

Lösungen zur Abiturvorbereitung

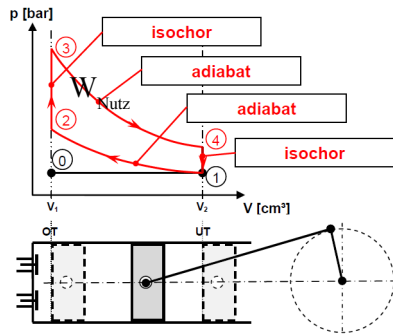
Lehrplaneinheit Elektro- und Hybridfahrzeuge Jahrgangsstufe 2

Themenbereiche

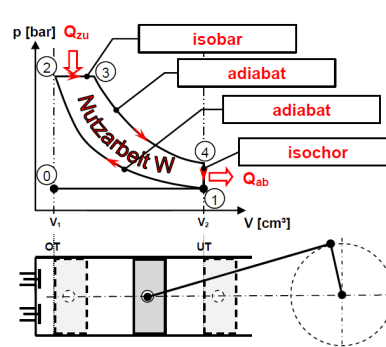
- **Idealisierte Kreisprozesse Ottomotor und Dieselmotor**
- **Elektrofahrzeuge**
- **Serielle Hybridfahrzeuge**
- **Parallele Hybridfahrzeuge**
- **Wirkungsgrad-Kennfelder**

1 Idealisierte Kreisprozesse

1.1 Otto-Prozess



Diesel_Prozess



1.2 z.B. Masse m über Punkt 1 berechnen:

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T \rightarrow m_{Luft} = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_i \cdot T_1} = \frac{0,9 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot 4 \cdot 10^{-3} m^3}{0,287 \frac{kJ}{kgK} \cdot 373 K} = 3,36 g$$

1.3

	Zustand 1	Zustand 2	Zustand 3	Zustand 4
p in N/m ²	0,9 * 10 ⁵	57 * 10 ⁵	57 * 10 ⁵	3,54*10⁵
T in K	373	903	2257,5	1020,82
V in m ³	4 * 10 ⁻³	0,22 * 10 ⁻³	0,56 * 10 ⁻³	4 * 10 ⁻³

Zustand 2 nach 3: isobar

$$\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3} \rightarrow T_3 = \frac{V_3}{V_2} \cdot T_2 = \frac{0,56 \cdot 10^{-3} m^3}{0,22 \cdot 10^{-3} m^3} \cdot 903 K = 2257,5 K$$

Zustand 3 nach 4: adiabat

$$p_3 \cdot V_3^\kappa = p_4 \cdot V_4^\kappa \rightarrow p_4 = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^\kappa \cdot p_3 = \left(\frac{0,56 \cdot 10^{-3} m^3}{4 \cdot 10^{-3} m^3}\right)^{1,4} \cdot 57 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} = 3,54 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{(\kappa-1)} \rightarrow T_4 = \frac{T_3}{\left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{(\kappa-1)}} = \frac{2257,5 K}{\left(\frac{4 \cdot 10^{-3} m^3}{0,55 \cdot 10^{-3} m^3}\right)^{(1,4-1)}} = 1020,82 K$$

1.4 gegeben: $m = 3,4 g$; $T_3 = 2260 K$; $T_4 = 1020 K$

gesucht: $Q_{zu} = Q_{23}$; $Q_{ab} = Q_{41}$

Zustand 2 nach 3: isobar

$$Q_{zu} = Q_{23} = c_p \cdot m \cdot \Delta T = c_p \cdot m \cdot (T_3 - T_2) = 1,005 \frac{kJ}{kgK} \cdot 3,4 \cdot 10^{-3} kg \cdot (2260 - 903) K$$

$$Q_{zu} = Q_{23} = 4,64 kJ$$

Zustand 4 nach 1: isochor

$$Q_{ab} = Q_{41} = c_v \cdot m \cdot \Delta T = c_v \cdot m \cdot (T_1 - T_4) = 0,718 \frac{kJ}{kgK} \cdot 3,4 \cdot 10^{-3} kg \cdot (373 - 1020) K$$

$$Q_{ab} = Q_{41} = -1,58 kJ$$

2 Ottomotor

2.1

	Zustand 1	Zustand 2	Zustand 3	Zustand 4
p in N/m^2	$0,8 \cdot 10^5$	$20,1 \cdot 10^5$	$46,17 \cdot 10^5$	$1,84 \cdot 10^5$
T in K	323	811,34	1873	745,65
V in m^3	$0,5 \cdot 10^{-3}$	$0,05 \cdot 10^{-3}$	$0,05 \cdot 10^{-3}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$

Aus Aufgabentext:

$$V_2 = \frac{1}{10} \cdot V_1 = 0,1 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} m^3 = 0,05 \cdot 10^{-3} m^3$$

Zustand 2 nach 3: isochor

$$V_3 = V_2 = 0,05 \cdot 10^{-3} m^3$$

Zustand 4 nach 1: isochor

$$V_4 = V_1 = 0,5 \cdot 10^{-3} m^3$$

Zustand 1 nach 2: adiabat

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{(\kappa-1)} \rightarrow T_2 = \frac{T_1}{\left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{(\kappa-1)}} = \frac{323 K}{\left(\frac{0,05 \cdot 10^{-3} m^3}{0,5 \cdot 10^{-3} m^3} \right)^{(1,4-1)}} = 811,34 K$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{(\kappa-1)}{\kappa}} \rightarrow p_2 = \frac{p_1}{\left(\frac{\kappa-1}{\kappa} \right)^{\frac{T_1}{T_2}}} = \frac{0,8 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}}{\left(\frac{1,4-1}{1,4} \right)^{\frac{323 K}{811,34 K}}} = 20,1 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}$$

Zustand 2 nach 3: isochor

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3} \rightarrow p_3 = \frac{p_2}{T_2} \cdot T_3 = \frac{20,1 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}}{811,34 K} \cdot 1873 K = 46,17 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}$$

Zustand 3 nach 4: adiabat

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{(\kappa-1)} \rightarrow T_4 = \frac{T_3}{\left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{(\kappa-1)}} = \frac{1873 K}{\left(\frac{0,5 \cdot 10^{-3} m^3}{0,05 \cdot 10^{-3} m^3} \right)^{(1,4-1)}} = 745,65 K$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{(\kappa-1)}{\kappa}} \rightarrow p_4 = \frac{p_3}{\left(\frac{\kappa-1}{\kappa} \right)^{\frac{T_3}{T_4}}} = \frac{46,17 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}}{\left(\frac{1,4-1}{1,4} \right)^{\frac{1873 K}{745,65 K}}} = 1,84 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}$$

$$2.2 \quad p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T \rightarrow m_{Luft} = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_i \cdot T_1} = \frac{0,8 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} m^3}{0,287 \frac{kJ}{kgK} \cdot 323 K} = 0,43 g$$

- 2.3 gegeben: $m = 0,43 \text{ g}; T_2 = 811 \text{ K}; T_4 = 746 \text{ K}$
 gegeben: $m = 0,43 \text{ g}; T_2 = 811 \text{ K}; T_4 = 746 \text{ K}$
 gesucht: W_{Nutz}

$$W_{\text{Nutz}} = W_{34} - W_{12}$$

Zustand 3 nach 4: adiabat

$$W_{34} = -\frac{m \cdot R_i}{1-\kappa} \cdot (T_4 - T_3) \rightarrow W_{34} = -\frac{0,43 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 0,287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}}{1-1,4} \cdot (1873 - 746) \text{ K}$$

$$W_{34} = 0,348 \text{ kJ}$$

Zustand 1 nach 2: adiabat

$$W_{12} = -\frac{m \cdot R_i}{1-\kappa} \cdot (T_2 - T_1) \rightarrow W_{12} = -\frac{0,43 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot 0,287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}}{1-1,4} \cdot (811 - 323) \text{ K}$$

$$W_{12} = 0,151 \text{ kJ}$$

$$W_{\text{Nutz}} = W_{34} - W_{12} = (0,348 - 0,151) \text{ kJ} = 0,197 \text{ kJ}$$

2.4 $\eta_{\text{therm}} = 1 - \frac{|Q_{\text{ab}}|}{Q_{\text{zu}}} = \frac{Q_{\text{zu}} - |Q_{\text{ab}}|}{Q_{\text{zu}}} = \frac{W_{\text{nutz}}}{Q_{\text{zu}}} = \frac{\text{Aufwand}}{\text{Nutzen}}$

$$Q_{\text{ab}} = Q_{41} = c_v \cdot m \cdot \Delta T = c_v \cdot m \cdot (T_1 - T_4) = 0,718 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 0,43 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot (323 - 746) \text{ K}$$

$$Q_{\text{ab}} = Q_{41} = -0,131 \text{ kJ}$$

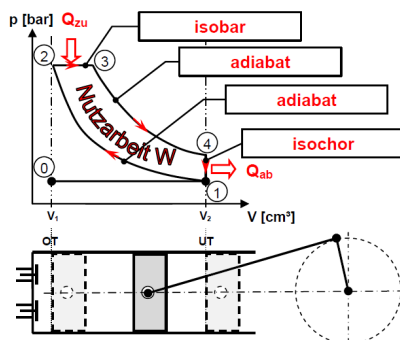
$$Q_{\text{zu}} = Q_{23} = c_v \cdot m \cdot \Delta T = c_v \cdot m \cdot (T_3 - T_2) = 0,718 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 0,43 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot (1873 - 811) \text{ K}$$

$$Q_{\text{zu}} = Q_{23} = 0,328 \text{ kJ}$$

$$\eta_{\text{therm}} = 1 - \frac{Q_{\text{ab}}}{Q_{\text{zu}}} = 1 - \frac{0,131 \text{ kJ}}{0,328 \text{ kJ}} = 1 - 0,4 = 0,6$$

3 Dieselmotor

3.1



- 3.2 gegeben: $p_1 = 0,8 \text{ bar} = 0,8 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
 $T_1 = 80 \text{ }^\circ\text{C} = 353 \text{ K}$
 $V_1 = 480 \text{ cm}^3 = 0,48 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{19}{1} \rightarrow V_2 = \frac{1}{19} \cdot V_1 = \frac{1}{19} \cdot 0,48 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 0,025 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{(\kappa-1)} \rightarrow T_2 = \frac{T_1}{\left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{(\kappa-1)}} = \frac{353 \text{ K}}{\left(\frac{0,025 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{0,48 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} \right)^{(1,4-1)}} = 1151,05 \text{ K}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{(\kappa-1)}{\kappa}} \rightarrow p_2 = \frac{p_1}{\left(\frac{\kappa-1}{\kappa} \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \right)} = \frac{0,8 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{\left(\frac{1,4-1}{1,4} \sqrt{\frac{353 \text{ K}}{1151,05 \text{ K}}} \right)} = 50,1 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

3.3 Kompression: Zustand 1 nach 2: adiabat

$$W_{\text{komp}} = W_{12} = -\frac{R_i}{1-\kappa} \cdot (T_2 - T_1) \rightarrow W_{12} = -\frac{0,287 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}}{1-1,4} \cdot (1151,05 - 353) \text{ K}$$

$$W_{12} = 572,6 \text{ kJ}$$

3.4 Verbrennung: Zustand 2 nach 3: isobar

$$\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3} \rightarrow T_3 = \frac{V_3}{V_2} \cdot T_2 = \frac{0,06 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{0,025 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} \cdot 1150 \text{ K} = 2760 \text{ K}$$

$$Q_{23} = c_p \cdot m \cdot \Delta T = c_p \cdot m \cdot (T_3 - T_2) = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 0,490 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot (2760 - 1150) \text{ K}$$

$$Q_{23} = 0,793 \text{ kJ}$$

$$Q_{23} = m_{\text{Diesel}} \cdot H_{i;\text{Diesel}} \rightarrow m_{\text{Diesel}} = \frac{Q_{23}}{H_{i;\text{Diesel}}} = \frac{0,793 \text{ kJ}}{42000 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 1,89 \cdot 10^{-5} \text{ kg}$$

Bei $n = 3000 \text{ min}^{-1}$ erfolgen 1500 Verbrennungen (Einspritzungen) pro min. Das bedeutet 90.000 Verbrennungen pro Stunde bzw. bei 5 Zylindern $90.000 \cdot 5 = 450.000$ Verbrennungen pro Stunde;

$$\dot{m}_{\text{ges}} = 1,89 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot 450000 \frac{1}{\text{h}} = 8,505 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$\dot{V}_{\text{ges}} = \frac{\dot{m}_{\text{ges}}}{\rho_{\text{Diesel}}} = \frac{8,505 \frac{\text{kg}}{\text{h}}}{0,83 \frac{\text{kg}}{\text{l}}} = 10,25 \frac{\text{l}}{\text{h}}$$

3.5 Der Kreisprozess des Dieselmotors wurde „rechtsläufig“ durchlaufen, d.h.

Expansion bei hohem Druck & Kompression bei niedrigem Druck.

$W = \int p \cdot dV > 0 \rightarrow$ Umwandlung der Wärmeenergie in mechanische Arbeit (Wärmekraftmaschine).

Die Umkehrung der Laufrichtung desselben Kreisprozesses („linksläufig“) bedeutet

Kompression bei hohem Druck & Expansion bei niedrigem Druck.

$W' = \int p \cdot dV < 0 \rightarrow$ Umwandlung von mechanischer Arbeit in Wärmeenergie (Kältemaschinen, Wärmepumpen).

4 Dieselmotor2

4.1

4.2

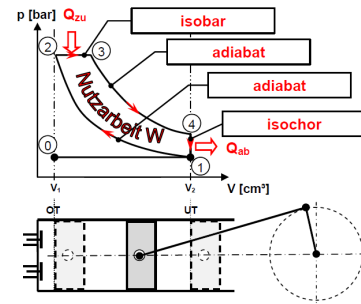
4.3 $W_{zu} = W_{12} =$ Fläche unter der Zustandsänderung 1 nach 2 (adiabat).

$W_{ab} = W_{23} + W_{34} =$ Fläche unter den Zustandsänderungen 2 nach 3 (isobar) und 3 nach 4 (adiabat).

4.4 $p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T$

$$\rightarrow m_{Luft} = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_i \cdot T_1} = \frac{0,9 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} m^3}{0,287 \frac{kJ}{kgK} \cdot 290 K} = 0,649 g$$

4.5



	Zustand 1	Zustand 2	Zustand 3	Zustand 4
p in N/m²	0,9 * 10 ⁵	59,7 * 10⁵	59,7 * 10⁵	2,49 * 10⁵
T in K	290	961,2	2000	806,7
V in m³	0,6 * 10 ⁻³	0,03 * 10⁻³	0,062 * 10⁻³	0,6 * 10⁻³

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{20}{1} \rightarrow V_2 = \frac{1}{20} \cdot V_1 = \frac{1}{20} \cdot 0,60 \cdot 10^{-3} m^3 = 0,030 \cdot 10^{-3} m^3$$

Zustand 1 nach 2: adiabat

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{(\kappa-1)} \rightarrow T_2 = \frac{T_1}{\left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{(\kappa-1)}} = \frac{290 K}{\left(\frac{0,03 \cdot 10^{-3} m^3}{0,6 \cdot 10^{-3} m^3} \right)^{(1,4-1)}} = 961,2 K$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{(\kappa-1)}{\kappa}} \rightarrow p_2 = \frac{p_1}{\left(\frac{\kappa-1}{\kappa} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}} = \frac{0,9 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}}{\left(\frac{1,4-1}{1,4} \right)^{\frac{1}{1,4}} \sqrt{\frac{290 K}{961,2 K}}} = 59,7 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}$$

Zustand 2 nach 3: isobar

$$\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_3}{T_3} \rightarrow V_3 = \frac{V_2}{T_2} \cdot T_3 = \frac{0,03 \cdot 10^{-3} m^3}{961,2 K} \cdot 2000 K = 0,062 \cdot 10^{-3} m^3$$

Zustand 3 nach 4: adiabat

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{(\kappa-1)} \rightarrow T_4 = \frac{T_3}{\left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{(\kappa-1)}} = \frac{2000 K}{\left(\frac{0,6 \cdot 10^{-3} m^3}{0,062 \cdot 10^{-3} m^3} \right)^{(1,4-1)}} = 806,7 K$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4} \right)^{\frac{(\kappa-1)}{\kappa}} \rightarrow p_4 = \frac{p_3}{\left(\frac{\kappa-1}{\kappa} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{T_3}{T_4}}} = \frac{59,7 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}}{\left(\frac{1,4-1}{1,4} \right)^{\frac{1}{1,4}} \sqrt{\frac{2000 K}{806,7 K}}} = 2,49 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}$$

4.6 $W_{Nutz} = W_{23} + W_{34} + W_{12}$

$$W_{23} = -p \cdot \Delta V = -p \cdot (V_3 - V_2) = 59,7 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot (0,062 \cdot 10^{-3} - 0,03 \cdot 10^{-3})$$

$$W_{23} = -191,04 J$$

$$W_{34} = -\frac{m \cdot R_i}{1 - \kappa} \cdot (T_4 - T_3) \rightarrow W_{34} = -\frac{0,65 \cdot 10^{-3} kg \cdot 0,287 \frac{kJ}{kg \cdot K}}{1 - 1,4} \cdot (806,7 - 2000) K$$

$$W_{34} = -0,557 kJ = -557 J$$

$$W_{12} = -\frac{m \cdot R_i}{1 - \kappa} \cdot (T_2 - T_1) \rightarrow W_{12} = -\frac{0,65 \cdot 10^{-3} kg \cdot 0,287 \frac{kJ}{kg \cdot K}}{1 - 1,4} \cdot (961,2 - 290) K$$

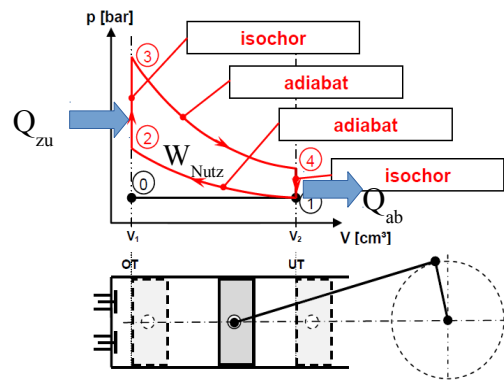
$$W_{12} = 0,313 kJ = 313 J$$

$$W_{Nutz} = W_{23} + W_{34} + W_{12} = [(-191,04) + (-557) + 313] kJ = -435,04 J$$

5 Ottomotor2

5.1

5.2



5.3 gegeben:

$p_1 = 1 \text{ bar}$	=	$1,0 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
$T_1 = 25 \text{ °C}$	=	298 K
$V_1 = 480 \text{ cm}^3$	=	$0,48 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$
$p_3 = 43 \text{ bar}$	=	$43 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$
κ	=	$1,4$

gesucht:

$V_2 = 0,051 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$	$p_2 = 23,07 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$	$T_2 = 730,6 \text{ K}$
$V_3 = 0,051 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$		$T_3 = 1361,8 \text{ K}$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{9,5}{1} \rightarrow V_2 = \frac{V_1}{9,5} = \frac{0,48}{9,5} = 0,051 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Zustand 1 nach 2: adiabat

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{(\kappa-1)} \rightarrow T_2 = \frac{T_1}{\left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{(\kappa-1)}} = \frac{298 \text{ K}}{\left(\frac{0,051 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{0,48 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} \right)^{(1,4-1)}} = 730,6 \text{ K}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{(\kappa-1)}{\kappa}} \rightarrow p_2 = \frac{p_1}{\left(\frac{\kappa-1}{\kappa} \right)^{\frac{1}{\kappa}} \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}} = \frac{1,0 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}}{\left(\frac{1,4-1}{1,4} \right)^{\frac{1}{1,4}} \sqrt{\frac{298 K}{730,6 K}}} = 23,07 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}$$

Zustand 2 nach 3: isochor

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{p_3}{T_3} \rightarrow T_3 = \frac{p_3 \cdot T_2}{p_2} = \frac{43 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot 730,6 K}{23,07 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2}} = 1361,8 K$$

5.4 Masse bestimmen über Zustand 1:

$$p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T \rightarrow m_{Luft} = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_i \cdot T_1} = \frac{1,0 \cdot 10^5 \frac{N}{m^2} \cdot 0,48 \cdot 10^{-3} m^3}{0,287 \frac{kJ}{kgK} \cdot 298 K} = 0,561 g$$

Verbrennung: Zustand 2 nach 3: isochor

$$Q_{23} = c_v \cdot m \cdot \Delta T = c_v \cdot m \cdot (T_3 - T_2) = 0,718 \frac{kJ}{kgK} \cdot 0,561 \cdot 10^{-3} kg \cdot (1350 - 730) K$$

$$Q_{23} = 0,25 kJ$$

6 Batterieelektrisches Fahrzeug

6.1 Mech. Leistung $P = F \cdot v = (F_W + F_R) \cdot v = (116 \text{ N} + 58,6 \text{ N}) \cdot 16,7 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 2,92 \text{ kW}$

6.2 Drehzahl $\frac{n}{n_{max}} = \frac{v}{v_{max}}$

$$n = \frac{v}{v_{max}} \cdot n_{max} = \frac{60 \text{ km/h}}{150 \text{ km/h}} \cdot 11400 \text{ min}^{-1} = 4560 \text{ min}^{-1}$$

Drehmoment $P = M \cdot \omega$

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{2,92 \text{ kW}}{2 \cdot \pi \cdot (4560/60) \text{ s}^{-1}} = 6,11 \text{ Nm}$$

6.3 Wirkungsgrad aus dem Wirkungsgradkennfeld $\eta \approx 50\%$

Elektrische Leistung $P_{el} = \frac{P_{mech}}{\eta} = \frac{2,92 \text{ kW}}{0,5} = 5,84 \text{ kW}$

6.4 Fahrzeit $W_{nutzbar} = P_{el} \cdot t \rightarrow t = \frac{W_{nutzbar}}{P_{el}} = \frac{18,8 \text{ kWh}}{5,84 \text{ kW}} = 3,22 \text{ h}$

Strecke $s = v \cdot t = 60 \text{ km/h} \cdot 3,22 \text{ h} = 193 \text{ km}$

6.5 Bis zum Knick der Volllastkennlinie ist das Drehmoment und damit die beschleunigende Kraft maximal. Jedoch erst ab dem Knick der Volllastkennlinie wird die Maximalleistung erreicht. Die folgenden Gleichungen werden also für den Knick formuliert.

Geschwindigkeit am Knick der Volllastkennlinie $\frac{n_{max}}{n_{Knick}} = \frac{v_{max}}{v_{Knick}}$

$$v_{Knick} = v_{max} \cdot \frac{n_{Knick}}{n_{max}} = 150 \text{ km/h} \cdot \frac{4800 \text{ min}^{-1}}{11400 \text{ min}^{-1}} = 63,2 \text{ km/h} = 17,5 \text{ m/s}$$

Max. Antriebskraft $P_{max} = F_{max} \cdot v_{Knick} \rightarrow F = \frac{P_{max}}{v} = \frac{125 \text{ kW}}{17,5 \text{ m/s}} = 7,14 \text{ kN}$

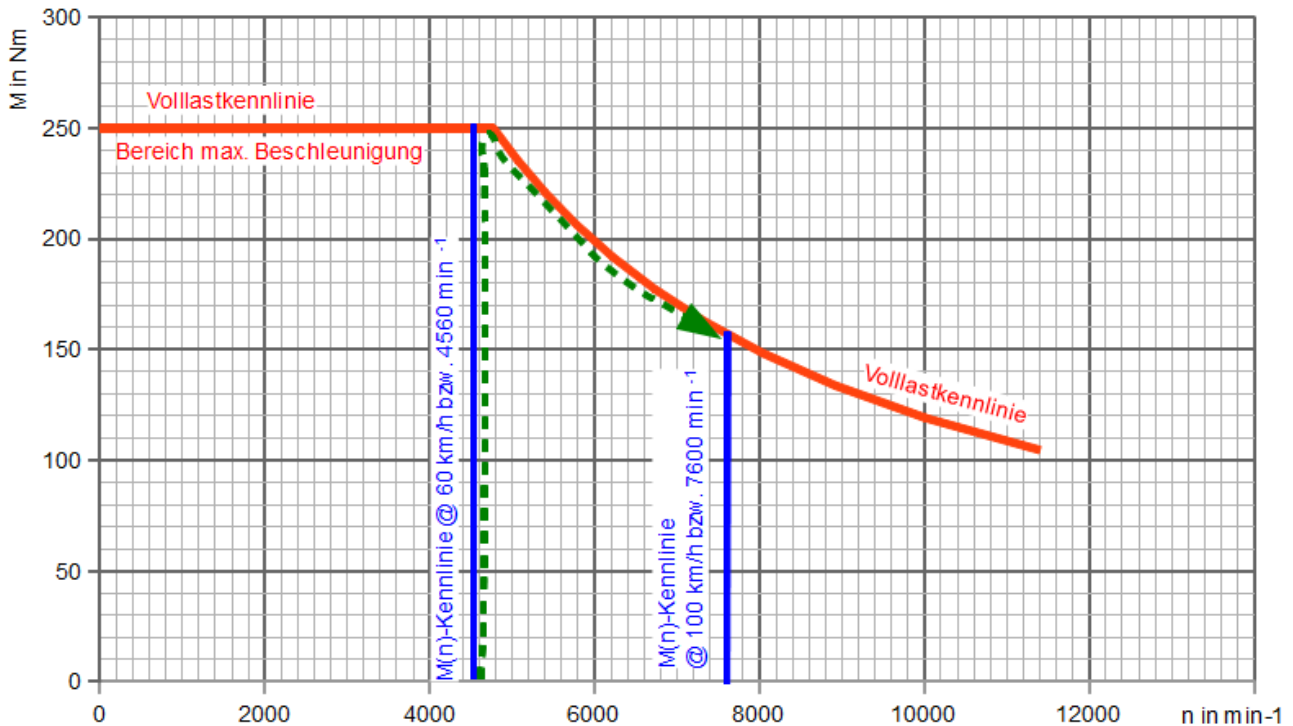
Max. Beschleunigung $F_{max} = m \cdot a_{max} \rightarrow a = \frac{F_{max}}{m} = \frac{7,14 \text{ kN}}{1195 \text{ kg}} = 5,97 \text{ m/s}^2$

6.6 Fett ist die Volllastkennlinie eingetragen. Unterhalb der Volllastkennlinie liegt der erlaubte Arbeitsbereich des Motors. Im waagrechten Teil ist das maximale Drehmoment des Motors (bzw. der maximale Strom von Motor, Leistungselektronik und Batterie) begrenzend. Im Hyperbelbereich ist die Maximalleistung des Motors begrenzend. Der Bereich endet bei der maximal erlaubten Drehzahl.

6.7 $v_1 = 60 \text{ km/h @ } n_1 = \frac{v_1}{v_{max}} \cdot n_{max} = \frac{60 \text{ km/h}}{150 \text{ km/h}} \cdot 11400 \text{ min}^{-1} = 4560 \text{ min}^{-1}$

$v_2 = 100 \text{ km/h @ } n_2 = \frac{v_2}{v_{max}} \cdot n_{max} = \frac{100 \text{ km/h}}{150 \text{ km/h}} \cdot 11400 \text{ min}^{-1} = 7600 \text{ min}^{-1}$

Die beiden gesuchten Kennlinien sind im folgenden Diagramm blau eingezeichnet.



6.8 Der Weg durch das $M(n)$ -Diagramm bei einer Beschleunigung von 60 km/h im Leerlauf auf 100 km/h bei Vollast ist im folgenden Diagramm grün eingezeichnet.

7 Serieller Hybridantrieb

7.1 250 g/kWh

7.2 Der Motor gibt 2,92 kW ab. Da die Übersetzung nicht fest vorgegeben ist, kann einer bestimmten Drehzahl n keine Geschwindigkeit zugeordnet werden. Der möglich Verbrauch (je nach Übersetzung) ist an den Schnittpunkten der 2,92 kW-Hyperbel mit den Wirkungsgradkennlinien ablesbar. D. h.: Der Wirkungsgrad liegt zwischen 17,7 % und 29,5 %, je nach gewähltem Getriebegang. Man sieht, dass man für einen guten Wirkungsgrad und damit geringen Verbrauch eine möglichst geringe Motordrehzahl und daher einen möglichst hohen Gang wählen sollte.

7.3 Range-Extender-Betrieb: Der Verbrennungsmotor läuft im optimalen Betriebspunkt und gibt fest 25 kW ab. Da diese Leistung nur zu einem geringen Teil zum Antrieb verwendet wird, kann auch der Akku aufgeladen werden.

7.4 Bei dieser Vorschrift wird nicht berücksichtigt, dass die Batterie aufgeladen wird und diese gespeicherte Energie später zur Fortbewegung eingesetzt wird, ohne dass dabei Energie vom Verbrennungsmotor geliefert werden müsste.

7.5 Wirkungsgrad über die Energiemengen berechnen: $\eta = \frac{W_{\text{ges-ab}}}{W_{\text{ges-zu}}}$

Zugeführt: Aufladung Akku + Energieinhalt Benzin.

Abgegeben: 2,92 kW mal Gesamtzeit.

Gesamtzeit = Zeit bis Akku leer + Zeit bis Benzin leer, dabei Akku wieder aufgeladen + Zeit bis Akku erneut leer

$$7.6 \quad \text{Energiedichte}_{\text{Batterie}} = \frac{W}{m} = \frac{18,8 \text{ kWh}}{300 \text{ kg}} = \frac{67,68 \text{ MJ}}{300 \text{ kg}} = 226 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\text{Energiedichte}_{\text{Tankinhalt}} = H_i = 11,3 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 40,7 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

Die Energiedichte des Tankinhalts ist also 180 mal größer als die der Batterie.

- 7.7 Der Verbrennungsmotor arbeitet immer im Nennbetriebspunkt (also $P_{\text{mech}} = 25 \text{ kW}$) mit einem Verbrauch von 250 g/kWh . Damit liegt sein Gesamtverbrauch bei

$$\dot{m} = 0,25 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \cdot 25 \text{ kW} = 6,25 \text{ kg/h}$$

Die Masse des Tankinhalts beträgt: $m = \rho \cdot V = 0,75 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \cdot 9 \text{ L} = 6,75 \text{ kg}$.

Somit beträgt die maximale Laufzeit bis der Tank leer ist:

$$t_{\text{Verbrennungsmotor}} = \frac{m}{\dot{m}} = \frac{6,75 \text{ kg}}{6,25 \text{ kg/h}} = 1,08 \text{ h}$$

- 7.8 Aus dem Energieflussdiagramm wird entnommen: Während der Laufzeit des Verbrennungsmotors stehen $16,7 \text{ kW}$ zum Laden der Batterie zur Verfügung. Die Laufzeit wurde in der vorigen Teilaufgabe zu $1,08 \text{ h}$ ermittelt. Damit ergibt sich:

$$W_{\text{Batterie}} = P_{\text{Lade}} \cdot t \cdot \eta_{\text{Lade}} = 16,7 \text{ kWh} \cdot 1,08 \text{ h} \cdot 0,9 = 16,2 \text{ kWh}$$

- 7.9 Der Elektroantrieb, der in der beschriebenen Fahrsituation $5,84 \text{ kW}$ benötigt kann also so lange betrieben werden:

$$t_{\text{Entladung}} = \frac{W_{\text{Batterie}}}{P_{\text{el, Motor}}} = \frac{16,2 \text{ kWh}}{5,84 \text{ kW}} = 2,77 \text{ h}$$

- 7.10 $s = v \cdot t_{\text{ges}} = v \cdot (t_{\text{Verbrennungsmotor}} + t_{\text{Entladung}}) = 60 \text{ km/h} \cdot (1,08 \text{ h} + 2,77 \text{ h}) = 231 \text{ km}$

8 Paralleles Hybridfahrzeug

8.1 Die Antriebskraft wird zur Überwindung der Rollreibungskraft und der Luftwiderstandskraft benötigt.

$$8.2 \quad P_{mech} = F \cdot v = 320 \text{ N} \cdot \frac{40 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} = 3,56 \text{ kW} < P_{Nenn} = 20 \text{ kW} \rightarrow \text{Betriebsart (1) möglich.}$$

$$8.3 \quad P_{el} = \frac{P_{mech}}{\eta} = \frac{3,56 \text{ kW}}{0,85} = 4,18 \text{ kW} \quad t = \frac{W_A}{P_{el}} = \frac{0,8 \text{ kWh}}{4,18 \text{ kW}} = 0,191 \text{ h}$$

$$s = v \cdot t = 40 \text{ km/h} \cdot 0,191 \text{ h} = 7,65 \text{ km}$$

8.4 Skizze fehlt noch

8.5 Fahrsituation (b): Betriebsart (2) sinnvoll, da für längere Fahrten der höhere Energieinhalt des Kraftstofftanks besser geeignet ist als der Energieinhalt des Akkus. Außerdem wird bei der schnellen Autobahnfahrt der stärkere Dieselantrieb benötigt. Die elektrische Maschine kann zur Lastpunktverschiebung genutzt werden.

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

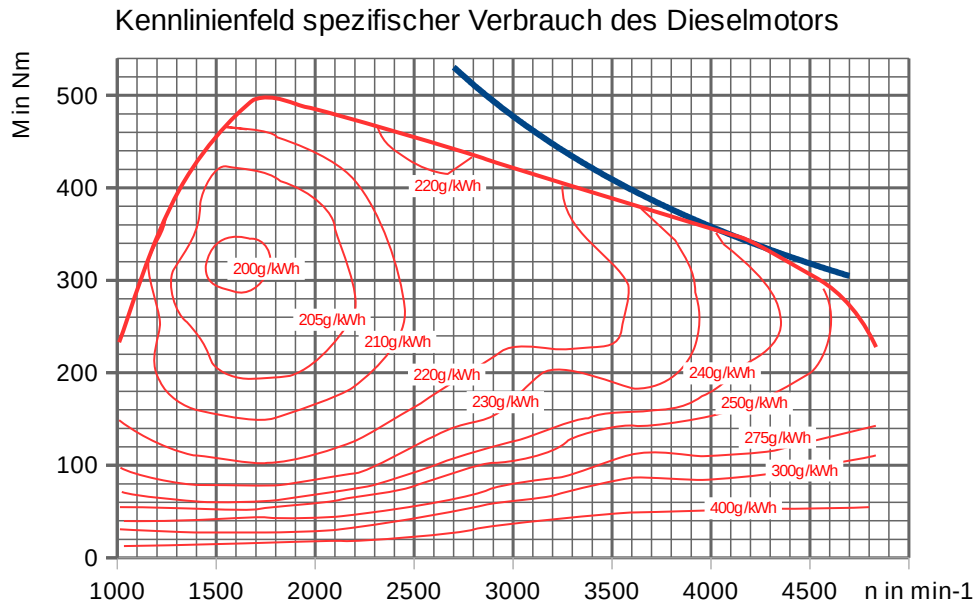
$$8.6 \quad \text{Antriebsleistung: } P = F \cdot v = 780 \text{ N} \cdot \frac{130 \text{ m}}{3,6 \text{ s}} = 28,2 \text{ kW}$$

$$\text{Antriebsmoment: } P = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M \rightarrow M = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{28,2 \text{ kW}}{2 \cdot \pi \cdot 1600/60 \text{ s}^{-1}} = 168 \text{ Nm}$$

Die elektrische Maschine wird als Generator betrieben, der durch sein zusätzliches Lastmoment das für den Antrieb benötigte Moment von 168 Nm auf den verbrauchsoptimalen Wert von 320 Nm erhöht. $M_{zusätzlich} = M_{optimal} - M = 320 \text{ Nm} - 168 \text{ Nm} = 152 \text{ Nm}$

8.7 Das maximale Antriebsmoment ergibt sich in Betriebsart (3). Dabei addieren sich das maximale Antriebsmoment des Dieselmotors von 500 Nm und des Elektromotors von 250 Nm zu insgesamt 750 Nm.

8.8 Man kann eine Punktprobe für einige Werte der Vollastkennlinie durchführen. Die Maximalleistung ergibt sich dabei zu $P = \omega \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot 4200 \text{ min}^{-1} \cdot 340 \text{ Nm} = 150 \text{ kW}$. Auch die in das Diagramm eingezeichnete 150kW-Hyperbel bestätigt das Ergebnis (nicht verlangt).



$$8.9 \quad 42 \text{ MJ/kg} = \frac{42\,000\,000 \text{ Ws}}{\text{kg}} = \frac{42\,000 \text{ kWh}}{3600 \text{ kg}} = 11,67 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$$

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\text{Ausbeute}}{\text{Heizwert}} = \frac{1/\text{Verbrauch}}{\text{Brennwert}} = \frac{(0,2 \frac{\text{kg}}{\text{kWh}})^{-1}}{11,67 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = \frac{5 \text{ kWh/kg}}{11,67 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}} = 42,9\%$$

$$8.10 \quad p_1 \cdot V_1 = m \cdot R_i \cdot T_1 \rightarrow p_1 = \frac{m \cdot R_i \cdot T_1}{V_1} = \frac{1951 \text{ mg} \cdot 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 358 \text{ K}}{536 \text{ cm}^3} = 3,74 \text{ bar}$$

$$8.11 \quad V_2 = \frac{V_1}{\epsilon} = \frac{536 \text{ cm}^3}{19} = 28,2 \text{ cm}^3$$

$$p_1 \cdot V_1^\kappa = p_2 \cdot V_2^\kappa \rightarrow p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\kappa = 3,74 \text{ bar} \cdot \left(\frac{19}{1}\right)^{1,4} = 231 \text{ bar}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa-1} \rightarrow T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\kappa-1} = 358 \text{ K} \cdot \left(\frac{19}{1}\right)^{1,4-1} = 1162 \text{ K}$$

8.12 Skizze fehlt noch

$$8.13 \quad W_{12} = -\frac{m \cdot R_i}{1-\kappa} \cdot (T_2 - T_1) = -\frac{1951 \text{ mg} \cdot 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}}{1-1,4} \cdot (1162 \text{ K} - 358 \text{ K}) = 1125 \text{ J}$$

8.14

$$W_{34} = -\frac{m \cdot R_i \cdot T_3}{1-\kappa} \cdot \left(\left[\frac{V_3}{V_4} \right]^{\kappa-1} - 1 \right) = -\frac{1951 \text{ mg} \cdot 287 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 2790 \text{ K}}{1-1,4} \cdot \left(\left[\frac{67,7 \text{ cm}^3}{536 \text{ cm}^3} \right]^{1,4-1} - 1 \right) = -2198 \text{ J}$$

$$W_{\text{nutz}} = |W_{34}| - W_{12} = 2198 \text{ J} - 1125 \text{ J} = 1073 \text{ J}$$

8.15 Während einer Minute werden 4200 Umdrehungen der Kurbelwelle, aber nur 2100 Zyklen gezählt:

$$P = \frac{W_{\text{ges}}}{t} = \frac{W_{\text{nutz}} \cdot \text{Zylinderzahl} \cdot 2100 \text{ Zyklen}}{60 \text{ s}} = \frac{1073 \text{ J} \cdot 4 \cdot 2100}{60 \text{ s}} = 150 \text{ kW}$$

Der thermodynamisch berechnete Werte stimmt mit dem aus der Vollastkennlinie ermittelten Wert überein.

$$8.16 \quad Q_{23} = c_p \cdot m \cdot \Delta \vartheta = 1,005 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} 1951 \text{ mg} \cdot (2790 \text{ K} - 1162 \text{ K}) = 3192 \text{ J}$$

$$8.17 \quad m_{\text{Kraftstoff}} = \frac{Q_{23}}{H_i} = \frac{3,192 \text{ kJ}}{11,67 \text{ kWh/kg}} = 76 \text{ mg} \quad \text{werden für einen Zyklus benötigt}$$

$W_{\text{nutz}} = 1073 \text{ J}$ werden während eines Zyklus an Nutzarbeit abgegeben

$$\text{Spezifischer Verbrauch} = \frac{m_{\text{Kraftstoff}}}{W_{\text{nutz}}} = \frac{0,076 \text{ g}}{1073 \text{ J}} = \frac{3600 \cdot 0,076 \text{ g}}{3192 \text{ Wh}} = 255 \frac{\text{g}}{\text{kWh}}$$

Aus dem Verbrauchskennfeld kann man für $n = 4200 \text{ min}^{-1}$ an der Vollastkennlinie einen spezifischen Verbrauch von etwa 245 g/kWh ablesen, was recht gut mit dem thermodynamisch berechneten Wert übereinstimmt.

9 Batterieelektrisches Fahrzeug

4P 9.1 $v = 100 \text{ km/h}$, $n = 7000 \text{ min}^{-1}$, $F = 900 \text{ N}$

$$v = 100 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 100 \cdot \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 27,78 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad n = 7000 \frac{1}{\text{min}} = 7000 \frac{1}{60 \text{ s}} = 116,7 \frac{1}{\text{s}}$$

$$P = F \cdot v = 900 \text{ N} \cdot 27,78 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 25 \text{ kW}$$

$$M = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot 116,7 \frac{1}{\text{s}}} = 34,1 \text{ Nm}$$

2P 9.2 Übergang (A): Gaspedal voll durchgetreten, maximales Drehmoment, (Drehmoment wird durch max. Motorleistung begrenzt), maximale Beschleunigung, maximale Leistung → hoher Energieverbrauch durch Beschleunigungsvorgang

Übergang (B): Gaspedal „leicht“ gedrückt, das Fahrzeug wird nur langsam schneller, Drehmoment und Leistung steigen nur langsam → geringerer Energieverbrauch als bei (A).

4P 9.3 $v = 150 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 41,67 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ $n = 10500 \frac{1}{\text{min}} = 175 \frac{1}{\text{s}}$

$$P = F \cdot v = 1100 \text{ N} \cdot 41,67 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 45,84 \text{ kW}$$

Abgelesen im Wirkungsgrad-Kennfeld beim Betriebspunkt 3: $\eta_{\text{Motor}} \approx 82 \%$
 gegebene Daten der Batterie: Entladewirkungsgrad 89%, Nutzbare Kapazität 25 kWh

$$W_{\text{ab}} = \eta_{\text{Motor}} \cdot \eta_{\text{Batt}} \cdot W_{\text{Batt}} = 82\% \cdot 89\% \cdot 3/4 \cdot 25 \text{ kWh} = 13,68 \text{ kWh}$$

$$t = \frac{W}{P} = \frac{13,68 \text{ kWh}}{45,84 \text{ kW}} = 0,298 \text{ h}$$

$$s = v \cdot t = 150 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 0,298 \text{ h} = 44,8 \text{ km}$$

Kürzere Reichweite bei 150 km/h als 100 km/h wegen höherem Energieverbrauch durch stark ansteigende Luftwiderstandskraft.

Alternative Berechnung:

Abgelesen im Wirkungsgrad-Kennfeld beim Betriebspunkt 2: $\eta_{\text{Motor}} \approx 73 \%$

$$\text{Von der Batterie gelieferte Arbeit: } W_{100 \text{ km/h}} = \frac{F \cdot s}{\eta_{\text{Motor}}} = \frac{400 \text{ N} \cdot 110 \text{ km}}{0,73} = 60,3 \text{ MJ}$$

$$\text{Weg bei 150 km/h: } s_{150 \text{ km/h}} = \frac{W_{\text{elekt}}}{F} \cdot \eta_{\text{Motor}} = 60,3 \frac{\text{MJ}}{1100 \text{ N}} \cdot 0,82 = 45 \text{ km}$$

Hinweis: Berechnung der gegebenen Reichweite bei 100 km/h (nicht verlangt)

$$P = F \cdot v = 400 \text{ N} \cdot 27,78 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 11,11 \text{ kW} \quad \text{Abgelesen Betriebspunkt 2: } \eta_{\text{Motor}} \approx 73 \%$$

$$W_{\text{ab}} = \eta_{\text{Motor}} \cdot \eta_{\text{Batt}} \cdot W_{\text{Batt}} = 73\% \cdot 89\% \cdot 3/4 \cdot 25 \text{ kWh} = 12,18 \text{ kWh}$$

$$t = \frac{W}{P} = \frac{12,18 \text{ kWh}}{11,11 \text{ kW}} = 1,1 \text{ h} \quad s = v \cdot t = 100 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot 1,1 \text{ h} = 110 \text{ km}$$

9.4 Straße hat Gefälle. Die Hangabtriebskraft muss den steigenden Luftwiderstand bei erhöhter Geschwindigkeit kompensieren.

10 Serielles Hybridfahrzeug

- 3P 10.1 Die Achse wird ausschließlich mit dem Elektromotor angetrieben, der beim Bremsen auch als Generator zum Aufladen der Batterie arbeiten kann.

Zur Reichweitenerhöhung kann ein Verbrennungsmotor zugeschaltet werden, der immer im optimalen Betriebspunkt arbeitet und mit einem Generator verbunden ist, der die Batterie lädt bzw. dem Elektromotor elektrische Energie liefert.

Nehmen wir an, der Akku sei leer und die gesamte Energie für den Antrieb des Elektromotors müsse vom Ottomotor und Generator erzeugt werden. Der Ottomotor läuft im Nennbetrieb.

- 2P 10.2 Akku leer, daher kann nur der Generator am Ottomotor elektrische Energie liefern:

$$P_{\text{Generator}} = \eta_{\text{Generator}} \cdot P_{\text{Ottomotor}} = 0,9 \cdot 25 \text{ kW} = 22,5 \text{ kW} \text{ wird geliefert}$$

Abgelesen im Wirkungsgrad-Kennfeld beim Betriebspunkt 2: $\eta_{\text{Motor}} \approx 73 \%$

Notwendige elektrische Energie für den Elektromotor:

$$P_{\text{Motor-mech}} = F \cdot v = 400 \text{ N} \cdot 27,78 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 11,11 \text{ kW}$$

$$P_{\text{Motor-elekt}} = \frac{P_{\text{Motor-mech}}}{\eta_{\text{Elektromotor}}} = \frac{11,1 \text{ kW}}{0,73} = 15,2 \text{ kW} \text{ notwendig zum Antrieb}$$

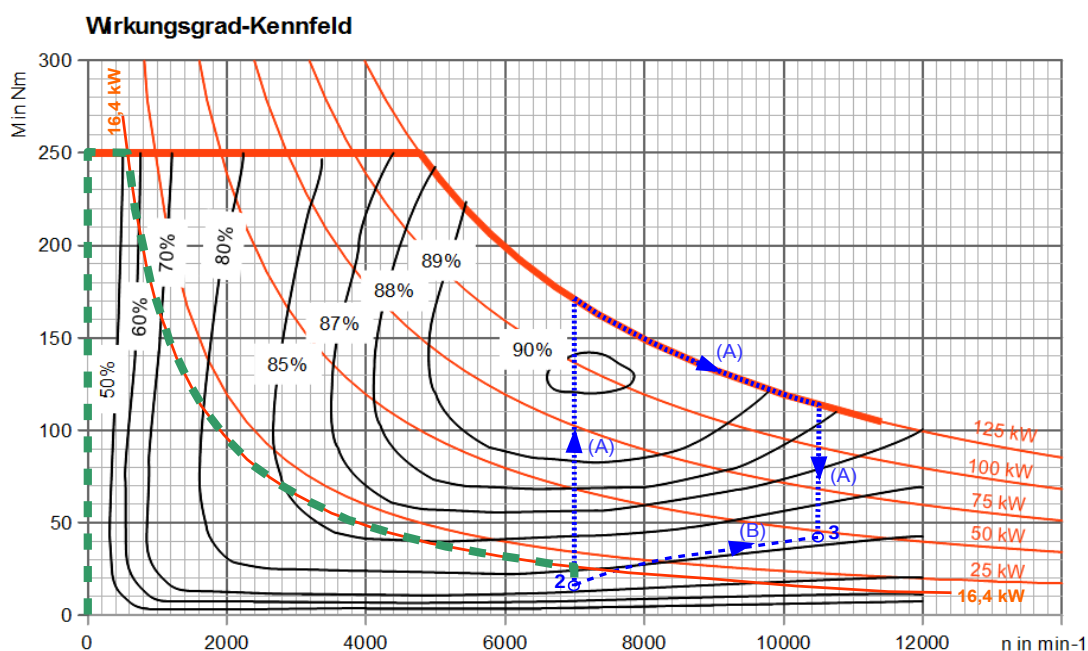
Akku wird mit $22,5 \text{ kW} - 15,2 \text{ kW} = 7,3 \text{ kW}$ aufgeladen.

- 3P 10.3 Akku leer, elektrische Energie nur aus dem Generator.

Maximale mechanische Leistung: $P_{\text{ab}} = 22,5 \text{ kW} \cdot 0,73 = 16,4 \text{ kW}$

→ geschätzte Leistungshyperbel $16,4 \text{ kW}$ einzeichnen.

Anfahren zunächst mit maximalem Drehmoment, dann sinkt dies sehr stark ab entlang der $16,4 \text{ kW}$ - Hyperbel und die Drehzahl steigt bis zum Betriebspunkt 2.

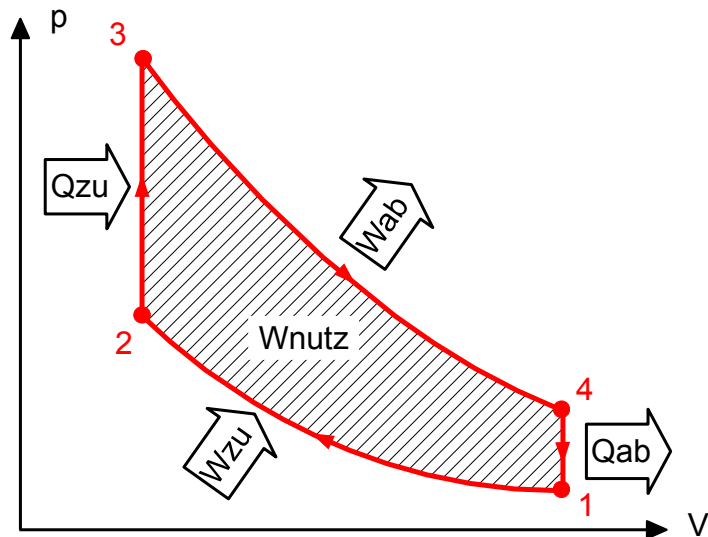


- 10.4
- 1-2 : Adiabatische Kompression durch Verrichtung der Arbeit W_{zu} am Arbeitsgas
 - 2-3 : Isochore Wärmeaufnahme Q_{Eu} durch Zünden und Verbrennen des Kraftstoff-Luft-Gemisches
 - 3-4 : Adiabatische Expansion, hier wird lediglich die Arbeit W_{ab} vom Arbeitsgas geleistet
 - 4-1 : Isochorer Gaswechsel, hier wird keine Arbeit geleistet; lediglich die Wärme Q_{ab} wird mit dem Abgas abgegeben

10.5

$$\frac{P_2}{T_2} = \frac{P_3}{T_3}$$

$$P_3 = P_2 \cdot \frac{T_3}{T_2} = 46,4 \text{ bar}$$



11 Paralleles Hybridfahrzeug

- 4P 11.1 Der Motor benötigt eine minimale Drehzahl, daher beginnen die Kennlinie M_{max} und P_{max} nicht bei 0, sondern erst bei 500 min^{-1} .

M_{max} stellt das maximale Drehmoment dar und wird als Vollastkennlinie bezeichnet, P_{max} stellt die maximal mögliche Leistung dar. Die maximale Drehzahl (rechte Grenze) ist technisch bedingt.

Beim Anfahren steigen Drehmoment und Leistung an, beide besitzen Maximalwerte bei bestimmten Drehzahlen. Es ist ein Getriebe notwendig, um die Motordrehzahlen den Fahrgeschwindigkeiten anzupassen.

Unterhalb der Vollastkennlinie sind Kennlinien mit gleichen spezifischen Kraftstoffverbräuchs eingezeichnet mit denen man den Verbrauch bei bestimmten Drehzahl/Drehmoment-Kombinationen ablesen kann.

An den Schnittpunkten ergeben die Werte der Leistungshyperbeln und die Drehmomentwerte den Wert der P_{max} -Kennlinie.

- 2P 11.2 Bei $n = 1300 \text{ min}^{-1}$ unterschreitet die M_{max} -Kennlinie die 70 kW-Hyperbel. Daher ist dies die niedrigste möglich Drehzahl, die höchste ist 4900 min^{-1} .

- 3P 11.3 $v = 50 \text{ km/h}$ im 4. Gang $\rightarrow n = 1250 \text{ min}^{-1} \rightarrow M = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{50.000 \text{ W}}{2 \cdot \pi \cdot 1250} \cdot 60 \text{ s} = 382 \text{ Nm}$

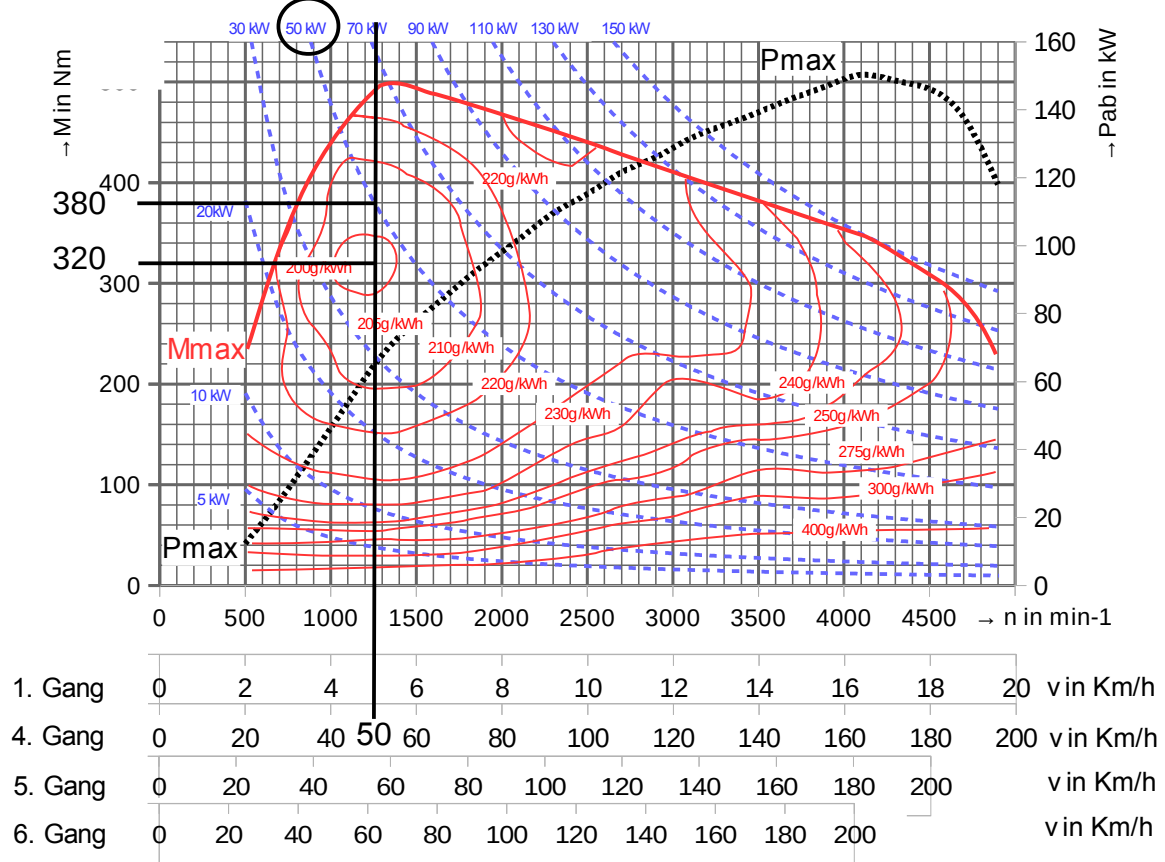
oder Wert ablesen: 50 kW-Hyperbel schneidet 1250 min^{-1} -Senkrechte \rightarrow links M ablesen

Aus Diagramm Verbrauchs-optimaler Bereich $\rightarrow N = 320 \text{ Nm}$ (Auge)

\rightarrow Elektromotor muss $380 \text{ Nm} - 320 \text{ Nm} = 60 \text{ Nm}$ aufbringen, also als Motor arbeiten

Siehe Diagramm nächste Seite.

Kennlinienfeld spezifischer Verbrauch mit Vollastkennlinie M_{max} und Leistungsverlauf P_{max}



12 Batterieelektrisches Fahrzeug Zoe

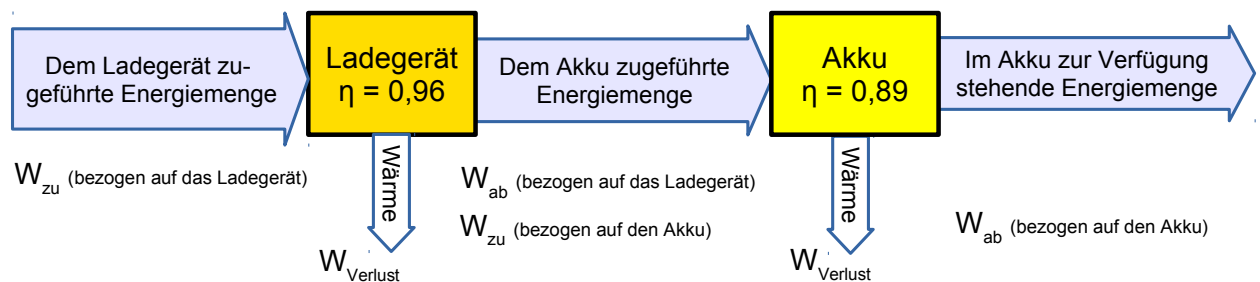
$$12.1 \quad P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \rightarrow I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi} = \frac{22 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 31,8 \text{ A}$$

$$12.2 \quad W = P \cdot t \cdot \eta_{\text{Ladegerät}} = 22 \text{ kW} \cdot 26 \text{ min} \cdot \frac{1 \text{ h}}{60 \text{ min}} \cdot 0,96 = 9152 \text{ Wh}$$

30 % → 9152 Wh (nach 26 min Ladezeit)

100 % → 30,5 kWh (bei Vollladung)

12.3



$$W_{\text{motor}} = \eta_{\text{Akku}} \cdot W_{\text{akku}} = 0,89 \cdot 30,5 \text{ kWh} = 27,1 \text{ kWh}$$

12.4 Vorteil Blei Akkumulatoren:

Günstig, einfache Technik (Austausch einfach möglich)

Nachteil Blei Akkumulatoren:

Geringe Energiedichte, ->Gewicht, Schwermetall, fehlende Schnellladung

Vorteil Li-Ionen Akkumulatoren:

Höhere Energiedichte, geringer Memory- Effekt, kleine Selbstentladung,

Nachteil Li-Ionen Akkumulatoren:

Höherer Preis, Kinderarbeit / geringe Verfügbarkeit, Selbstentzündung und empfindlich gegen Über- und Tiefentladung

$$12.5 \quad 135 \text{ km/h} \rightarrow n_{135} = 10000 \text{ min}^{-1} \quad (\text{Datenblatt})$$

$$90 \text{ km/h} \rightarrow n_{90} = 10000 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{90 \text{ km/h}}{135 \text{ km/h}} = 6666 \text{ min}^{-1}$$

aus dem Wirkungsgrad-Kennfeld: Leistungshyperbel 15 kW bei 6666 min⁻¹ → 80 %

$$P_{\text{Motor-elekt}} = \frac{P_{\text{ab}}}{\eta} = \frac{15 \text{ kW}}{0,8} = 18,75 \text{ kW}$$

$$12.6 \quad t = \frac{W}{P} = \frac{27 \text{ kWh}}{18,75 \text{ kW}} = 1,44 \text{ h} \quad s = v \cdot t = 90 \text{ km/h} \cdot 1,44 \text{ h} = 129,6 \text{ km}$$

(Anmerkung: Im Prospekt werden „reale“ Reichweiten von 110 km bis 190 km „je nach Fahrweise“ angegeben.)

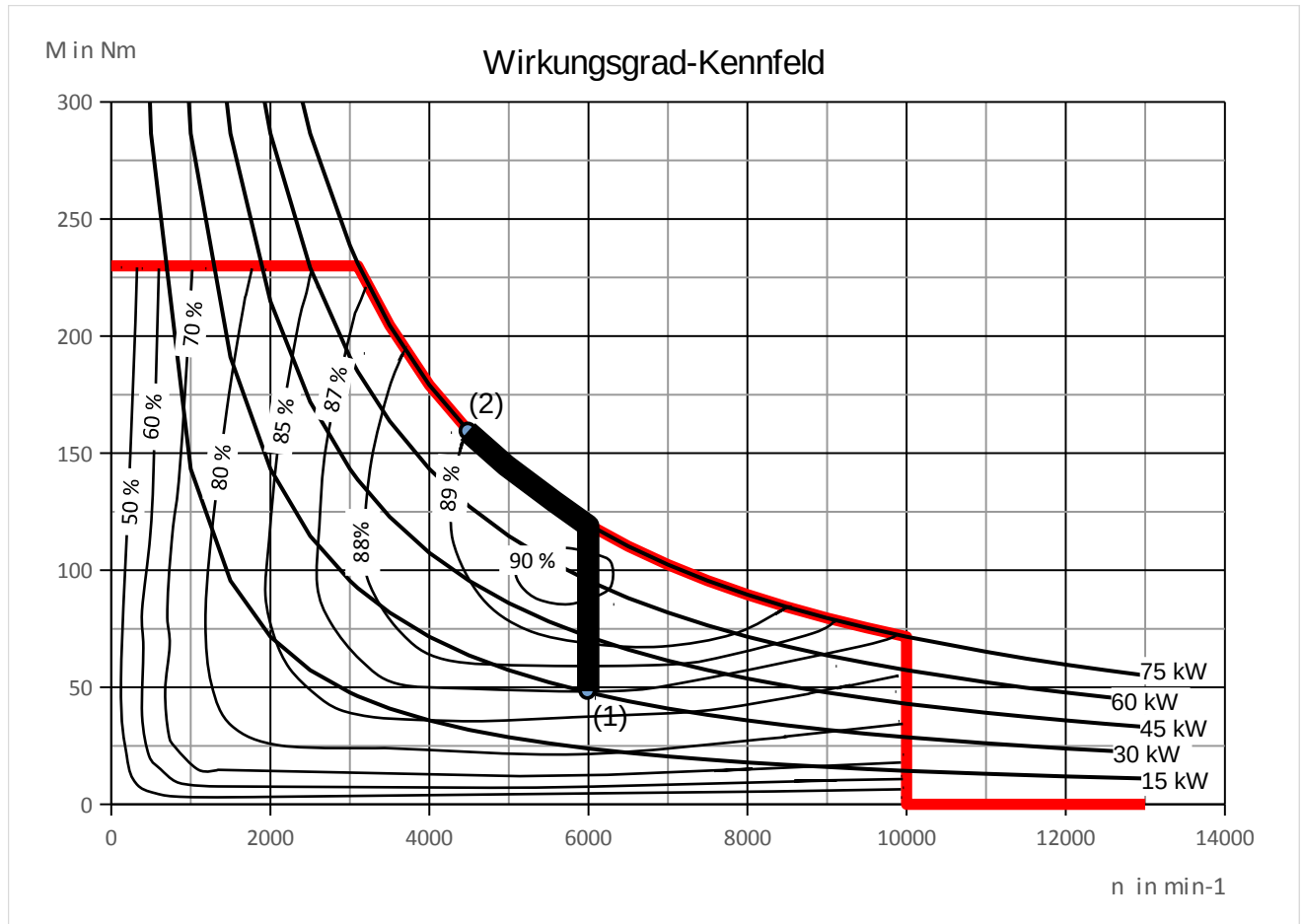
12.7 Betriebszustand 1: 6000 min⁻¹ auf 30 kW Hyperbel

Betriebszustand 2: 4440 min⁻¹ auf der 75 kW Hyperbel (Vollgaskennlinie nach links)

Gaspedal voll durchgetreten Maximales Drehmoment wird durch maximale Leistung begrenzt

$$n_{81} = 10000 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{81 \text{ km/h}}{135 \text{ km/h}} = 6000 \text{ min}^{-1}$$

$$n_{60} = 10000 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{60 \text{ km/h}}{135 \text{ km/h}} = 4444 \text{ min}^{-1}$$



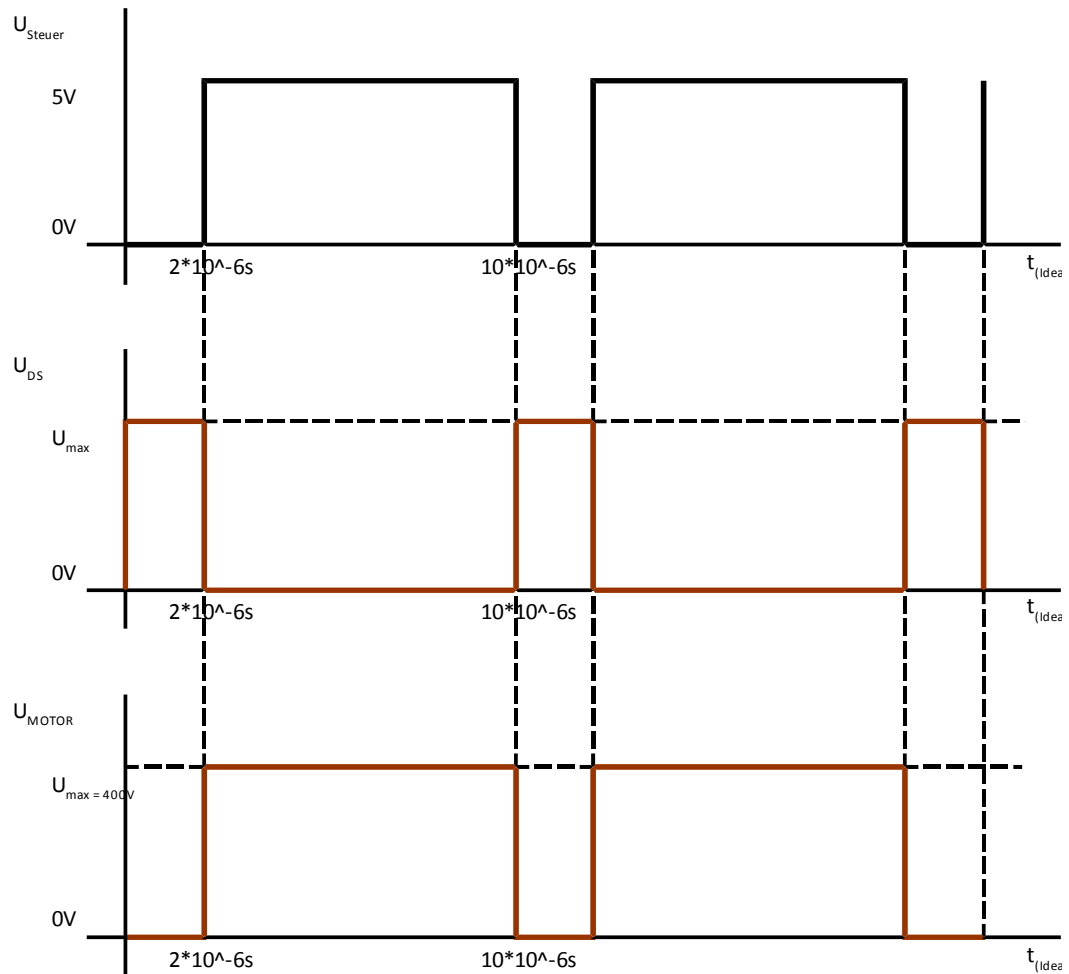
12.8 Betriebspunkt1: $\eta = 0,87$ $P_{el} = 30 \text{ kW} / 0,87 = 34,48 \text{ kW}$ $P_{verl.} = P_{el} - P_{mech} = 4,48 \text{ kW}$

Betriebspunkt2: $\eta = 0,89$ $P_{el} = 75 \text{ kW} / 0,89 = 84,27 \text{ kW}$ $P_{verl.} = P_{el} - P_{mech} = 9,27 \text{ kW}$

Trotz des besseren Wirkungsgrades in (2), ist dort der Leistungsverlust größer, da die zugeführte Leistung deutlich größer ist als in (1). Dies kann auch der bessere Wirkungsgrad nicht kompensieren.

12.9 Wenn die Drehzahl sinkt, reicht das aktuelle (vorhandene) Drehmoment nicht aus. Unter 3000 min^{-1} kann das Drehmoment mit sinkender Drehzahl nicht mehr gesteigert werden und das Fahrzeug kommt zum Stillstand.

12.10



12.11 $T_i = 8 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ $t_p = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ $T = 10 \cdot 10^{-6} \text{ s}$

Tastgrad = $t_p/T = 8 \cdot 10^{-6} \text{ s} / 10 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 8/10 = 0,8$

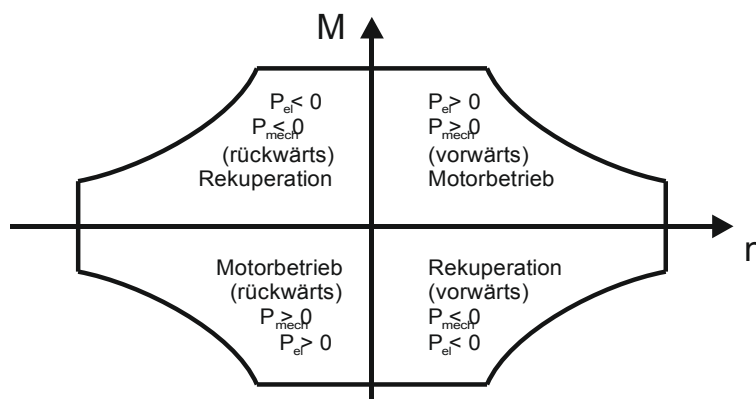
$U_{\text{mittelwert}} = \text{Tastgrad} \cdot U_{\text{maximalwert}} = \text{Tastgrad} \cdot U_{\text{batterie}} = 0,8 \cdot 400 \text{ V} = 320 \text{ V}$

12.12 $P_{\text{el}} = U_{\text{mittelwert}} \cdot I_{\text{mittelwert}} \rightarrow I_{\text{mittelwert}} = P_{\text{el}} / U_{\text{mittelwert}} = 18750 \text{ W} / 320 \text{ V} = 58,6 \text{ A}$

12.13 $\frac{U_{\text{motor}}}{n} = \text{konstant} = \frac{400 \text{ V}}{10000 \text{ min}^{-1}} = 0,04 \text{ V} \cdot \text{min}$

$U_{\text{mittel}[4500]} = n \cdot \text{konstant} = 4500 \text{ min}^{-1} \cdot 0,04 \text{ V} \cdot \text{min} = 180 \text{ V}$

12.14



13 Paralleles Hybridfahrzeug

13.1 ca. 680 min^{-1} bis ca. 4540 min^{-1}

Dieser Bereich wurde gewählt, da unter einer Drehzahl von 680 min^{-1} das maximale Moment bei der geforderten Leistung überschritten wird → Auto würde zum Stillstand kommen.

Bei einer Drehzahl von über 4540 min^{-1} würde der Motor zu schnell drehen und die mechanische Belastung des Motors würde diesen zerstören.

13.2 Die elektrische Maschine muss als Generator betrieben werden und belastet den Dieselmotor mit einem zusätzlichen Drehmoment zum Laden des Akkumulators. Hierbei wird das Drehmoment um 50 Nm bis 110 Nm angehoben. (Auf ca. 290 Nm bis 350 Nm)

13.3 Dieselpreisprozess

13.4

	p [bar]	V [cm ³]	T [K]
Zustand 1	1	960	334,5
Zustand 2	32,6	80	908,5
Zustand 3	32,6	240	2719
Zustand 4	4,65	960	1559,5