

Im Hybridfahrzeug sind ein Elektromotor und ein Verbrennungsmotor kombiniert. Der Elektromotor unterstützt den Verbrennungsmotor beim Beschleunigen, so muss der Verbrennungsmotor weniger Energie aufbringen, wodurch der Benzinverbrauch sinkt. Beim Bremsen fungiert der Elektromotor als Generator, wodurch bei jedem Bremsvorgang die Batterien aufgeladen werden. Beim Laden und Entladen der Batterie sorgt der Wechselrichter für die erforderliche Gleich- bzw. Wechselspannung.

Für die Komponenten werden folgende Wirkungsgrade angenommen:

Daten:

Wechselrichter:	$\eta_W$	=	0,9
4-Takt- Ottomotor:	$\eta_O$	=	0,3
Elektromotor/Generator:	$\eta_{EG}$	=	0,85
Getriebe:	$\eta_G$	=	0,95
Batterie – Aufladen:	$\eta_A$	=	0,8
Batterie – Entladen:	$\eta_E$	=	0,7
Übertragung Rad auf Straße:	$\eta_{RS}$	=	0,88

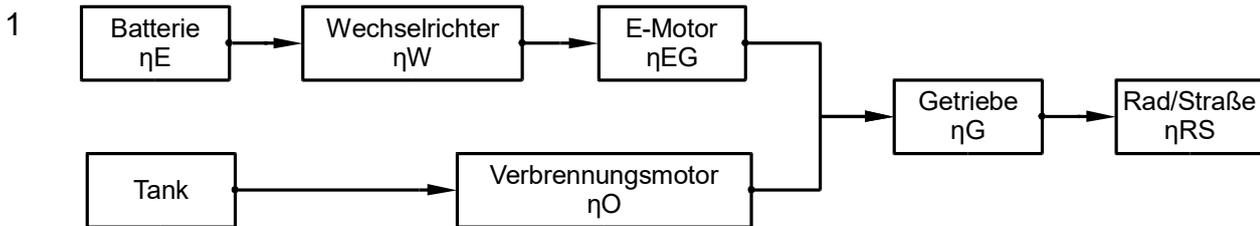
- 1 Erstellen Sie ein Blockschaltbild für ein Hybridfahrzeug während der Beschleunigung. Zeichnen Sie Pfeile für den Energiefluss ein und ordnen Sie die Wirkungsgrade zu. 4,0
- 2 Mit dem Fahrzeug wird ein Alpenpass talwärts mit einer Höhendifferenz von 1000 m befahren. Die Abfahrtsenergie lädt dabei die Batterie auf.
  - 2.1 Nennen Sie die Baugruppen, die für die Energieübertragung relevant sind. 2,0
  - 2.2 Der Hybrid-Pkw hat eine Masse von 1375 kg. Berechnen Sie die von der Batterie aufgenommene Energie in kWh. 4,0



- 3 Für den 4-Takt Ottomotor wird der idealisierte Kreisprozess zu Grunde gelegt. Es gelten folgende Daten: 5,0
- |                                  |         |
|----------------------------------|---------|
| Temperatur der angesaugten Luft: | 40 °C   |
| Druck vor der Verdichtung:       | 1,5 bar |
| Druck nach der Verdichtung:      | 20 bar  |
| Druck nach der Expansion:        | 4 bar   |
| Höchster Gasdruck:               | 54 bar  |
| Höchste Gastemperatur:           | 1477 °C |
- Berechnen Sie die spezifische Nutzarbeit  $w_{\text{nutz}}$  in kJ/kg, die jeder Zylinder beim Durchlaufen der 4 Takte abgibt.
- 4 Die Verbindungswelle zwischen Ottomotor und Generator/Elektromotor ist aus dem Werkstoff C45E.
- 4.1 Skizzieren Sie die Abkühlkurve mit Hilfe des Fe-Fe<sub>3</sub>C-Diagramms für diesen Werkstoff für langsames Abkühlen aus der Schmelze bis Raumtemperatur. Beschreiben Sie die Gefügeumwandlungen während des Abkühlens. 4,0
- 4.2 Berechnen Sie die prozentualen Anteile der Gefügebestandteile bei Raumtemperatur näherungsweise. 2,0
- 4.3 Aufgrund der hohen Beanspruchung wird die Verbindungswelle einer Wärmebehandlung unterzogen. Wählen Sie ein geeignetes Verfahren aus und begründen Sie Ihre Wahl. 2,0
- 4.4 Zur Überprüfung der Wärmebehandlung wird die Verbindungswelle einer Härteprüfung unterzogen. Wählen Sie ein geeignetes Härteprüfverfahren aus und begründen Sie Ihre Wahl. 2,0
- 4.5 Dimensionieren Sie die Dicke  $s$  einer hohlen Verbindungswelle mit einem Außendurchmesser  $D = 40$  mm für ein maximales Torsionsmoment von  $M_t = 800$  Nm bei einer Sicherheit von  $v = 3$  gegen Verdrehen. 5,0
- 
- 30,0



## Lösungsvorschläge



## 2 Talfahrt

### 2.1 Straße/Rad, Getriebe, Generator, Wechselrichter, Batterie

$$2.2 \quad W_{pot} = m \cdot g \cdot \Delta h = 1375 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1000 \text{ m} = 13,75 \text{ MJ}$$

$$W_{Batt} = W_{pot} \cdot \eta_{RS} \cdot \eta_G \cdot \eta_{EG} \cdot \eta_w \cdot \eta_A = 13,75 \text{ MJ} \cdot 0,88 \cdot 0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,9 \cdot 0,8$$

$$= 7,035 \text{ MJ} = 7035 \text{ kNm} \cdot \frac{h}{3600 \text{ s}} = 1,95 \text{ kWh}$$

Annahme 1: Die Wirkungsgrade Rad→Straße und Straße→Rad sind gleich.

## 3 Spezifische Nutzarbeit $w_{nutz}$

Ergebnisse															Aufgabe: tgt HP 2014/15-2Hybridfahrzeug 3				
		1E+05	1E-03	1E+00	1E+00	1E+03	1E+00	1E+03	1E+00	1E-03	1E+03	1E+03	1E+03	1E+00	1E+00				
Zustand	Typ	p	V	T	ϑ	w	W	q	Q	m	cp	cv	Rs	χ	ε				
1		1,50		313,2	40,0						1,005	0,718	0,287	1,400					
12	a					246		0,0	0,0		1,005	0,718	0,287	1,400	6,36				
2		20,00		656,4	383,2						1,005	0,718	0,287	1,400					
23	c					0	0,0	784,8			1,005	0,718	0,287	1,400	1,00				
3		54,00		1750,2	1477,0						1,005	0,718	0,287	1,400					
34	a					-659		0,0	0,0		1,005	0,718	0,287	1,400	0,16				
4		4,00		832,0	558,8						1,005	0,718	0,287	1,400					
41	c					0	0,0	-372,3			1,005	0,718	0,287	1,400	1,00				
1		1,50		313,2	40,0						1,005	0,718	0,287	1,400					
						$\Sigma w_{Nutz}$	$\Sigma W_{nu}$	$\Sigma q$	$\Sigma Q$		$\eta_{therm}$								
						-412	0,0	412,5	0,0		0,53								
						$\Sigma w_{ab}$	$\Sigma W_{ab}$	$\Sigma q_{ab}$	$\Sigma Q_{ab}$		$\eta_{carnot}$								
						-659	0,0	-372,3	0,0		0,82								
						$\Sigma w_{zu}$	$\Sigma W_{zu}$	$\Sigma q_{zu}$	$\Sigma Q_{zu}$										
						246	0,0	784,8	0,0										

$$w_{Nutz} = \Sigma w = +w_{12} + w_{23} + w_{34} + w_{41} = 246,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0 - 658,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0 = -412,6 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$w_{12} = -\frac{R_i \cdot T_1}{1-\kappa} \cdot \left( \left[ \frac{p_2}{p_1} \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) = -\frac{287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot (273+40) \text{ K}}{1-1,4} \cdot \left( \left[ \frac{20 \text{ bar}}{1,5 \text{ bar}} \right]^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right) = +246,1 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$w_{34} = -\frac{R_i \cdot T_3}{1-\kappa} \cdot \left( \left[ \frac{p_4}{p_3} \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) = -\frac{287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot (273+1477) \text{ K}}{1-1,4} \cdot \left( \left[ \frac{4 \text{ bar}}{54 \text{ bar}} \right]^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right) = -658,7 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Hinweis 2: „Spezifische“ Größen sind auf die Masse bezogen:  $w = \frac{W}{m}$  und  $q = \frac{Q}{m}$ .

Man kann also für w (klein) die Formeln für W (groß) ohne die Masse m verwenden.

Hinweis 3: Manchmal geht es schneller,  $w_{nutz}$  über die Wärme zu berechnen. Hier ist das nicht der Fall, weil man zunächst die Temperaturen ermitteln müsste.

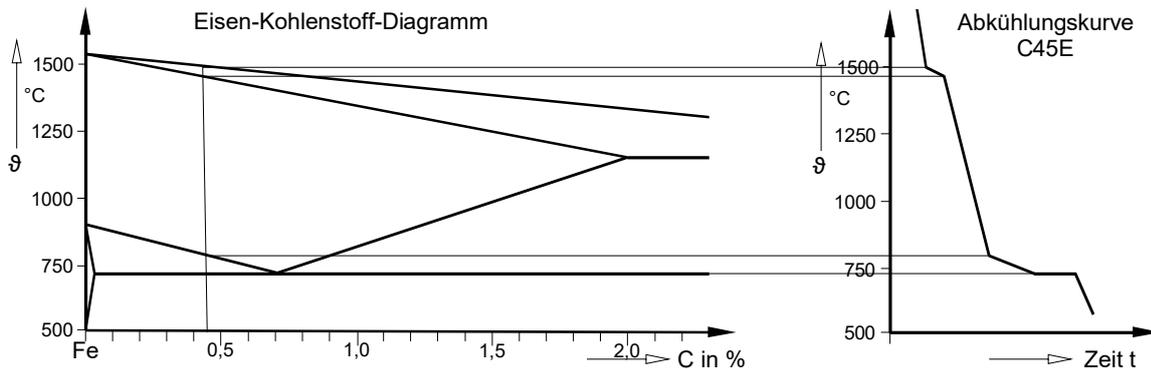
$$0 = \Sigma q + \Sigma w = \Sigma q + w_{Nutz} \Rightarrow w_{Nutz} = -q_{12} - q_{23} - q_{34} - q_{41} = 0 - q_{23} - 0 - q_{41}$$

$$\text{mit } q_{23} = c_V \cdot \Delta T_{23} \quad \text{und} \quad q_{41} = c_V \cdot \Delta T_{41}$$



## 4 Welle

### 4.1 Abkühlungskurve



(Die Skizze des Eisen-Kohlenstoffdiagramms ist nicht Teil der Aufgabe.)

Gefügeumwandlungen:

- Oberhalb ca. 1500°C ist C45E vollständig geschmolzen
- Von ca. 1500°C bis ca. 1450°C erstarrt C45E allmählich zu Austenit.
- Zwischen ca. 1450°C und ca. 800°C liegt C45E als Austenit vor. Austenit ist die kubisch-flächenzentrierte Form des Eisens. Im Austenit ist der Kohlenstoff vollständig gelöst.
- Von ca. 800°C bis 723°C wandeln sich Teile des Austenits in Ferrit um; dazu gruppieren sich die Fe-Atome aus dem kubisch-flächenzentrierten in das kubisch-raumzentrierte Gitter um. Da das krz-Gitter kaum Kohlenstoff lösen kann, reichert sich der Kohlenstoff im verbleibenden Austenit bis zu 0,8% an.
- Unter 723°C ist Austenit instabil und wandelt sich in den kohlenstoffarmen Gebieten in Ferrit um, während sich in den kohlenstoffreichen Gebieten Zementit bildet, das 6,67% Kohlenstoff enthält. Es entsteht ein eutektisches Gefüge aus Ferrit und Zementit, das man Perlit nennt.  
Das über 723°C entstandene Ferrit bleibt unverändert.
- Unterhalb 723°C besteht C45E aus einem Kristallgemisch aus Ferrit und Perlit.

### 4.2 C45E besteht aus:

0,45% C und Rest Fe

2,5

bzw.

$$\frac{0,8\% - 0,6\%}{0,8\% - 0\%} = 43,75\% \text{ Ferrit (mit } 0\% \text{ C)} \text{ und } \frac{0,45\% - 0\%}{0,8\% - 0\%} = 56,25\% \text{ Perlit (mit } 0,8\% \text{ C)}$$

bzw.

$$\frac{6,67\% - 0,45\%}{6,67\% - 0\%} = 93,3\% \text{ Ferrit (mit } 0\% \text{ C)} \text{ und } \frac{0,45\% - 0\%}{6,67\% - 0\%} = 6,7\% \text{ Zementit (mit } 6,67\% \text{ C).}$$

### 4.3 Das geeignete Verfahren ist Vergüten. Begründung:

- Für die hohe Beanspruchung benötigt die Welle eine erhöhte Festigkeit und Zähigkeit, dies wird durch Vergüten erreicht.
- C45E ist für Vergüten geeignet.

### 4.4 Beim Vergüten steigt auch die Härte des Stahls. Für gehärteten Stahl sind die Verfahren Vickers und Rockwell geeignet.



## 4.5 Wandstärke

$$\tau_{tF} = 0,7 \cdot R_e = 0,7 \cdot 430 \frac{N}{mm^2} = 301 \frac{N}{mm^2} \quad (\text{für Stahl} \rightarrow [\text{EuroTabM46}], 46.\text{Auflage, S.41})$$

$R_e = 430 \text{ N/mm}^2$  (C45E vergütet  $\rightarrow$  [EuroTabM46], 46.Auflage, S.134)

$$\frac{\tau_{tF}}{v} = \tau_{tzul} > \tau_t = \frac{M_t}{W_p} \Rightarrow$$

$$\tau_{tzul} = \frac{\tau_{tF}}{v} = \frac{301 \text{ N/mm}^2}{3} = 100,3 \frac{N}{mm^2}$$

$$W_{perf} = \frac{M_t}{\tau_{tzul}} = \frac{800 \text{ Nm}}{100,3 \text{ N/mm}^2} = 7,973 \text{ cm}^3$$

$$W_p = \frac{\pi \cdot (D^4 - d^4)}{16 D} \Rightarrow d = \sqrt[4]{D^4 - \frac{16 D \cdot W_p}{\pi}} = \sqrt[4]{(40 \text{ mm})^4 - \frac{16 \cdot 40 \text{ mm} \cdot 7973 \text{ mm}^3}{\pi}} = 31,1 \text{ mm}$$

$$s = \frac{D - d}{2} = \frac{40 \text{ mm} - 31,1 \text{ mm}}{2} \geq 4,5 \text{ mm}$$