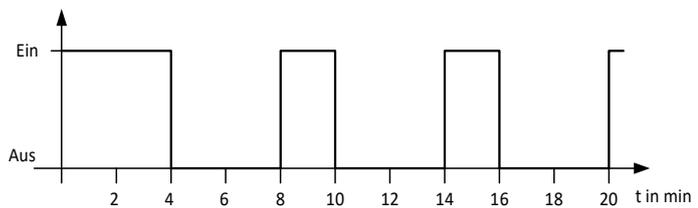


Alternativ:

Darstellung unter Berücksichtigung nichtlinearer Temperaturänderungen und der Trägheit



4.3.5 1



4.3.6 Die Genauigkeit kann z.B. durch eine Verkleinerung der Hysterese oder über den Einsatz eines stetigen Reglers verbessert werden. Bei der Verkleinerung der Hysterese nimmt die Schalthäufigkeit zu, was zu einem erhöhten Verschleiß des Schaltelements führen kann. Eine Regelabweichung kann damit nicht ganz vermieden werden. Der Einsatz eines stetigen Reglers erfordert eine aufwendigeres Stellglied und mehr Aufwand in der Konfiguration. Sie liefert aber die genaueste und flexibelste Lösung. 2

TG Umwelttechnik**Abitur 2017/2018****Hauptprüfung****Lösungsvorschlag**

Arbeitszeit: 270 Minuten
Hilfsmittel: Formelsammlung Umwelttechnik
Zugelassener Taschenrechner

Stoffgebiet **Teil 1: Pflichtbereich**

Aufgabe 1: Photovoltaik (3 Seiten)
Energieübertragung
Windkraft

Aufgabe 2: Wärmeschutz (4 Seiten)
BHKW

Teil 2: Wahlbereich

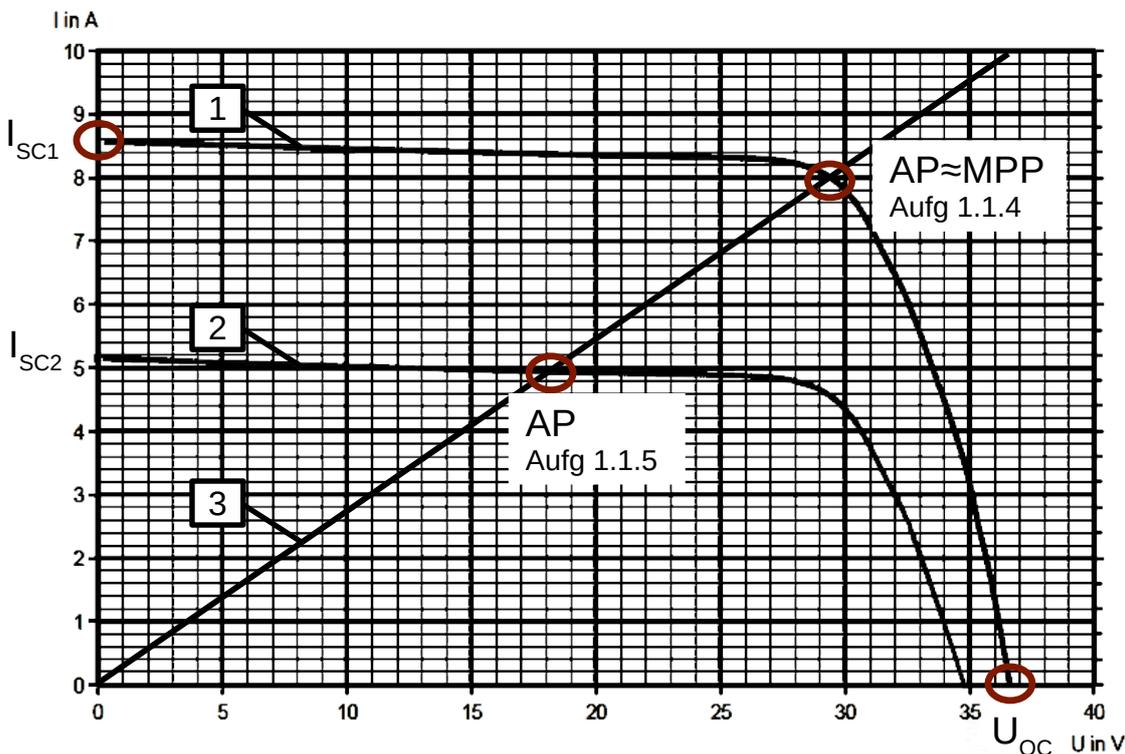
Aufgabe 3: Elektrofahrzeug (5 Seiten)
Solarthermisches Kraftwerk

Aufgabe 4: Wohnklima (3 Seiten)
Wärmepumpe als Klimaanlage
Temperaturregelung

1 1 Pflichtaufgabe zur Photovoltaik, Energieübertragung, Windkraft

Punkte

1.1 Solaranlage in Kleingartenanlage



1.1.1 $U_{OC} = 36,5 \text{ V}$ Leerlaufspannung: kein Verbraucher angeschlossen 2
 $I_{SC} = 8,6 \text{ A}$ Kurzschlussstrom: Verbraucherwiderstand ist 0

1.1.2 $\frac{36,6 \text{ V}}{0,61 \text{ V}} = 60$ in Reihe geschaltete Solarzellen. $I_{SC-1 \text{ Zelle}} = I_{SC-Modul} = 8,6 \text{ A}$ 2

1.1.3 Monokristalline Zelle, 2
 Vorteil: hoher Wirkungsgrad, Nachteil: energieaufwändige Herstellung, teuer

1.1.4 $R_{\text{Beleuchtung}} = \frac{35 \text{ V}}{9,5 \text{ A}} = 3,68 \Omega$ 2

Arbeitspunkt ist Schnittpunkt der Kennlinien 1 und 3: $29,5 \text{ V} / 8 \text{ A}$
 $P = U \cdot I = 29,5 \text{ V} \cdot 8 \text{ A} = 236 \text{ W}$

1.1.5 Kurzschlussstrom proportional zur Einstrahlung $\rightarrow \frac{E_2}{E_1} = \frac{I_{SC2}}{I_{SC1}}$ 5

$$E_2 = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \frac{5,2 \text{ A}}{8,6 \text{ A}} = 605 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

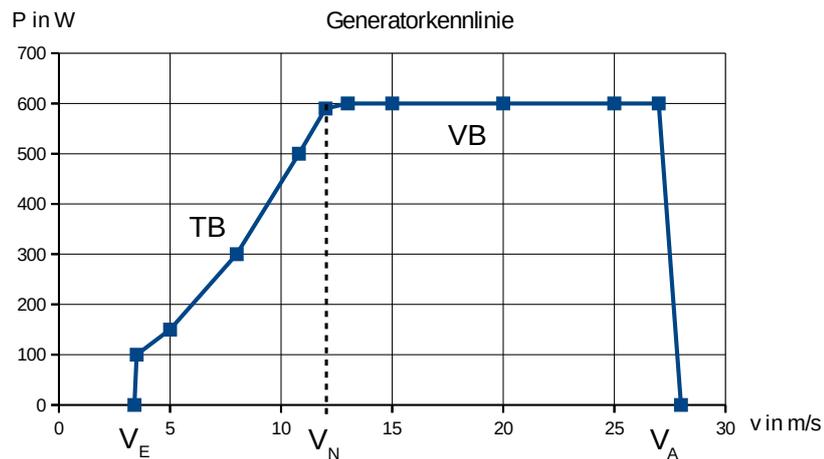
Arbeitspunkt 2 \rightarrow Schnittpunkt Kennlinien 2 und 3: $18,2 \text{ V} / 5 \text{ A}$

$$P = 18,2 \text{ A} \cdot 5 \text{ A} = 91 \text{ W}$$

$$91 \text{ W} \triangleq 100\% \cdot \frac{91 \text{ W}}{236 \text{ W}} = 38,6\%$$

<p>Im Arbeitspunkt 1 wird das Solarmodul im MPP betrieben und kann die maximale Leistung abgeben, im Arbeitspunkt 2 jedoch nicht. Daher sinkt die Leistungsabgabe stärker als die Sonneneinstrahlung.</p>	
<p>1.1.6 Funktion des Wechselrichters: MPP-Tracker</p>	2
<p>Ständig U und I messen und $P = U \cdot I$ berechnen, Belastung vergrößern → wenn P kleiner wurde → Belastung verringern, wenn P größer wurde → Belastung weiter vergrößern.</p>	
<p>1.2 Energieübertragung</p>	
<p>1.2.1 Blindleistung ist notwendig, wenn Verbraucher (z.B. Motoren) oder die Übertragungsleitung (z.B. Seekabel) magnetisch oder elektrisch „aufgeladen“ werden müssen. Liegt Wechselspannung an, so erfolgt diese Auf- und Entladung 50 mal pro Sekunde. Wenn die zur Auf- und Entladung notwendige Energie durch Spulen oder Kondensatoren direkt dort bereitgestellt wird, wo sie benötigt wird, spricht man von Blindleistungskompensation. Die Blindenergie muss dann nicht vom Energieerzeuger (Kraftwerk, Windrad) über lange Leitungen hin und her pendeln.</p>	2
<p>1.2.2 Vorteil HGÜ: es entsteht keine Blindleistung.</p>	2
<p>Seekabel wirkt wegen der Isolation und dem geringeren Abstand der Leitungen wie ein großer Energiespeicher (Kondensator), daher ist viel Blindleistung schon bei kurzen Entfernungen notwendig. Hier verwendet man besser die HGÜ.</p>	
<p>Freiluftkabel besitzen als Isolator die Luft und haben einen großen Abstand der Leitungen, daher speichern diese wenig Energie und die notwendige Blindleistung „stört“ erst bei großen Entfernungen.</p>	
<p>1.3 Windkraftanlage</p>	
<p>1.3.1 $600 \text{ W} > 200 \text{ W} + 180 \text{ W}$. Die Windkraftanlage kann bei Windgeschwindigkeiten $> 9 \text{ m/s}$ den Energiebedarf der Hütten decken. Da dieser Windgeschwindigkeitswert sicherlich häufig unterschritten wird und die Anlage keinen elektrischen Speicher besitzt, können dann die Verbraucher nicht betrieben werden.</p>	2
<p>1.3.2 $u = \pi \cdot d \cdot n = \pi \cdot 1,5 \text{ m} \cdot 300 \frac{1}{60 \text{ s}} = 23,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \left(= 86 \frac{\text{km}}{\text{h}} \right)$</p> $\lambda = \frac{23,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{12 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1,96$	2
<p>1.3.3 Die Anlage ist mit einer Schnelllaufzahl von 2 ein Langsamläufer. Die Umfangsgeschwindigkeit ist niedriger als bei üblichen 3-Blatt-Rotor-Anlagen (mit horizontaler Rotorachse). Daher erzeugt die Anlage weniger Windgeräusche und ist leiser.</p>	2

1.3.4



2,5

$$1.3.5 \quad P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,5 \text{ m} \cdot 1,42 \text{ m} \cdot 12^3 \frac{\text{m}^3}{\text{s}^3} = 2,21 \text{ kW}$$

2,5

$$P_{\text{mech}} = \frac{600 \text{ W}}{0,85} = 706 \text{ W} \quad c_P = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{Wind}}} = \frac{706 \text{ W}}{2210 \text{ W}} = 0,32$$

Die Anlage mit Darrieus-Helix-Rotor reagiert schneller auf böige Winde aus unterschiedlichen Richtungen als ein träger 3-Blatt-Rotor, der nur langsam nach dem Wind ausgerichtet werden kann. Daher ist der Ertrag dieser Windkraftanlage unter Umständen größer als bei einem 3-Blatt-Rotor.

30

2 Wärmeschutz und BHKW

Punkte

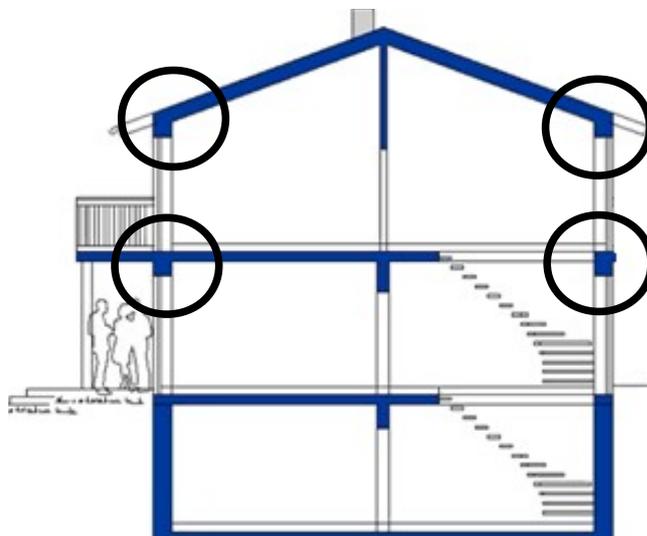
2.1 Wärmeschutz in einem Reihenhaushaus

2.1.1 Das Gebäude besitzt auf der Südseite einen auskragenden Balkon. So werden die Innenräume vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt und heizen sich weniger auf.

2

2.1.2

2



Wärmebrücke 1: Übergang Dach- Außenwand, Begr.: geometrisch bedingte Wärmebrücke

Wärmebrücke 2: Auskragende Balkonplatte, Begr.: konstruktionsbedingte Wärmebrücke

Wärmebrücke 3: Rollladenkasten oder Auflage der Bodenplatte des ersten OG, Begr.: Konstruktionsbedingte Wärmebrücke

2.1.3 Wärmestrom von innen nach außen durch die Fensterfläche:

4

$$\dot{Q} = U_{\text{Fenster}} \cdot \Delta T = 0,6 \frac{\text{W}}{(\text{m}^2 \cdot \text{K})} \cdot 30 \text{K} = 18 \frac{\text{W}}{(\text{m}^2)}$$

Wärmestrom von außen nach innen verursacht durch die solare Einstrahlung:

$$\dot{Q} = E_k \cdot g = 300 \frac{\text{W}}{(\text{m}^2)} \cdot 0,45 = 135 \frac{\text{W}}{(\text{m}^2)}$$

Bewertung: Der eingehende Wärmestrom ist deutlich größer als der abfließende Wärmestrom. Durch das Fenster wird mehr Wärme gewonnen als verloren geht.

2.1.4 Strukturelle Gemeinsamkeiten:

1

Große Porigkeit: Die Wärmedämmung eines Baustoffs wird durch viele mit Luft gefüllte Poren verbessert, da Luft eine geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt.

oder:

Geringe Rohdichte: Materialien mit geringer Rohdichte eignen sich als Wärmedämmstoffe. Bei geringer Rohdichte ist wenig wärmeleitfähiges Material vorhanden.

2.1.5 Werte für die Wärmeleitfähigkeit aus FS:

Kalksandstein (Rohdichteklasse 1000)	$\lambda_1 = 0,5 \text{ W/(mK)}$
Innenputz, Gipsputz	$\lambda_2 = 0,51 \text{ W/(mK)}$
Außendämmung (EPS) WLG 032	$\lambda_3 = 0,032 \text{ W/(mK)}$
Außenputz, Wärmedämmputz WLG 060	$\lambda_4 = 0,06 \text{ W/(mK)}$

Berechnung des Wärmedurchgangswiderstands R_T

$$R_T = \frac{1}{U_{\text{Wand}}} = \frac{1}{0,15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} = 6,67 \frac{\text{m}^2\cdot\text{K}}{\text{W}}$$

Berechnung der Schichtdicke der Außendämmung:

$$d_3 = \lambda_3 \cdot \left(R_T - R_{\text{si}} - R_{\text{se}} - \frac{d_1}{\lambda_1} - \frac{d_2}{\lambda_2} - \frac{d_4}{\lambda_4} \right) = 0,177 \text{ m}$$

2.1.6 Sicherstellung der Dämmwirkung: Wärmedämmung beruht auf dem Einschluss von ruhender Luft in Hohlräumen des Dämmmaterials. Bei Luftundichtheiten ist ein Wärmetransport mittels Konvektion möglich.

Vermeidung von Tauwasser in der Konstruktion: Wenn warme, feuchte Luft aus dem Innenraum durch Undichtheiten in den kälteren Bereich der Baukonstruktion gelangt, kann der enthaltene Wasserdampf kondensieren. Dadurch verschlechtert sich die Dämmwirkung.

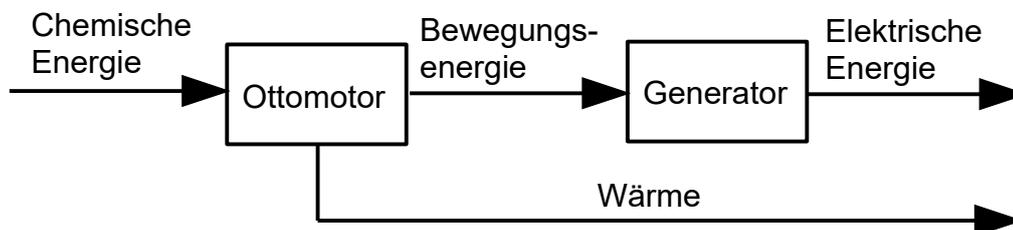
2.1.7 Reduktion von Wärmebrücken: Bei einer Außendämmung werden alle konstruktionsbedingten Wärmebrücken überdämmt.

Wahrscheinlichkeit des Tauwasseranfalls wird reduziert: Die Außendämmung, in der ein starker Temperaturabfall stattfindet, ist durch die Wandkonstruktion von der warmen, feuchten Innenluft getrennt (Dampfbremse). Ein Tauwasseranfall ist so unwahrscheinlicher als bei der Innendämmung.

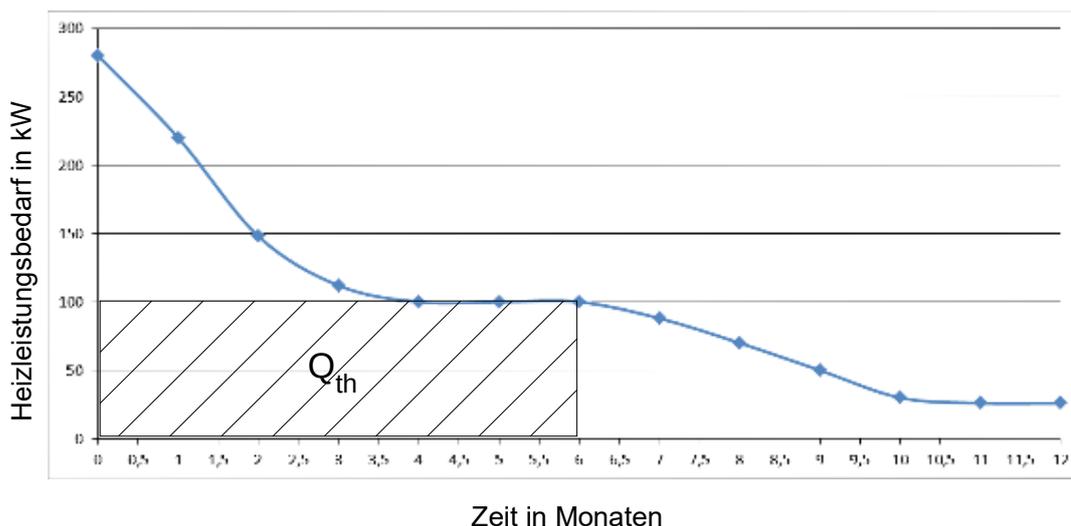
2.2 Blockheizkraftwerk (BHKW)

2.2.1 Das BHKW besteht im Wesentlichen aus einem Ottomotor (Verbrennungsmotor), einem Drehstromgenerator und mehreren Wärmetauschern. Der Verbrennungsmotor wird mit Gas betrieben und treibt den Generator an, dieser erzeugt elektrischen Strom. Bei der Energieumwandlung entsteht im Verbrennungsmotor Abwärme. Diese Wärme über ein Wärmetauschersystem an das angeschlossene Heizungssystem übertragen.

Blockschaltbild:



2.2.2



2

Wärmemenge:

$$t = 6 \text{ Monate} = 6 \text{ Mon} \cdot 30 \text{ d/Mon} \cdot 24 \text{ h/d} = 4320 \text{ h}$$

$$Q = \dot{Q} \cdot t = 100 \text{ kW} \cdot 4320 \text{ h} = 432000 \text{ kWh} = 0,432 \text{ MWh}$$

2.2.3 $\dot{Q}_{100} = 100 \text{ kW}$; $\dot{Q}_{50} = 50 \text{ kW}$; $t_1 = 4320 \text{ h}$

3

$t_2 = 9 \text{ Monate}$ im Diagramm ablesen

$$t_2 = 9 \text{ Mon} \cdot 30 \text{ d/Mon} \cdot 24 \text{ h/d} = 6480 \text{ h}$$

$$t_{\text{zu}} = \frac{\dot{Q}_{100} + \dot{Q}_{50}}{2 \cdot \dot{Q}_{100}} \cdot (t_2 - t_1) = \frac{100 \text{ kW} + 50 \text{ kW}}{2 \cdot 100 \text{ kW}} \cdot 2160 \text{ h} = 1620 \text{ h}$$

2.2.4 $\eta_{\text{ges}} = \frac{P_{\text{el}} + \dot{Q}_H}{\dot{Q}_{B,i}}$ $P_{\text{el}} = 65 \text{ kW}$; $\dot{Q}_H = 100 \text{ kW}$; $\eta_{\text{ges}} = 90 \%$

3

$$\dot{Q}_{B,i} = \frac{(P_{\text{el}} + \dot{Q}_H)}{\eta_{\text{ges}}} = \frac{(65 \text{ kW} + 100 \text{ kW})}{0,9} = 183,3 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{B,i} = \dot{V}_{B,i} \cdot H_i \quad \dot{V}_{B,i} = \frac{\dot{Q}_{B,i}}{H_i} = \frac{183,3 \text{ kW}}{10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} = 18,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

$$V_{B,i} = \dot{V}_{B,i} \cdot t = 18,33 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \cdot 5940 \frac{\text{h}}{\text{a}} = 108880,2 \frac{\text{m}^3}{\text{a}}$$

2.2.5 Durch einen zusätzlichen Wärmespeicher (Pufferspeicher) kann das BHKW mit weniger Ein- und Ausschaltvorgängen und somit mit weniger Verschleiß betrieben werden.

1

2.2.6 Das BHKW kann nur einen Teil des Jahreswärmebedarfs decken. Im Winter reicht die Heizleistung nicht aus und im Sommer schaltet das BHKW nicht ein, da der Wärmebedarf zur Trinkwassererwärmung zu gering ist.

1

30

3 Wahlaufgabe zum elektrischen Fahrzeug und zum solarthermischen Kraftwerk

Punkte

3.1 Batterieelektrisches Fahrzeug

3.1.1 Im Drehzahlbereich 0 – 4400 min⁻¹ kann die elektrische Maschine mit maximalem Drehmoment, also $M_{max} = 250 \text{ Nm}$, arbeiten. Bei Überschreiten von M_{max} würde der zulässige Strom überschritten.

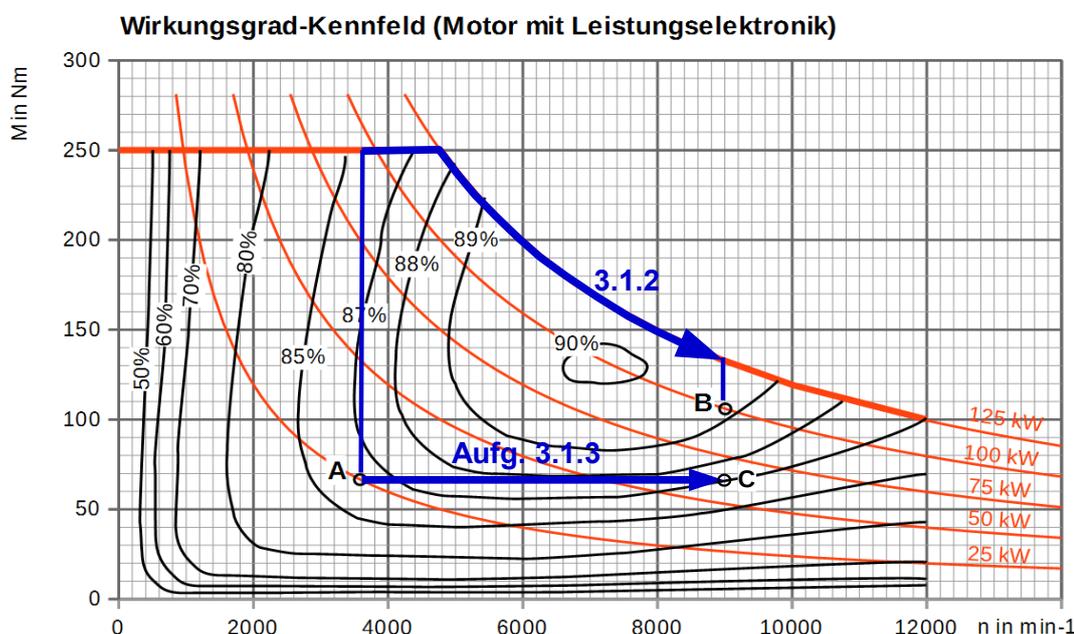
2

Im Drehzahlbereich 4400 – 12000 min⁻¹ kann nicht mehr das maximale Drehmoment genutzt werden. Hier ist die maximale Leistung von $P_{max} = 125 \text{ kW}$ begrenzend und die Volllastkennlinie folgt einer Konstantleistungshyperbel. Bei Überschreiten von P_{max} würde die maximal mögliche Verlustleistung überschritten werden.

Bei $n_{max} = 12000 \text{ min}^{-1}$ ist die maximale Drehzahl erreicht. Ein Überschreiten von n_{max} ist aufgrund der begrenzten Batteriespannung nicht möglich.

3.1.2

2



Bei der Drehzahl $n_A = 3600 \text{ min}^{-1}$ wird mit maximalem Drehmoment, also 250 Nm beschleunigt, bis die maximale Leistung der elektrischen Maschine von 125 kW bei $n = 4400 \text{ min}^{-1}$ erreicht ist. Dann wird mit dieser maximalen Leistung weiter beschleunigt, wobei das Drehmoment mit steigender Drehzahl sinkt. Dies geschieht bis zum Erreichen von $n_B = 9000 \text{ min}^{-1}$.

3.1.3 Während die Drehzahl von $n_A = 3600 \text{ min}^{-1}$ auf $n_B = 9000 \text{ min}^{-1}$ ansteigt, steigt die Geschwindigkeit und damit die Luftwiderstandskraft. Trotzdem bleibt das Antriebsmoment und damit die Antriebskraft von der elektrischen Maschine konstant. Es muss also zusätzlich eine Antriebskraft, die nicht von der elektrischen Maschine stammt, existieren: Eine Hangabtriebskraft. Die Straße muss also ein Gefälle aufweisen.

1,5

(Nicht verlangt: das Gefälle wird immer größer, da sonst die quadratisch mit der Geschwindigkeit steigende Luftwiderstandskraft nicht ausgeglichen werden kann.)

$$3.1.4 \quad v \sim n \rightarrow \frac{v}{n} = \text{konst.} \rightarrow \frac{v_{\max}}{n_{\max}} = \frac{v_B}{n_B} \rightarrow \quad 3$$

$$v_B = \frac{n_B}{n_{\max}} \cdot v_{\max} = \frac{9000 \text{ min}^{-1}}{12000 \text{ min}^{-1}} \cdot 165 \text{ km/h} = 124 \text{ km/h}$$

$$n \sim U_{Kl} \rightarrow \frac{U_{Kl}}{n} = \text{konst.} \rightarrow \frac{U_{Kl,\max}}{n_{\max}} = \frac{U_{Kl,B}}{n_B} \rightarrow$$

$$U_{Kl,B} = \frac{n_B}{n_{\max}} \cdot U_{Kl,\max} = \frac{9000 \text{ min}^{-1}}{12000 \text{ min}^{-1}} \cdot 360 \text{ V} = 270 \text{ V}$$

$$3.1.5 \quad \text{Aus Wirkungsgrad-Kennfeld: } P_{\text{mech}} = 100 \text{ kW} \quad , \quad \eta = 0,89 \quad 2,5$$

$$P_{\text{Bat}} = \frac{P_{\text{mech}}}{\eta} = \frac{100 \text{ kW}}{0,89} = 112 \text{ kW}$$

$$P_{\text{Bat}} = U_{\text{Bat}} \cdot I_{\text{Bat}} \rightarrow I_{\text{Bat}} = \frac{P_{\text{Bat}}}{U_{\text{Bat}}} = \frac{112 \text{ kW}}{270 \text{ V}} = 415 \text{ A}$$

$$3.1.6 \quad \frac{t_i}{T} = \frac{\bar{U}}{U_{\text{Bat}}} = \frac{270 \text{ V}}{360 \text{ V}} = 0,75 \quad 1$$

3.1.7 Beim PWM-Prinzip wird die Batteriespannung nahezu verlustfrei ein- und ausgeschaltet, so dass an den Klemmen der elektrischen Maschine der zeitliche Mittelwert der geschalteten Batteriespannung wirkt und in eine hierzu proportionale Drehzahl gewandelt wird. Würde hingegen ein Vorwiderstand eingesetzt, so würde der Strom durch die elektrische Maschine und die Differenz zwischen Batteriespannung und Klemmenspannung der elektrischen Maschine zur Erwärmung dieses Vorwiderstand führen. $P_{\text{Verlust}} = I \cdot (U_{\text{Bat}} - U_{\text{Kl}})$ 2

$$3.1.8 \quad \text{Vorab zur Probe: } n_{48} = \frac{48 \text{ km/h}}{165 \text{ km/h}} \cdot 12000 \text{ min}^{-1} \approx 3500 \text{ min}^{-1} \quad 4$$

→ Werte 48 km/h und 3500 min⁻¹ passen zueinander (Nachweis war nicht verlangt)

Aus Diagramm abgelesen: $\eta = 0,87$ @ $M = 100 \text{ Nm}$ und $n = 3500 \text{ min}^{-1}$

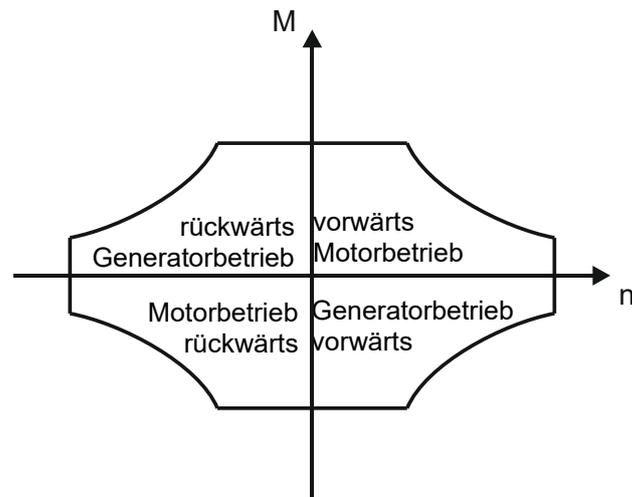
$$P_{\text{Bat}} = \frac{P_{\text{mech}}}{\eta} = \frac{36,7 \text{ kW}}{0,87} = 42,2 \text{ kW}$$

$$W_{\text{Bat}} = P_{\text{Bat}} \cdot t \rightarrow t = \frac{W_{\text{Bat}}}{P_{\text{Bat}}} = \frac{14,5 \text{ kWh}}{42,2 \text{ kW}} = 0,344 \text{ h}$$

$$s = v \cdot t = 48 \text{ km/h} \cdot 0,344 \text{ h} = 16,5 \text{ km}$$

3.1.9

2



3.2 Solarthermisches Kraftwerk

3.2.1 Gegeben:

4

$$T_A = 200 \text{ }^\circ\text{C}, T_E = 700 \text{ }^\circ\text{C}, \eta_H = 60,7 \% = 0,607, \eta_R = 73 \% = 0,73, t_d = 10 \text{ h/d},$$

$$c_P = 1,005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K} = 0,2792 \text{ Wh/kg}\cdot\text{K}, Q_S = 395,8 \text{ GWh}$$

Gesucht: $m_{\text{Luft}}=?$ Am Receiver zur Verfügung stehende jährliche Wärmeenergiemenge Q_R :

$$Q_R = Q_S \cdot \eta_H \cdot \eta_R = 395,8 \text{ GWh} \cdot 0,607 \cdot 0,73 = 175,4 \text{ GWh}$$

Pro Stunde zur Verfügung stehende Wärmeenergiemenge:

$$\dot{Q}_{Rh} = \frac{Q_R}{t_{ges}} = \frac{175,4 \frac{\text{GWh}}{\text{a}}}{365 \frac{\text{d}}{\text{a}} \cdot 10 \frac{\text{h}}{\text{d}}} = 48,06 \text{ MW}$$

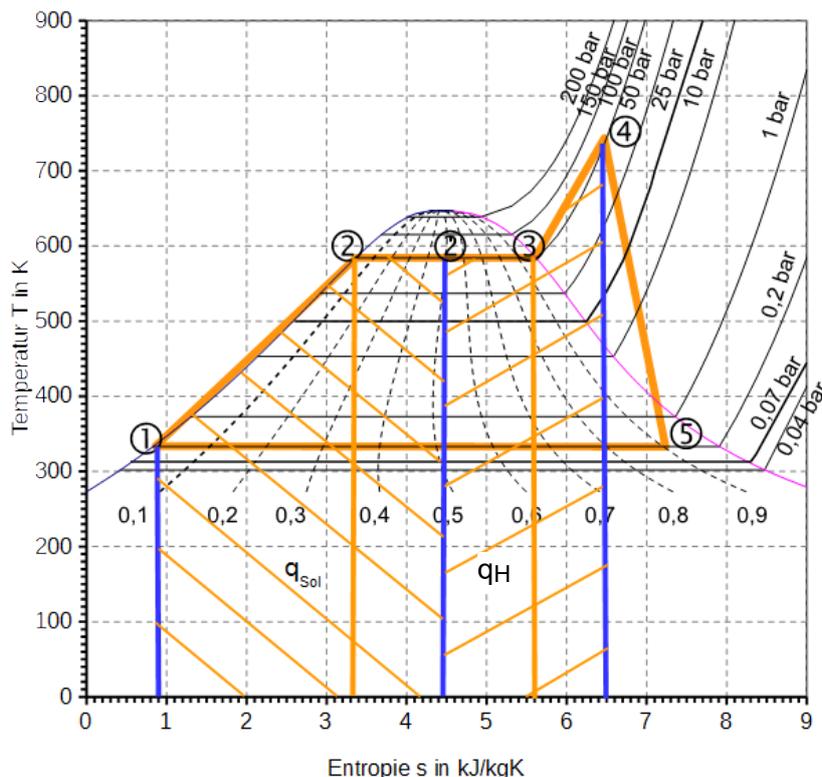
Berechnung der Masse an Luft, die erwärmt werden kann:

$$\dot{Q}_L = \dot{m}_L \cdot c_P \cdot \Delta T$$

$$\dot{m}_L = \frac{\dot{Q}_L}{c_P \cdot \Delta T} = \frac{48,06 \text{ MW}}{0,2792 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \cdot 500 \text{ K}} = 344198,6 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

3.2.2

2



3.2.3 Die zugeführte Solarenergie q_{Sol} entspricht der Fläche unter dem Linienzug $1 \rightarrow 2'$. Dies entspricht der Trapezfläche $1 \rightarrow 2$ und der Rechteckfläche $2 \rightarrow 2'$.

4

$$q_{\text{Sol}} = \frac{T_1 + T_2}{2} \cdot (s_2 - s_1) + T_2 \cdot (s_2' - s_2)$$

$$q_{\text{Sol}} = \frac{333 \text{ K} + 580 \text{ K}}{2} \cdot \left(3,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - 0,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) + 580 \text{ K} \cdot \left(4,45 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - 3,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)$$

$$q_{\text{Sol}} = 1762,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Die zugeführte Heizenergie q_{H} entspricht der Fläche unter dem Linienzug $2' \rightarrow 4$. Dies entspricht der Rechteckfläche $2' \rightarrow 3$ und der Trapezfläche $3 \rightarrow 4$.

$$q_{\text{H}} = T_2 \cdot (s_3 - s_2') + \frac{T_3 + T_4}{2} \cdot (s_4 - s_3)$$

$$q_{\text{H}} = 580 \text{ K} \cdot \left(5,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - 4,45 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) + \frac{580 \text{ K} + 760 \text{ K}}{2} \cdot \left(6,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - 5,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)$$

$$q_{\text{H}} = 1270 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

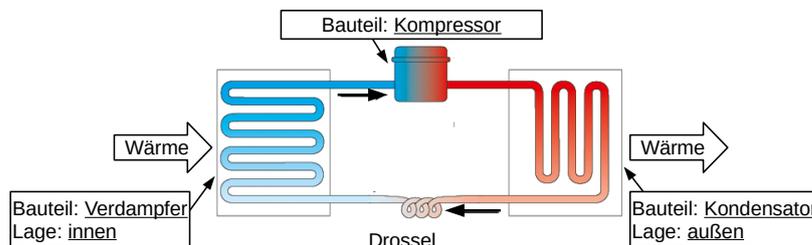
Aus dem T,s-Diagramm abgelesene Werte können abweichen.

30

4 Wahlaufgaben zu Wohnklima und Gebäudehülle, Wärmepumpe als Klimaanlage

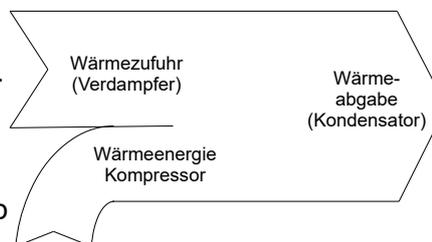
4.1 Eine Multi-Split-Klimaanlage hat das Funktionsprinzip einer Wärmepumpe

4.1.1 Im Verdampfer wird das Kältemittel durch Zufuhr der warmen Innenluft verdampft. Im Kompressor wird das verdampfte Kältemittel verdichtet und dabei erwärmt. Die Wärmeabgabe an die Umgebung erfolgt, indem im Kondensator das Kältemittel (unter hohem Druck) wieder kondensiert bevor in der Drossel Temperatur und Druck sinken. 4



4.1.2 Das Kältemittel verdampft im Bereich der „Wärmequelle“. Im Heizbetrieb ist dies außen, so dass „Verdampfer“ und „Kondensator“ getauscht werden müssen. In der Praxis wird dazu die Fließrichtung des Kältemittels geändert. 2

4.1.3 Die Wärme, die im Kompressor freigesetzt wird, dient im Winterbetrieb als zusätzliche Heizwärme. Im Sommerbetrieb bezieht sich die Leistungsangabe auf den Wärmestrom, der aus dem Raum abfließt. Das Energieflussbild sieht für beide Betriebszustände identisch aus. Entscheidend ist, ob die „Wärmezufuhr“ oder die „Wärmeabgabe“ die „erwünschte Größe“ ist.



4.1.4 COP: Momentanwert zum Vergleich der abgegebenen Wärmeleistung zur aufgenommenen elektrischen Leistung 3

JAZ: Verhältnis der abgegebenen Wärmemenge zur aufgenommenen elektrischen Energie über einen langen Zeitraum.

Beide betrachten bei der elektrischen Leistung/Energie neben dem Kompressor auch Hilfsaggregate.

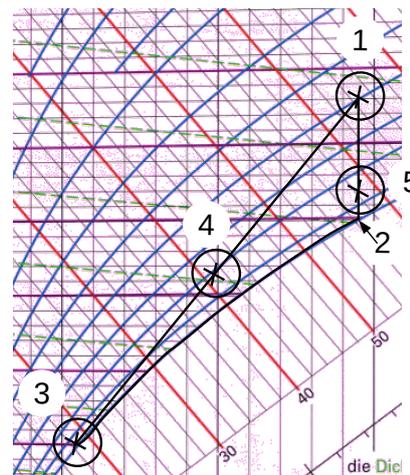
Die JAZ ist für den Vergleich besser geeignet, weil über einen langen Zeitraum verschiedenste Betriebszustände herrschen, die in der Kenngröße berücksichtigt werden können.

4.2 Gebäudeklimatisierung

- 4.2.1 Die warme Innenluft (1) wird bei konstanter absoluter Feuchte bis zum Taupunkt abgekühlt (2). Entlang der Wasserdampfsättigungslinie wird sie bis zur gewünschten Temperatur weiter abgekühlt (3).

Wasserabgabe pro kg trockene Luft:

$$\Delta x = x_1 - x_2 = 14,5 \frac{\text{g}}{\text{kg}} - 5,5 \frac{\text{g}}{\text{kg}} = 9 \frac{\text{g}}{\text{kg}}$$



- 4.2.2 Der Mischungspunkt (4) muss auf der Geraden (1) – (3) liegen. Da die Hälfte der Raumluft ausgetauscht wird, liegt der neue Luftzustand genau auf der Hälfte der Strecke (1) – (3).

Abgelesen bei (4): $\vartheta = 16,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi \approx 81 \text{ } \%$

- 4.2.3 Beim Abkühlen auf $5 \text{ }^\circ\text{C}$ wird ein großer Teil der absoluten Feuchte der Luft entnommen. Die durch Mischung entstandene abgekühlte Luft liegt gerade noch im behaglichen Bereich ($\varphi = 81 \text{ } \%$ bei $\vartheta = 16,5 \text{ }^\circ\text{C}$). Wenn die warme Luft (1) bei gleichbleibender absoluter Feuchte auf $22 \text{ }^\circ\text{C}$ abgekühlt wird (5), erhöht sich die relative Feuchte auf $\varphi = 85 \text{ } \%$. Die Luft wird als schwül / unbehaglich feucht empfunden.

4.3 Temperaturregelung

- 4.3.1 PT2-Strecke da Verzugszeit sichtbar
Zweipunktregler, schaltet nur ein und aus.

- 4.3.2 Siehe Diagramm: y

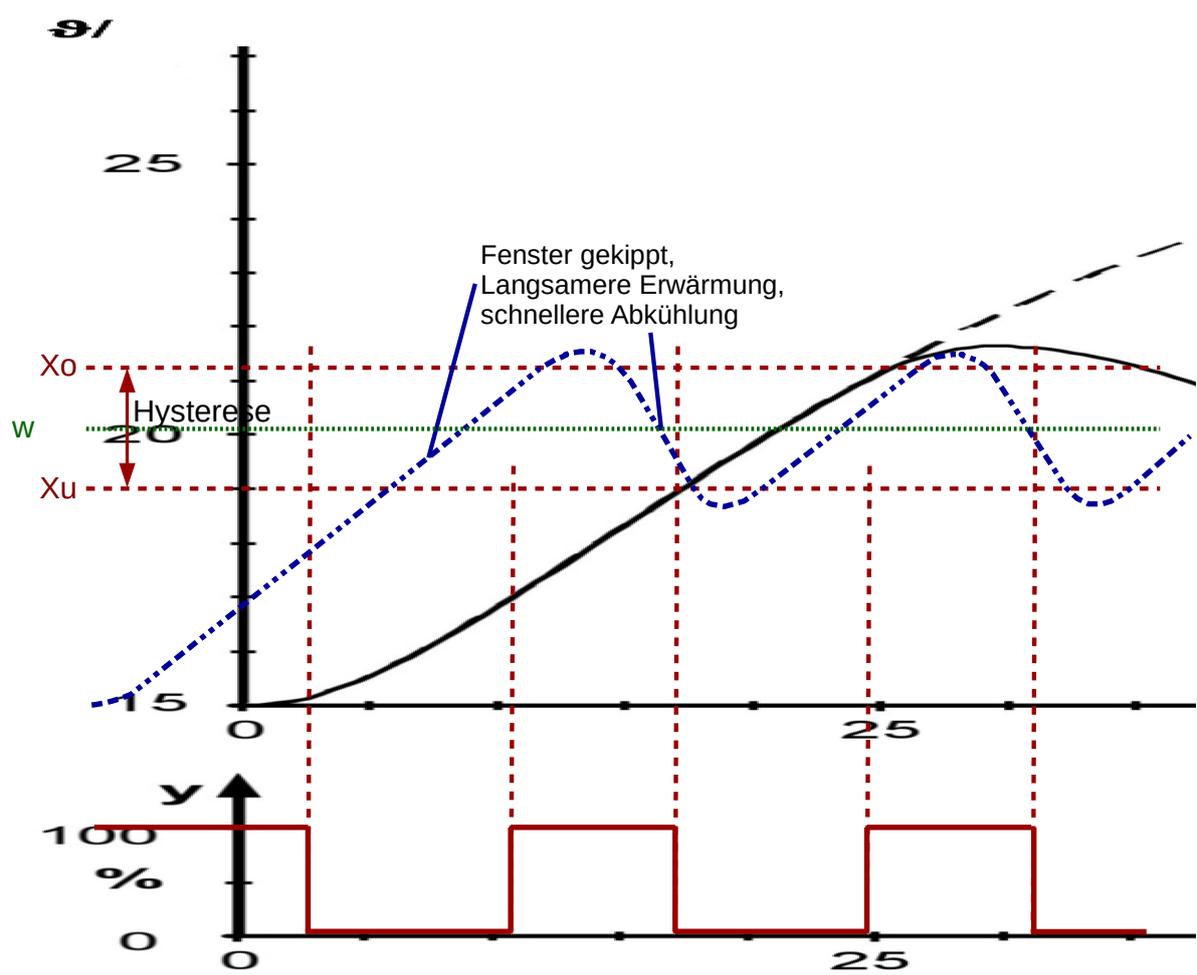
- 4.3.3 Obere Schaltschwelle $21,3 \text{ }^\circ\text{C}$, untere Schaltschwelle: $19 \text{ }^\circ\text{C}$
→ Hysterese $x_D = 2,3 \text{ K}$ → Sollwert $w = 20,15 \text{ }^\circ\text{C}$

- 4.3.4 Durch die kleinere Hysterese erhöht sich die Schaltfrequenz und die Regelabweichung verringert sich.

Wenn die obere gleich der unteren Schaltschwelle ist, schaltet der Regler ständig und die Anlage kann zerstört werden.

- 4.3.5 Temperaturverlauf siehe Diagramm.

Anstiegszeit vergrößert sich, da Wärme verloren geht und die Erwärmung länger dauert. Die Abfallzeit verringert sich, da der Raum schneller abkühlt.
Sollwert und Hysterese bleiben gleich.



TG Umwelttechnik**2017/2018****Übungsaufgabe****Lösungsvorschlag**

Arbeitszeit: 270 Minuten
Hilfsmittel: Formelsammlung Umwelttechnik
Zugelassener Taschenrechner

Stoffgebiet **Teil 1: Pflichtbereich**

Aufgabe 1: Windkraft (2 Seiten)
Energieübertragung

Aufgabe 2: Wohnklima und Gebäudehülle (2 Seiten)
Brennwerttechnik

Teil 2: Wahlbereich

Aufgabe 3: Elektromobilität (4 Seiten)
Brennstoffzelle

Aufgabe 4: Wärmekraftwerk (3 Seiten)
Rauchgasreinigung
Photovoltaik

1 Pflichtaufgaben zur Windkraft, Energieübertragung

Punkte

1.1 Windkraft

$$1.1.1 \quad W_{\text{Jahr}} = P_{\text{NKK}} \cdot 300 \text{ d} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} = 1410 \text{ MW} \cdot 300 \text{ d} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} = 10152 \text{ GWh}$$

1

$$1.1.2 \quad W_{\text{WKA}} = 8760 \text{ h} \cdot (0,5 \text{ MW} \cdot 0,2 + 2 \text{ MW} \cdot 0,25 + 3,5 \text{ MW} \cdot 0,2 + 3,5 \text{ MW} \cdot 0,125 + 3,5 \text{ MW} \cdot 0,1)$$

3

$$W_{\text{WKA}} = 18,29 \text{ GWh}$$

$$1.1.3 \quad 10152 \text{ GWh} / 18,29 \text{ GWh} = 555 \text{ Anlagen}$$

1

$$1.1.4 \quad \text{Durchschnittliche elektrische Leistung } P_{\text{el-d}} = \frac{W_{\text{WKA}}}{8760 \text{ h}} = \frac{18,29 \text{ GWh}}{8760 \text{ h}} = 2,09 \text{ MW}$$

4

$$P_{\text{mech}} = \frac{P_{\text{el-d}}}{\eta} = \frac{2,09 \text{ MW}}{0,928} = 2,252 \text{ MW} \quad c_p = 0,49 \quad (\text{aus FOSA S. 18})$$

$$P_{\text{Wind}} = \frac{P_{\text{mech}}}{c_p} = \frac{2,252 \text{ MW}}{0,49} = 4,596 \text{ MW}$$

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (50,5 \text{ m})^2 = 8012 \text{ m}^2$$

$$v = \sqrt[3]{\frac{P_{\text{Wind}} \cdot 2}{\rho \cdot A}} = \sqrt[3]{\frac{4,596 \text{ MW} \cdot 2}{1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 8012 \text{ m}^2}} = 9,85 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$1.1.5 \quad u = v \cdot \lambda = 9,85 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 6 = 59,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 212,8 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

2

$$n = \frac{u}{\pi \cdot d} = \frac{59,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\pi \cdot 101 \text{ m}} = 0,186 \frac{1}{\text{s}} = 11,2 \frac{1}{\text{min}}$$

$$1.1.6 \quad \text{Volllaststunden: } \frac{18,29 \text{ GWh}}{3,5 \text{ MW}} = 5226 \text{ h}$$

2

1.1.7 Der Generator ist für Nennleistung ausgelegt, größere Leistungen zerstören den Generator auf Dauer thermisch. Um dies zu verhindern, werden die Rotorblätter „etwas aus dem Wind genommen“. Die Widerstandskraft der Rotoren steigt, dadurch sinkt die Auftriebskraft der Anlage und die Drehzahl steigt nicht weiter an. Man spricht von einer Pitch-Regelung.

3

$$1.1.8 \quad \frac{W_{\text{Tag}} \cdot 80}{W_{\text{Haushalt}} \cdot 1,05} = \frac{18,29 \text{ GWh} \cdot 80}{4400 \text{ kWh} \cdot 1,05} = 316710 \text{ Haushalte}$$

3

- 1.1.9 Halbierung der Anzahl der Windräder bei gleichbleibender Gesamtleistung des Windparks bedeutet, dass jede WKA die doppelte Leistung erzeugen muss. Da außer der umströmten Fläche alle weiteren Einflussgrößen (v , ρ) unverändert bleiben, wird die Verdopplung der Leistung durch die Verdopplung der durchströmten Fläche hervorgerufen:

$$\frac{A_{\text{neu}}}{A_{\text{alt}}} = \frac{\pi \cdot r_{\text{neu}}^2}{\pi \cdot r_{\text{alt}}^2} = \frac{r_{\text{neu}}^2}{r_{\text{alt}}^2} = 2 \rightarrow r_{\text{neu}}^2 = 2 \cdot r_{\text{alt}}^2 \rightarrow r_{\text{neu}} = \sqrt{2} \cdot r_{\text{alt}} = 71,42 \text{ m}$$

$$d_{\text{neu}} = 2 \cdot r_{\text{neu}} = 2 \cdot 71,42 \text{ m} \cdot 2 = 142,84 \text{ m}$$

1.2 Energieübertragung

- 1.2.1 Wenn die gleiche Leistung übertragen wird, verringert sich durch das Hochtransformieren der Spannung der Strom, der durch die Leitung fließt. Dadurch verringern sich die Verluste auf der Leitung. Außerdem werden Kosten gespart, da durch die geringeren Ströme die Leitungsquerschnitte geringer gewählt werden können.
- 1.2.2 Viele Verbraucher wie Motoren sind ohmsch-induktive Verbraucher und erzeugen Blindleistung durch den Auf- und Abbau der magnetischen Felder. Ebenso erzeugen Kabel kapazitive Blindleistung, durch den Auf- und Abbau der elektrischen Felder. Die Blindleistung ist ein nicht nutzbarer Anteil der Gesamtleistung, der auf der Übertragungsleitung zwischen Quelle und Verbraucher hin- und herpendelt. Dadurch vergrößert sich der Gesamtstrom, wodurch die Verluste auf der Leitung ansteigen. Durch die Blindleistungskompensation werden die Leitungen weitgehend von Blindleistung freigehalten und die Verluste minimiert.
- 1.2.3 Die Drehstrom-Übertragung über Seekabel ist auf Strecken unter 100 km begrenzt, da die Leitungen eine sehr hohe Kapazität besitzen (geringer Abstand der Leiter, große Dielektrizitätszahl). Je länger die Übertragungsstrecken sind, desto größer das kapazitive Verhalten der Leitung, desto größer die Blindleistung und die Verluste. Der Einsatz der Drehstrom-Übertragung ist jedoch günstiger als die HGÜ-Übertragung, da der Einsatz der Umrichter wegfällt. Bei langen Strecken ist die HGÜ-Übertragung sinnvoll, da keine Blindleistung entsteht, wodurch die Verluste verringert werden. Nachteilig wirkt sich aus, dass Gleichspannung nicht auf eine andere Spannungsebene transformiert werden kann.

3

2

3

3

30

2 Pflichtaufgaben zu Wohnklima und Gebäudehülle, Brennwerttechnik

Punkte

2.1 Wärmeschutz in einem Niedrigenergiehaus

2.1.1 Große Fenster Richtung Süden ==> hoher Wärmeertrag
 kleine Fenster Richtung Norden ==> verringerte Wärmeverluste 2

2.1.2 Je kleiner die Oberfläche im Verhältnis zum Volumen ist, desto geringer sind die Transmissionswärmeverluste ==> möglichst kompakte Bauweise 2

2.1.3 Blower-Door-Test: Verschließen aller Türen und Fenster. Ventilator in der Eingangstür ==> Es dürfen keine Luftströmungen nachweisbar sein. 2

2.1.4 $U = \frac{1}{R_T}$, 2

$$R_T = \frac{0,02\text{m}}{0,51 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,3\text{m}}{0,13 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,12\text{m}}{0,03 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,02\text{m}}{0,06 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + 0,13 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} + 0,043 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} = 6,85 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}$$

$$U = 0,146 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Die Aussage aus dem Prospekt ist korrekt.

2.1.5 $s_D = \sum \mu \cdot d = 10 \cdot 0,02 \text{ m} + 5 \cdot 0,3 \text{ m} + 80 \cdot 0,12 \text{ m} + 20 \cdot 0,02 \text{ m} = 11,7 \text{ m}$ Der s_D -Wert entspricht einer Luftschichtdicke, die die gleiche Dampfdiffusionseigenschaft wie das Bauteil hat. 3

2.2 Kontrollierte Wohnraumlüftung

2.2.1  2

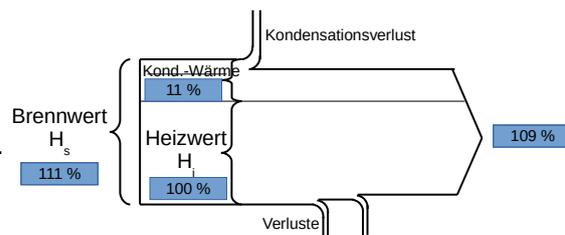
2.2.2 $\Phi_2 = \frac{\vartheta_{zu} - \vartheta_{Au}}{\vartheta_{ab} - \vartheta_{Au}}$, $\vartheta_{zu} = 0,75 \cdot (20 \text{ °C} - (-10 \text{ °C})) - 10 \text{ °C} = 12,5 \text{ °C}$ 2

2.2.3 $Q_{zu} = m \cdot c_p \cdot \Delta T$, $m = 0,3 \frac{1}{\text{h}} \cdot 24 \text{ h} \cdot 420 \text{ m}^3 \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 3628,8 \text{ kg}$ 3

$$Q_{zu} = 3628,8 \text{ kg} \cdot 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 10 \text{ K} = 36469 \text{ kJ}$$

2.3 Voll-Brennwertkessel

2.3.1 Als Bezugsgröße für die Wirkungsgradermittlung wird der Heizwert betrachtet. Dieser entspricht nur der fühlbaren Wärme, die bei der Verbrennung freigesetzt wird. Die zusätzlich gebildete Kondensationswärme wird nicht berücksichtigt. 2



- 2.3.2 Der Wirkungsgrad (bezogen auf den Heizwert) kann maximal den Wert H_s/H_i erreichen (s. Formelsammlung). Das Verhältnis ist bei Erdgas 1,11, bei Heizöl EL 1,07.
Ebenfalls korrekte Begründung: Das Verhältnis H/C ist bei Methan (Hauptbestandteil von Erdgas) höher als bei Heizöl. Daher wird bei der Verbrennung mehr Wasserdampf gebildet, der kondensieren kann. 2
- 2.3.3 Bei kleinen Heizflächen ist die Rücklauftemperatur oft so hoch, dass in den ersten Wärmetauschern der Abgastaupunkt nicht oder nur sehr wenig unterschritten wird. Daher kann die Kondensationswärme nicht (oder nur zu einem sehr geringen Anteil) genutzt werden. Beim Voll-Brennwertkessel wird die nicht genutzte Kondensationswärme von der Verbrennungsluft aufgenommen und damit genutzt. 2
Bei großen Heizflächen (Fußbodenheizung) ist in der Regel die Vorlauf- und Rücklauftemperatur so niedrig, dass die Kondensationswärme weitestgehend genutzt werden kann.
- 2.3.4 a. Stimmt nicht, da die zur Verbrennung angesaugte sehr kalte Außenluft dazu führt, dass mehr Kondensationswärme zurückgewonnen werden kann. 6
b. Stimmt nicht, da ein großer Teil der Kondensationswärme vom Heizungswasser aufgenommen wird.
c. Stimmt nicht. Durch die wärmere Zuluft wird dem Heizgerät fast die gesamte Kondensationswärme zugeführt. Die Flamme wird heißer.

30

3 Wahlaufgaben zu Elektromobilität und Brennstoffzelle

Punkte

3.1 Elektromobilität

3.1.1 Ohne Kommutierung würde der Rotor spätestens dann zum Stillstand kommen, wenn die Kraft auf den stromdurchflossenen Leiter des Rotors nicht mehr tangential sondern radial wirkt und somit nicht mehr zu einem Drehmoment führt. 1

3.1.2 Der Widerstand R_{Verlust} steht für den ohmschen Kupferwiderstand der Ankerwicklung im Ersatzschaltbild. Die induzierte Spannung und die Klemmenspannung unterscheiden sich um den Spannungsabfall an diesem Ankerwiderstand. 2

Die Spannung $U_{\text{induziert}}$ steht für die durch die Rotation des Ankers im Magnetfeld induzierte Spannung. Sie ist proportional zur Drehzahl.

$$3.1.3 \quad n_{\text{Nenn}} = \frac{P_{\text{mech, Nenn}}}{2 \cdot \pi \cdot M_{\text{Nenn}}} = \frac{P_{\text{elektr, Nenn}} \cdot \eta}{2 \cdot \pi \cdot M_{\text{Nenn}}} = \frac{500 \text{ W} \cdot 0,87}{2 \pi \cdot 12,15 \text{ Nm}} = 5,7 \frac{1}{\text{s}} \quad 4$$

mit $U_{\text{Verlust}} = U_{\text{Klemme, Nenn}} - U_{\text{ind, Nenn}}$ und $I_{\text{Klemme}} = \frac{P_{\text{elektr, Nenn}}}{U_{\text{Klemme, Nenn}}}$ folgt:

$$R_{\text{Verlust}} = \frac{U_{\text{Verlust}}}{I_{\text{Klemme}}} = \frac{(U_{\text{Klemme, Nenn}} - U_{\text{ind, Nenn}}) \cdot U_{\text{Klemme, Nenn}}}{P_{\text{el, Nenn}}} = 0,756 \Omega$$

3.1.4 Aus $M(v)$ -Diagramm abgelesen: $M_{18} = 4 \text{ Nm}$ 2

$$I_{\text{Klemme, Nenn}} = \frac{P_{\text{elektr, Nenn}}}{U_{\text{Klemme, Nenn}}} = \frac{500 \text{ W}}{54 \text{ V}} = 9,26 \text{ A}$$

$$I \sim M \rightarrow \frac{I}{M} = \text{konst.} \rightarrow \frac{I_{18}}{M_{18}} = \frac{I_{\text{Nenn}}}{M_{\text{Nenn}}}$$

$$\rightarrow I_{18} = M_{18} \cdot \frac{I_{\text{Nenn}}}{M_{\text{Nenn}}} = 4 \text{ Nm} \cdot \frac{9,26 \text{ A}}{12,15 \text{ Nm}} = 3,05 \text{ A}$$

$$3.1.5 \quad n \sim U_{\text{ind}} \rightarrow \frac{U_{\text{ind}}}{n} = \text{konst.} \rightarrow \frac{U_{\text{ind, 18}}}{n_{18}} = \frac{U_{\text{ind, Nenn}}}{n_{\text{Nenn}}} \quad 3$$

$$\rightarrow U_{\text{ind, 18}} = U_{\text{ind, Nenn}} \cdot \frac{n_{18}}{n_{\text{Nenn}}} = U_{\text{ind, Nenn}} \cdot \frac{v_{18}}{\pi \cdot d \cdot n_{\text{Nenn}}} = 47 \text{ V} \cdot \frac{18/3,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{\pi \cdot 0,36 \text{ m} \cdot 5,7 \frac{1}{\text{s}}} = 36,5 \text{ V}$$

$$\text{Alternative 1: } U_{\text{Klemme, 18}} = \frac{U_{\text{ind, 18}}}{\eta} = \frac{36,5 \text{ V}}{0,87} = 41,9 \text{ V}$$

$$\text{Alternative 2: } U_{\text{Klemme, 18}} = U_{\text{ind, 18}} + R_A \cdot I_{18} = 36,5 \text{ V} + 0,756 \Omega \cdot 3,05 \text{ A} = 38,8 \text{ V}$$

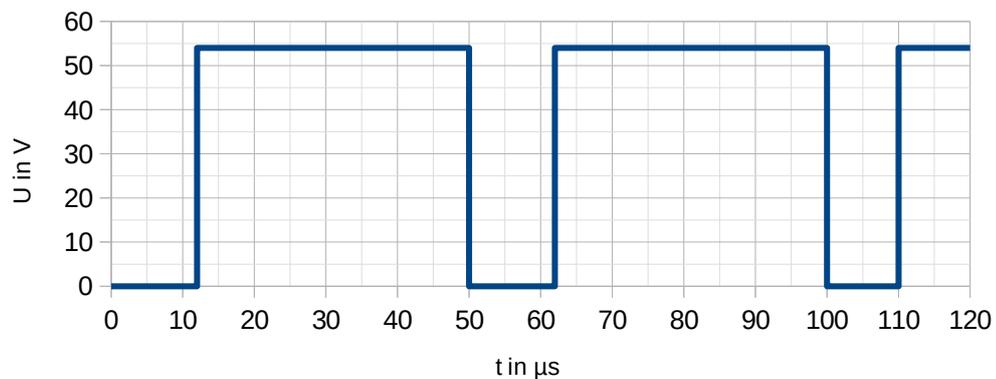
Die Berechnungsalternativen liefern unterschiedliche Ergebnisse wegen der vereinfachten Annahme eines konstanten Wirkungsgrades.

$$3.1.6 \quad \text{Tastgrad} = \frac{U_{\text{Klemme},18}}{U_{\text{Bat}}} = \frac{40,9 \text{ V}}{54 \text{ V}} = 0,76$$

$$3.1.7 \quad T = \frac{1}{f} = \frac{1}{20 \text{ kHz}} = 50 \mu\text{s}$$

$$t_i = \text{Tastgrad} \cdot T = 0,76 \cdot 50 \mu\text{s} = 38 \mu\text{s} \quad t_p = T - t_i = 50 \mu\text{s} - 38 \mu\text{s} = 12 \mu\text{s}$$

PWM-Signal mit einem Tastgrad von 76%



- 3.1.8 (a) falsch,
(b) falsch,
(c) richtig,
(d) richtig

$$3.1.9 \quad W_{\text{Rest}} = W_{\text{Akku}} \cdot 0,35 = 108,5 \text{ Wh}$$

Aus Diagramm abgelesen $M = 14,2 \text{ Nm}$

$$P_{el} = \frac{P_{mech}}{\eta} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n \cdot M}{\eta} = \frac{2 \cdot \pi \cdot v / (\pi d) \cdot M}{\eta} = \frac{2 \cdot v \cdot M}{\eta \cdot d} = \frac{2 \cdot 15 / 3,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 14,2 \text{ Nm}}{0,87 \cdot 0,36 \text{ m}} = 378 \text{ W}$$

$$t = \frac{W_{\text{Rest}}}{P_{el}} = \frac{108,5 \text{ Wh}}{378 \text{ W}} = 0,287 \text{ h} \quad s_{\text{max}} = v \cdot t = 15 \text{ km/h} \cdot 0,287 \text{ h} = 4,31 \text{ km}$$

$$s = \sqrt{h^2 + (h / \text{Steigung})^2} = \sqrt{(180 \text{ m})^2 + (180 \text{ m} / 0,06)^2} = 3 \text{ km}$$

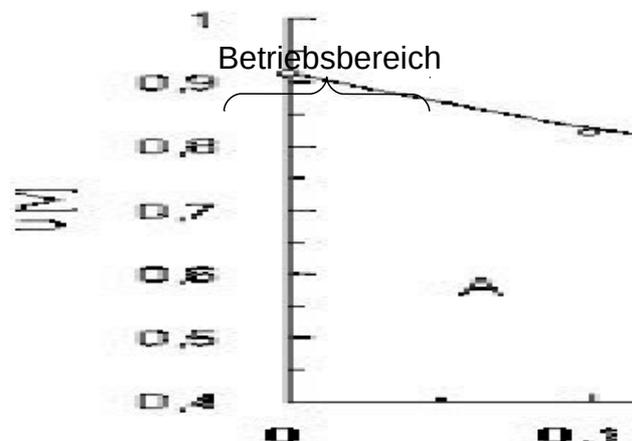
$s < s_{\text{max}} \rightarrow$ er schafft es den Berg hoch!

3.2 Brennstoffzelle

3.2.1 Bei der PEM-Brennstoffzelle wird mithilfe von Wasserstoff H_2 und Sauerstoff O_2 chemische Energie direkt in elektrische Energie umgewandelt. Das Kernstück der PEMFC ist eine Polymerelektrolytmembran, die ausschließlich für Protonen durchlässig ist (also nur für H^+ -Ionen), die sogenannte proton exchange membrane (PEM). Die Membran ist beidseitig mit einer katalytisch aktiven Elektrode beschichtet. Wasserstoffgas wird an die Anode geführt, dort dissoziieren die H_2 -Moleküle und werden unter Abgabe von zwei Elektronen zu je zwei Protonen oxidiert. Diese Protonen diffundieren durch die Membran. Die Elektronen können über einen äußeren Stromkreis auf die Kathodenseite gelangen und verrichten auf diesem Weg elektrische Arbeit. Auf der Kathodenseite wird Sauerstoff durch diese Elektronen reduziert; zusammen mit den durch den Elektrolyt transportierten Protonen entsteht Wasser. Anode und Kathode werden an einen elektrischen Verbraucher angeschlossen.

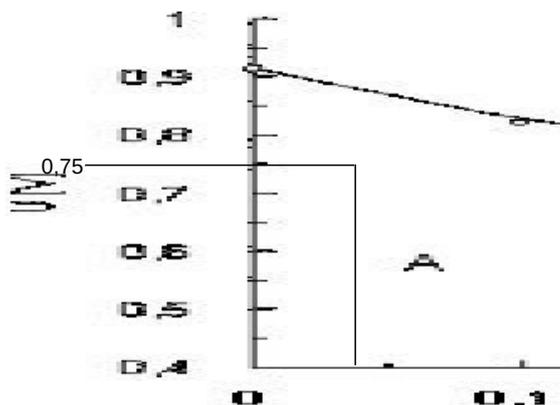


3.2.2 Der Ausgangspunkt der Kurve gibt die Klemmenspannung der Zelle im Ruhezustand wieder (Ruhespannung). Im Bereich niedriger Stromstärken (Bereich A) nimmt die Klemmenspannung zunächst mit steigender Stromstärke stark ab. Bei weiterer Belastung nimmt die Kurve nun einen flacheren Verlauf (Bereich B). In diesem Bereich nimmt die Zellspannung bei weiterer Belastung nur wenig ab. Dieser Bereich kann für den Betrieb der Zelle genutzt werden (Betriebsspannung). Die Zelle sollte bei unterschiedlicher Belastung eine möglichst konstante Spannung liefern, um eventuelle Verbraucher zu versorgen. Wird die Brennstoffzelle über den Betriebsbereich hinaus belastet (Bereich C), erfolgt ein deutlicher Abfall der Spannung. Irgendwann wird das System überlastet; die Zellspannung bricht zusammen, da der Brennstoff nicht mehr schnell genug nachgeliefert werden kann.



- 3.2.3 Um eine höhere Spannung zu erreichen, müssen mehrere Brennstoffzellen in Reihe (Serie) verschaltet werden (Brennstoffzellenstapel oder „Stack“). Die einzelnen Brennstoffzellenspannungen addieren sich dadurch.
Aus Diagramm bei $I = 0,3 \text{ mA}$ abgelesen: $U = 0,75 \text{ V}$.
Anzahl $n = 30 \text{ V} / 0,75 \text{ V} = 40$

2



- 3.2.4 $\eta = U_{\text{Betrieb}} / U_{\text{th}}$
Aus Diagramm als Betriebsspannung bei $I = 0,3 \text{ mA}$ abgelesen: $U = 0,75 \text{ V}$
 $\eta = 0,75 \text{ V} / 1,25 \text{ V} = 0,6$

2

30

4 Wahlaufgabe zu Wärmekraftwerken, Rauchgasreinigung und Photovoltaik

Punkte

4.1 Wärmekraftwerke

4.1.1 Die Speisepumpe verdichtet das Kesselspeisewasser auf den Betriebsdruck und führt es dem Dampferzeuger zu. Dort wird es erwärmt, verdampft und überhitzt. Der Wasserdampf treibt anschließend eine Turbine mit Generator an. Nach der Turbine wird der Wasserdampf im Kondensator verflüssigt, damit er als Wasser wieder in den Dampferzeuger gepumpt werden kann.

2

4.1.2 - Kohlekraftwerk
- Parabolrinnenkraftwerk

3

Der wesentliche Unterschied ist, wie die Prozesswärme dem Dampfkreislauf zugeführt wird. Im Kohlekraftwerk wird dazu Kohle verbrannt. Im Parabolrinnenkraftwerk wird Solarenergie gebündelt und mithilfe von Thermoöl über einen Wärmetauscher auf das Prozessmedium Wasser übertragen.

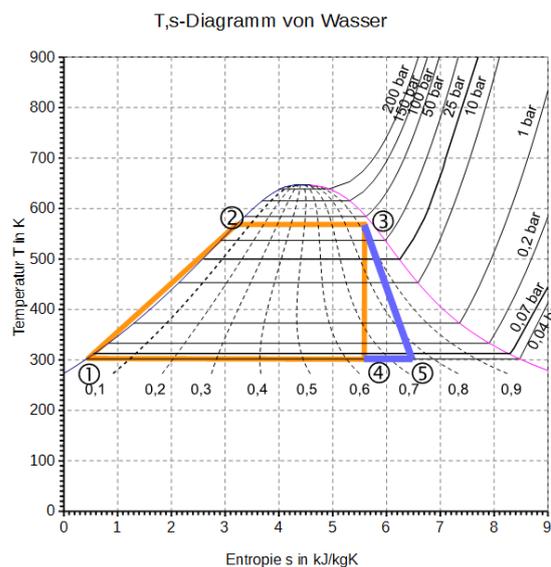
Im Kernkraftwerk hingegen wird durch Kernspaltungsprozesse Wärme frei, welche über einen Wärmetauscher in den Dampfkreisprozess eingebracht wird.

4.1.3 Der Prozess kann trotz der Phasenübergänge flüssig – gasförmig – flüssig dargestellt werden. Im p,V-Diagramm sind Phasenübergänge nicht darstellbar.

1

4.1.4 Kreisprozess 1-2-3-4

2



Hinweis: Punkt 5 von Aufgabe 4.1.6

4.1.5

2

$$q_{ab} = T_1 \cdot (s_5 - s_1) = 298 \text{ K} \cdot \left(5,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - 0,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) = 1579,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_{th} = \frac{2610 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 1579,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{2610 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,39 = 39 \%$$

4.1.6 Im T,S-Diagramm (4.1.4) veränderter Kreisprozess: 1-2-3-5

3

Vorteil: Der Flüssigwasseranteil im Dampf am Turbinenausgang sinkt, dadurch verringert sich der Verschleiß in der Turbine.

Nachteil: Der thermische Wirkungsgrad sinkt, da mehr Wärme im Kondensator abgeführt werden muss.

4.2 Rauchgasreinigung im Kohlekraftwerk

4.2.1 Im Abgas verbleibender Schwefelgehalt:

3

$$\dot{m}_S = \dot{m}_K \cdot \varphi_{SK} \cdot \varphi_{SR} = 350 \frac{t}{h} \cdot 0,01 \cdot 0,05 = 175 \frac{kg}{h}$$

$$\dot{n}_S = \frac{\dot{m}_S}{M_S} = \frac{175 \frac{kg}{h}}{0,032 \frac{kg}{mol}} = 5468,75 \frac{mol}{h}$$

$$\dot{m}_{SO_2} = \dot{n}_S \cdot M_{SO_2} = 5468,75 \frac{mol}{h} \cdot 64 \frac{g}{mol} = 350 \frac{kg}{h}$$

Schwefeldioxydausstoß: 350 kg/h

Schwefeldioxid ist maßgeblich an der Entstehung sauren Regens beteiligt. Die Folgen sind Waldsterben und Schäden an Gebäuden.

4.2.2 Durch Einsprühen von Kalkmilch (Calciumhydroxid) in das Rauchgas kann das Schwefeldioxid in Calciumsulfit gebunden und zu Calciumsulfat (Gips) aufoxidiert werden.

4

Im Rauchgaswäscher kühlt das Rauchgas stark ab, es müsste für eine anschließende Entstickung unter Energieeinsatz wieder erwärmt werden.

4.3 Photovoltaik

4.3.1 Solarmodule: Umwandlung von Lichtenergie in elektrische Energie

2,5

Laderegler: Überladeschutz, Tiefentladeschutz, Lademanagement

Akku: Speichern der elektrischen Energie und Energieabgabe bei Bedarf

Wechselrichter: Umwandlung von Gleichspannung in Wechselspannungen

Ladegerät des Elektroinrads: lädt den Akku des Elektroinrads

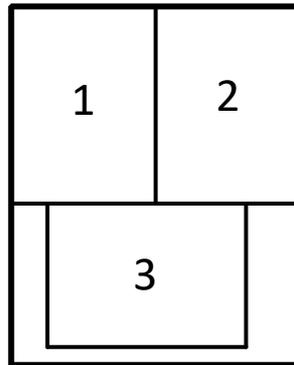
4.3.2 Globale Einstrahlungssumme im Dezember: $H_h = 0,68 \text{ kWh/m}^2\text{d}$

2,5

Korrekturfaktor für 20° Neigung und Südausrichtung: $K_{\alpha,\beta} = 1,4$

$$P_{\text{Nenn}} = \frac{W_{\text{Tag}} \cdot 1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}}{H_h \cdot K_{\alpha,\beta}} = \frac{0,4 \text{ kWh} \cdot 1 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}}{0,68 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 1,4} = 0,42 \text{ kW} = 420 \text{ W}$$

- 4.3.3 Angebot 1: 4 Module zu je 110 W für einen Gesamtpreis von 280 €
Angebot 2: 3 Module zu je 150 W für einen Gesamtpreis von 270 €
Es werden 3 Module aus Angebot 2 installiert.



- 4.3.4 Funktion des Wechselrichters: MPP-Tracker:

Ständig U und I messen und $P = U \cdot I$ berechnen,
Belastung vergrößern → wenn P kleiner wurde → Belastung verringern,
wenn P größer wurde → Belastung weiter vergrößern.

3

2

30

TG Umwelttechnik**Abitur 2018/2019****Hauptprüfung****Lösungsvorschlag**

Arbeitszeit: 270 Minuten
Hilfsmittel: Formelsammlung Umwelttechnik
Zugelassener Taschenrechner

Stoffgebiet	Teil 1: Pflichtbereich	
Aufgabe 1:	Elektromobilität Hybridantrieb Photovoltaik	(3 Seiten)
Aufgabe 2:	Wohnklima und Gebäudehülle Wärme­kraftwerke	(3 Seiten)
	Teil 2: Wahlbereich	
Aufgabe 3:	Bewertung von umwelttechnischen Systemen Abgasreinigung	(3 Seiten)
Aufgabe 4:	Windkraft, Wasserstoffwirtschaft Bewertung von umwelttechnischen Systemen	(3 Seiten)

1 Pflichtaufgabe zu Hybridfahrzeug und Photovoltaik

Punkte

1.1 Energiebedarf des Elektroantriebs1.1.1 Abschnitt 1: abgelesen bei $v = 100 \text{ km/h}$ und 0% Steigung: $P_{\text{mech}} = 13,5 \text{ kW}$

3

$$P_{1\text{Akku}} = \frac{P_{1\text{mech}}}{\eta} = \frac{13,5 \text{ kW}}{0,91} = 14,84 \text{ kW}$$

Abschnitt 2: abgelesen bei $v = 70 \text{ km/h}$ und 7% Steigung: $P_{\text{mech}} = 22 \text{ kW}$

$$P_{2\text{Akku}} = \frac{P_{2\text{mech}}}{\eta} = \frac{22 \text{ kW}}{0,91} = 24,18 \text{ kW}$$

$$t_1 = \frac{s_1}{v_1} = \frac{30 \text{ km}}{100 \text{ km/h}} = 0,3 \text{ h} \quad W_1 = P_{1\text{Akku}} \cdot t_1 = 14,84 \text{ kW} \cdot 0,3 \text{ h} = 4,452 \text{ kWh}$$

$$t_2 = \frac{s_2}{v_2} = \frac{10 \text{ km}}{70 \text{ km/h}} = 0,143 \text{ h} \quad W_2 = P_{2\text{Akku}} \cdot t_2 = 24,18 \text{ kW} \cdot 0,143 \text{ h} = 3,458 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{ges}} = W_1 + W_2 = 7,91 \text{ kWh}$$

1.1.2 Bergab ist eine Rekuperation möglich, der Akku wird aufgeladen. Diese Energie kann auf dem Rückweg für Teile der ebenen Strecke genutzt werden.

2

1.1.3
$$P_{\text{el}} = \frac{13,5 \text{ kW}}{0,91} = 14,84 \text{ kW} \quad P_{\text{el}} = U \cdot I \rightarrow I = \frac{P_{\text{el}}}{U} = \frac{14,84 \text{ kW}}{300 \text{ V}} = 49,5 \text{ A}$$

2

1.1.4
$$P_{\text{mech}} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_{\text{Achse}} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{v}{U_{\text{Rad}}} \cdot M \quad \left(n = \frac{v}{U_{\text{Rad}}} = \frac{100 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,65 \text{ m}}{2}} = 13,6 \frac{1}{\text{s}} \right)$$

3

$$\rightarrow M_{\text{Achse}} = \frac{P_{\text{mech}} \cdot U_{\text{Rad}}}{2 \cdot \pi \cdot v} = \frac{13,5 \text{ kW} \cdot \pi \cdot 0,65 \text{ m}}{2 \cdot \pi \cdot 100 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}}} = 158 \text{ Nm}$$

$$i = \frac{M_{\text{Achse}}}{M_{\text{Motor}}} = 10 \rightarrow M_{\text{Motor}} = 15,8 \text{ Nm}$$

1.1.5
$$W_{\text{Akku}} = 35 \text{ kWh} \quad W_{\text{Laden}} = \frac{W_{\text{Akku}}}{\eta} = \frac{35 \text{ kWh}}{0,65} = 53,85 \text{ kWh}$$

2

$$P_{\text{Laden}} = U \cdot I = 230 \text{ V} \cdot 14 \text{ A} = 3,22 \text{ kW} \quad t = \frac{W_{\text{Akku}}}{P_{\text{Laden}}} = \frac{53,85 \text{ kWh}}{3,22 \text{ kW}} = 16,7 \text{ h}$$

Alternative:
$$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} \rightarrow P_{\text{ab}} = \eta \cdot P_{\text{zu}} = \eta \cdot U_{\text{zu}} \cdot I_{\text{zu}}$$

$$W_{\text{ab}} = P_{\text{ab}} \cdot t \rightarrow t = \frac{W_{\text{ab}}}{P_{\text{ab}}} = \frac{W_{\text{Akku}}}{\eta \cdot U_{\text{zu}} \cdot I_{\text{zu}}}$$

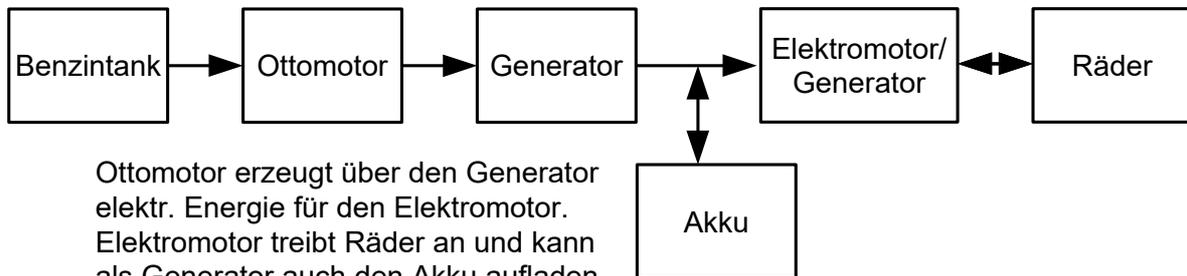
1.1.6
$$P_{\text{Laden}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos(\phi) = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 63 \text{ A} \cdot 1 = 43,65 \text{ kW}$$

2

$$t = \frac{W_{\text{Laden}}}{P_{\text{Laden}}} = \frac{35 \text{ kWh} / 0,65}{43,65 \text{ kW}} = \frac{53,85 \text{ kWh}}{43,65 \text{ kW}} = 1,23 \text{ h}$$

1.2 Fahrt mit Range-Extender

1.2.1



(Akku kann auch zwischen Generator und Elektromotor angeordnet sein.)

1.2.2 Im Benzin enthaltene Energiemenge:

$$W_{\text{Benzin}} = H_i \cdot V = 8,7 \frac{\text{kWh}}{\text{L}} \cdot 12 \text{ L} = 104,4 \text{ kWh}$$

Zur Fortbewegung steht zur Verfügung:

$$W_{\text{mech-Antrieb}} = W_{\text{Benzin}} \cdot \eta_{\text{Benzinmotor}} \cdot \eta_{\text{Generator}} \cdot \eta_{\text{Elektromotor}}$$

$$W_{\text{mech-Antrieb}} = 104,4 \text{ kWh} \cdot 0,23 \cdot 0,85 \cdot 0,91 = 18,57 \text{ kWh}$$

Abgelesen in Abb.2 bei $v = 110 \text{ km/h}$: $P_{\text{mech}} = 17 \text{ kW}$

$$\text{Fahrzeit: } t = \frac{W}{P} = \frac{18,57 \text{ kWh}}{17 \text{ kW}} = 1,09 \text{ h}$$

Zurückgelegte Strecke: $s = 110 \text{ km/h} \cdot 1,09 \text{ h} = 119,9 \text{ km}$

1.3 Photovoltaik-Anlage

$$1.3.1 \quad W_{\text{Jahr}} = P_{\text{Nenn}} \cdot \frac{H_{\text{h-Jahr}}}{1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} \cdot K_{\alpha,\beta} \cdot \eta_{\text{WR}} \quad \text{mit } K_{\alpha,\beta} = 1 \quad \text{und } H_{\text{h-Jahr}} = 365 \cdot H_h$$

$$P_{\text{Nenn}} \geq \frac{W_{\text{Jahr}} \cdot 1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}}{365 \cdot H_h \cdot K_{\alpha,\beta} \cdot \eta_{\text{WR}}} = \frac{5000 \text{ kWh} \cdot 1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}}{365 \cdot 3,28 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 1 \cdot 0,92} = 4,54 \text{ kW}$$

$$\text{Anzahl}_{\text{Module}} = \frac{4,54 \text{ kW}}{300 \text{ W}} = 15$$

Alternative Berechnung:

$$W_{\text{Jahr}} = A_{\text{PV}} \cdot H_{\text{h-Jahr}} \cdot K_{\alpha,\beta} \cdot \eta_{\text{PV}} \quad \text{mit } K_{\alpha,\beta} = 1 \quad \text{und } H_{\text{h-Jahr}} = 365 \cdot H_h$$

$$A_{\text{PV}} \geq \frac{W_{\text{Jahr}}}{365 \cdot H_h \cdot \eta_{\text{PV}} \cdot \eta_{\text{WR}}} = \frac{5000 \text{ kWh}}{365 \cdot 3,28 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \cdot 0,18 \cdot 0,92} = 25,2 \text{ m}^2$$

$$\text{Anzahl}_{\text{Module}} = \frac{25,2 \text{ m}^2}{1,67 \text{ m}^2} = 15$$

1.3.2 Verbesserung des Ertrags um den Faktor $K_{\text{opt}} = 1,17$.

D.h. Steigerung des Ertrags um 17 %.

1.3.3 $\Delta T = 75^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C} = 50\text{ K}$

$$U(75^\circ\text{C}) = 7 \cdot 32,41\text{ V} \cdot \left(1 + \frac{-0,28\text{ \%/K} \cdot 50\text{ K}}{100\text{ \%}}\right) = 195,1\text{ V} \quad (U_{1\text{Modul}}(75^\circ\text{C}) = 27,87\text{ V})$$

$$I(75^\circ\text{C}) = 2 \cdot 9,26\text{ A} \cdot \left(1 + \frac{0,04\text{ \%/K} \cdot 50\text{ K}}{100\text{ \%}}\right) = 18,89\text{ A} \quad (I_{1\text{Modul}}(75^\circ\text{C}) = 9,45\text{ A})$$

$$P_{\text{MPP}} = 195,1\text{ V} \cdot 18,89\text{ A} = 3685\text{ W} \quad (P_{1\text{Modul}}(75^\circ\text{C}) = 263,4\text{ W} ; P_{14\text{Module}} = 14 \cdot 263,4\text{ W})$$

1.3.4 Energie ins Stromnetz einspeisen → Vergütung erhalten

Beim Laden der Akkus ohne Sonnenschein → Energie gegen Bezahlung aus dem Netz beziehen:

Einfache Möglichkeit, da Wechselrichter vorhanden, jedoch nur geringe Einspeisevergütung gegenüber teurem Energieeinkauf beim Laden des Autoakkus.

Energie aus eigener Anlage in Akkus speichern und Autoakkus dann mit dieser Energie laden, wenn keine Sonne scheint.

Höhere Investitionskosten für Speicher. Keine zusätzlichen Kosten beim Laden der Autoakkus.

3

2

30

2 Pflichtaufgabe zu Niedrigenergiebauweise und GuD-Kraftwerk

2.1 Niedrigenergiehaus

2.1.1 Verringerung der Lüftungswärmeverluste durch die Wärmerückgewinnung. Verbesserung im Schallschutz: Frischluftzufuhr ohne Fensteröffnung. Zusätzlich wird die Außenluft bei der KWL durch einen Filter gereinigt. 2

2.1.2 H,x-Diagramm: bei -10°C, 80 % rel. Feuchte → absolute Feuchte ca. 1,6 g/kg. Erwärmung auf 18 °C → im h,x-Diagramm senkrecht nach oben → relative Feuchte ca. 15 %.
Diagramm FS S. 15: Die zugeführte Luft ist unbehaglich trocken. 3

2.1.3 $R_T = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + R_{se}$ 4

$$R_T = 0,13 \frac{m^2 \cdot K}{W} + \frac{0,02 m}{0,51 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,24 m}{1,4 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,12 m}{0,032 \frac{W}{m \cdot K}} + \frac{0,02 m}{0,06 \frac{W}{m \cdot K}} + 0,043 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

$$R_T = 4,47 \frac{m^2 \cdot K}{W} \rightarrow U = \frac{1}{R_T} = 0,224 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

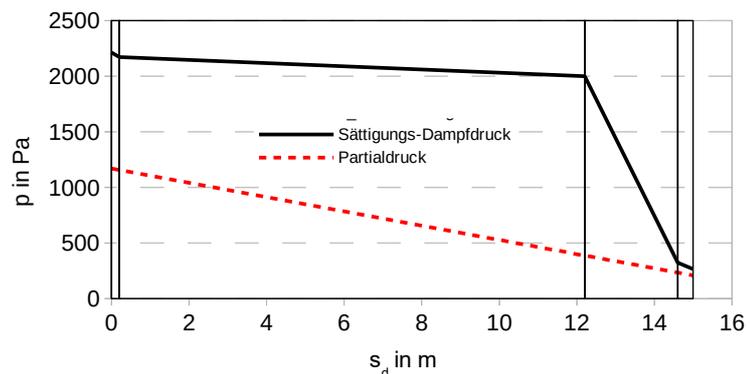
$$\dot{Q} = A \cdot U \cdot \Delta T = 120 m^2 \cdot 0,224 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 30 K = 806,4 W$$

$$Q = \dot{Q} \cdot t = 1161 kWh$$

2.1.4 $\vartheta_{si} = \vartheta_i - \frac{\Delta T}{R_T} \cdot R_{si} = 20^\circ C - \frac{30 K}{\frac{1}{0,224 \frac{W}{m^2 K}}} \cdot 0,13 \frac{m^2 \cdot K}{W} = 19,1^\circ C$ 2

2.1.5 $s_d \rightarrow$ wasserdampfäquivalente Luftschichtdicke. Sie entspricht der Dicke einer Luftschicht, die den identischen Widerstand gegenüber der Wasserdampfdiffusion hat wie die Baustoffschicht. 1

2.1.6 Die Partialdrucklinie ist überall unter dem Sättigungsdampfdruck → kein Tauwasseranfall. 3

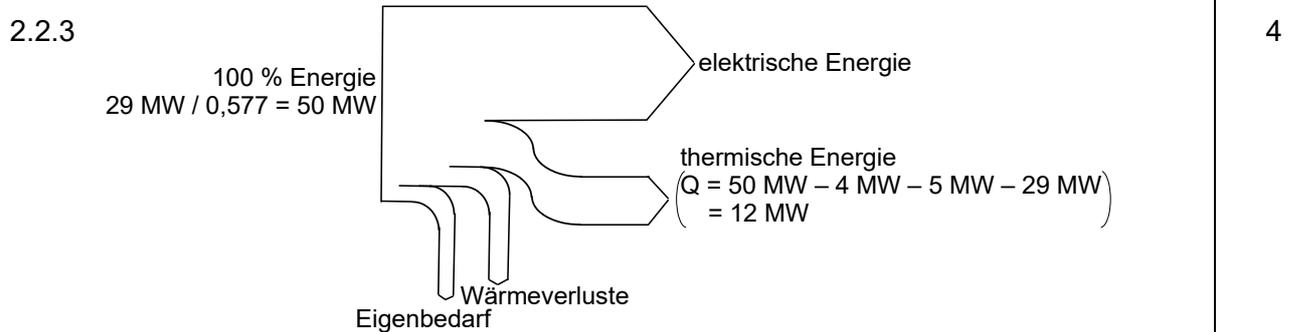
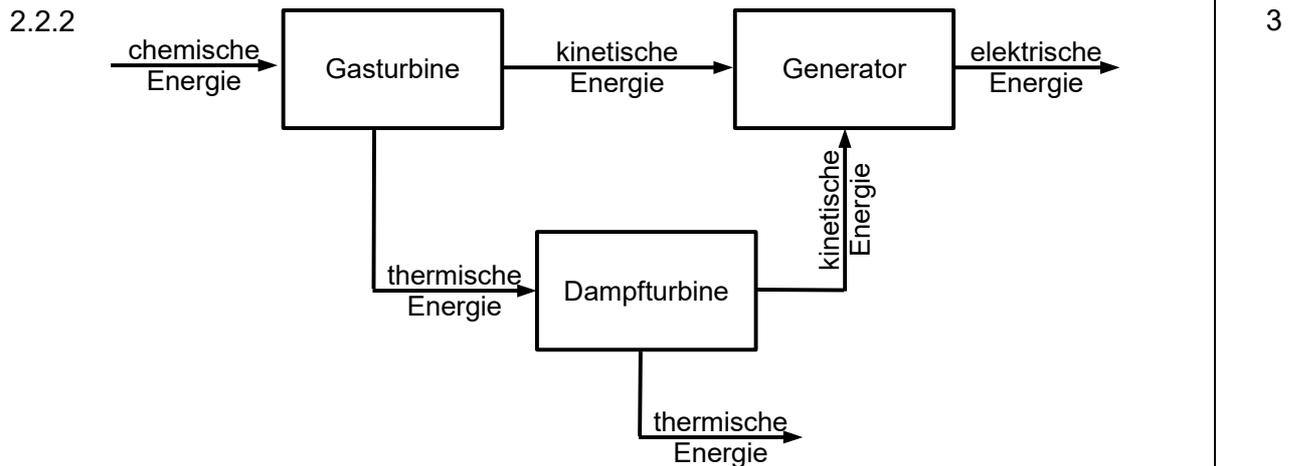


2.2 Gas- und Dampfturbinenkraftwerk

2.2.1 $W_{el} = 29 \text{ MW} \cdot 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} \cdot 365 \frac{\text{d}}{\text{a}} = 254.040 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}$ 2

Anzahl Haushalte: $N = \frac{W_{el, \text{Kraftwerk}}}{W_{el, \text{Haushalt}}} = \frac{254.040 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}}{4 \frac{\text{MWh}}{\text{a}}} = 63.510$

63.510 Haushalte können versorgt werden.



Gesamtwirkungsgrad: $\eta_{ges} = \frac{Q_{therm} + W_{el}}{W_{zu}} = \frac{29 \text{ MW} + 12 \text{ MW}}{50 \text{ MW}} = 82 \%$

2.2.4 Im GuD-Kraftwerk wird die in den heißen Abgasen enthaltene Energie mit Hilfe der Gasturbine ausgenutzt. Dadurch wird eine erhebliche Effizienzsteigerung erreicht. 2

2.2.5 Durch Abkopplung der Gasturbine (mit Generator) kann sehr schnell elektrische Energie bereitgestellt werden. Dadurch können Spitzenlasten im Energiebedarf abgedeckt werden und die Netzstabilität gesichert werden. 2

2.2.6 Das Kraftwerk ist wärmegeführt, da der Wärmebedarf über den größten Teil des Jahres ganz gedeckt wird. Der Strombedarf wird über das Jahr nie ganz gedeckt. 2

3 Wahlaufgabe zur Bewertung von umwelttechnischen Systemen, Abgasreinigung

Punkte

3.1 Vergleich Fahrzeug mit Benzinmotor und Elektrofahrzeug

3.1.1 benötigte Energiemenge pro km = $\frac{20,5 \text{ kWh}}{100 \text{ km}} = 205 \frac{\text{Wh}}{\text{km}}$
 $\text{CO}_2\text{-Ausstoß pro km} = 205 \frac{\text{Wh}}{\text{km}} \cdot \frac{527 \text{ g}}{1000 \text{ Wh}} = 108 \frac{\text{g}}{\text{km}}$

2

3.1.2 $m_{\text{CO}_2} = 8 \cdot 25.000 \text{ km} \cdot 0,108 \frac{\text{kg}}{\text{km}} + 30 \text{ kWh} \cdot 150 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = 21,6 \text{ t} + 4,5 \text{ t} = 26,1 \text{ t}$

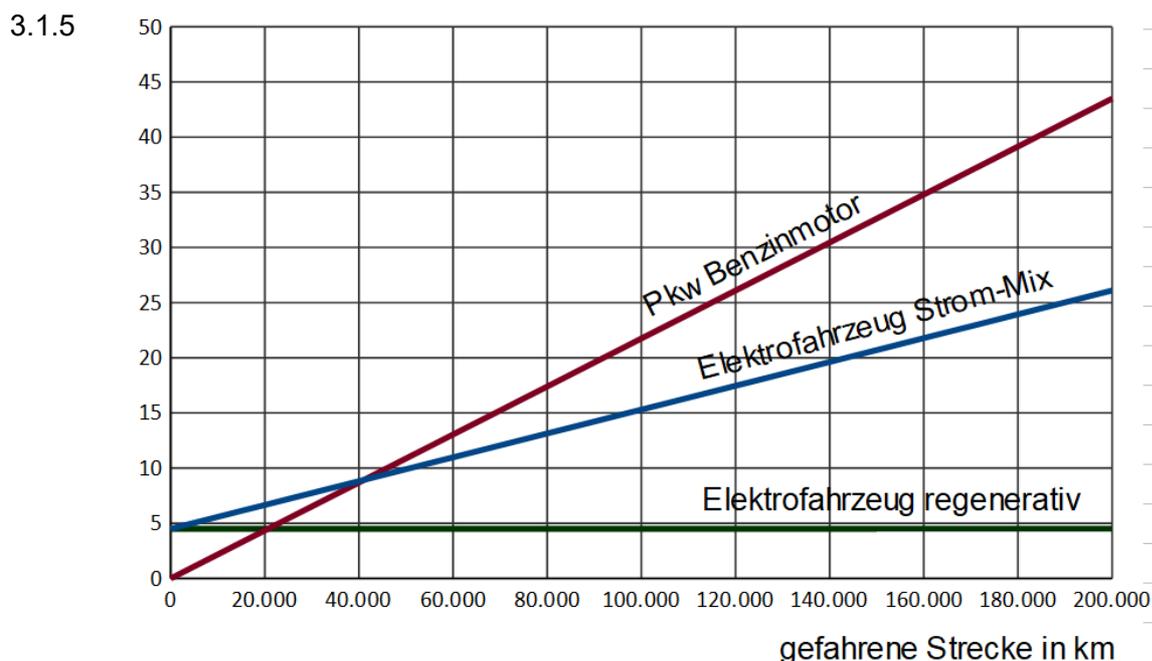
2

3.1.3 $m_{\text{CO}_2} = 8 \cdot 25.000 \text{ km} \cdot 0,159 \frac{\text{kg}}{\text{km}} + 8 \cdot 25.000 \text{ km} \cdot \frac{7 \text{ L}}{100 \text{ km}} \cdot 1,585 \frac{\text{kWh}}{\text{L}} \cdot 0,527 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}}$
 $= 31,8 \text{ t} + 11,7 \text{ t} = 43,5 \text{ t}$

2

3.1.4 **CO₂-Ausstoß in Tonnen**

2



1

3.1.6 Auch berücksichtigt werden müssen:

2

Herstellung des Fahrzeugs. Die Herstellung trägt zur CO₂-Bilanz, sowie zu weiteren Sach- und Wirkungsbilanzen bei.

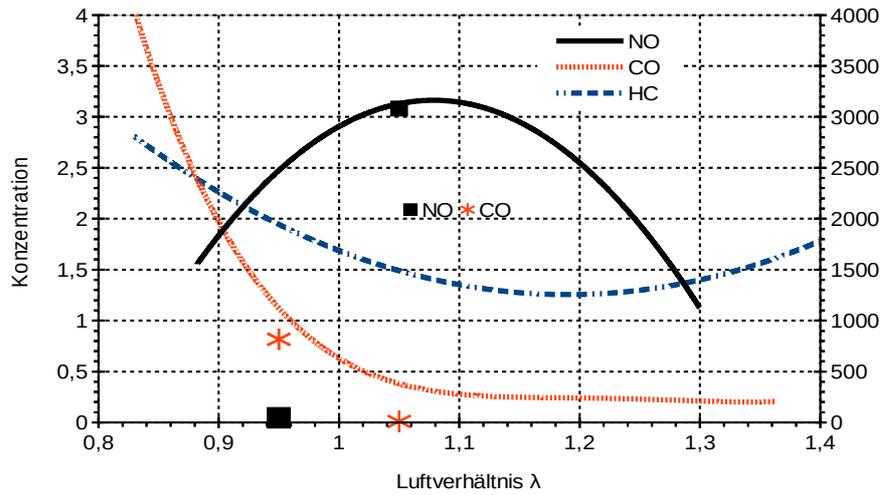
Wartung / Unterhalt des Fahrzeugs. Neben dem Zuführen des Energieträgers zum Antrieb des Fahrzeugs entstehen weitere Aufwendungen, die die Ökobilanz beeinflussen, wie z. B. Ölwechsel, Austausch von Verschleißteilen, usw.

Entsorgung / Recycling des Fahrzeugs. Aufgrund der Verteilung von verschiedenen Materialien z. B. als Verbundwerkstoffe können nicht alle eingesetzten Stoffe recycelt werden und beeinflussen die Sachbilanz ungünstig.

- 3.1.7 Die Herstellung eines Verbrennungsmotors (inklusive Getriebe, Ölfilter etc.) ist deutlich energieintensiver als die Herstellung eines Elektromotors. 3
- Bei einem Elektrofahrzeug ist im Unterhalt und bei der Wartung kein Ölwechsel erforderlich. Durch die Rekuperation gibt es weniger Verschleiß in der Bremsanlage.
- Das Recycling der Lithium-Ionen-Akkus steht noch in der Kritik, ist aber möglich und wird bereits praktiziert. Durch den Aufbau einer Industrie mit umfassender Infrastruktur können die Recyclingverfahren weiter verbessert werden.
- 3.1.8 Erzeugte CO₂-Masse pro Jahr: $m_{\text{CO}_2(\text{Jahr})} = \frac{m_{\text{CO}_2(8\text{Jahre})}}{8} = \frac{25\text{t}}{8} = 3,125\text{t}$ 3
- $\frac{1\text{ha}}{10\text{t}} \cdot 3,125\text{t} = 0,312\text{ha}$ sind notwendig, um das CO₂ der mit Strom-Mix geladenen Elektrofahrzeuge zu binden. Es stehen jedoch nur 0,13 ha zur Verfügung.
- Nachhaltigkeit bedeutet, individuelle Bedürfnisse nicht auf Kosten anderer oder zukünftiger Generationen zu befriedigen. Das erfordert eine ausgeglichene CO₂-Bilanz. Für eine nachhaltiges Mobilitätskonzept muss der CO₂-Ausstoß weiter reduziert werden, z. B. durch das regenerative Laden der Elektrofahrzeuge.
- 3.1.9 Die Vermeidung von Autofahrten, wo immer möglich, vermeidet natürlich die damit verbundenen Emissionen. 3
- Car-Sharing hilft, die Gesamtzahl der Fahrzeuge zu minimieren und mindert damit die Emissionen, die mit der Herstellung und der Entsorgung von Fahrzeugen verbunden sind.
- Ein weiterer Ausbau von Wind- und Sonnenenergie hilft den CO₂-Ausstoß des derzeitigen Strom-Mix zu verbessern und ist damit eine weitere Maßnahme zur Erhöhung der Nachhaltigkeit von individueller Mobilität.
- 3.2 Schadstoffemission und Abgasreinigung bei Kraftfahrzeugen**
- 3.2.1 CO / HC werden bei unvollständiger Verbrennung gebildet. Hohe Konzentration bei Luftmangel, niedrige Konzentration bei Luftüberschuss. 2
- Da die Verbrennungstemperatur bei sehr hohem Luftüberschuss sinkt, steigt die HC Konzentration bei großen λ-Werten an. (unvollständige Verbrennung)
- NO wird bei hohen Verbrennungstemperaturen gebildet, maximale Konzentration bei λ 1,0 (ideale Verbrennung, höchste Temperaturen).
- 3.2.2 $2\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$ 3
 $2\text{C}_2\text{H}_6 + 7\text{O}_2 \rightarrow 4\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
 $2\text{NO} + 2\text{CO} \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{CO}_2$

3.2.3

Faktoren			gemindert		
λ	CO	NO	λ	CO	NO
0,95	0,18	0,98	0,95	0,82	49
1,05	0,96	0,02	1,05	0,014	3087



3

3.2.4 $\lambda=1,3 \rightarrow$ Roh-Emissionen:
 sehr niedrige CO-Konzentration,
 relativ niedrige Konzentration HC,
 relativ niedrige NO-Emission.

2

Die Reaktion $2 \text{NO} + 2 \text{CO} \rightarrow \text{N}_2 + 2 \text{CO}_2$ im Drei-Wege-Katalysator läuft bei hohem Luftüberschuss nicht, da das CO als Reaktionspartner für das NO nicht zur Verfügung steht. CO reagiert einfacher mit dem Luftsauerstoff zu CO_2 . ($2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{CO}_2$). NO muss daher auf andere Weise entfernt werden (z. B. SCR-Katalysator)

30

4 Wahlaufgabe zu Windkraft und Wasserstoffwirtschaft

Punkte

4.1 Kleinwindkraftanlage4.1.1 Abgelesen: $n = 1550 \text{ min}^{-1}$

3

$$\lambda = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{v} = \frac{\pi \cdot 1,2 \text{ m} \cdot \frac{1550}{60 \text{ s}}}{12 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 8,1$$

$$4.1.2 \quad P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (1,2 \text{ m})^2 \cdot \left(12 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 = 1173 \text{ W}$$

3

$$P_{\text{mech}} = \frac{P_{\text{Nenn}}}{\eta} = \frac{350 \text{ W}}{0,9} = 388,9 \text{ W}$$

$$c_p = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{Wind}}} = \frac{388,9 \text{ W}}{1173 \text{ W}} = 0,331$$

4.1.3 Bei einer dreiflügeligen Anlage mit einer Schnelllaufzahl von 8 kann der Leistungsbeiwert bis über 0,5 liegen. Damit wäre deutlich mehr Leistung möglich. Die Qualität der Kleinwindkraftanlage ist daher im Vergleich zur idealen Lösung nicht optimal.

3

4.1.4

4

0 .. 4 m/s $P = 0 \text{ W}$ 4 .. 6 m/s $P = 5 \text{ W}$ 6 .. 8 m/s $P = 35 \text{ W}$ 8 .. 10 m/s $P = 130 \text{ W}$ 10 .. 12 m/s $P = 280 \text{ W}$ 12 .. 14 m/s $P = 350 \text{ W}$

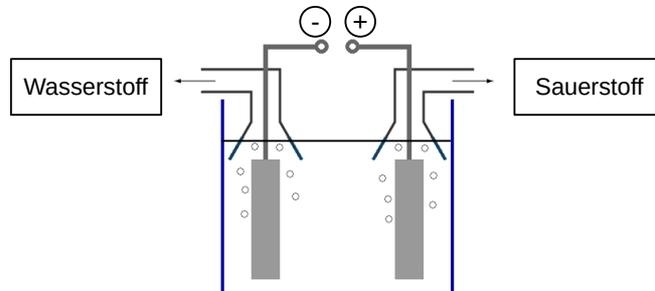
$$W_{\text{Jahr}} = 24 \text{ h/d} \cdot 365 \text{ d} \cdot (0,3 \cdot 5 \text{ W} + 0,3 \cdot 35 \text{ W} + 0,2 \cdot 130 \text{ W} + 0,05 \cdot 280 \text{ W} + 0,05 \cdot 350 \text{ W})$$

$$W_{\text{Jahr}} = 608,8 \text{ kWh}$$

4.2 „Power to Gas“ mit Windkraft und Wasserstoffspeicher

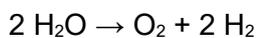
4.2.1 Minus-Pol: Elektronen werden dem Elektrolyseur zugeführt. Daher muss an dieser Stelle die untere Reaktionsgleichung (Wasserstoffentstehung) ablaufen.

2



4.2.2 Gesamtreaktionsgleichung

2



Das Volumenverhältnis von O₂ zu H₂ ist 1 : 2

4.2.3 Berechnung des Elektrolyseur-Wirkungsgrades:

2

$$\eta_{\text{Elektrolyseur}} = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{H_{s,H_2} \cdot V_{H_2}}{U \cdot I \cdot t} = \frac{3,55 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,006 \text{ m}^3}{23,9 \text{ V} \cdot 14,5 \text{ A} \cdot 300 \text{ s}} = 0,73$$

4.2.4 Ablesen aus Tabelle: Windgeschwindigkeit: 10-12 m/s → P = 280 W

3

Elektrische Energie eines Tages:

$$W_{\text{el}} = P_{\text{el}} \cdot t = 280 \text{ W} \cdot 24 \text{ h} = 6720 \text{ Wh} = 6,72 \text{ kWh}$$

Gewonnene chemische Energie eines Tage:

$$W_{\text{chem}} = W_{\text{el}} \cdot \eta_{\text{Elektrolyseur}} = 6,72 \text{ kWh} \cdot 0,75 = 5,04 \text{ kWh}$$

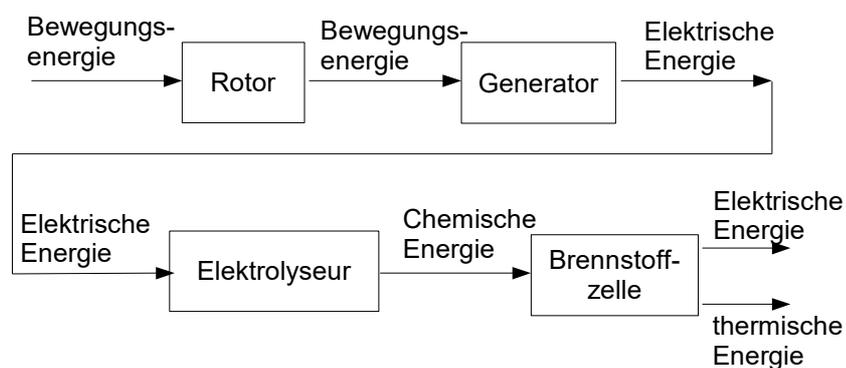
Berechnung Tagesvolumen Wasserstoff

$$V_{H_2} = \frac{W_{\text{chem}}}{H_{s,H_2}} = \frac{5,04 \text{ kWh}}{3,55 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} = 1,42 \text{ m}^3$$

4.3 Bilanzierung der „Power to Gas“ - Anlage

4.3.1 Energetisches Blockschaltbild

2



4.3.2 Berechnung des elektr. Wirkungsgrades der Brennstoffzelle

$$\eta_{\text{Brennstoffzelle-ges}} = \eta_{\text{Brennstoffzelle-thermisch}} + \eta_{\text{Brennstoffzelle-elekt}} = 0,85 - 0,4 = 0,45$$

(Prozesse laufen parallel ab, daher Addition)

$$\eta_{\text{Brennstoffzelle-elekt}} = \eta_{\text{Brennstoffzelle-ges}} - \eta_{\text{Brennstoffzelle-thermisch}} = 0,85 - 0,4 = 0,45$$

Berechnung des Gesamtwirkungsgrades

$$\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{Elektrolyseur}} \cdot \eta_{\text{Brennstoffzelle-elekt}} = 0,75 \cdot 0,45 = \underline{0,3375}$$

Der Wirkungsgrad liegt bei einem Drittel der zuvor von der WKA abgegebenen elektrischen Energie. Zwei Drittel gehen bei der Speicherung und Umwandlung als Verlustenergie verloren. Dies erscheint viel. Wenn man jedoch bedenkt, dass ohne Speicherung gar keine Energie aus dem windreichen Zeitraum zur Verfügung stehen würde, ist jeder Energiebeitrag aus der Speicherung eine Verbesserung.

4.3.3 Windenergie steht nicht immer zur Verfügung, wenn der entsprechende elektrische Energiebedarf besteht. Die Speicherung überschüssiger Windenergie in Zeiten starker Windstromproduktion trägt dazu bei, dass in Zeiten schwächerer Produktion und höherer Energienachfrage eine bessere Passung zwischen Energieangebot und Nachfrage erzielt wird. Dies verbessert die Versorgungssicherheit.

4

2

30

TG Umwelttechnik

Abitur 2018/2019

Übung

Lösungsvorschlag

Arbeitszeit:	270 Minuten	
Hilfsmittel	Formelsammlung Umwelttechnik Zugelassener Taschenrechner	
Stoffgebiet	Teil 1: Pflichtbereich	
Aufgabe 1:	Windkraft Elektro- und Hybridfahrzeuge	(3 Seiten)
Aufgabe 2:	Wärme erzeugen Wohnklima und Gebäudehülle	(2 Seiten)
	Teil 2: Wahlbereich	
Aufgabe 3:	Solarthermie, Photovoltaik Bewertung von umwelttechnischen Systemen	(3 Seiten)
Aufgabe 4:	Elektromobilität Bewertung von umwelttechnischen Systemen	(2 Seiten)

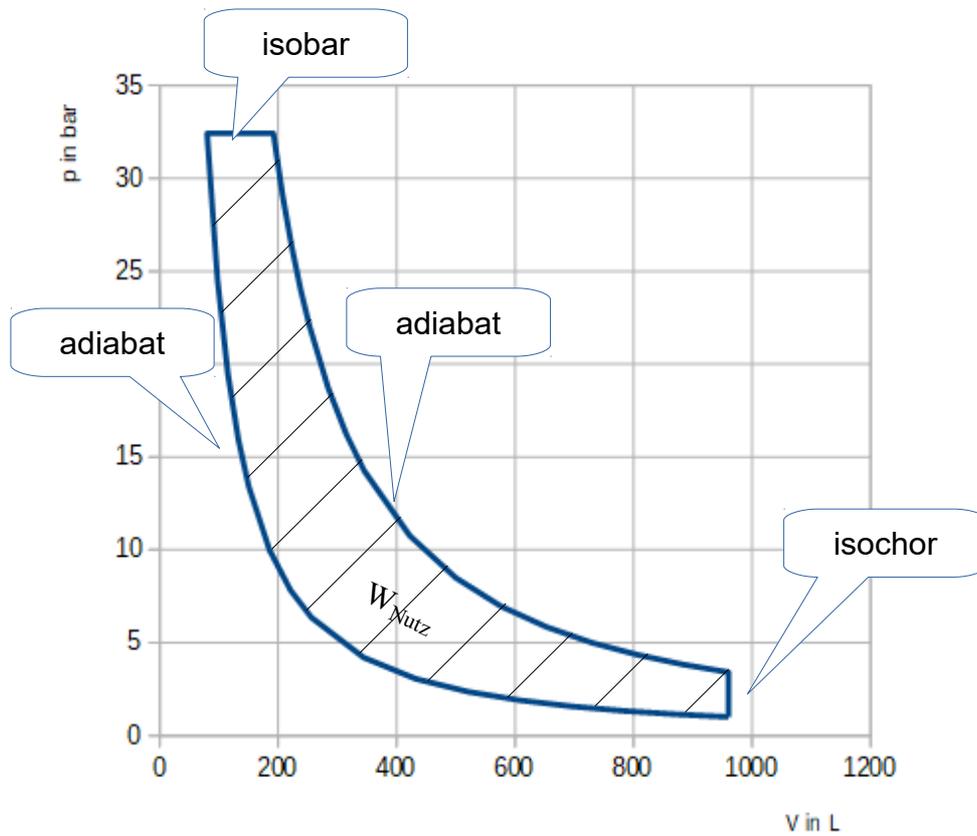
1 Pflichtaufgabe zu Windkraft, Hybridfahrzeug und Elektromobilität	Punkte
1.1 Windkraftanlage	
1.1.1 $c_p = 0,48$	3
$P_{mech} = c_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot v^3 = 0,48 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,2 \frac{kg}{m^3} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (82 m)^2 \cdot \left(8 \frac{m}{s} \right)^3$	
$P_{mech} = 778717,7 W = 778,7 kW$	
1.1.2 Der Leistungsbeiwert einer Windkraftanlage entspricht dem Wirkungsgrad des Rotors. Das heißt, dass der Rotor den höchsten „Wirkungsgrad“ bei 8 m/s (Auslegungswindgeschwindigkeit) hat. Das ist eine Windgeschwindigkeit, die am Standort häufig erreicht wird. Hier holt man die optimale Leistung aus der Windkraftanlage. Die Nennwindgeschwindigkeit wird seltener erreicht, daher kann bei dieser Geschwindigkeit der Leistungsbeiwert geringer sein.	3
1.1.3 $\lambda = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{v} \rightarrow n = \frac{\lambda \cdot v}{\pi \cdot d} = \frac{8 \cdot 8 \frac{m}{s}}{\pi \cdot 82 m} = 0,2484 \frac{1}{s} = 14,9 \frac{1}{min}$	2
1.1.4 $W_{ges} = \sum W_i = 8760 h \cdot \sum f_i \cdot P_i$ $W_{ges} = 8760 h \cdot (0,07 \cdot 0 kW + 0,14 \cdot 80 kW + 0,19 \cdot 250 kW + 0,22 \cdot 650 kW + 0,21 \cdot 1200 kW + 0,13 \cdot 1900 kW + 0,02 \cdot 2700 kW + 0,01 \cdot 2900 kW + 0,01 \cdot 3000 kW)$ $W_{ges} = 7128012 kWh = 7128 MWh$	3
1.1.5 $n = \frac{W_{ges}}{W_{Schnitt}} = \frac{7128 MWh}{4500 kWh} = 1584$	1
1.1.6 Da das Windangebot schwankt, schwankt auch die produzierte Energiemenge. Sie passt nicht mit dem Energiebedarf der Haushalte zusammen. So kann es zum Überangebot oder zum Energiemangel kommen. Eine praktizierte Lösung ist die Speicherung der Windenergie mithilfe eines Pumpspeicherkraftwerks. Die Windkraftanlagen sind jedoch häufig viel zu weit von den Pumpspeicherkraftwerken entfernt, so dass andere Speichermöglichkeiten weiterentwickelt werden müssen. Zur Zeit wird die von den Windkraftanlagen produzierte Energie in das Verbundnetz eingespeist und konventionelle Kraftwerke gleichen die Schwankungen aus.	3
1.2 Antriebskonzept eines Hybridfahrzeugs	
1.2.1 Beim parallelen Hybrid sitzt die elektrische Maschine auf der Welle des Verbrennungsmotors. Die elektrische Maschine ist mit einer (meist kleineren) Batterie verbunden. Sie unterstützt den Verbrennungsmotor beim Beschleunigen und sorgt dafür, dass er möglichst im optimalen Arbeitspunkt arbeitet.	1

1.3 Dieselmotor

1.3.1

1.3.2

1.3.3



1

1

1

1.3.4

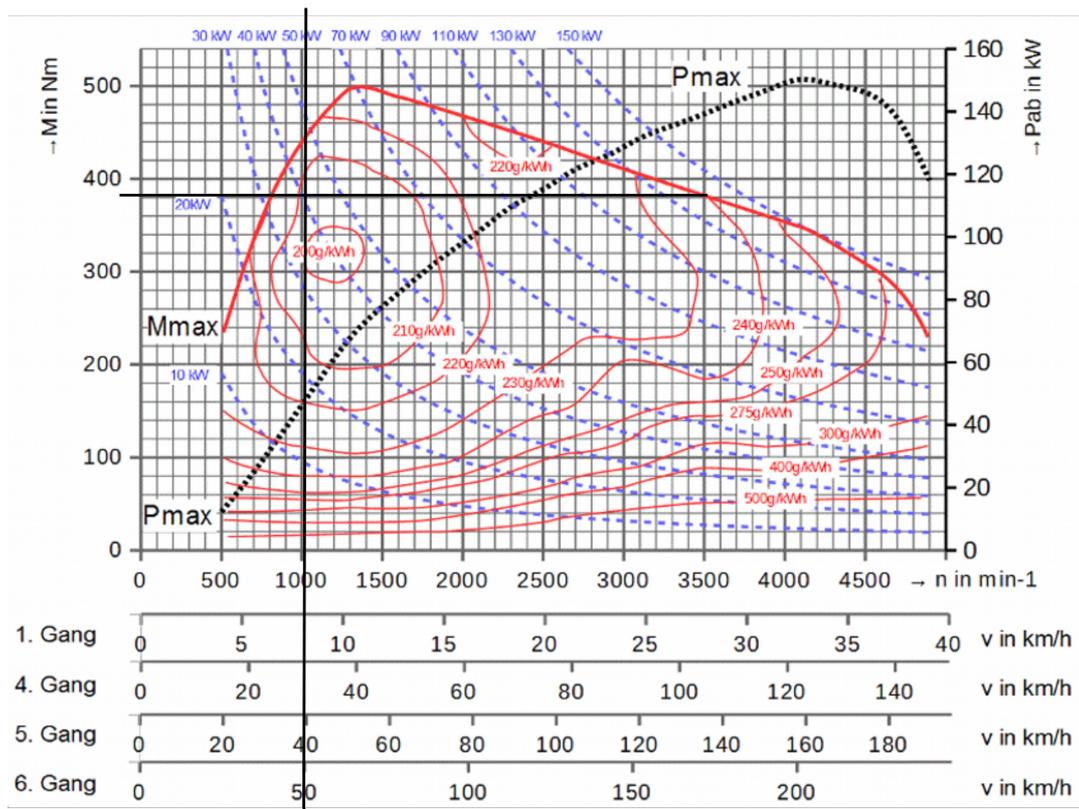
$$T_4 = T_3 \cdot \frac{p_4 \cdot V_4}{p_3 \cdot V_3} \quad T_4 = 2166 \text{ K} \cdot \frac{3 \text{ bar} \cdot 960 \text{ cm}^3}{32 \text{ bar} \cdot 192 \text{ cm}^3} \quad T_4 = 1015 \text{ K}$$

2

1.4 Fahrsituation im Hybridbetrieb

1.4.1 $M = \frac{F \cdot v}{\omega}$ $M = \frac{2880 \text{ N} \cdot \frac{50000 \text{ m}}{3600 \text{ s}}}{\frac{2 \pi \cdot 1000}{60 \text{ s}}}$ $M = 381 \text{ Nm}$

3



1.4.2 $M_{\text{Elektromotor}} = M_{\text{Fahrt}} - M_{\text{Dieseloptimal}} \quad M_{\text{Elektromotor}} = 381 \text{ Nm} - 320 \text{ Nm}$

$M_{\text{Elektromotor}} = 61 \text{ Nm}$

1.4.3 Das Drehmoment, das für die Fahrt benötigt wird ist größer als das Drehmoment des Dieselmotors. Der Elektromotor entnimmt dem Akku Energie, der Strom fließt aus dem Akku heraus.

$P_{\text{Elektromotor-mech}} = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_{\text{Elektromotor}} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1000}{60 \text{ s}} \cdot 61 \text{ Nm}$

$P_{\text{Elektromotor-mech}} = 6,39 \text{ kW}$

$\eta = \frac{P_{\text{ab}}}{P_{\text{zu}}} \rightarrow P_{\text{zu}} = U \cdot I = \frac{P_{\text{ab}}}{\eta} \rightarrow I_{\text{Elektromotor}} = \frac{P_{\text{Elektromotor-mech}}}{\eta \cdot U}$

$I_{\text{Elektromotor}} = \frac{6,39 \text{ kW}}{0,93 \cdot 200 \text{ V}} \quad I_{\text{Elektromotor}} = 34,3 \text{ A}$

1.5 Fahren mit elektrischem Antrieb

1.5.1 $t = \frac{W_{\text{zu}}}{\frac{P_{\text{mech}}}{\eta}} = \frac{Q_{\text{zu}} \cdot U}{\frac{P_{\text{mech}}}{\eta}} \quad t = \frac{90 \text{ Ah} \cdot 200 \text{ V}}{\frac{20 \text{ kW}}{0,92}} \quad t = 0,828 \text{ h}$

$s = v \cdot t \quad s = 0,828 \text{ h} \cdot 40 \frac{\text{km}}{\text{h}} \quad s = 33,1 \text{ km}$

3

30

2 Pflichtaufgabe zu Wärme erzeugen, Wohnklima und Gebäudehülle

Punkte

2.1 Wohnklima und Gebäudehülle

- 2.1.1 - Das äußerliche Erscheinungsbild der Hütte wird nicht verändert. 1
 - Bei gelegentlicher Nutzung am Wochenende heizt sich der innengedämmte Wohnraum schnell auf.

- 2.1.2 3

$$R_{T,alt} = R_{si} + R_1 + R_{se} = \left(0,13 + \frac{0,2}{0,13} + 0,043\right) \frac{m^2K}{W} = 1,711 \frac{m^2K}{W}$$

$$U_{Neu} = \frac{1}{R_{T,alt} + R_{Dämm}}$$

$$R_{Dämm} = \frac{1}{U_{Neu}} - R_{T,alt} = \frac{1}{0,3 \frac{W}{m^2K}} - 1,711 \frac{m^2K}{W} = 1,562 \frac{m^2K}{W}$$

$$d_{Dämm} = R_{Dämm} \cdot \lambda_{Dämm} = 1,562 \frac{m^2K}{W} \cdot 0,032 \frac{W}{m^2K} = 0,05 m$$

- 2.1.3 In der Raumluft ist immer Wasserdampf enthalten. Die Dampfsperre verhindert, dass dieser ins Dämmmaterial eindringt und dort kondensiert. 3

Typische Materialien sind Folien aus Kunststoff (PE) oder Aluminium.

Der Vorschlag ist sinnvoll, da die verwendeten Holzfaserplatten diffusionsoffen sind, also Wasserdampf durchlassen. Dieser kann an der Holzwand kondensieren und dort zu Bauwerksschäden durch Schimmel führen.

Alternativ:

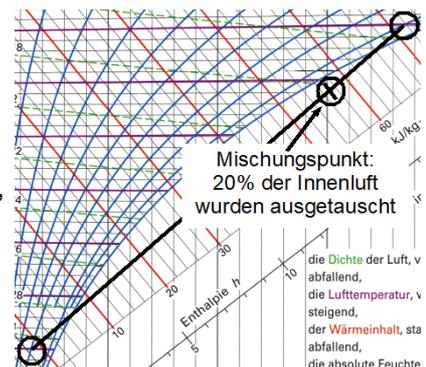
Der Einbau einer Dampfsperre ist nicht notwendig, da anfallendes Tauwasser von den Holzfaserdämmplatten aufgenommen und durch deren schnelles Austrocknungsverhalten der Raumluft zugeführt wird.

- 2.1.4 $V_R = 15 m^3$, Luftaustausch nach 15 Minuten Lüften: 3

$$V_{AUL} = 15 \text{ min} \cdot 200 \frac{L}{\text{min}} = 3 m^3$$

→ 20 % der Luft wurde ausgetauscht.

Der Mischungspunkt liegt im nebelfeuchten Bereich, d. h. die Lüftungsdauer reicht nicht aus, um ein für die Bausubstanz unproblematisches Raumklima zu erzeugen.

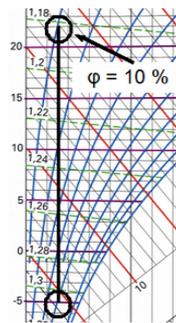


- 2.1.5 Eine Lüftungsanlage ist sinnvoll, da sie das Ablüften der Feuchtigkeit gewährleistet, ohne dass das Fenster geöffnet sein muss. 2

- 2.1.6 $\frac{\dot{V}_{Aul}}{V_{Bad}} = \beta$, Luftaustausch innerhalb 15 Minuten → $\beta = 4 \frac{1}{h}$ 2

$$\dot{V}_{Aul} = V_{Bad} \cdot \beta = 15 m^3 \cdot 4 \frac{1}{h} = 60 \frac{m^3}{h}$$

2.1.7 Die relative Luftfeuchte nach der Erwärmung beträgt $\varphi = 10\%$. Dieser Zustand wird als unbehaglich trocken empfunden.



2

2.1.8 $Q = m \cdot \Delta h$

aush, x-Diagramm: $\Delta h = 28 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$, $m = \rho \cdot V = 1,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 15 \text{m}^3 = 19,5 \text{kg}$

$$Q = 19,5 \text{kg} \cdot 28 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 546 \text{kJ}$$

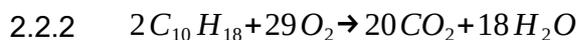
2

2.2 Wärme erzeugen

2.2.1 Jährlicher Brennstoffbedarf: $V_B = \frac{Q_{Bi}}{H_i} = \frac{Q_L}{\eta_i \cdot H_i} = \frac{1840 \text{kWh}}{0,7 \cdot 10 \frac{\text{kWh}}{\text{L}}} = 262,86 \text{L}$,

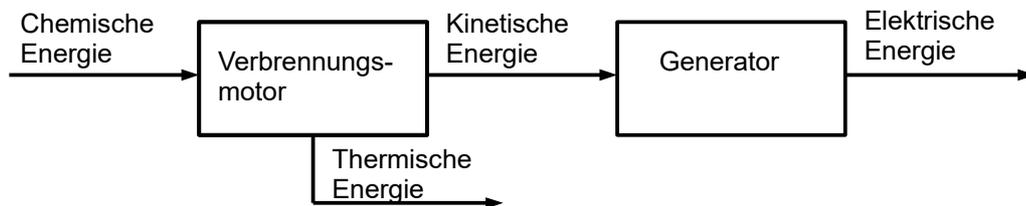
$$\text{jährliche Kosten} = V_B \cdot k = 262,86 \text{L} \cdot 0,68 \frac{\text{€}}{\text{L}} = 178,74 \text{€}$$

2



2

2.2.3



2

2.2.4 Vorteil: Das BHKW besitzt einen größeren Gesamt-Wirkungsgrad als die alte Ölheizung, da es neben der Heizwärme auch elektrischen Energie aus dem Brennstoff gewinnt.

2

Nachteil: Die hohen Investitionskosten für ein BHKW lohnen sich nur bei langen jährlichen Betriebszeiten, die in der beschriebenen Anwendung sicher nicht gegeben sind.

2.2.5 $Q_{\text{Speicher}} = Q_{\text{Bedarf}}$ mit: $Q_{\text{Bedarf}} = m_{\text{Bedarf}} \cdot c \cdot \Delta T_{35}$ und $Q_{\text{Speicher}} = m_{\text{Speicher}} \cdot c \cdot \Delta T_{50}$
 $m_{\text{Bedarf}} \cdot \Delta T_{35} = m_{\text{Speicher}} \cdot \Delta T_{50}$
 $m_{\text{Speicher}} = \frac{m_{\text{Bedarf}} \cdot \Delta T_{35}}{\Delta T_{50}} = \frac{300 \text{kg} \cdot 35 \text{K}}{50 \text{K}} = 210 \text{kg} \Rightarrow V_{\text{Speicher}} = 210 \text{L}$

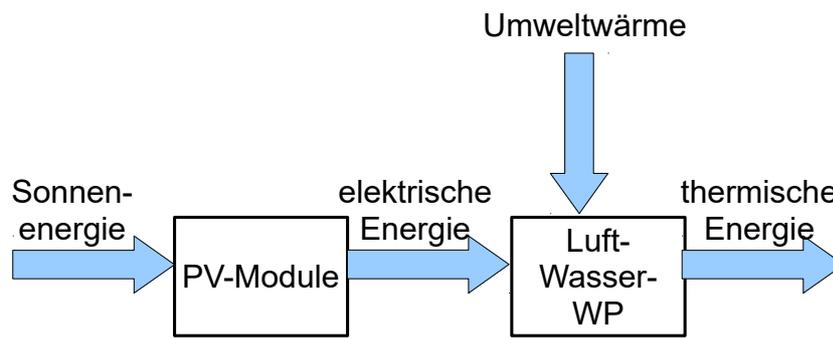
3

2.2.6 Durch lange Stillstandzeiten herrschen im Speicher oft Temperaturen im Bereich 30 - 40 °C, bei denen Keime (Legionellen) ideale Bedingungen vorfinden.

1

3 Wahlaufgaben zur Solarthermie, zur Photovoltaik und zur Bewertung von umwelttechnischen Systemen	Punkte
3.1 Solarthermie	
3.1.1 Abgelesen FS S. 7 Diagr. Globalstr. 30°, August: $q_{d,max} = 4,3 \frac{kWh}{m^2}$ Abgelesen FS S. 7 Diagr. Kollektorwirkungsgrad, Temperaturdiff. 80 K: $\eta = 0,3$ Ertrag: $W_{Tag} = A \cdot q_{d,max} \cdot \eta = 50 m^2 \cdot 4,3 \frac{kWh}{m^2} \cdot 0,3 = 64,5 kWh$	3
3.1.2 Bedarf: $Q_{Tag} = m \cdot c \cdot \Delta T = 6 \cdot 50 L \cdot \frac{1 kg}{1 L} \cdot 1,16 \frac{Wh}{kg \cdot K} \cdot 30 K = 10,44 kWh$	2
3.1.3 Der Ertrag ist ungefähr 6 mal so groß wie der Bedarf. Der Nutzungsgrad ist daher gering (ca. 16 %) und der Deckungsgrad hoch (100 %).	2
3.2 Photovoltaik und elektrische Warmwasserbereitung	
3.2.1 Abgelesen FS S. 27 Tabelle Globalstrahlung, Karlsruhe, August: $H_h = 4,86 \frac{kWh}{m^2}$ Abgelesen FS S. 27 Tabelle Korrekturfaktoren, Karlsruhe August, Süd, Interpolation zwischen den Werten für 20° und 37°: $K_{\alpha,\beta} = 1,09$ Ablesen der Werte für Januar in gleicher Weise: $H_h = 0,88 \frac{kWh}{m^2}$ $K_{\alpha,\beta} = 1,5$ August: $W_{Tag} = A \cdot H_h \cdot K_{\alpha,\beta} \cdot \eta = 50 m^2 \cdot 4,86 \frac{kWh}{m^2} \cdot 1,09 \cdot 0,18 = 47,7 kWh$ Januar: $W_{Tag} = A \cdot H_h \cdot K_{\alpha,\beta} \cdot \eta = 50 m^2 \cdot 0,88 \frac{kWh}{m^2} \cdot 1,5 \cdot 0,18 = 11,9 kWh$	3
3.2.2 August: Bedarf $Q_{Tag} = 10,4 kWh$ Ertrag PV: $W_{Tag} = 0,9 \cdot 47,7 kWh = 42,9 kWh$ $Q_{Tag} < W_{Tag} \rightarrow$ Warmwassererzeugung gesichert Januar: Bedarf $Q_{Tag} = 10,4 kWh$ Ertrag PV: $W_{Tag} = 0,9 \cdot 11,9 kWh = 10,7 kWh$ $Q_{Tag} \approx W_{Tag} \rightarrow$ Warmwasserzeugung überwiegend gesichert	4
An trüben Tagen wird die notwendige elektrische Energie aus dem Stromnetz entnommen. Das verursacht zwar Kosten, aber die Warmwasserversorgung kann aufrecht erhalten werden. Alternativ kann die Warmwasserversorgung länger aufrecht erhalten werden, indem man einen größeren Warmwasserspeicher und/oder eine höhere Speichertemperatur wählt.	
Im Gegensatz dazu kann im August der Wärmebedarf und der elektrische Eigenbedarf mit der PV-Anlage gedeckt werden und eventuell zusätzlich Geld mit der Einspeisung elektrischer Energie verdient werden.	

3.2.3



3

3.2.4 $Q_{\text{Jahr}} = 365 \cdot Q_{\text{Tag}} = 365 \cdot 10,4 \text{ kWh} = 3.796 \text{ kWh}$ $JAZ = \frac{Q_{\text{Jahr}}}{W_{\text{Wärmepumpe-elekt}}}$

2

$W_{\text{Wärmepumpe-elekt}} = \frac{Q_{\text{Jahr}}}{JAZ} = \frac{3.796 \text{ kWh}}{4} = 949 \text{ kWh}$

3.2.5 $W_{\text{elekt-PV}} = 12.400 \text{ kWh}$

4

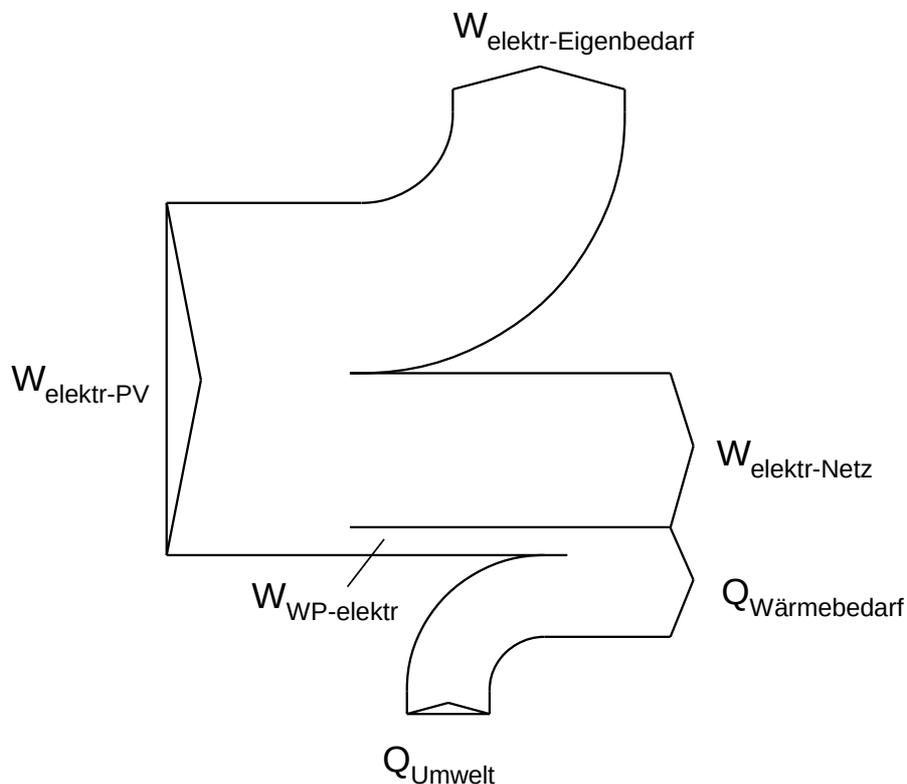
$W_{\text{elekt-Eigenbedarf}} = 6.000 \text{ kWh}$

$Q_{\text{Jahr}} = 365 \cdot 10,4 \text{ kWh} = 3.796 \text{ kWh}$ (s. 3.2.4)

$Q_{\text{Umwelt}} = 3.796 \text{ kWh} \cdot \frac{3}{4} = 2.847 \text{ kWh}$

$W_{\text{Wärmepumpe-elekt}} = 3.796 \text{ kWh} \cdot \frac{1}{4} = 949 \text{ kWh}$ (s. 3.2.4)

$W_{\text{elekt-Netz}} = (12.400 - 6.000 - 949) \text{ kWh} = 5.451 \text{ kWh}$



3.2.6	Jahresertrag PV und Wärmeerzeugung mit Heizstäben: $\frac{500 \text{ €}}{4 \text{ Jahre}} = 125 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$	3
	Jahresertrag PV und Wärmeerzeugung mit Wärmepumpe: $\frac{2750 \text{ €}}{5 \text{ Jahre}} = 550 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}$	
	Schnittpunkt Wärmepumpe – 0 €-Linie: Nach 5,5 Jahren hat die Wärmepumpe einen Gesamtertrag in Höhe ihrer Anschaffungskosten erwirtschaftet. Schnittpunkt der Geraden: Nach 7 Jahren hat die Wärmepumpe ihre Anschaffungskosten kompensiert und mehr Erträge erwirtschaftet als das System mit Heizstäben.	
3.3 Systemvergleich und Bewertung		
3.3.1	CO ₂ -Bilanz: Der Betrieb des Gasdurchlauferhitzers erzeugt einen CO ₂ -Ausstoß. Beim Betrieb der beiden PV-Systeme wird kein CO ₂ ausgestoßen.	4
	Energetische Unabhängigkeit: Beim Betrieb des Gasdurchlauferhitzers besteht eine starke Abhängigkeit von der Gasindustrie. Der Betrieb der beiden PV-Systeme ist weitgehend unabhängig möglich, so lange der Ertrag größer oder gleich dem elektrischen Bedarf des Wärmeerzeugers ist. Dies ist bei dem Wärmepumpensystem auch bei geringeren Erträgen als beim Heizstabsystem möglich.	
		30

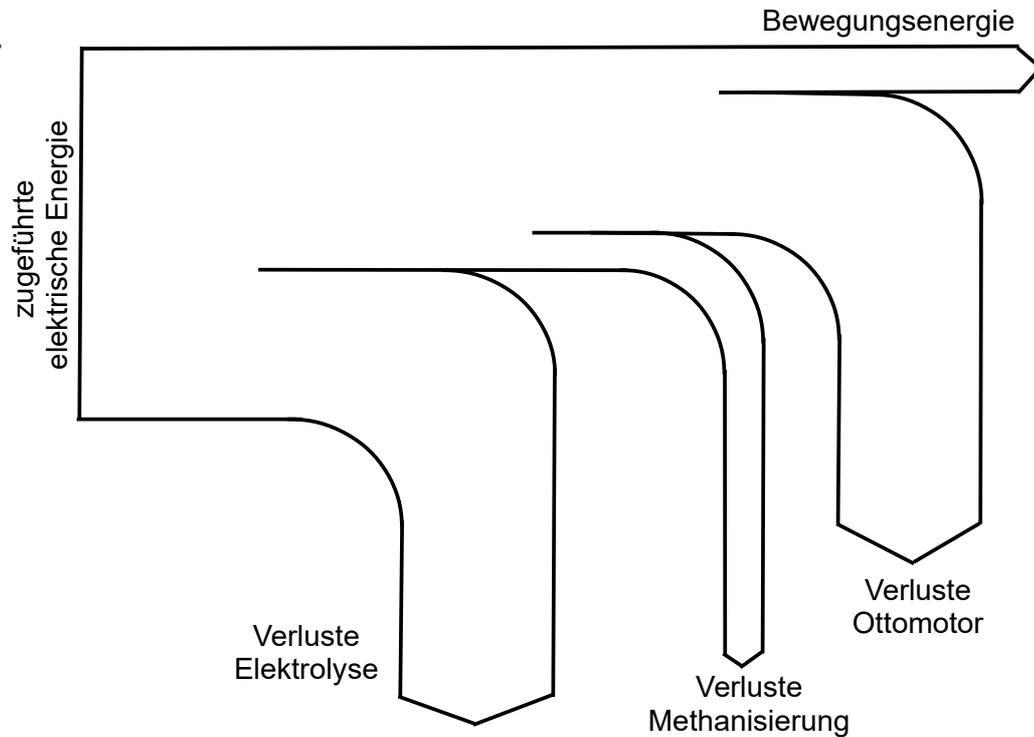
**4 Wahlaufgabe zu Energiespeicherung,
Bewertung von Energie- und umwelttechnischen Systemen**

Punkte

4.1 Konzeptvergleich

4.1.1 Sankey-Diagramm

3



4.1.2 Gesamtwirkungsgrad des Konzepts „Power to Gas“

3

$$\eta_{\text{Ges}} = \eta_{\text{Elektrolyse}} \cdot \eta_{\text{Methanisierung}} \cdot \eta_{\text{Ottomotor}}$$

$$\eta_{\text{Ges}} = 0,6 \cdot 0,83 \cdot 0,25$$

$$\eta_{\text{Ges}} = 0,125$$

Gesamtwirkungsgrad des Konzepts „Batteriespeicher“:

$$\eta_{\text{Ges}} = \eta_{\text{Batterieladen}} \cdot \eta_{\text{Batterieentladen}} \cdot \eta_{\text{Akkuladen}} \cdot \eta_{\text{Akkuentladen}} \cdot \eta_{\text{Elektromotor}}$$

$$\eta_{\text{Ges}} = 0,95 \cdot 0,95 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,92$$

$$\eta_{\text{Ges}} = 0,672$$

Bewertung

Der Gesamtwirkungsgrad des Konzepts „Batteriespeicher“ ist um den Faktor 6,3 höher.

Ursache für die geringe Effizienz des Konzepts „Power to Gas“ ist die mehrfache Umwandlung der Energie in eine andere Energieform, bei der jedes Mal Verluste entstehen, insbesondere durch den geringen Wirkungsgrad des Ottomotors.

4.1.3 Power-to Gas Szenario, 2 Vorteile gefordert, z. B.: 2

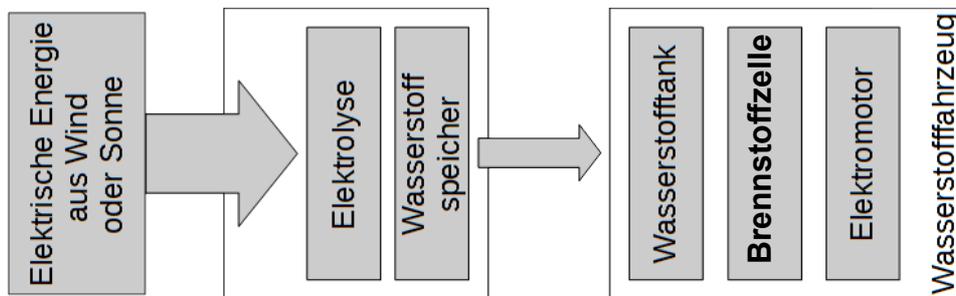
Vorteil 1: Das Konzept „Power to Gas“ ermöglicht die Speicherung großer Energiemengen im Erdgasnetz. So kann überschüssige Windenergie oder Solarenergie gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt verwendet werden.

Vorteil 2: Herkömmliche Verbrennungsmotoren können mit geringem Aufwand auf Gasbetrieb umgerüstet werden. Dadurch kann die CO₂-Emmission im Verkehrsbereich schnell und kostengünstig reduziert werden.

Vorteil 3: Im Güterverkehr können durch kurze Tankzeiten auch Gasantriebe zum Einsatz kommen, während der Umstieg auf Elektroantrieb aufgrund langer Ladezeiten und hoher Batteriepreise zur Zeit nicht wirtschaftlich ist.

Vorteil 4: Die Reichweite der Kraftfahrzeuge mit Gasantrieb ist höher als bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen.

4.1.4 Brennstoffzellenantrieb 2



4.2 Elektrofahrzeug

4.2.1 Ermittlung des Ladestroms 2

$$W_{\text{Akku}} = U_{\text{Akku}} \cdot I \cdot t \quad W_{\text{Akku}} = 200 \text{ V} \cdot 95 \text{ Ah} \quad W_{\text{Akku}} = 19 \text{ kWh}$$

$$W_{\text{zu}} = \frac{W_{\text{Akku}}}{\eta_{\text{Aufladen}}} \quad W_{\text{zu}} = \frac{19 \text{ kWh}}{0,90} \quad W_{\text{zu}} = 21,11 \text{ kWh}$$

$$I = \frac{W_{\text{zu}}}{U \cdot t} \quad I = \frac{21,11 \text{ kWh}}{230 \text{ V} \cdot 9 \text{ h}} \quad I = 10,2 \text{ A}$$

4.2.2 $P_{\text{ges}} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$ $P_{\text{ges}} = \sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 32 \text{ A} = 22,17 \text{ kW}$ 3

$$t = \frac{W_{\text{zu}}}{\eta \cdot P} \quad t = \frac{20 \text{ kWh}}{0,9 \cdot 22,17 \text{ kW}} = 1 \text{ h}$$

Die Ladezeit beträgt 60 Minuten

4.2.3 Energieverbrauch pro 100 km (EnV₁₀₀) bei Hersteller-Angaben zur Reichweite: 2

$$\text{EnV}_{100} = \frac{W_{\text{Akku}} \cdot \eta_{\text{Akkuentladen}} \cdot 100 \text{ km}}{\text{Reichweite}} \quad \text{EnV}_{100} = \frac{19 \text{ kWh} \cdot 0,9 \cdot 100 \text{ km}}{160 \text{ km}}$$

$$\text{EnV}_{100} = 10,69 \text{ kWh}$$

<p>4.2.4 Reichweite im Alltagsbetrieb:</p> <p>Die Hersteller geben die Reichweite unter optimierten Bedingungen an. Zusätzliche Verbraucher wie Heizung oder Klimaanlage reduzieren die Reichweite ebenso wie Fahrten mit hoher Geschwindigkeit.</p>	2
<p>4.2.5 CO₂-Emissionswert</p> <p>Das hier berücksichtigte CO₂ entsteht bei der Erzeugung des Stromes. Im Energiemix in Deutschland wird der Strom auch aus Kohle- und Gaskraftwerken gewonnen, die dabei CO₂ ausstoßen</p>	1
<p>4.3 Verbrennungsmotor mit Gasantrieb</p>	
<p>4.3.1 Aus dem Verbrennungsmotor werden die Abgase sehr heiß ausgestoßen. Die Kondensationswärme kann nicht genutzt werden, daher darf nur der Heizwert betrachtet werden.</p>	1
<p>4.3.2 Energieinhalt eines vollen Gastanks</p> $m = \frac{p \cdot V}{R_i \cdot T} \quad m = \frac{200 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 0,072 \text{ m}^3}{520 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 293 \text{ K}} \quad m = 9,451 \text{ kg}$ $W = H_i \cdot m \quad W = 45 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 9,451 \text{ kg} \quad W = 425,3 \text{ MJ} = 118,1 \text{ kWh}$	3
<p>4.3.3 Reichweite einer Tankfüllung</p> $W = H_i \cdot m = 45 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 6 \text{ kg} \cdot \frac{1000 \frac{\text{kJ}}{\text{MJ}}}{3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} = 75 \text{ kWh}$ $\text{Reichweite} = \frac{W_{\text{Tank}}}{\text{EnV}_{100}} = \frac{75 \text{ kWh} \cdot 100 \text{ km}}{31 \text{ kWh}} = 241 \text{ km}$	2
<p>4.3.4 Unterschiedlicher Energieverbrauch</p> <p>Die Hauptursache liegt im Unterschied der Wirkungsgrade der Motoren. Während der Elektromotor einen Wirkungsgrad von 92 % hat liegt der des Otto-Motors nur bei 25 %.</p>	2
<p>4.3.5</p> $P = z \cdot Q_{1\text{Zyklus}} \cdot \eta \cdot \frac{n}{2} \quad Q_{1\text{Zyklus}} = H_i \cdot m$ $P = 4 \cdot 45 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \cdot 0,00003 \text{ kg} \cdot 0,25 \cdot \frac{83,3 \text{ s}^{-1}}{2} = 53,6 \text{ kW}$	2

TG Umwelttechnik

Abitur 2019/2020

Hauptprüfung

Lösungsvorschlag

Arbeitszeit: 270 Minuten
 Hilfsmittel: Formelsammlung Umwelttechnik
 Zugelassener Taschenrechner

Stoffgebiet	Teil 1: Pflichtbereich		
	Aufgabe 1:	Photovoltaik Elektromobilität	(4 Seiten)
	Aufgabe 2:	Solarthermie Energiebilanz Gebäudehülle	(3 Seiten)
	Teil 2: Wahlbereich		
	Aufgabe 3:	Wasserstoffmobilität Klimatisierung	(3 Seiten)
	Aufgabe 4:	Wärmepumpe Rauchgasreinigung Pumpspeicherkraftwerk	(3 Seiten)

1 Pflichtaufgabe zu Photovoltaik und Elektromobilität

Punkte

1.1 Photovoltaik-Anlage

1.1.1 $n = \frac{6 \text{ kW}}{0,3 \text{ kW}} = 20$

1

1.1.2 $\eta = \frac{P_{MPP}}{E \cdot A} = \frac{300 \text{ W}}{1000 \text{ W/m}^2 \cdot 0,991 \text{ m} \cdot 1,65 \text{ m}} = 0,183 = 18,3\%$

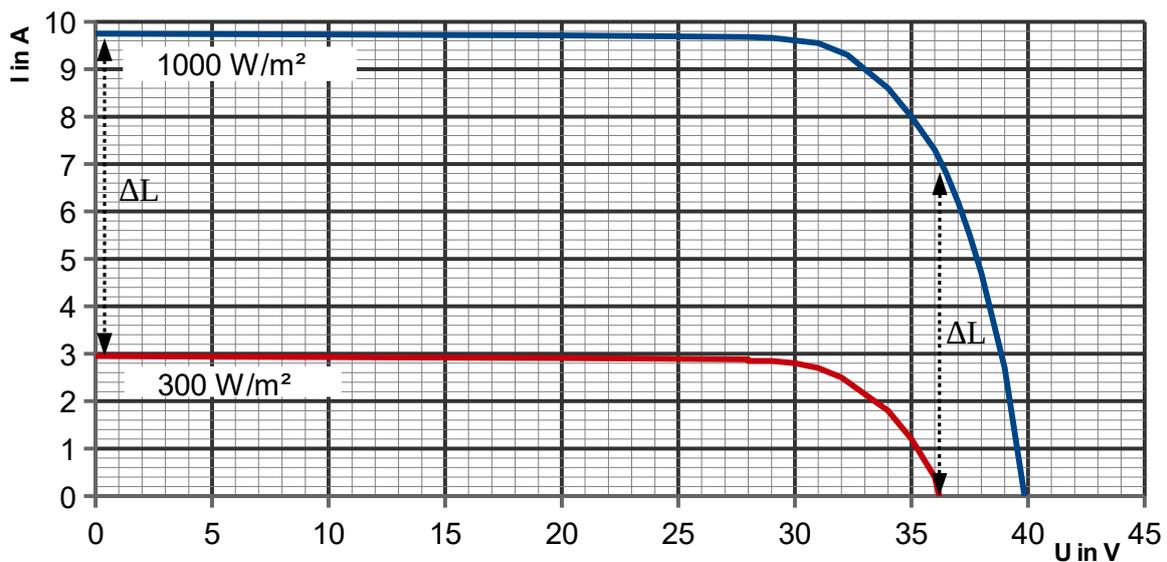
2

1.1.3 Der Kurzschlussstrom ändert sich proportional zur Bestrahlungsstärke.

4

$$I_{SC}(300 \text{ W/m}^2) = \frac{300 \text{ W/m}^2}{1000 \text{ W/m}^2} \cdot I_{SC}(1000 \text{ W/m}^2) = \frac{300 \text{ W/m}^2}{1000 \text{ W/m}^2} \cdot 9,75 \text{ A} = 2,93 \text{ A}$$

Die 300 W/m²-Kennlinie entsteht durch Parallelverschiebung der 1000 W/m²-Kennlinie nach unten, so dass diese durch den Punkt (0 V | 2,93 A) verläuft.



1.1.4 Es lässt sich im Diagramm ablesen: $U_{OC}(300 \text{ W/m}^2) = 36,2 \text{ V}$

1.1.5 Es sind also insgesamt 10 Module zu einem String verschaltet. Die maximale Eingangsspannung tritt im Leerlauf bei - 20 °C auf.

3

$$U_{OC}(-20^\circ \text{C}) = n \cdot U_{OC}(25^\circ \text{C}) \cdot (1 + TK_U \cdot \Delta T)$$

$$U_{OC}(-20^\circ \text{C}) = 10 \cdot 39,85 \text{ V} \cdot \left(1 + \frac{0,3\% / \text{K} \cdot (25 - (-20)) \text{ K}}{100\%}\right) = 452 \text{ V}$$

1.2 Elektromobilität

1.2.1 Ladesäulen mit regenerativer Energie, dichtes Ladesäulennetz, Recycling/Wiederverwendung der Akkus, umweltfreundliche und energiearme Herstellung der Akkus, Schnellladefähigkeit, ausreichende Reichweiten.

3

1.2.2 Die Solarzellen liefern:

$$W_{el} = P \cdot t = 6 \text{ kW} \cdot 5 \text{ h} = 30 \text{ kWh}$$

Davon sind am Ende im Akku gespeichert:

$$W_{\text{Akku}} = \eta_{\text{Laderegler}} \cdot \eta_{\text{Ladung}} \cdot W_{el} = 0,95 \cdot 0,96 \cdot 30 \text{ kWh} = 27,36 \text{ kWh}$$

Dies führt zur Reichweite:

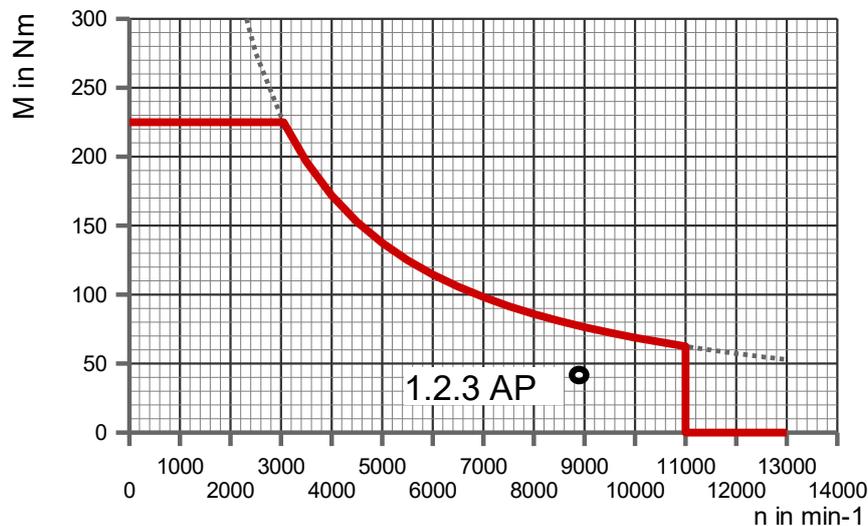
$$s = \frac{W_{\text{Akku}}}{14,6 \text{ kWh}/100 \text{ km}} = \frac{27,36 \text{ kWh}}{14,6 \text{ kWh}/100 \text{ km}} = 187 \text{ km}$$

1.2.3 Mit $n_{\text{max}} = \frac{v_{\text{max}}}{RU}$ den Radumfang ausrechnen und dann n bei 100 km/h berechnen

oder Ansatz $\frac{n_{\text{max}}}{v_{\text{max}}} = \frac{n_1}{v_1}$

$$\rightarrow n_{\text{Motor}} = \frac{v}{v_{\text{max}}} \cdot n_{\text{Motor, max}} = \frac{110 \text{ km/h}}{135 \text{ km/h}} \cdot 11000 \text{ min}^{-1} = 8963 \text{ min}^{-1} = 149 \text{ s}^{-1}$$

$$P_{\text{mech}} = 2 \cdot \pi \cdot n_{\text{Motor}} \cdot M_{\text{Motor}} \rightarrow M_{\text{Motor}} = \frac{P_{\text{mech}}}{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{Motor}}} = \frac{40 \text{ kW}}{2 \cdot \pi \cdot 149 \text{ s}^{-1}} = 42,7 \text{ Nm}$$

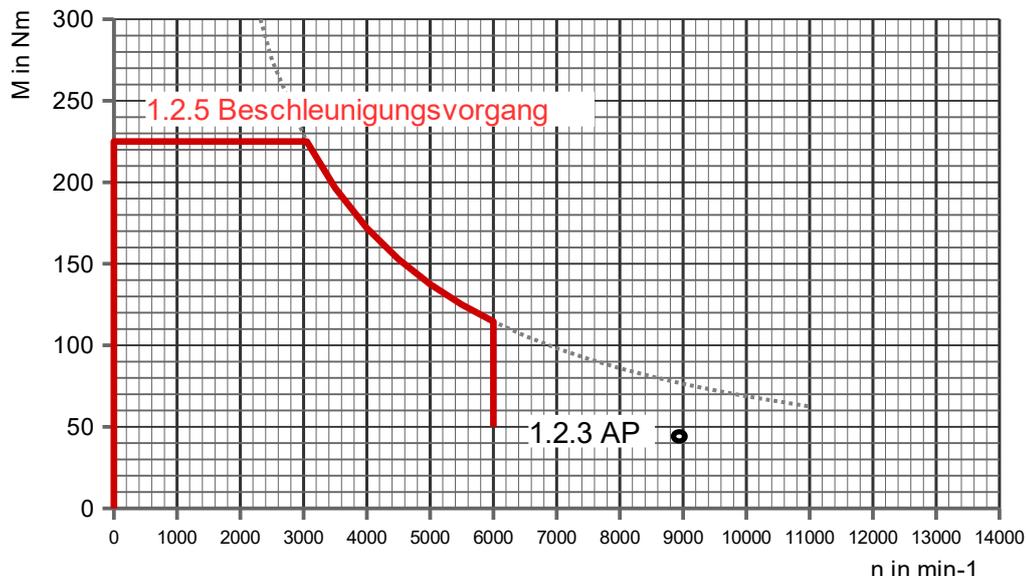


1.2.4 $W_{\text{mech}} = W_{\text{Akku}} \cdot \eta_{\text{Entladung}} \cdot \eta_{\text{Motor}} = 41 \text{ kWh} \cdot 0,96 \cdot 0,9 = 35,4 \text{ kWh}$

$$W_{\text{mech}} = P_{\text{mech}} \cdot t \rightarrow t = \frac{W_{\text{mech}}}{P_{\text{mech}}} = \frac{35,4 \text{ kWh}}{40 \text{ kW}} = 0,885 \text{ h}$$

$$s = v \cdot t = 110 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 0,885 \text{ h} = 97,4 \text{ km}$$

1.2.5



2

Die maximale Beschleunigung ergibt sich, wenn die beschleunigende Antriebskraft maximal ist, also das Drehmoment.

→ Der Beschleunigungsvorgang folgt der Volllastkennlinie bis zum angegebenen Arbeitspunkt 50 Nm / 6000 min⁻¹.

1.2.6 Wie auch der Kennlinie in der Formelsammlung S.32 zu entnehmen, ist das maximal mögliche Drehmoment beim Verbrenner drehzahlabhängig und steigt von niedrigen Drehzahlen beginnend zunächst an. Beim Elektroantrieb steht von der Drehzahl 0 an das maximale Drehmoment zur Verfügung. (Beim Verbrenner ist ein Schaltgetriebe und eine Kupplung zum Anfahren notwendig, beim Elektroantrieb nicht.)

2

1.2.7 Für die Akkuherstellung wird die folgende Wassermenge benötigt:

2

$$V_{\text{Wasser}} = 41 \text{ kWh} \cdot 0,18 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \cdot \frac{400\,000 \text{ L}}{1000 \text{ kg}} = 2952 \text{ L}$$

1.2.8 Der auf Nutzungsdauer umgelegte Wasserverbrauch bei der Lithiumherstellung des Akkus beträgt: $\frac{2952 \text{ L}}{200.000 \text{ km}} \cdot 100 \text{ km} = 1,47 \frac{\text{L}}{100 \text{ km}}$

3

Diese Betrachtungsweise relativiert den Wasserverbrauch bei der Lithiumherstellung. Andere Alltagsgüter wie z.B. die Herstellung von Kaffee besitzen wohl ein viel höheren Wasserverbrauch bei der Herstellung.

30

2 Pflichtaufgabe zu Solarthermie, Energiebilanz und Gebäudehülle

2.1 Solarthermische Anlage und Speicher

2.1.1 Nutzungsgrad: Anteil der Solarenergie, der immer komplett genutzt werden kann. 3

Deckungsgrad: Anteil des Wärmebedarfs, der mit Solarenergie abgedeckt werden kann.

Ist die Anlage auf einen sehr großen Deckungsgrad ausgelegt, erhält man speziell im Sommer einen sehr großen Überschuss, welchen man nicht ausnutzen kann. D.h. der Nutzungsgrad der Anlage sinkt.

2.1.2 Nach Süden mit möglichst steiler Aufständigung, z.B. 70° , um möglichst ganzjährig den Bedarf zu decken. 2

2.1.3 Im Winterhalbjahr, wenn die Temperaturen von Kollektor und Umgebung weit auseinander liegen, ist der Wirkungsgrad des Vakuumröhrenkollektors deutlich höher als der eines Flachkollektors. 2

2.1.4 $V_{Sp} = 1,4063 \cdot \text{Bedarf} + 18,75\text{l}$
 $V_{Sp} = 1,4063 \cdot 12 \cdot \text{Einzelbedarf} + 18,75\text{l}$
 $\text{Einzelbedarf} = \frac{V_{Sp} - 18,75\text{l}}{1,4063 \cdot 12} = \frac{1000\text{l} - 18,75\text{l}}{1,4063 \cdot 12} = 58,15\text{l}$ 2

2.1.5 $Q_{Sp} = Q_{WW}$
 $m_{Sp} \cdot c_W \cdot \Delta T_{Sp} = m_{WW} \cdot c_W \cdot \Delta T_{WW}$
 $m_{WW} = \frac{m_{Sp} \cdot \Delta T_{Sp}}{\Delta T_{WW}} = \frac{1000\text{kg} \cdot 58\text{K}}{38\text{K}} = 1526,32\text{kg} \quad V = 1,526\text{ m}^3$ 3

2.2 Vakuumröhrenkollektor

2.2.1 Abgelesen aus dem Diagramm in der FS S.7 2

bei $T_K - T_U = 60\text{ K}$ für Vakuumröhrenkollektor: $\eta_{Koll} = 0,56$

$\eta_{Verteil} = 0,95$, $\eta_{Sp} = 0,85$

$\eta_{Anlage} = \eta_{Verteil} \cdot \eta_{Sp} \cdot \eta_{Koll} = 0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,56 = 0,45 = 45\%$

2.2.2 $\Delta T = \vartheta_{Max} - \vartheta_K = 180^\circ\text{C} - 70^\circ\text{C} = 110\text{K}$ 3

$V_{Koll} = V_R \cdot A_{Koll} = 0,4 \frac{\text{l}}{\text{m}^2} \cdot 28\text{m}^2 = 11,2\text{l} \rightarrow m_{Koll-Inhalt} = 11,2\text{kg}$

$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = 11,2\text{kg} \cdot 1,16 \frac{\text{Wh}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 110\text{K} = 1429,12\text{Wh}$

$Q = \dot{q}_{Sonne} \cdot \eta_{Koll} \cdot A_{Koll} \cdot t$

$t = \frac{Q}{\dot{q}_{Sonne} \cdot \eta_{Koll} \cdot A_{Koll}} = \frac{1429,12\text{Wh}}{800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,45 \cdot 28\text{m}^2} = \frac{1.429,12\text{Wh}}{10.080\text{W}} = 0,142\text{h} \rightarrow 8,5\text{min}$

2.3 Energiebilanz

2.3.1 Interne Gewinne sind Energiegewinne, die im Inneren des Mehrfamilienhauses gemacht werden. Hierbei handelt es sich zum einen um Gewinne aus Abwärme von technischen Geräten, wie Backofen oder Kühlschrank, zum anderen um Wärme, die von den im Haus befindlichen Bewohnern abgegeben wird. 2

2.3.2 Die Transmissionsverluste sind im Januar größer, da es draußen kälter ist und dadurch mehr Wärme durch die Wände verloren geht. Der Sonnenenergieeintrag ist kleiner, da im Januar weniger Sonnenstunden als im März zur Verfügung stehen. Die Werte für Lüftungsverluste und interne Gewinne sind annähernd gleich, da sowohl im Januar als auch im März gleich viel gelüftet werden muss bzw. gleich viele Personen im Haus wohnen, die Wärme abgeben. 3

2.3.3 $Q_{\text{Heiz}} = Q_{\text{Trans}} + Q_{\text{Lüft}} - Q_{\text{Sonne}} - Q_{\text{Gewinne}}$ 2
 $Q_{\text{Heiz}} = 3000 \text{ kWh} + 1000 \text{ kWh} - 1500 \text{ kWh} - 250 \text{ kWh} = 2250 \text{ kWh}$

2.4 Gebäudehülle

2.4.1 $U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{si} + \frac{d_G}{\lambda_G} + \frac{d_B}{\lambda_B} + \frac{d_W}{\lambda_W} + \frac{d_Z}{\lambda_Z} + R_{se}}$ 3

$$\lambda_W = \frac{d_W}{\frac{1}{U} - R_{si} - \frac{d_G}{\lambda_G} - \frac{d_B}{\lambda_B} - \frac{d_Z}{\lambda_Z} - R_{se}}$$

$$\lambda_W = \frac{0,14 \text{ m}}{\frac{1}{0,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}} - 0,13 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} - \frac{0,01 \text{ m}}{0,51 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} - \frac{0,18 \text{ m}}{2 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} - \frac{0,015 \text{ m}}{1,6 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} - 0,043 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}}$$

$$\lambda_W \approx 0,03 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

z.B. EPS WLG 030

2.4.2 Zwei Nachteile für Innendämmung: z.B. 1

- Die Wohnräume werden kleiner.
- Es besteht die Gefahr von Tauwasseranfall in der Wand.
- Die Räume heizen sich schnell auf, was im Sommer zu sehr hohen Innenraumtemperaturen führen kann.
- Die Befestigung von Möbeln und Bildern an der Wand ist kompliziert, da keine Wärmebrücken entstehen dürfen.
- Gefahr von Wärmebrücken an den Decken und Fußböden.
- usw.

3 Wahlaufgabe zu Wasserstoffmobilität und Klimatisierung

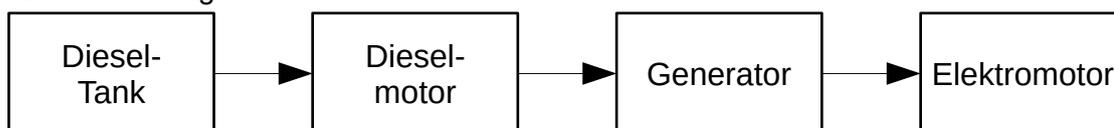
Punkte

3.1 Wasserstoffmobilität

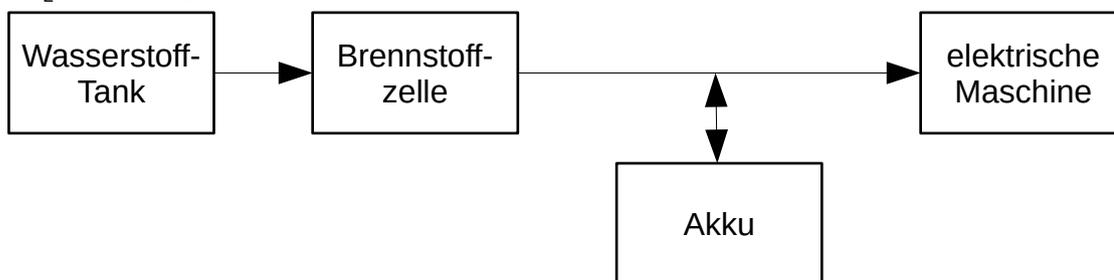
3.1.1 Die Bremsenergie kann zurückgewonnen werden und geht nicht als Wärme verloren.
Die mechanischen Bremsen werden weniger beansprucht (weniger Verschleiß).
Beim Bremsen entsteht kein Feinstaub.

2

3.1.2 Dieseltriebwagen



H₂-Triebwagen



3.1.3 Einbau eines Akkus, damit Bremsenergie zurückgewonnen werden kann.
Verwendung von regenerativ erzeugtem Biokraftstoff.
Einbau eines Akkus damit der Lastpunkt des Dieselmotors hin zu einem besseren Wirkungsgrad verschoben werden kann.
Lange Nutzungsdauer, um CO₂ bei der Herstellung und Entsorgung zu vermeiden.

2

3.1.4 Ausstoß von Stickoxiden, Ausstoß von Feinstaub, Lärmbelastung

1

3.1.5 Tank-2-wheel-Betrachtungen

2

1. Möglichkeit

Die Behauptung stimmt dann, wenn die Erzeugung und der Transport des Wasserstoffs nicht betrachtet werden. Weiterhin dürfen Wartungsarbeiten und Hilfsstoffe (Öle und Fette) nicht berücksichtigt werden. Das heißt, die Systemgrenzen sind so zu legen, dass nur der bereits voll getankte und frisch gewartete Triebwagen betrachtet wird.

2. Möglichkeit:

Die Behauptung stimmt, wenn für die Erzeugung und den Transport des Wasserstoffs nur regenerative CO₂-freie Primärenergieträger eingesetzt werden. Weiterhin müssen Wartungsarbeiten CO₂-frei erfolgen, z.B. in einer Werkstatt mit Ökostrom. Gleiches gilt für Hilfsstoffe. Die Systemgrenzen können dann die Bereitstellung des Wasserstoffs und die Wartung mit einschließen.

3.1.6
$$W_{\text{Tank}} = 2 \cdot V \cdot H_i = 2 \cdot \frac{m}{\rho} \cdot H_i = 2 \cdot \frac{90 \text{ kg}}{0,0899 \text{ kg/m}^3} \cdot 3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} = 6 \text{ MWh}$$

2

3.1.7 $\eta_{\text{Elektrolyseur}} = \frac{0,66}{0,94} = 0,70$ $\eta_{\text{Brennstoffzelle}} = \frac{0,30}{0,60} = 0,50$ 2

3.1.8 H₂-Triebwagen: $m_{\text{CO}_2, \text{H}_2, 1\text{km}} = \frac{4890 \text{ kg}}{900 \text{ km} \cdot 280 \text{ Personen}} = 19,4 \frac{\text{g}}{\text{km} \cdot \text{Person}}$ 3

Dieseltriebwagen: $m_{\text{CO}_2, \text{Diesel}, 1\text{km}} = \frac{80 \text{ L} \cdot 3,3 \text{ kg/L}}{100 \text{ km} \cdot 370 \text{ Personen}} = 7 \frac{\text{g}}{\text{km} \cdot \text{Person}}$

3.1.9 Der Wirkungsgrad der Wasserstofferzeugung bis zur Speicherung beträgt nur 60 %. Daher muss sehr viel elektrische Energie (10MWh) aufgewendet werden. Im deutschen Strommix wird dazu auch die Kohleverstromung eingesetzt, deren Verbrennung sehr viel CO₂ erzeugt. Beim dieselektrischen Antrieb ist der Gesamtwirkungsgrad offenbar größer, weshalb die Verbrennung insgesamt weniger CO₂ emittiert. 3

Wird der Wasserstoff jedoch regenerativ erzeugt, so ist der CO₂-Ausstoß des Dieseltriebwagens höher.

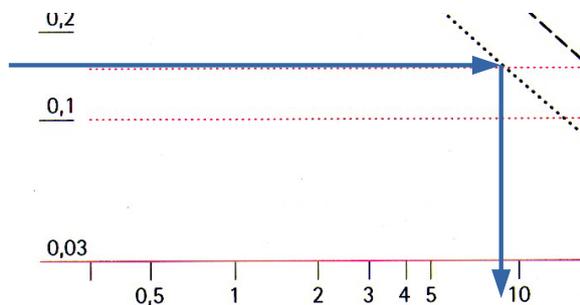
3.2 Behaglichkeit und Klimatisierung im Großraumbüro

3.2.1 Mit zunehmender CO₂-Konzentration der Raumluft verringert sich die Konzentrationsfähigkeit; die Ermüdung nimmt zu und die Arbeitsfähigkeit nimmt ab. 3

Z. B. Niedere Wandtemperatur verursacht Konvektion → Zegerscheinung, niedere Luftfeuchtigkeit verursacht trockene Schleimhäute,

3.2.2 Ermittlung der Außenluft rate: max. zulässige CO₂-Konzentration ==> Außenluft rate 9 m³/Person

$$\dot{V}_{\text{Außenluft}} = 20P \cdot 9 \frac{\text{m}^3}{\text{h} \cdot P} = 180 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$



3.2.3 Luftwechselrate $\beta = \frac{\dot{V}}{V} = \frac{200 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{150 \text{ m}^3} = 1,33 \frac{1}{\text{h}}$ 3

aus h,x-Diagramm: $\rho_i \approx 1,18 \text{ kg/m}^3$, $\rho_a \approx 1,14 \text{ kg/m}^3$

damit: $m_i = 1,18 \text{ kg/m}^3 \times 200 \text{ m}^3/\text{h} = 236 \text{ kg/h}$,

$m_a = 1,14 \text{ kg/m}^3 \times 200 \text{ m}^3/\text{h} = 228 \text{ kg/h}$

Unterschied zwischen den beiden Werten: Luft hat bei höheren Temperaturen durch zunehmende Teilchenbewegung eine geringere Dichte. Bei gleichem Volumenstrom ist daher der Massenstrom kleiner als der der kalten Luft.

3.2.4 $m_{\text{Wasser}} = (x_a - x_i) \cdot \dot{m}$ 2

$$m_{\text{Wasser}} = (8,5 - 8) \frac{\text{g}}{\text{kg}} \cdot 230 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 115 \frac{\text{g}}{\text{h}}$$

4 Wahlaufgabe zu Wärmepumpe, Abgasreinigung, Pumpspeicherkraftwerk

Punkte

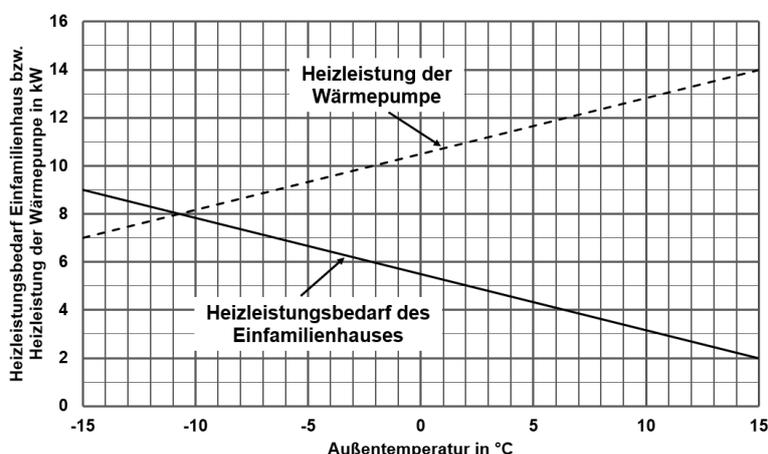
4.1 Wärmepumpe

4.1.1 Zwei von folgenden Wärmequellen:

2

Umweltwärme-Quelle	Temperaturniveau	Temperaturkonstanz
Umgebungsluft	in Mitteleuropa ca. 35 °C bis -10 °C	Temperatur schwankt stark (abhängig von Jahreszeit, Tag-Nacht-Zyklus, Bewölkung...)
Grundwasser	Temperatur \approx Boden-Temperatur	Temperatur über das Jahr gesehen nahezu konstant
Boden	ca. 10 °C	Temp. über das Jahr nahezu konstant

4.1.2



4

Bei einer Außentemperatur über -10,5 °C ist die Heizleistung der Wärmepumpe größer als der Heizleistungsbedarf. Die Wärmepumpe kann dann als einziger Wärmeerzeuger dienen.

4.1.3 Die Kurve gibt an, an wie vielen Tagen im Jahr welche Außentemperatur unterschritten wird.

2

Beispiel „A“: An 250 Tagen im Jahr ist die Außentemperatur 15 °C oder geringer.

4.1.4 An 250 Tagen im Jahr ist die Heizgrenztemperatur von 15 °C unterschritten. An 50 Tagen im Jahr ist die Temperatur unterhalb 0 °C, die Wärmepumpe geht außer Betrieb. D. h. an 200 Tagen im Jahr deckt die Wärmepumpe den Heizwärmebedarf ab.

2

4.2 Rauchgasreinigung im Kohlekraftwerk

4.2.1 Elektrofilter: Entfernung von Staubpartikeln;
Rauschgasentschwefelungsanlage: benötigt Kalkmilch, Entfernung von Schwefeldioxid; SCR-Katalysator: benötigt Ammoniaklösung, Entfernung von Stickoxiden.

3

4.2.2 Der verfahrenstechnische Vorteil beruht darauf, dass Stäube aus dem Gasstrom entfernt sind, bevor der Gasstrom in die Entstickung gelangt und somit eine vergleichsweise hohe Standzeit des Katalysators erreicht wird. Außerdem wird in der Rauchgasentschwefelungsanlage SO₂ entfernt, so dass im Katalysator keine unerwünschten Nebenreaktionen stattfinden.
An der mit „?“ gekennzeichneten Stelle muss eine Erwärmung des Gasstromes durchgeführt werden, so dass die für den Betrieb des Katalysators erforderliche Temperatur vorhanden ist.

3

4.2.3 Steinkohle:

$$Q_{B,i,SK} = \frac{Q}{\eta_{i,SK}} = \frac{1.540.000 \text{ kWh}}{0,46} = 3.347.826,1 \text{ kWh}$$

$$m_{SK} = \frac{Q_{B,i,SK}}{H_{i,SK}} = \frac{3.347.826,1 \text{ kWh}}{8 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = 418.478,3 \text{ kg}$$

$$m_{CO_2,SK} = m_{SK} \cdot m_{\text{spez}, CO_2, SK} = 418.478,3 \text{ kg} \cdot 7,2 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg}} = 3.013,04 \text{ Mg}$$

Braunkohle:

$$Q_{B,i,BK} = \frac{Q}{\eta_{i,BK}} = \frac{1.540.000 \text{ kWh}}{0,43} = 3.581.395,3 \text{ kWh}$$

$$m_{BK} = \frac{Q_{B,i,BK}}{H_{i,BK}} = \frac{3.581.395,3 \text{ kWh}}{5,5 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = 651.162,8 \text{ kg}$$

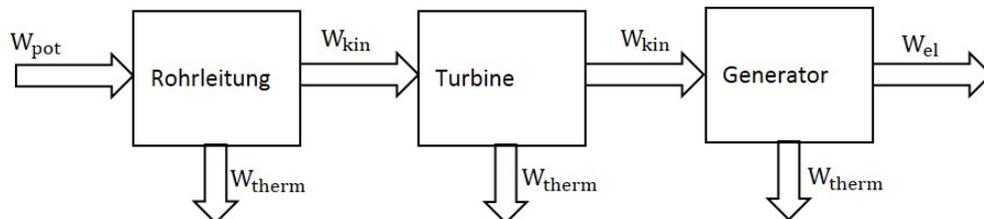
$$m_{CO_2,BK} = m_{BK} \cdot m_{\text{spez}, CO_2, BK} = 3581395,3 \text{ kg} \cdot 6,6 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg}} = 4297,67 \text{ Mg}$$

$$\frac{m_{CO_2,BK} - m_{CO_2,SK}}{m_{CO_2,SK}} = \frac{4.297,67 \text{ Mg} - 3.013,04 \text{ Mg}}{3.013,04 \text{ Mg}} = 0,426$$

Der CO₂-Ausstoß ist um 42,6 % höher.

4.3 Pumpspeicherkraftwerk

4.3.1



4.3.2

$$\eta_{\text{Generator}} = \frac{P_{\text{el}}}{P_{\text{fließ}} \cdot \eta_{\text{Turbine}}} = \frac{147 \text{ MW}}{180 \text{ MW} \cdot 0,87} = 0,94$$

4.3.3

$$W_{\text{hydro}} = \rho_{\text{Wasser}} \cdot V \cdot g \cdot h = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 115.000 \text{ m}^3 \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 600 \text{ m} = 677,0 \text{ GJ} = 188.025 \text{ kWh}$$

$$P_{\text{hydro}} = \frac{W_{\text{hydro}}}{t} = \frac{188 \text{ MWh}}{1 \text{ h}} = 188 \text{ MW}$$

$$P_{\text{elektr}} = \frac{P_{\text{hydro}}}{\eta_{\text{Pumpe}} \cdot \eta_{\text{Rohr}}} = \frac{188 \text{ MW}}{0,89 \cdot 0,94} = 225 \text{ MW}$$

4.3.4

$$V_{\text{Ring}} = l \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} = 15.000 \text{ m} \cdot \pi \cdot \frac{(7,14 \text{ m})^2}{4} = 600.589 \text{ m}^3$$

$$W_{\text{el}} = \rho \cdot V \cdot g \cdot h \cdot \eta_{\text{Rohr}} \cdot \eta_{\text{Turbine}} \cdot \eta_{\text{Generator}} = 2.718 \text{ GJ} \text{ oder } 754,9 \text{ MWh}$$

4

2

2

3

3

30

TG Umwelttechnik**Abitur 2019/2020****Lösungsvorschlag der Übung**

Arbeitszeit:	270 Minuten	
Hilfsmittel	Formelsammlung Umwelttechnik Zugelassener Taschenrechner	
Stoffgebiet	Teil 1: Pflichtbereich	
	Aufgabe 1: Photovoltaik Elektromobilität Energiespeicher	(3 Seiten)
	Aufgabe 2: Gebäudehülle Brennwerttechnik	(3 Seiten)
	Teil 2: Wahlbereich	
	Aufgabe 3: Wind- und Wasserkraft Ökobilanz Pumpspeichersystem Abgasreinigung	(3 Seiten)
	Aufgabe 4: Solarthermisches Kraftwerk Bewertung von PV-Modulen	(3 Seiten)

1 Pflichtaufgabe zu Photovoltaik, Elektromobilität, Energiespeicher

Punkte

1.1 Photovoltaik

1.1.1 Die Solarzellen benötigen jeweils einen MPP-Tracker für Heckklappe, Dach, Motorhaube, linke und rechte Tür. Das ist notwendig, da die Bestrahlungsstärken sich für die Flächen unterscheiden und damit unterschiedliche MPPs berücksichtigt werden müssen.

2

1.1.2 Die 308 Solarzellen können auf Grund der Fahrzeuggeometrie nie gleichzeitig ideal beleuchtet werden. Daher ist die tatsächliche Gesamtleistung nicht das 308-fache der Maximalleistung einer Solarzelle.

1

1.1.3 $A_{Zelle} = 0,156 m \cdot 0,156 m = 0,024336 m^2$

2

$$P_{ab} = \eta_{Zelle} \cdot P_{zu} = 0,24 \cdot 1000 \frac{W}{m^2} \cdot 0,024336 m^2 = 5,84 W$$

1.1.4 $W = W_{max} \cdot \frac{s}{s_{max}} = 29,4 kWh \cdot \frac{30 km}{250 km} = 3,528 kWh$

2

$$P_{el} = \frac{W}{t} = \frac{3,528 kWh}{11 h} = 320,7 W$$

1.2 Elektromobilität

1.2.1 Aus Diagramm: bei 2 % Steigung und 45 km/h: $P_{mech} = 10 kW$

1

1.2.2 $P_{ab Motor} = 10 kW, P_{zu Motor} = \frac{P_{ab Motor}}{\eta_{Motor}} = \frac{10 kW}{0,7} = 14,3 kW$

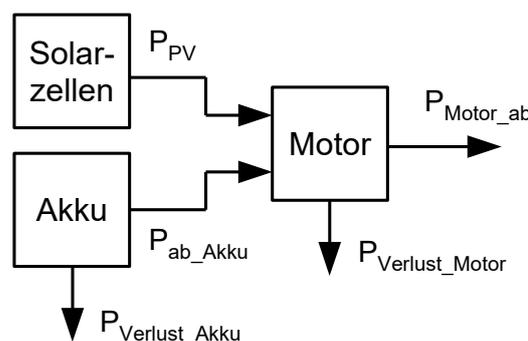
4

$$P_{Verlust Motor} = P_{zu Motor} - P_{ab Motor} = 14,3 kW - 10 kW = 4,3 kW$$

$$P_{ab Akku} = P_{zu Motor} - P_{Solar} = 14,3 kW - 1,2 kW = 13,1 kW$$

$$P_{Akku} = \frac{P_{ab Akku}}{\eta_{Akku}} = \frac{13,1 kW}{0,84} = 15,6 kW$$

$$P_{Verlust Akku} = P_{Akku} - P_{ab Akku} = 15,6 kW - 13,1 kW = 2,5 kW$$



- 1.2.3 Für den elektrischen Antrieb stehen $W_{\text{akku}} \cdot \eta$ zur Verfügung. 2
- $$t = \frac{W}{P} = \frac{W_{\text{akku}} \cdot \eta}{13,1 \text{ kW}} = \frac{29,4 \text{ kWh} \cdot 0,84}{13,1 \text{ kW}} = 1,885 \text{ h}$$
- $$s = v \cdot t = 45 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 1,885 \text{ h} = 84,8 \text{ km}$$
- 1.2.4 $P_{\text{ab Motor}} = \frac{P_{\text{Solar}}}{\eta_{\text{Motor}}} = \frac{1,2 \text{ kW}}{0,833} = 1,0 \text{ kW}$ 2
- Aus Kennlinie bei 0%: $v = 12 \text{ km/h}$
- 1.2.5 $\eta = \frac{W_{\text{Nutz Akku}}}{P_{\text{zu laden}} \cdot t} \quad \eta = \frac{29,4 \text{ kWh}}{11 \text{ kW} \cdot 3,5 \text{ h}} = 0,76$ 3
- $$\text{Kosten} = \frac{11 \text{ kW} \cdot 3,5 \text{ h} \cdot 0,30 \text{ €} \cdot 100 \text{ km}}{250 \text{ km}} = 4,62 \text{ €}$$
- 1.3 Energiespeicher**
- 1.3.1 $\text{Energiedichte} = \frac{W}{V} = \frac{0,215 \text{ kWh}}{0,15 \text{ dm} \cdot 1 \text{ dm} \cdot 3 \text{ dm}} = 0,478 \frac{\text{kWh}}{\text{L}}$ 2
- Viel geringer als der Heizwert von Diesel mit $10 \frac{\text{kWh}}{\text{L}}$
- 1.3.2 $n_{\text{Zellen}} < \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{max Zelle}}} \quad n_{\text{Zellen}} < \frac{400 \text{ V}}{4,2 \text{ V}} \quad n_{\text{Zellen}} < 95,2$ 2
- Bei 162 Zellen werden jeweils 81 Zellen in Reihe geschaltet. Die beiden Reihenschaltungen werden dann parallel geschaltet.
- 1.3.3 $P_{\text{max}} = 81 \cdot U_{\text{Nenn}} \cdot 2 \cdot I_{\text{max}} = 81 \cdot 3,6 \text{ V} \cdot 2 \cdot 120 \text{ A} = 70,0 \text{ kW}$ 2
- 1.3.4 Während eines Zyklus des neuen Akkus fährt das Fahrzeug ungefähr 250 km. Während eines Zyklus des gealterten Akkus fährt das Fahrzeug nur noch 80 % davon, also 200 km. Im Mittel sind das also 225 km pro Zyklus. Über 1000 Zyklen sind das also 225 000 km. 2
- 1.3.5 Bei Einsatz einer größeren Batterie werden mehr Rohstoffe benötigt und die Kosten steigen. (Ein Großteil der anfallenden Fahrten kann ohne Einschränkung auch mit kleinem Akku durchgeführt werden.) Bei kleinerem Akku werden Rohstoffe eingespart, ebenso Energie und CO₂. Jedoch ergibt sich beim kleineren Akku ein höherer Verschleiß, da dieser öfter aufgeladen werden muss. Andererseits wird weniger Fortbewegungsenergie benötigt, da der kleine Akku leichter ist. Insgesamt fällt die Umweltbilanz eines kleinen Akkus deutlich besser aus. 3

2 Pflichtaufgabe zu Gebäudehülle und Brennwerttechnik

2.1 Gebäudehülle

2.1.1 Überschlägige Berechnung der Außenflächen (A/V Verhältnis)

3

$$A_A = 18\text{m} \cdot 6\text{m} \cdot 2 + 18\text{m} \cdot 5\text{m} \cdot 2 + 6\text{m} \cdot 5\text{m} \cdot 2 = 456\text{m}^2$$

$$A_B = 12\text{m} \cdot 9\text{m} \cdot 2 + 12\text{m} \cdot 5\text{m} \cdot 2 + 9\text{m} \cdot 5\text{m} \cdot 2 = 426\text{m}^2$$

Bei identischem Gebäudevolumen (12 Module a 45 m³) weist die Variante B die kleinere Außenfläche auf. Daraus resultieren geringere Transmissionswärmeverluste in der kalten Jahreszeit. Sie ist daher energetisch betrachtet die bessere Option.

Hinweis: Die Kontaktfläche zur Außenluft ist bei beiden Anordnungen identisch. Die Bodenkontaktfläche von Variante B ist aber geringer.

2.1.2 Der U-Wert gibt an, welcher Wärmestrom pro 1 m² und 1 K Temperaturdifferenz durch ein Bauteil durchgeleitet wird. Insofern ist ein kleiner Wert besser, denn je kleiner der Wert, umso weniger Wärme geht „verloren“.

2

2.1.3 Bestimmung des Wärmedurchgangswiderstands R_T

4

$$R_T = \frac{1}{U} = \frac{1}{0,21} \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 4,762 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Bestimmung der Dämmschichtdicke

$$R_T = R_{si} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_{HF}}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + R_{se}$$

$$d_{HF} = \lambda_3 \cdot \left(R_T - R_{si} - \frac{d_1}{\lambda_1} - \frac{d_2}{\lambda_2} - \frac{d_4}{\lambda_4} - R_{se} \right)$$

$$d_{HF} = 0,045 \frac{\text{W}}{\text{mK}} \cdot (4,762 - 0,13 - 0,05 - 0,92 - 0,33 - 0,043) \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 0,148 \text{ m}$$

Die Holzfaserdämmplatte sollte ca. 15 cm dick sein.

2.1.4 Kurvenverlauf Außenluft: Temperatur schwankt zwischen 35 °C um 15 Uhr und 15 °C um 3 Uhr nachts.

3

Kurvenverlauf Innenluft: Temperatur schwankt zwischen 23°C um 12 Uhr und 27°C um 2 Uhr nachts.

Die Temperaturhöchstwerte sind um ca. 11 h versetzt. Man spricht hier von einer Phasenverschiebung. Die Differenz der Höchst- bzw. Tiefstwerte zwischen Innen- und Außenluft betragen ca. 12 K. Man spricht hier von einer Amplitudendämpfung. Die Wärme der Außenluft wird von der Innenseite der Wand aufgenommen, dies führt zu der Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung der Innenluft.

2.1.5 Bei einer innen gedämmten Wand befinden sich keine massigen Bauteile auf der Rauminnenseite. Daher hat sie eine geringere Wärmespeicherfähigkeit, es wird weniger Wärme aufgenommen. Die Raumtemperatur hat fast den gleichen Verlauf wie die Außenlufttemperatur (hohe Temperaturschwankungen, geringere Amplitudendämpfung, kaum Phasenverschiebung).

2

2.1.6 Abgelesen: 27° C. Mit Diagramm FS S. 15: Die Temperatur liegt in jedem Fall (unabhängig von der Luftfeuchte) außerhalb des behaglichen Bereichs, es ist zu warm.

1

2.2 Brennwerttechnik

- 2.2.1 Das Abgas bei der Verbrennung von Erdgas enthält Wasserdampf. Durch die Kondensation dieses Wasserdampfes kann Kondensationswärme gewonnen und nutzbar gemacht werden. Beim Niedertemperatur-Heizkessel gibt es im Gegensatz zum Brennwertkessel keine Kondensationswärmenutzung (weil der Taupunkt nicht unterschritten wird), daher ist der Kondensationswärmeverlust wesentlich höher.

Der Wärmegehalt des Abgases ist beim Niedertemperatur-Heizkessel durch die höhere Abgastemperatur höher als beim Brennwertkessel. Dadurch hat der Brennwertkessel geringere Abgasverluste.

- 2.2.2 aus dem Diagramm FS S. 6 folgt: $\eta_{Ki} = 107,5 \%$ 3

$$Q_{Bi} = \frac{Q_{th}}{\eta_{Ki}} = \frac{12.000 \text{ kWh}}{107,5 \%} = 11.162,79 \text{ kWh}$$

$$V_B = \frac{Q_{Bi}}{H_i} = \frac{11.162,79 \text{ kWh}}{10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} = 1.116,28 \text{ m}^3$$

- 2.2.3 Der (abgekühlte) Heizungsrücklauf trifft auf den heißesten Bereich des Wärmetauschers. Das Abgas kann daher nicht unter den Taupunkt abgekühlt werden; es ist unwahrscheinlich, dass bei dieser Anlage ein Brennwerteffekt auftritt. 3

Zur Lösung des Problems muss der Heizungsrücklauf an den Wärmetauscher 2 und der Heizungsvorlauf an den Wärmetauscher 1 angeschlossen werden. Somit strömt im Wärmetauscher 2 kälteres Rücklaufwasser durch die Rohrleitung, und es kann zur Kondensation des Wasserdampfes im Abgas und damit zur Brennwertnutzung kommen.

- 2.2.4 Erdgas treibt einen Verbrennungsmotor an, der mittels eines Generators elektrische Energie liefert. Die „Abwärme“ liefert thermische Energie. „Wärmegeführt“ heißt, dass das BHKW betrieben wird, sobald Wärmebedarf besteht. 2

- 2.2.5 $Q_B = \frac{W_{el}}{\eta_{el}} = \frac{4800 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}}{0,5} = 9600 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$ 4

$$Q_{th} = Q_B \cdot \eta_{th} = 9600 \frac{\text{kWh}}{\text{a}} \cdot 0,35 = 3360 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$$

$$\text{Anteil am Wärmebedarf: } \frac{3360 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}}{18\,400 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}} = 0,183$$

3 Wahlaufgabe zu Wind- und Wasserkraft, Ökobilanz, Rauchgasreinigung

3.1 Wind- und Wasserkraft

- 3.1.1 Bei sich ändernden Windgeschwindigkeiten schwankt die abgegebene Leistung des Windparks. Diese Schwankungen können verringert werden. 2

Stehen für den Abtransport der erzeugten Energie nicht genügend Übertragungskapazitäten zur Verfügung, so müsste der Windpark abgeregelt werden. Mit Speichern geht diese Energie nicht verloren.

Lastspitzen, d.h. kurze Zeiten mit erhöhtem Strombedarf, können von den Speichern zuverlässig und windunabhängig ausgeglichen werden.

Die Kombination von Windpark und Speicher kann verlässlicher ins Stromnetz integriert werden. Es können auch Systemdienstleistungen (Minutenreserve) bereitgestellt werden.

- 3.1.2 $W_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot h = \rho \cdot V \cdot g \cdot h = \rho \cdot 4/3 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot g \cdot h$ 3

$$W_{\text{pot}} = 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 4/3 \cdot \pi \cdot (15 \text{ m})^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 \cdot 500 \text{ m} = 19,26 \text{ MWh}$$

- 3.1.3 $t = \frac{W_{\text{pot}}}{P_{\text{hydraulisch, Pumpe}}} = \frac{19,26 \text{ MWh}}{5 \text{ MW}} = 3,85 \text{ h}$ 1

- 3.1.4 Aus Diagramm: $P_{\text{elektrisch}} = 1500 \text{ kW}$, $c_p = 0,49$ 4

$$P_{\text{Wind}} = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 = 0,5 \cdot 1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot \pi \cdot (41 \text{ m})^2 \cdot (10 \text{ m/s})^3 = 3,17 \text{ MW}$$

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{Wind}} \cdot c_p = 3,17 \text{ MW} \cdot 0,49 = 1,55 \text{ MW}$$

$$\eta_{\text{Generator}} = \frac{P_{\text{elektrisch}}}{P_{\text{mech}}} = \frac{1,50 \text{ MW}}{1,55 \text{ kW}} = 0,97$$

- 3.1.5 Aus Diagramm: Leistung einer WKA: $P_{\text{elektrisch, WKA}} = 2 \text{ MW}$ 2

Gesamtleistung des Windparks:

$$P_{\text{elektrisch, WKA, gesamt}} = n_{\text{WKA}} \cdot P_{\text{elektrisch, WKA}} = 72 \cdot 2 \text{ MW} = 144 \text{ MW}$$

$$P_{\text{elektrisch, Speicher}} = P_{\text{elektrisch, WKA, gesamt}} - P_{\text{elektrisch Abgabe}} = 144 \text{ MW} - 50 \text{ MW} = 94 \text{ MW}$$

- 3.1.6 $t = \frac{W_{\text{Speicher}} \cdot 0,5}{(P_{\text{elektrisch, Speicher}} \cdot \eta_{\text{Pumpe}} \cdot \eta_{\text{Motor}})} = \frac{80 \cdot 19,26 \text{ MWh} \cdot 0,5}{(94 \text{ MW} \cdot 0,82 \cdot 0,94)} = 10,63 \text{ h}$ 3

- 3.1.7 $\eta_{\text{ges}} = \eta_{\text{Generator}} \cdot \eta_{\text{Pumpe}} \cdot \eta_{\text{Turbine}} \cdot \eta_{\text{Motor}} = 0,94 \cdot 0,82 \cdot 0,82 \cdot 0,94 = 0,594 = 59,4 \%$ 2

3.2 Ökobilanz eines Pumpspeichersystems

- 3.2.1 $m_{\text{CO}_2} = W_{\text{el}} \cdot c_{\text{CO}_2} = 14.800 \text{ kWh} \cdot 0,34 \text{ kg/kWh} = 5,03 \text{ t}$ 2

- 3.2.2 Produktion der Betonkugeln, Produktion der Turbine/ Pumpe, Transport der einzelnen Komponenten zum Errichtungsort, Installation/ Verankerung der Kugel am Meeresgrund, Verkabelung der Kugel, Wartungsarbeiten während des Betriebs, Entsorgung der einzelnen Komponenten 2

3.3 Abgasreinigung beim Diesel-PKW, AdBlue-Verbrauch

3.3.1 Im Oxidationskatalysator reagieren alle oxidierbaren Substanzen (z. B.: Kohlenwasserstoffe HC, Kohlenstoffmonoxid CO; Stickstoffmonoxid NO) mit Sauerstoff, z. B. $2 \text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}_2$, $2 \text{NO} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{NO}_2$

3.3.2 Der SCR-Katalysator ist erforderlich, weil die Reaktion von Harnstofflösung (bzw. NH_3) mit NO_2 sonst sehr hohe Temperaturen benötigt. Der Katalysator würde durch die Partikel verstopft, daher muss der Filter vorher eingebaut werden.

3.3.3 NO_2 ist ein Reizgas, das die Atemwege belastet. Außerdem ist es Vorläufersubstanz für Sommersmog (Ozon) und sauren Regen. (Weitere mögliche Antworten: Düngereintrag, dadurch Störung von Ökosystemen).

$$3.3.4 \quad m(\text{NO}_2, \text{gemindert}) = 1630 \text{ km} \cdot \left(0,85 \frac{\text{g}}{\text{km}} - 0,08 \frac{\text{g}}{\text{km}}\right) = 1255 \text{ g}$$

$$n(\text{NO}_2) = \frac{m(\text{NO}_2)}{M(\text{NO}_2)} = \frac{1255 \text{ g}}{46 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 27,28 \text{ mol}$$

$$n(\text{NH}_3) = \frac{8}{6} \cdot n(\text{NO}_2) = 36,38 \text{ mol}$$

$$m(\text{NH}_3) = M(\text{NH}_3) \cdot n(\text{NH}_3) = 17 \frac{\text{g}}{\text{mol}} \cdot 36,38 \text{ mol} = 618 \text{ g}$$

$$V(\text{Harnstoff}) = \frac{618 \text{ g}}{200 \frac{\text{g}}{\text{Liter}}} = 3,1 \text{ Liter}$$

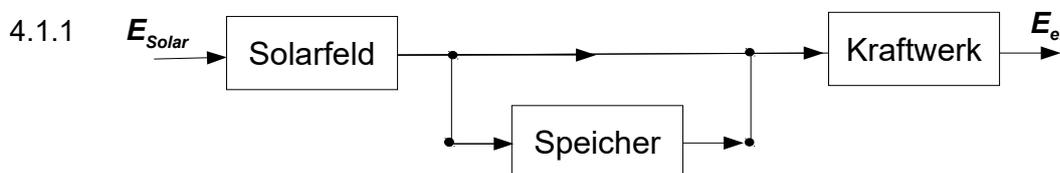
2

3

1

3

30

4 Wahlaufgabe zu Solarthermischem Kraftwerk, Bewertung von PV-Modulen**4.1 Solarthermisches Kraftwerk**

1

4.1.2 Der Speicher dient dazu, überschüssige Energie für den Kraftwerksbetrieb beispielsweise an bedeckten Tagen und in Nachtstunden zu speichern.

1

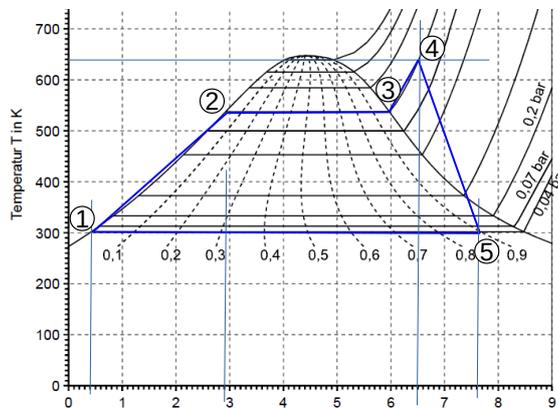
4.1.3 **Solarturm-Kraftwerk:** Die auf das Heliostatfeld auftreffenden Sonnenstrahlen werden auf den Receiver reflektiert und erhitzen dort ein Gas. Über einen WT gibt das erhitze Gas Wärmeenergie zur Dampferzeugung ab.

3

Parabolrinnenkraftwerk: Die eintreffenden Sonnenstrahlen werden in der Parabolrinne auf das Absorberrohr reflektiert und erhitzen die Absorberflüssigkeit.

4.2 Elektrische Energieerzeugung

4.2.1



2

4.2.2 Durch den hohen Anteil flüssiger Wassertropfen im entspannten Dampf werden die Turbinenschaufeln im hohen Maße belastet.

1

$$q_{zu} = \frac{(300 + 540) \text{ K}}{2} \cdot \left(2,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - 0,4 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) + \left(6,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - 2,9 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) \cdot 540 \text{ K}$$

$$+ \frac{(640 + 540) \text{ K}}{2} \cdot \left(6,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - 6,0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) = 1050 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1674 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 295 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 3019 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$w_{\text{Nutz}} = q_{zu} - q_{ab} = 859 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}, \quad \eta_{\text{th}} = \frac{w_{\text{Nutz}}}{q_{zu}} = \frac{859 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3019 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,285 = 28,5 \%$$

4

4.3 Speicher-Betrieb:

4.3.1 $\eta_{\text{Speicherbetrieb}} = \eta_{\text{Speicher-WT}} \cdot \eta_{\text{Dampferzeuger}} \cdot \eta_{\text{Turbine}} \cdot \eta_{\text{Generator}} = 0,92 \cdot 0,88 \cdot 0,7 \cdot 0,9 = 0,51$

3

$$t = \frac{Q_{\text{Speicher}} \cdot \eta_{\text{Speicherbetrieb}}}{Q} = \frac{650 \text{ MWh} \cdot 0,51}{50 \text{ MW}} = 6,6 \text{ h}$$

4.3.2

$$A_{\text{Solar, erforderlich}} = \frac{Q_{\text{Speicher}}}{E \cdot t \cdot \eta_{\text{Solarfeld}} \cdot \eta_{\text{Speicher-WT}}}$$

$$A_{\text{Solar, erforderlich}} = \frac{650 \text{ MWh} + 3 \text{ h} \cdot 50 \text{ MW}}{900 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 3 \text{ h} \cdot 0,35 \cdot 0,92} = 0,92 \cdot 10^6 \text{ m}^2 = 0,92 \text{ km}^2$$

3

Die vorhandene Fläche ist nicht ausreichend.

4.3.3

$$m = \frac{Q}{c \cdot \Delta T} = \frac{650 \text{ MWh} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}}{1,55 \frac{\text{MJ}}{\text{MgK}} \cdot (367 - 292) \text{ K}} = 20.129 \text{ Mg} = 20.129 \text{ t}$$

2

4.4 Bewertung von PV-Modulen

4.4.1 $W_{\text{Jahr}} = 365 \text{ d} \cdot A_{\text{PV}} \cdot \frac{H_h}{1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} \cdot K_{\alpha, \beta} \cdot \eta_{\text{PV}} = 365 \text{ d} \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot \frac{2,98 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}}{1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} \cdot 1,16 \cdot 0,25 = 315 \text{ kWh}$

2

alternativ: aus Diagramm FS S. 27: jährliche Einstrahlung für optimale Neigung und Ausrichtung in Berlin: 1241 kWh(m²a).

$$\text{Ertrag } W_{\text{Jahr}} = 1.241 \frac{\text{kWh}}{0,25} = 310 \text{ kWh}$$

$$t = \frac{W_{\text{Herst.}}}{W_{\text{Jahr}}} \cdot 1 \text{ a} = \frac{2.110 \text{ kWh}}{315 \text{ kWh}} \cdot 1 \text{ a} = 6,70 \text{ a}$$

- 4.4.2 - Südausrichtung der Module
 - günstiger Neigungswinkel der Module
 - sonnenreicher Standort
 - keine Verschattungen

1,5

4.4.3 Für die Herstellung eines Moduls benötigt: $m_{\text{CO}_2} = 1,6 \text{ m}^2 \cdot 1,5 \frac{\text{t}}{\text{m}^2} = 2,4 \text{ t}$

4

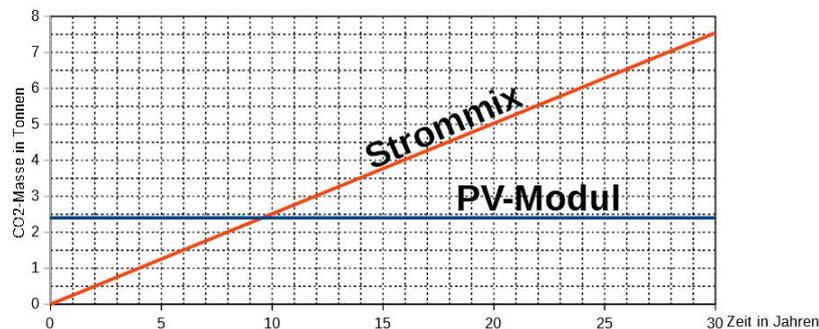
Dieses Modul erzielt über 30 Jahre den folgenden Ertrag:

$$W_{30 \text{ Jahre}} = 30 \cdot 365 \text{ d} \cdot A_{\text{PV}} \cdot \frac{H_h}{1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} \cdot K_{\alpha, \beta} \cdot \eta_{\text{PV}} = 365 \text{ d} \cdot 1,6 \text{ m}^2 \cdot \frac{2,98 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}}{1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} \cdot 1,16 \cdot 0,25$$

$$= 15.141 \text{ kWh}$$

Für diese Energiemenge gilt bei aktuellem Strommix:

$$m_{\text{CO}_2, 30 \text{ Jahre}} = W_{30 \text{ Jahre}} \cdot 0,498 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = 15.141 \text{ kWh} \cdot 0,498 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} = 7.540 \text{ kg} = 7,54 \text{ t}$$



4.4.4 Für 1 Modul: $W_{30 \text{ Jahre}} = 15.141 \text{ kWh}$ $m_{\text{CO}_2} = 1,6 \text{ m}^2 \cdot 1,5 \frac{\text{t}}{\text{m}^2} = 2,4 \text{ t}$

2,5

$$\frac{2,4 \text{ t}}{15141 \text{ kWh}} = \frac{2.400.000 \text{ g}}{15.141 \text{ kWh}} = 158 \frac{\text{g}}{\text{kWh}}$$

Verglichen mit dem aktuellen Strommix in Deutschland, bei dem 498 g/kWh CO₂ ausgestoßen werden, ist das gering. Photovoltaik spart also CO₂.

Zusatzinformation (nicht erwartet): Würde man bei den PV-Modulen allerdings auch die Entsorgung in die Bilanz mit einbeziehen, wäre die CO₂-Einsparung geringer. Die CO₂-Einsparung wäre auch geringer, wenn der aktuelle Strommix mit weniger CO₂-Ausstoß verbunden wäre. Bis das allerdings so weit ist, wird die Herstellung der Module sicher auch mit geringeren CO₂-Emissionen möglich sein.

TG Umwelttechnik

Abitur 2020/2021

Hauptprüfung

Lösungsvorschlag

Arbeitszeit 270 Minuten
Hilfsmittel Formelsammlung Umwelttechnik
Zugelassener Taschenrechner

Stoffgebiet **Teil 1: Pflichtbereich**

Aufgabe 1: Photovoltaikanlage (4 Seiten)
Laufwasserkraftwerk

Aufgabe 2: Wärmekraftwerk (3 Seiten)
Blockheizkraftwerk
Bauphysik

Teil 2: Wahlbereich

Aufgabe 3: Windkraft (3 Seiten)
Bewertung von Energiesystemen
Power-to-Gas

Aufgabe 4: Hybridfahrzeug (3 Seiten)
Abgasreinigung
Brennwerttechnik

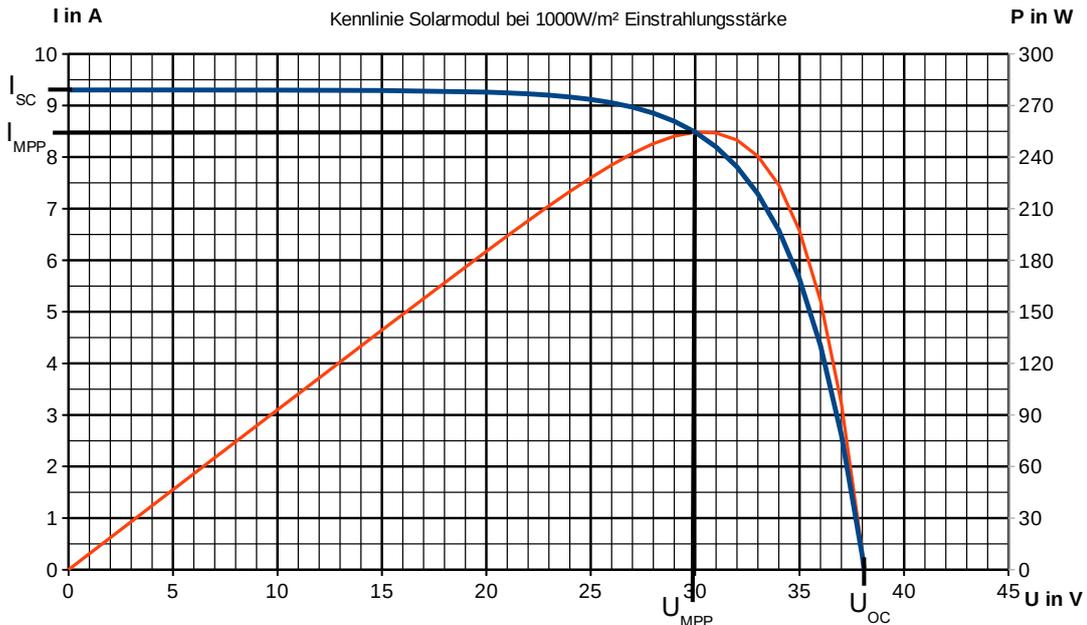
1 Pflichtaufgabe zu Photovoltaik, Laufwasserkraftwerk

Punkte

1.1 Photovoltaikanlage

1.1.1

3,5



$$P_{MPP} = U_{MPP} \cdot I_{MPP} = 30 \text{ V} \cdot 8,5 \text{ A} = 255 \text{ W}$$

$$P_{SC} = U_{SC} \cdot I_{SC} = 0 \text{ V} \cdot 9,3 \text{ A} = 0 \text{ W}$$

$$P_{OC} = U_{OC} \cdot I_{OC} = 38,1 \text{ V} \cdot 0 \text{ A} = 0 \text{ W}$$

5 Punkte: Ursprung, MPP, Leerlauf, $35 \text{ V} \cdot 5,5 \text{ A} = 192,5 \text{ W}$,
 $26,5 \text{ V} \cdot 9 \text{ A} = 238,5 \text{ W}$

1.1.2 Modulanzahl:

3

$$n = \frac{P_{ges}}{P_{MPP}} = \frac{9180 \text{ W}_P}{255 \text{ W}_P} = 36$$

Parallelschaltung von zwei Strängen mit jeweils 18 Modulen in Reihe

$U_{Strang} = 18 \cdot 30 \text{ V} = 540 \text{ V}$ liegt innerhalb des Spannungsbereichs des Ladereglers
 (400 V – 700 V)

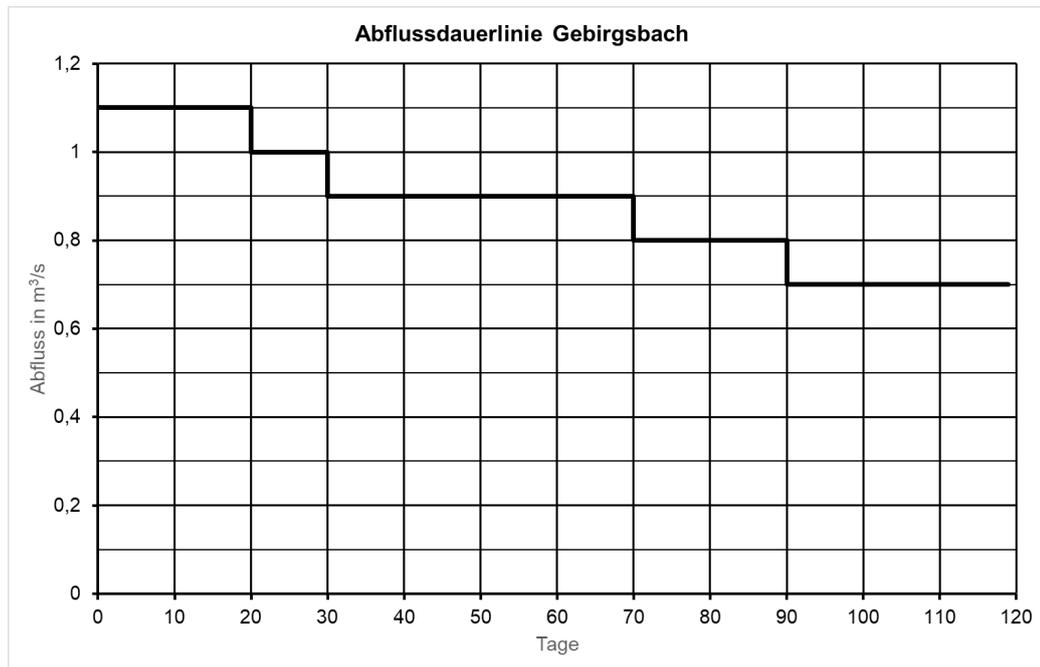
1.1.3 $A_{ges} = 36 \cdot A = 36 \cdot 1,64 \text{ m} \cdot 0,992 \text{ m} = 58,57 \text{ m}^2$

2

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{9180 \text{ W}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 58,57 \text{ m}^2} = 0,157 = 15,7\%$$

1.1.4	$W_{\text{Tag, Sept}} = P_{\text{Nenn}} \cdot \frac{H_h}{1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} \cdot k_{\alpha, \beta} = 9180 \text{ W} \cdot \frac{3,56 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}}{1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} \cdot 1,25 = 40,85 \frac{\text{kWh}}{\text{d}}$	1
1.1.5	$W_{\text{laden}} = \frac{W_{\text{Akku}}}{\eta_{\text{laden}}} = \frac{33,5 \text{ kWh}}{0,8} = 41,9 \text{ kWh}$ <p>Der Akku kann im Juli komplett aufgeladen werden, es bleiben noch $49,36 \text{ kWh} - 41,9 \text{ kWh} = 7,46 \text{ kWh}$ zur Wassererwärmung übrig.</p> <p>Im September wird der Akku nicht vollständig geladen, es fehlen $1,05 \text{ kWh}$ zur Vollladung, zur Wassererwärmung bleibt somit keine Energie übrig.</p>	3
1.1.6	<p>Im Juli wäre der Ertrag leicht höher (ca. 4 %), da der Korrekturfaktor von 0,95 auf 0,99 ansteigen würde, alle anderen Parameter bleiben konstant.</p> <p>Im September wäre der Ertrag minimal kleiner (ca. 1 %), da der Korrekturfaktor von 1,25 auf 1,24 fallen würde.</p> <p>Grund dafür ist die im Sommer höherstehende Sonne; dadurch trifft die Strahlung im Juli bei 37°-Neigung unter einem günstigeren Winkel als bei 45°-Neigung auf die Module (idealerweise senkrecht).</p>	2
1.1.7	<p>MPP-Tracking: Suche des Maximum Power Point, um optimalen Ertrag zu erhalten</p> <p>Umwandlung der Gleichspannung in eine Wechselspannung</p> <p>Netzabschaltung: trennt die PV-Anlage im Fehlerfall vom Netz, z. B. bei Netzausfall</p>	1,5
1.1.8	<p>Die maximale Leistung des Wechselrichters muss größer als die Leistung der PV-Anlage im MPP sein.</p> <p>Die maximale/minimale Eingangsspannung des Wechselrichters im MPP muss größer/kleiner sein als die MPP-Spannung eines Strings.</p> <p>Der maximale Strom des Wechselrichters muss größer sein als der Kurzschlussstrom der PV-Anlage.</p>	2
1.2	Laufwasserkraftwerk	
1.2.1	<p>Grundlast ist die niedrigste Belastung des Stromnetzes im Tages-/Jahresverlauf. Ein Kraftwerk, das diese Last kontinuierlich abdecken kann, ist grundlastfähig. Laufwasserkraftwerke erfüllen diese Bedingung, da sie im Jahresverlauf mit annähernd konstanten Volumenströmen arbeiten.</p>	2
1.2.2	$P_{\text{hydro}} = \frac{P_{\text{el}}}{\eta_{\text{ges}}} = \frac{15 \text{ kW}}{0,88} = 17 \text{ kW}$ $P_{\text{hydro}} = \rho \cdot g \cdot h \cdot \dot{V}$ $\rightarrow \dot{V} = \frac{P_{\text{hydro}}}{\rho \cdot g \cdot h} = \frac{17 \text{ kW}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2 \text{ m}} = 0,866 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$	2

1.2.3



1,5

1.2.4 Damit das Laufwasserkraftwerk seine Nennleistung abgeben kann, muss der Volumenstrom größer oder gleich $0,87 \text{ m}^3/\text{s}$ sein (siehe Aufgabe 1.2.2). Der Abflussdauerlinie ist zu entnehmen, dass dies an 70 Tagen der Fall ist.

1,5

1.2.5 Dauerhaft steht ein Volumenstrom von $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ zur Verfügung.

2

$$P_{\text{Hydro}} = \rho \cdot g \cdot h \cdot \dot{V} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2 \text{ m} \cdot 0,7 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 13,7 \text{ kW}$$

1.2.6 Würde der Ausbauabfluss auf $1,1 \text{ m}^3/\text{s}$ erhöht werden, wäre die maximale Leistung größer. Diese würde aber nur in kurzen Zeitintervallen erreicht werden. Hingegen wäre die Auslastung des Kraftwerks dauerhaft geringer. Dies hätte oft einen geringeren Wirkungsgrad zur Folge.

3

Würde der Ausbauabfluss auf $0,7 \text{ m}^3/\text{s}$ abgesenkt werden, wäre die maximale Leistung geringer. Hingegen wäre die Auslastung größer. Der Wirkungsgrad wäre dann oft größer, aber es könnten größere Anteile des zur Verfügung stehenden Wassers nicht genutzt werden.

30

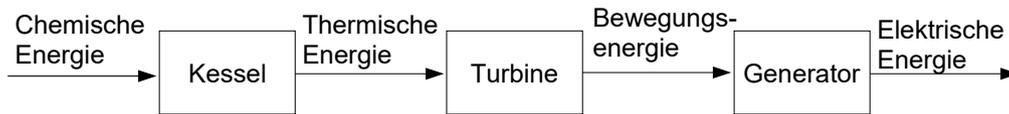
2 Pflichtaufgabe zu Wärmekraftwerk, Blockheizkraftwerk und Bauphysik

Punkte

2.1 Wärmekraftwerk

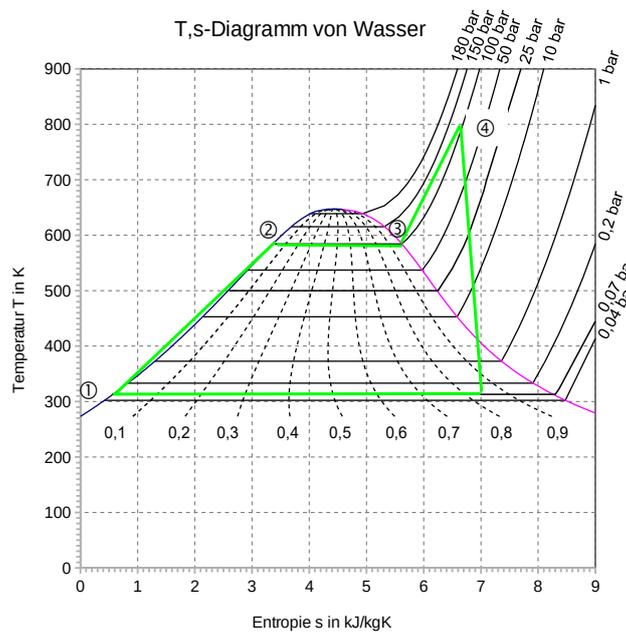
2.1.1 Energetisches Blockschaltbild:

2



2.1.2

2



2.1.3
$$q_{12} = \frac{(580\text{ K} + 315\text{ K})}{2} \cdot (3,4 - 0,5) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 1297,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

2

$$q_{23} = 580\text{ K} \cdot (5,6 - 3,4) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 1276 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{34} = \frac{(580\text{ K} + 800\text{ K})}{2} (6,7 - 5,6) \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} = 759 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{zu} = q_{12} + q_{23} + q_{34} = 1297,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 1276 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 759 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 3332,8 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

2.1.4 Thermischer Wirkungsgrad

2

$$q_{ab} = 315\text{ K} \cdot (7 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} - 0,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}) = 2047,5\text{ kJ} \quad q_{zu} = 3300 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_{th} = \frac{q_{Nutz}}{q_{zu}} = \frac{q_{zu} - q_{ab}}{q_{zu}} = \frac{3300 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2047,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3300 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,38$$

2.1.5 Wirkungsgradsteigerung z. B. durch:

2

- Erhöhung des Speisewasserdrucks vor der Turbine
- Zwischenüberhitzung und Betrieb einer weiteren Turbine
- Absenkung der/des Kondensatortemperatur /-drucks auf 300 K oder 0,04 bar
- Vorwärmung des Speisewassers über Wärmetauscher im Rauchgas

2.2 Blockheizkraftwerk

- 2.2.1 Mögliche Antworten (andere gut begründete Antworten sind zulässig) 2
- Ein im Freibad festinstalliertes BHKW bliebe im Winter ungenutzt. Ein mobiles Blockheizkraftwerk kann bei Bedarf an verschiedenen Orten eingesetzt werden. Dadurch erhöht sich die Nutzungsdauer wodurch die Amortisationszeit sinkt.
 - Durch die Anschaffung nur eines BHKW für Hallen- und Freibad zusammen sinken die Investitionskosten.
- 2.2.2 $P_{ab} = P_{el} + \dot{Q}_L = 50 \text{ kW} + 82 \text{ kW} = 132 \text{ kW}$ 3
- $$\dot{Q}_{zu} = \frac{P_{ab}}{\eta_{ges}} = \frac{132 \text{ kW}}{0,904} = 146 \text{ kW}$$
- $$\eta_{el} = \frac{P_{el}}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{50 \text{ kW}}{146 \text{ kW}} = 0,34$$
- $$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{Q}_{zu}} = \frac{82 \text{ kW}}{146 \text{ kW}} = 0,56$$
- 2.2.3 $V_{\text{Becken}} = 50 \text{ m} \cdot 15 \text{ m} \cdot 2,4 \text{ m} = 1800 \text{ m}^3$ 3
- $$Q = m \cdot c \cdot \Delta T = V_{\text{Becken}} \cdot \rho_W \cdot c \cdot \Delta T = 1800 \text{ m}^3 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1,16 \frac{\text{Wh}}{\text{kgK}} \cdot 9\text{K} = 18792 \text{ kWh}$$
- $$Q_{B,i} = \frac{Q}{\eta_{th}} = \frac{18792 \text{ kWh}}{0,56} = 33557 \text{ kWh}$$
- $$V_B = \frac{Q_{B,i}}{H_i} = \frac{33557 \text{ kWh}}{10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} = 3356 \text{ m}^3$$
- 2.2.4 $W_{el} = \frac{Q}{\dot{Q}_{th}} \cdot P_{el} = \frac{19 \text{ MWh}}{82 \text{ kW}} \cdot 50 \text{ kW} = 11,6 \text{ MWh}$ 2
- 2.2.5 $A_{\text{Becken}} = 50 \text{ m} \cdot 15 \text{ m} = 750 \text{ m}^2$ 2
- $$\dot{Q}_{\text{Verlust}} = 750 \text{ m}^2 \cdot 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 75 \text{ kW} < \dot{Q}_{Th} = 82 \text{ kW} \quad \text{Das BHKW ist ausreichend.}$$

2.3 Sanierung des Hallenbads

2.3.1 Die Auskühlung des Mauerwerks wird vermindert und dadurch ein möglicher Tauwasseranfall unwahrscheinlicher. Mögliche Wärmebrücken werden überdämmt.

1

$$2.3.2 \quad U_{\text{Neu}} = \frac{1}{R_T} \quad \text{mit} \quad R_T = R_{T,\text{alt}} + \frac{d_D}{\lambda_D} + \frac{d_P}{\lambda_P},$$

$$R_T = \frac{1}{0,613 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}} + \frac{0,12\text{m}}{0,032 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} + \frac{0,02\text{m}}{1 \frac{\text{W}}{\text{mK}}} = 5,4 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

$$U_{\text{Neu}} = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{5,4 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}} = 0,185 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad U_{\text{Neu}} < U_{\text{Soll}}$$

2

Die Rahmenbedingungen werden eingehalten, d.h. die Förderung für die Sanierung kann gewährt werden!

$$2.3.3 \quad \dot{Q} = A \cdot U_{\text{Einsp}} \cdot \Delta T \quad \text{wobei} \quad U_{\text{Einsp}} = U_{\text{Alt}} - U_{\text{Neu}}$$

mit $U_{\text{Neu}} = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{5,4} \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} = 0,185 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$ und $U_{\text{Alt}} = 0,613 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$

$$U_{\text{Einsp}} = U_{\text{Alt}} - U_{\text{Neu}} = 0,613 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} - 0,185 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = 0,428 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$\dot{Q} = A \cdot U_{\text{Einsp}} \cdot \Delta T = 450 \text{m}^2 \cdot 0,428 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 40\text{K} = 7704 \text{W}$$

$$Q = \dot{Q} \cdot t = 7704 \text{W} \cdot 24\text{h} = 184,9 \text{kWh}$$

$$P = Q \cdot k = 184,9 \text{kWh} \cdot 0,2 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 36,98 \text{€}$$

3

Die zusätzliche Dämmung spart 36,98 € ein.

2.3.4 Schaumglas hat zum einen eine geringe Wärmeleitfähigkeit, d.h. es eignet sich gut als Dämmstoff. Zum anderen ist Schaumglas dampfdicht, es verhindert also das Eindringen von Feuchtigkeit in das Mauerwerk.

2

30

3 Wahlaufgabe Windkraft, Bewertung von Energiesystemen, Power-to-Gas	Punkte
3.1 Windkraftanlage	
3.1.1 $P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad A = \pi \cdot \left(\frac{13,2 \text{ m}}{2}\right)^2 = 136,85 \text{ m}^2$ $\rightarrow v = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot P_{\text{Wind}}}{\rho \cdot A}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 350 \text{ kW}}{1,2 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 136,85 \cdot \text{m}^2}} = 16,21 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	2
3.1.2 $n = 66 \text{ min}^{-1} = 1,1 \text{ s}^{-1} \quad \lambda = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{v} = \frac{\pi \cdot 13,2 \text{ m} \cdot 1,1 \text{ s}^{-1}}{7,5 \text{ m/s}} = 6,1$ $\lambda = \frac{u}{v} \rightarrow u = \lambda \cdot v = 6,1 \cdot 7,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 45,75 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 164,7 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ <p>Die Umfangsgeschwindigkeit ist zu groß.</p>	2
3.1.3 Der Einstellwinkel muss vergrößert werden, dadurch sinkt die Auftriebskraft und der Rotor dreht sich langsamer.	2
3.1.4 $P_{\text{Wind}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 136,85 \text{ m}^2 \cdot \left(7,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^3 = 34,64 \text{ kW}$ $P_{\text{Mech}} = c_p \cdot P_{\text{Wind}} = 0,32 \cdot 34,65 \text{ kW} = 11,08 \text{ kW}$ $P_{\text{elektr}} = \eta_{\text{Gen}} \cdot P_{\text{Mech}} = 0,8 \cdot 11,08 \text{ kW} = 8,87 \text{ kW}$	2
3.1.5 $W = P \cdot t \rightarrow t = \frac{W}{P_{\text{Gen}} \cdot \eta_{\text{Laderegler}} \cdot \eta_{\text{Akku}}} = \frac{30 \text{ kWh}}{8,87 \text{ kW} \cdot 0,8 \cdot 0,9} = 4,7 \text{ h}$	2
3.2 Bewertung von Energiesystemen anhand der Kleinwindkraftanlage	
3.2.1 In einem Jahr erzeugte Energiemenge $W = 10 \text{ kW} \cdot 2800 \frac{\text{h}}{\text{a}} = 28\,000 \frac{\text{kWh}}{\text{a}}$ $t = \frac{W}{W/t} = \frac{16\,000 \text{ kWh}}{28\,000 \frac{\text{kWh}}{365 \text{ d}}} = 208,6 \text{ d}$	2
3.2.2 Herstellung und Montage, Betriebsphase, Abbau und Entsorgung. <p>In der Herstellungs- und Montagephase sind hohe Energiemengen zur Herstellung des Generators, des Stahlturms, der Rotoren und des Betonfundaments notwendig. Ebenso ist der Transport zur Almhütte (wahrscheinlich mit einem Hubschrauber) und der Aufbau energieaufwendig. Während der Betriebsphase entstehen vergleichsweise geringe Energieaufwendungen für die Wartung. Beim Rückbau der Anlage ist wieder der Transport und das Recycling energieintensiv. Stahlurm und Generator lassen sich recyceln, der Beton bleibt wahrscheinlich vor Ort. Recycling von GFK ist noch nicht technisch ausgreift nutzbar.</p>	3
3.2.3 Mit der Kombination von PV- und Windkraftanlage in Verbindung mit einem Energiespeicher lässt sich die Almhütte energetisch autark betreiben. Der Speicher ist dringend notwendig, um bei Windstille und nachts elektrische Energie bereit stellen zu können.	4

Ökologische Vorteile der regenerativen Stromerzeugung gegenüber Stromaggregat mit Diesel-Generator (CO₂-Bilanz, etc.)

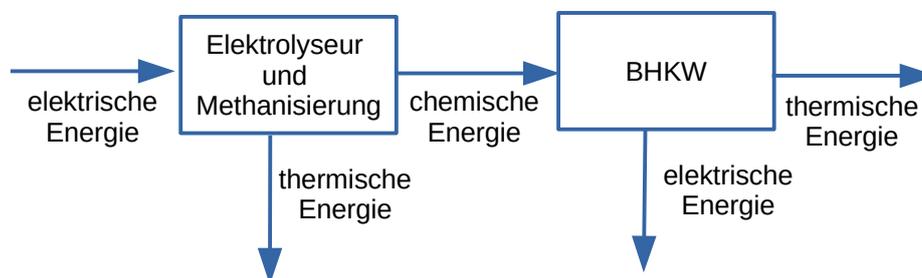
Die Verlegung einer elektrischen Versorgungsleitung ist sehr aufwendig und teuer. Diese einmaligen Kosten steckt man besser in die Installation einer PV-Anlage und zusätzlich in eine Windkraftanlage.

Wenn die Hütte nur im Sommer betrieben wird, ist zu prüfen, ob sich die Anschaffung der Windkraftanlage lohnt oder ob deren Kosten nicht evtl. besser in die Vergrößerung der Solaranlage gesteckt werden.

Wird die Hütte auch im Winter bewohnt, kann die Windkraftanlage wahrscheinlich zuverlässiger Energie liefern, weil Solaranlage sonst fortwährend vom Schnee befreit werden muss.

3.3 Wärmezeugung mit Power-to-Gas

3.3.1



2

3.3.2 Im Elektrolyseur wird Wasser aufgespalten in Wasserstoff und Sauerstoff. Bei der Methanisierung wird aus Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid Methan. Elektrolyse: $2H_2O \rightarrow O_2 + 2H_2$

2

3.3.3 Wird im Haus weniger Wärmeleistung gebraucht als das BHKW liefert, lädt das BHKW den Pufferspeicher und schaltet dann ab. Zunächst wird dann der Pufferspeicher wieder entladen; bevor das BHKW erneut anspringt. Dadurch verringert sich die Anzahl der Schaltvorgänge und damit verlängert sich die Lebensdauer des BHKW. Außerdem kann durch den Speicher auch die Abwärme genutzt werden, die bei der Methanisierung entsteht.

2

3.3.4 Energiewende: Erneuerbare Energie aus Windkraft und Photovoltaik steht nicht immer dann zur Verfügung, wenn der elektrische Bedarf besteht. Durch die Herstellung von Erdgas ist eine Speicherung der überschüssigen Energie möglich. Bei höherer Energienachfrage z. B. im Winter ist hierdurch eine bessere Planung zwischen Energieangebot und Energiebedarf gesichert.

3

Klimaneutralität: Kohlenstoffdioxid ist als „Treibhausgas“ für den Klimawandel mitverantwortlich. In dieser Anlage wird zur Methanisierung des Erdgases das CO₂ aus der Verbrennung des BHKW benutzt. Dadurch wird kein zusätzliches CO₂ freigesetzt, wenn bei der Elektrolyse ausschließlich Strom aus erneuerbaren Quellen verwendet wird.

3.3.5 $Q_{B,i} = v_B \cdot H_i = 200 \text{ m}^3 \cdot 10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} = 2000 \text{ kWh}$ Heizwärmemenge CH₄

2

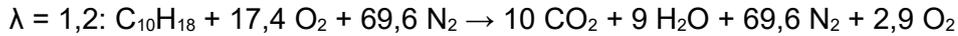
$Q_{B,i} = v_B \cdot H_i = 200 \text{ m}^3 \cdot 3 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} = 600 \text{ kWh}$ Heizwärmemenge H₂

Es ist nicht sinnvoll den Speicher mit Wasserstoff zu befüllen, da der Heizwert von H₂ weniger als 1/3 des Heizwerts von CH₄ beträgt. D. h. die speicherbare Energiemenge ist deutlich geringer.

4 Wahlaufgabe zu Hybridfahrzeug, Abgasreinigung, Brennwerttechnik	Punkte
4.1 Paralleles Hybridfahrzeug	
4.1.1 Die Kennlinien mit %-Angaben und die untere Vollastkennlinie gehören zum Elektromotor, die Kennlinien mit den Verbrauchsangaben g/kWh und die obere Vollastkennlinie gehören zum Dieselmotor. Eine Verbrauchsangabe von g/kWh macht nur Sinn bei einem Dieselmotor. Die Leistungshyperbeln mit kW-Angaben gehören zur M(n)-Kennlinie und gelten damit für beiden Motortypen.	2,5
4.1.2 Beim Verbrenner ist eine Mindestdrehzahl erforderlich, die Kennlinie beginnt nicht bei $n=0$, Anstieg bis zum Maximaldrehmoment im mittleren Drehzahlbereich, danach Rückgang des Drehmoments bei hohen Drehzahlen. Beim Elektromotor steht das maximale Drehmoment beim Anfahren aus dem Stand zur Verfügung. Ab dem Knickpunkt begrenzt die Leistung das maximale Drehmoment.	2
4.1.3 $W_{\text{Tank}} = H_i \cdot V = 10 \frac{\text{kWh}}{\text{L}} \cdot 50 \text{ L} = 500 \text{ kWh}$ ist mehr als 100-fach größer als $W_{\text{Akku}} = 4 \text{ kWh}$.	1
4.1.4 Abgelesen aus dem Diagramm $\eta_{\text{Elektro}} = 0,92$ $s_{\text{Elektro}} = v \cdot t = v \cdot \frac{W_{\text{Akku}}}{P_{\text{el}}} = v \cdot \frac{W_{\text{Akku}}}{P_{\text{mech}} / \eta_{\text{Elektro}}} = 90 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{4 \text{ kWh}}{20 \text{ kW} / 0,92} = 16,56 \text{ km}$	2
4.1.5 Der Akku wird mit der nicht zum Antrieb notwendigen überschüssigen Leistung aufgeladen. Durch die Arbeitspunktverschiebung erzielt der Verbrennungsmotor einen höheren Wirkungsgrad da der spezifische Verbrauch (g/kWh) geringer wird.	2,5
4.1.6 Abgelesen an der Leistungshyperbel im Arbeitspunkt: 44 kW. (Alternativ berechnen) Für den Antrieb notwendig: 20 kW Akku wird mit $44 \text{ kW} - 20 \text{ kW} = 24 \text{ kW}$ aufgeladen.	2
4.2 Abgasreinigung beim Kraftfahrzeug	
4.2.1 Stickstoff aus der Verbrennungsluft reagiert bei hohen Verbrennungstemperaturen mit dem Sauerstoff zu Stickstoffoxiden.	2
4.2.2 Drei verschiedene Reaktionswege laufen gleichzeitig ab. Die Reduktion von NO erfolgt durch Reaktion z. B. mit Kohlenstoffmonoxid (CO): $2 \text{ NO} + 2 \text{ CO} \rightarrow \text{N}_2 + 2 \text{ CO}_2$	3
4.2.3 In Dieselmotoren wird der Kraftstoff mit wesentlich höherem Luftüberschuss verbrannt als in Ottomotoren. Dadurch entstehen zum einen wesentlich mehr Stickstoffoxide als im Ottomotor; zum anderen kann die Reduktion mit Hilfe von CO (oder Kohlenwasserstoffen) nicht ablaufen, da weder CO (noch Kohlenwasserstoffe) bei Luftüberschuss während der Verbrennung entstehen.	2

4.3 Brennwertechnik

4.3.1 $\lambda = 1,0: C_{10}H_{18} + 14,5 O_2 + 58 N_2 \rightarrow 10 CO_2 + 9 H_2O + 58 N_2$ 3



CO₂-Gehalt: $\varphi_{CO_2} = \frac{10}{10 + 9 + 69,9 + 2,9} = \frac{10}{91,5} = 0,11$

Diagramm FS S. 6: Taupunkt: 46°C oder

$\varphi_{H_2O} = \frac{9}{10 + 9 + 69,9 + 2,9} = \frac{9}{91,5} = 0,098 \Rightarrow p_{H_2O} = 0,098 \text{ bar}$

aus der Formelsammlung: Der Taupunkt liegt zwischen 44,83 °C und 45,83 °C

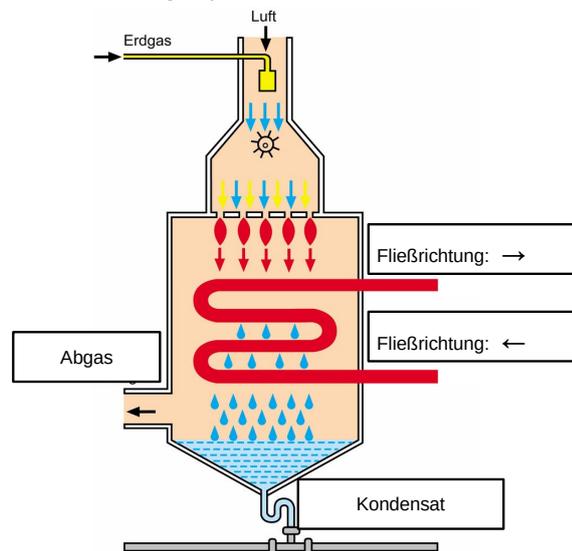
4.3.2 Je höher der Luftüberschuss wird, desto stärker wird das Abgas verdünnt. Damit sinkt der CO₂-Gehalt. 2

4.3.3 $\dot{V}_B = \frac{\dot{Q}_{B,s}}{H_s \cdot \eta_s} = \frac{10 \text{ kW}}{10,7 \frac{\text{kWh}}{\text{L}} \cdot 0,98} = 0,954 \frac{\text{L}}{\text{h}}$ 3

$V_B = t \cdot \dot{V}_B = 0,954 \frac{\text{L}}{\text{h}} \cdot 1440 \text{ h} = 1374 \text{ L}$

CO₂-Emission: $1374 \text{ L} \cdot 2,7 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{L}} = 3710 \text{ kg CO}_2$

4.3.4 Kondensat: ablaufendes Wasser → unten 3
 Abgas: austretendes Gas
 Vorlauf geht in das Heizungssystem → an der wärmsten Stelle des Wärmetauschers
 Rücklauf kommt aus dem Heizungssystem → an der kältesten Stelle des Wärmetauschers



TG Umwelttechnik**Abitur 2021/2022****Hauptprüfung****Lösungsvorschlag**

Arbeitszeit 270 Minuten
Hilfsmittel Formelsammlung Umwelttechnik
Zugelassener Taschenrechner

Stoffgebiet Teil 1: Pflichtbereich

Aufgabe 1: Photovoltaik (3 Seiten)
Elektromobilität

Aufgabe 2: Wärmeschutz (3 Seiten)
Solarthermie
Wohnraumlüftung

Teil 2: Wahlbereich

Aufgabe 3: Plug-in-Hybrid (3 Seiten)
Entstickung und Ozon

Aufgabe 4: Gas- und Dampfkraftwerk (3 Seiten)
Windpark und CO₂-Bilanz

1 Pflichtaufgabe zur Photovoltaik und Elektromobilität

Punkte

1.1 PV-Solarpark in der Nähe von Berlin

$$1.1.1 \quad n = \frac{185 \text{ GWh}}{10 \text{ kWh} \cdot 365} = \frac{185.000.000 \text{ kWh}}{10 \text{ kWh} \cdot 365} = 50.685 \text{ Haushalte}$$

2

1.1.2

2

$$W_{\text{Jahr}} = 365 \cdot P_{\text{Nenn}} \cdot \frac{H_h}{1 \frac{\text{KW}}{\text{m}^2}} \cdot K_{\alpha, \beta} = 365 \text{ d} \cdot 187 \text{ MW} \cdot \frac{2,98 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}}{1 \frac{\text{KW}}{\text{m}^2}} \cdot 1,16 = 235,9 \text{ GWh}$$

1.1.3 Verluste durch Wechselrichter, Leitungen, Verschmutzung der Module, (Teil-) Verschattung der Module.

2

$$1.1.4 \quad A_{\text{PV}} = \frac{W_{\text{Jahr-ideal}}}{H_h \cdot 365 \text{ d} \cdot K_{\alpha, \beta} \cdot \eta_{\text{PV}}} = \frac{235,9 \text{ GWh}}{2,98 \frac{\text{KWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \cdot 365 \text{ d} \cdot 1,16 \cdot 0,205} = 912.025 \text{ m}^2$$

2

$$n = \frac{912.025 \text{ m}^2}{7.000 \text{ m}^2} = 130 \text{ Fußballfelder}$$

$$1.1.5 \quad n = \frac{P_{\text{ges}}}{P_{\text{Modul}}} = \frac{187.000.000 \text{ W}}{415 \text{ W}} = 450.602 \text{ Module}$$

1

$$\text{Alternative: } n = \frac{A_{\text{ges}}}{A_{\text{Modul}}} = \frac{912.025 \text{ m}^2}{2,024 \text{ m} \cdot 1,002 \text{ m}} = 449.706 \text{ Module}$$

$$1.1.6 \quad \sin(20^\circ) = \frac{h}{6,08 \text{ m}} \rightarrow h = 6,08 \text{ m} \cdot \sin(20^\circ) = 2,08 \text{ m}$$

2

$$\tan(\varphi) = \frac{h}{a} \rightarrow \varphi = \arctan\left(\frac{2,08 \text{ m}}{3 \text{ m}}\right) = 34,7^\circ$$

1.1.7 Anordnung A ist besser geeignet, da durch die tief stehende Sonne dann z.B. nur die unterste von 6 Reihen verschattet ist.

4

Alle gleichzeitig verschatteten Module sollten in Reihe geschaltet werden, damit der Stromfluss durch die anderen Module nicht behindert wird.

Immer auf gleicher Höhe nebeneinander liegende Module sollten in Reihe geschaltet werden:

→ Reihenschaltung oberster String: 1-7-13-usw.

→ Reihenschaltung nächster String: 2-8-14-usw.

→ bis Reihenschaltung unterster String: 6-12-18-usw.

Hinweis (nicht verlangt)

Auch die Wirksamkeit von Bypassdioden bei der Teilverschattung von Modulen ist nur gewährleistet, wenn die Module nach A angeordnet sind.

$$1.1.8 \quad U(-10^\circ\text{C}) = U_{25^\circ\text{C}} \cdot \left(1 + \frac{TK_U \cdot \Delta T}{100\%}\right)$$

$$U(-10^\circ\text{C}) = 49,6 \text{ V} \cdot \left(1 + \frac{-0,25\% / ^\circ\text{C} \cdot (-10^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})}{100\%}\right)$$

$$U(-10^\circ\text{C}) = 49,6 \text{ V} \cdot 1,0875 = 53,94 \text{ V}$$

$$n = \frac{1500 \text{ V}}{53,94 \text{ V}} = 27,8$$

1.2 Garantieleistung über 30 Jahre

1.2.1 Der Betreiber muss damit rechnen, dass die Leistung der Anlage bereits zu Beginn nur 97,5 % der angegebenen Leistung beträgt.
Die Leistung sinkt kontinuierlich ab und beträgt nach 30 Jahren noch 83 % des im Datenblatt angegebenen Werts.

1.3 Elektromobilität

$$1.3.1 \quad s = \frac{70 \text{ kWh}}{\frac{22,54 \text{ kWh}}{100 \text{ km}}} = 311 \text{ km}$$

1.3.2 Bei der Ladung der leeren Batterie bis zu 20 % Füllstand muss die Ladeleistung linear von 0 bis zum Maximalwert 150 kW ansteigen. Nur im Bereich zwischen 20 % und 80 % des Batteriefüllstands kann mit der Maximalleistung geladen werden. Bei der Ladung von 80 % bis 100 % des Füllstands muss die Ladeleistung wieder linear vom Maximalwert bis auf 0 sinken.

1.3.3 100 % \triangleq 70 kWh
20 % \triangleq 14 kWh
80 % \triangleq 56 kWh
von 0 % bis 20 % laden mit 75 kW (Mittelwert): $W = 14 \text{ kWh}$
von 20 % bis 80 % laden mit 150 kW: $W = 42 \text{ kWh}$
von 80 % bis 100 % laden mit 75 kW (Mittelwert): $W = 14 \text{ kWh}$

$$a) \quad t = \frac{W}{P} \quad t_{20-80} = \frac{42 \text{ kWh}}{150 \text{ kW}} = 0,28 \text{ h} = 16,8 \text{ min}$$

$$b) \quad t_{80-100} = \frac{14 \text{ kWh}}{75 \text{ kW}} = 0,187 \text{ h} = 11,2 \text{ min}$$

$$t_{20-100} = t_{20-80} + t_{80-100} = 0,28 \text{ h} + 0,187 \text{ h} = 0,467 \text{ h} = 28 \text{ min}$$

1.3.4 Es sollten immer Ladestopps eingelegt werden, sobald der Ladestand auf ca. 20 % abgesunken ist. Dabei sollte nur auf 80 % aufgeladen werden.

$$1.3.5 \quad s = \frac{185 \text{ GWh}}{\frac{19 \text{ kWh}}{100 \text{ km}}} = \frac{185.000.000 \text{ kWh}}{\frac{19 \text{ kWh}}{100 \text{ km}}} = 973.700.000 \text{ km} \rightarrow$$

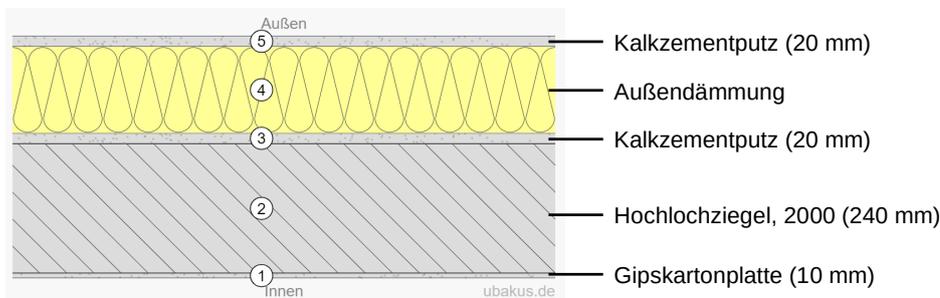
$$n = \frac{973.700.000}{12.000} = 81.142 \text{ Fahrzeuge}$$

2 Pflichtaufgabe zu Wärmeschutz, Solarthermie und Wohnraumlüftung

Punkte

2.1 Wärmeschutz

2.1.1



1

2.1.2

$$U = \frac{1}{R_{T, \text{saniert}}} \Leftrightarrow R_{T, \text{saniert}} = \frac{1}{U} = \frac{1}{0,15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}} = 6,67 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

4

$$R_{T, \text{saniert}} = R_{\text{Si}} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + \frac{d_4}{\lambda_4} + \frac{d_5}{\lambda_5} + R_{\text{Se}}$$

$$d_4 = (R_{T, \text{saniert}} - R_{\text{Si}} - \frac{d_1}{\lambda_1} - \frac{d_2}{\lambda_2} - \frac{d_3}{\lambda_3} - \frac{d_5}{\lambda_5} - R_{\text{Se}}) \cdot \lambda_4$$

$$d_4 = \left(6,67 - 0,13 - \frac{0,01}{0,25} - \frac{0,24}{0,96} - \frac{0,02}{1} - \frac{0,02}{1} - 0,043 \right) \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \cdot 0,03 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$d_4 = 0,185 \text{ m} \Rightarrow d_4 \approx 18,5 \text{ cm}$$

2.1.3

$$\vartheta_{\text{saniert}} = \vartheta_i - \frac{\Delta T}{R_{T, \text{saniert}}} \cdot R_{\text{Si}} = 20^\circ \text{C} - \frac{30 \text{ K}}{6,67 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}} \cdot 0,13 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} = 19,4^\circ \text{C}$$

4

$$R_{T, \text{unsaniert}} = R_{\text{Si}} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_3}{\lambda_3} + R_{\text{Se}}$$

$$R_{T, \text{unsaniert}} = 0,13 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} + \frac{0,01 \text{ m}}{0,25 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,24 \text{ m}}{0,96 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + \frac{0,02 \text{ m}}{1 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}} + 0,043 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} = 0,483 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}$$

$$\vartheta_{\text{unsaniert}} = \vartheta_i - \frac{\Delta T}{R_{T, \text{Vor}}} \cdot R_{\text{Si}} = 20^\circ \text{C} - 30 \frac{\text{K}}{0,483 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}}} \cdot 0,13 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} = 11,9^\circ \text{C}$$

Die Wandoberflächentemperatur ist nach der Sanierung deutlich höher. Dies wirkt sich positiv auf die Behaglichkeit aus, da es sich deutlich wärmer anfühlt, wenn die raumumschließenden Wände warm sind.

Weitere mögliche Antworten: Weniger Zugerscheinungen verursacht durch Konvektion, verringerte Gefahr von Kondenswasser- und Schimmelbildung.

2.1.4

$$\dot{Q}_{\text{ab}} = U_{\text{Fenster}} \cdot \Delta T = 0,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 30 \text{ K} = 15 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\dot{Q}_{\text{zu}} = 250 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0,6 = 150 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\dot{Q}_{\text{zu}} > \dot{Q}_{\text{ab}}$$

Die Menge der durch das Fenster zugeführten Wärme ist zehnmal größer als die des Wärmeverlustes.

3

2.2 Solarthermie

$$2.2.1 \quad q_{\text{unsaniert}} = \frac{V_{\text{Erdgas}} \cdot H_s}{A} = \frac{900 \text{ m}^3 \cdot 11,1 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}}{150 \text{ m}^2} = 66,7 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} \quad 3$$

$$\text{Einsparung: } \frac{q_{\text{unsaniert}} - q_{\text{saniert}}}{q_{\text{unsaniert}}} = \frac{66,7 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} - 15 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}}{66,7 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2}} = 0,78 = 78 \%$$

Hinweis: Alternative Berechnung mit Heizwert zulässig, dann 75 % Einsparung.

$$2.2.2 \quad Q = m \cdot c_w \cdot \Delta T \Leftrightarrow m = \frac{Q}{c_w \cdot \Delta T} = \frac{1000 \text{ kWh}}{1,16 \frac{\text{kWh}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 60 \text{ K}} = 14\,368 \text{ kg} \rightarrow V = 14,368 \text{ m}^3 \quad 4$$

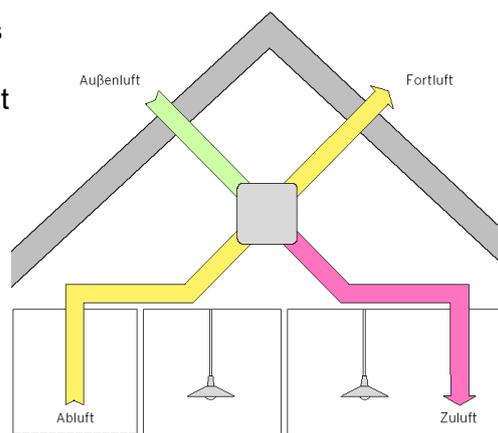
$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h \Leftrightarrow h = \frac{V}{\pi \cdot r^2} = \frac{14,368 \text{ m}^3}{\pi \cdot (1 \text{ m})^2} = 4,57 \text{ m}$$

2.2.3 Der Solarthermiekollektor muss rund $32,5 \text{ m}^2$ groß sein, damit die gewonnene Solarenergie den Bedarf ganzjährig decken kann, also einen solaren Deckungsgrad von 100 % aufweist. 2

2.2.4 Der Speicher kann bis auf $30 \text{ }^\circ\text{C}$ abgekühlt werden. Das genügt als Vorlauftemperatur für eine Flächenheizung. Für Heizkörper braucht man wegen der kleineren Heizflächen eine höhere Vorlauftemperatur; der Wärmespeicher kann daher nicht so weit abgekühlt werden und dann auch weniger Wärme abgeben ($Q = m \cdot c_w \cdot \Delta T$). 2

2.3 Kontrollierte Wohnraumlüftung

2.3.1 Mithilfe eines Kreuzstromwärmetauschers wird der Abluft der Wohnräume Wärme entzogen. Die frische Außenluft wird damit angewärmt und als Zuluft den Wohnräumen zugeführt. 3



$$2.3.2 \quad \Phi = \frac{\vartheta_{\text{zu}} - \vartheta_{\text{au}}}{\vartheta_{\text{ab}} - \vartheta_{\text{au}}} \rightarrow \vartheta_{\text{zu}} = (\vartheta_{\text{ab}} - \vartheta_{\text{au}}) \cdot \Phi + \vartheta_{\text{au}} = (21 \text{ }^\circ\text{C} - (-2,5 \text{ }^\circ\text{C})) \cdot 0,83 + (-2,5 \text{ }^\circ\text{C}) = 17 \text{ }^\circ\text{C} \quad 2$$

2.3.3 Kühle Nachtluft soll in heißen Sommernächten zur Abkühlung der Räume dienen und auf keinen Fall durch die abgeführte Raumluft vorgewärmt werden. Dazu muss der Wärmetauscher durch einen Bypass überbrückt werden. 2

3 Wahlaufgabe zu Hybridfahrzeuge, Entstickung und Ozon	Punkte
3.1 Plug-in-Hybrid	
3.1.1 Hybridfahrzeug bedeutet, dass im Fahrzeugantrieb eine elektrische Maschine und ein Verbrennungsmotor in geeigneter Weise zusammen arbeiten. engl. „to plug in“ = dt. „einstecken“. Ein Plug-in-Hybrid ist ein Hybridfahrzeug mit der Möglichkeit, die Batterie des elektrischen Teils über einen Ladestecker zu laden.	1
3.1.2 engl. „Well-to-Wheel“ = dt. „Bohrloch bis Rad“ Well-to-Wheel bedeutet, dass in die Bewertung eines rohölbasierten Erzeugnisses – hier Benzin – nicht nur das Verbrennen des Rohölerzeugnisses im Fahrzeugmotor betrachtet wird, sondern auch alle vorgelagerten Schritte, wie Förderung am Bohrloch, Transport zur Raffinerie, Verarbeitung des Rohöls in einer Raffinerie, Transport des Benzins zur Tankstelle.	2
3.1.3 Herstellerangabe – Werbung: $m_{CO_2} = 0,01 \text{ L/km} \cdot 2300 \text{ g/L} + 0,072 \text{ kWh/km} \cdot 0 \text{ g/kWh} = 23 \text{ g/km}$ Herstellerangabe – Kleingedrucktes: $m_{CO_2} = 0,01 \text{ L/km} \cdot (2300 \text{ g/L} + 720 \text{ g/L}) + 0,072 \text{ kWh/km} \cdot 400 \text{ g/kWh}$ $= 30,2 \text{ g/km} + 28,8 \text{ g/km} = 59 \text{ g/km}$	4
3.1.4 Der Hersteller hat zu Beginn eigener Testfahrten die Batterie voll geladen. Dies dürfte aber im alltäglichen Gebrauch des Fahrzeugs eher nicht der Fall sein, was einen geringeren Elektromotor- und einen höheren Verbrennungsmotoreinsatz zur Folge hat. Das wiederum bedingt einen gegenüber Herstellerangaben erhöhten Verbrauch. Möglicherweise erfolgt der Fahrzeugeinsatz im Alltag auch bei ungünstigeren Bedingungen als bei den Testfahrten, wie z. B. Fahrt bei höheren Geschwindigkeiten, stärkeres Beschleunigen, scharfes Bremsen ohne nennenswerte Rekuperation usw.	2
3.1.5 Der deutsche Strommix wird in Zukunft durch den weiter steigenden regenerativen Anteil weniger CO ₂ -Ausstoß verursachen, während sich der CO ₂ -Ausstoß bei Benzinmotoren nicht mehr stark verbessern lässt. Dadurch steigt der prozentuale Unterschied zwischen Elektro- und Benzinfahrzeugen in Zukunft weiter an.	3
3.1.6 Aus dem Diagramm lässt sich für eine mech. Antriebsleistung von 5 kW bei $n = 1900 \text{ min}^{-1}$ ein Wirkungsgrad von $\eta = 0,85$ entnehmen. $P_{el} = \frac{P_{mech}}{\eta} = \frac{5 \text{ kW}}{0,85} = 5,882 \text{ kW}$ $s = v \cdot t \quad \rightarrow \quad t = \frac{s}{v} = \frac{100 \text{ km}}{65 \text{ km/h}} = 1,538 \text{ h}$ $W = P \cdot t = 5,882 \text{ kW} \cdot 1,538 \text{ h} = 9,05 \text{ kWh}$	4
3.1.7 Aus dem Diagramm lässt sich für eine mech. Antriebsleistung von 5 kW bei $n = 1900 \text{ min}^{-1}$ ein spezifischer Verbrauch von 400 g/kWh entnehmen. $s = v \cdot t \quad \rightarrow \quad t = \frac{s}{v} = \frac{100 \text{ km}}{65 \text{ km/h}} = 1,538 \text{ h}$ $W = P \cdot t = 5 \text{ kW} \cdot 1,538 \text{ h} = 7,69 \text{ kWh}$	4

$$m = 7,69 \text{ kWh} \cdot 400 \text{ g/kWh} = 3076 \text{ g}$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \rightarrow \quad V = \frac{m}{\rho} = \frac{3076 \text{ g}}{740 \text{ kg/L}} = 4,16 \text{ L}$$

Der Verbrauch ist also 4,16 L/100km.

3.2 Entstickung und Ozon

- 3.2.1 "Reduktion" ist Abgabe von Sauerstoff: Der Sauerstoff des NO wird an das Reduktionsmittel NH₃ abgegeben. Als Reaktionsprodukte werden elementarer Stickstoff (N₂) und Wasser (H₂O) gebildet.
 $6 \text{ NO} + 4 \text{ NH}_3 \rightarrow 5 \text{ N}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O}$ 2
- 3.2.2 Der Katalysator beschleunigt die Reaktion und senkt die benötigte Aktivierungsenergie. Ohne Katalysator würde die Reaktion langsamer und nur bei viel höheren Temperaturen ablaufen. 1
- 3.2.3 Mögliche Antworten: 2
 Direkt nach dem Dampferzeuger (High-Dust-Anordnung): Der SCR-Katalysator hat wegen der höheren Temperaturen eine höhere Konvertierungsrate. Nachteilig ist der erhöhte Katalysatorverschleiß.
 Nach der Entstaubung (Low-Dust-Anordnung): Die Konvertierungsrate ist wegen der niedrigeren Temperaturen niedriger als bei der High-Dust-Anordnung. Weil das Abgas an der Einbaustelle entstaubt ist, ist der Katalysatorverschleiß geringer, der Katalysator erreicht eine längere Standzeit.
 Hinweis: Tail-End-Anordnung (nach allen anderen Reinigungsstufen) ist beim Kohlekraftwerk nicht üblich aber theoretisch möglich, weil viel zu viel Energie für die Abgas-Wiederaufheizung erforderlich wäre.
- 3.2.4 Aus dem Diagramm: Bei einer Abgastemperatur von 250° C beträgt der Reduktionsgrad 80 %, d. h. 20 % des NO verbleiben im Abgas.
 Restmenge im Abgas = $0,2 \cdot 1350 \text{ mg/m}^3 = 270 \text{ mg/m}^3$.
 Der Anteil des nicht umgewandelten NO im Abgas übersteigt den geforderten Grenzwert, die Qualität der Entstickung ist nicht ausreichend. 2
- 3.2.5 Stickstoffdioxid (NO₂) reagiert unter Sonneneinstrahlung zu Stickstoffmonoxid (NO) und einem reaktiven einzelnen Sauerstoffatom (O). Das reaktive Sauerstoffatom reagiert mit einem Sauerstoffmolekül (O₂) zu Ozon (O₃).
 Die Ozonkonzentration steigt stark an, weil in den Mittagsstunden die Sonneneinstrahlung am höchsten ist.
 Nicht gefordert ist die Reaktionsgleichung:
 $\text{NO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO} + \text{O}_3$ 2
- 3.2.6 Ozon ist ein Reizgas und verursacht Atemwegsbeschwerden. 1

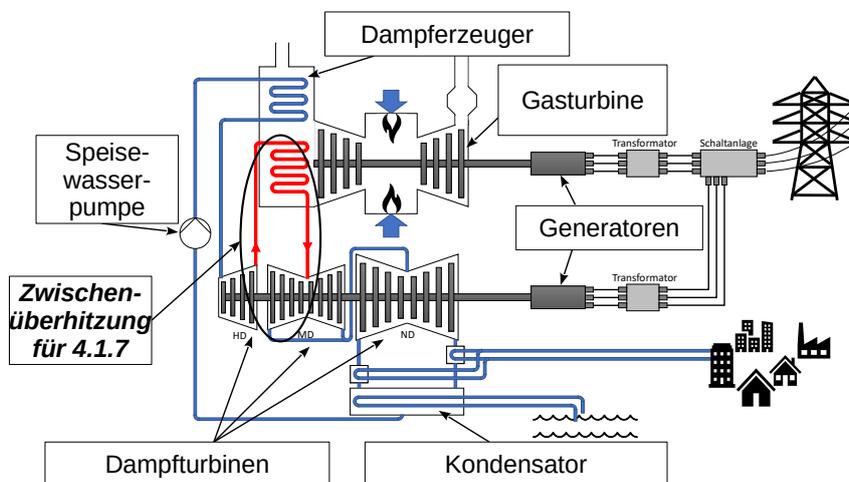
30

4 Wahlaufgabe zu Gas- und Dampfkraftwerk, Windpark und CO₂-Bilanz

Punkte

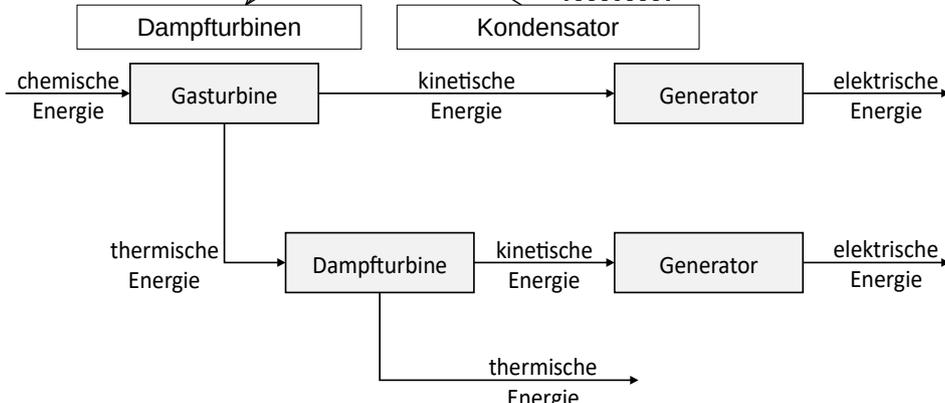
4.1.1

3



4.1.2

3



4.1.3 In der Gasturbine wird Erdgas verbrannt; durch die Energie der heißen Abgase wird sie in Bewegung versetzt. Die dabei entstehende Bewegungsenergie treibt einen Generator zur Stromerzeugung an. Die aus der Gasturbine ausströmenden heißen Abgase lassen in einem Dampferzeuger Wasser verdampfen. Der Wasserdampf treibt Dampfturbinen an, die wiederum einen Generator zur Stromerzeugung speisen. Nach der Dampfturbine wird Fernwärme ausgekoppelt und das Speisewasser im Kondensator vollständig kondensiert.

2

4.1.4 Ein GuD-Kraftwerk lässt sich bei Bedarf sehr schnell an- und abschalten. Die Gasturbine ist sofort für die Stromproduktion startklar und der Dampfkreisprozess ist auch schneller auf Temperatur als bei den anderen Kraftwerken, da kein Kessel befeuert werden muss. Dadurch kann die Fluktuation (Verfügbarkeitsschwankung) erneuerbarer Energien besser ausgeglichen werden.

2

4.1.5 $\dot{Q}_{zu} = \frac{P_{el}}{\eta_{Gas}} = \frac{340 \text{ MW}}{0,38} = 894,7 \text{ MW}$

2

$$\dot{V}_{Gas} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{H_i} = \frac{894,7 \text{ MW}}{10 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}} = 89473,7 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

4.1.6 $\eta_{GuD,el} = \eta_{Gas,el} + \eta_{Dampf,el} \Leftrightarrow \eta_{Dampf,el} = \eta_{GuD,el} - \eta_{Gas,el} = 0,61 - 0,38 = 0,23$

3

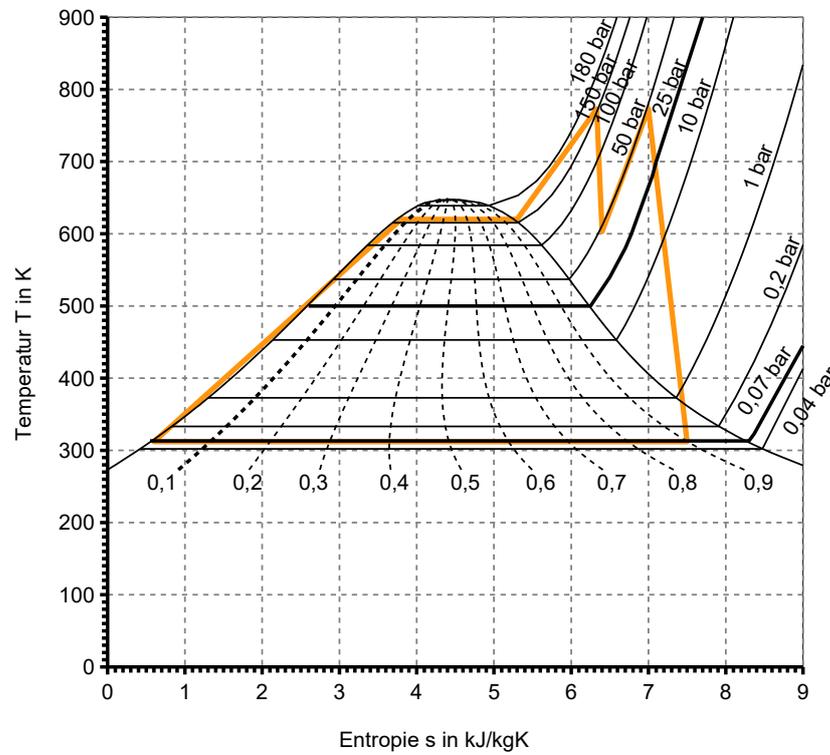
$$\eta_{Dampf,el} = \frac{P_{Dampf,el}}{Q_{zu}} \Leftrightarrow P_{Dampf,el} = \dot{Q}_{zu} \cdot \eta_{Dampf,el} = 900 \text{ MW} \cdot 0,23 = 207 \text{ MW}$$

4.1.7 Zwischenüberhitzung zwischen Hochdruck- und Mitteldruckturbine,

2

Abbildung bei 4.1.1

4.1.8



3

4.2 Windpark und CO₂-Bilanz

$$4.2.1 \quad W = \frac{P \cdot t}{n} = \frac{3 \cdot 4,2 \text{ MW} \cdot 2.619 \text{ h}}{10.000} = 3.300 \text{ kWh} \quad (\text{Werte Windpark Falkenhöhe})$$

1,5

$$4.2.2 \quad \text{CO}_2\text{-Einsparung: } m_{\text{CO}_2} = \frac{20.500.000.000 \text{ g}}{10.000 \cdot 3.300 \text{ kWh}} = 621 \frac{\text{g}}{\text{kWh}}$$

1,5

4.2.3 Der deutsche Strommix enthält einen von Jahr zu Jahr steigenden Anteil von regenerativen Energiequellen, die im Betrieb keine CO₂-Emissionen haben. Würde man den deutschen Strommix als Vergleichswert zur Ermittlung der CO₂-Einsparung heranziehen, wäre die CO₂-Einsparung dann von Jahr zu Jahr geringer. Das ist nicht sinnvoll. Sinnvoll dagegen ist, die CO₂-Einsparung mit einem Mix aus verschiedenen fossilen Energiequellen zu ermitteln, denn regenerative Energien ersetzen fossile Energien.

2

4.2.4 Für eine umfassende Bewertung der CO₂-Emissionen muss der gesamte Lebenszyklus der Windkraftanlagen berücksichtigt werden, sowie weitere Betriebszustände. Es fehlen also in der Betrachtung:

2

- Herstellung der WKAn
- Transport und Aufstellung der WKAn
- Wartung, Reparatur
- Abbau und Entsorgung

4.2.5 Bei Berücksichtigung des Faktors Herstellung von Stahl und Beton für Turm und Fundament fällt zusätzlich die folgende CO₂-Emission an:

3

$$m_{\text{CO}_2, \text{Herstellung}} = m_{\text{CO}_2, \text{Beton}} + m_{\text{CO}_2, \text{Stahl}}$$

$$m_{\text{CO}_2, \text{Herstellung}} = \frac{3 \cdot 1444 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \cdot 380\,000 \text{ kg}}{33\,000\,000 \text{ kWh} \cdot 20} + \frac{3 \cdot 323,8 \frac{\text{g}}{\text{kg}} \cdot 3\,100\,000 \text{ kg}}{33\,000\,000 \text{ kWh} \cdot 20}$$

$$m_{\text{CO}_2, \text{Herstellung}} = 2,49 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} + 4,56 \frac{\text{g}}{\text{kWh}} = 7,05 \frac{\text{g}}{\text{kWh}}$$

In Vergleich zu den CO₂-Emissionen fossiler Kraftwerke fallen die CO₂-Emissionen auf Grund der Türme und der Fundamente nicht ins Gewicht. Zudem müssten auch die CO₂-Emissionen, die durch den Bau der fossilen Kraftwerke entstanden sind berücksichtigt werden.