

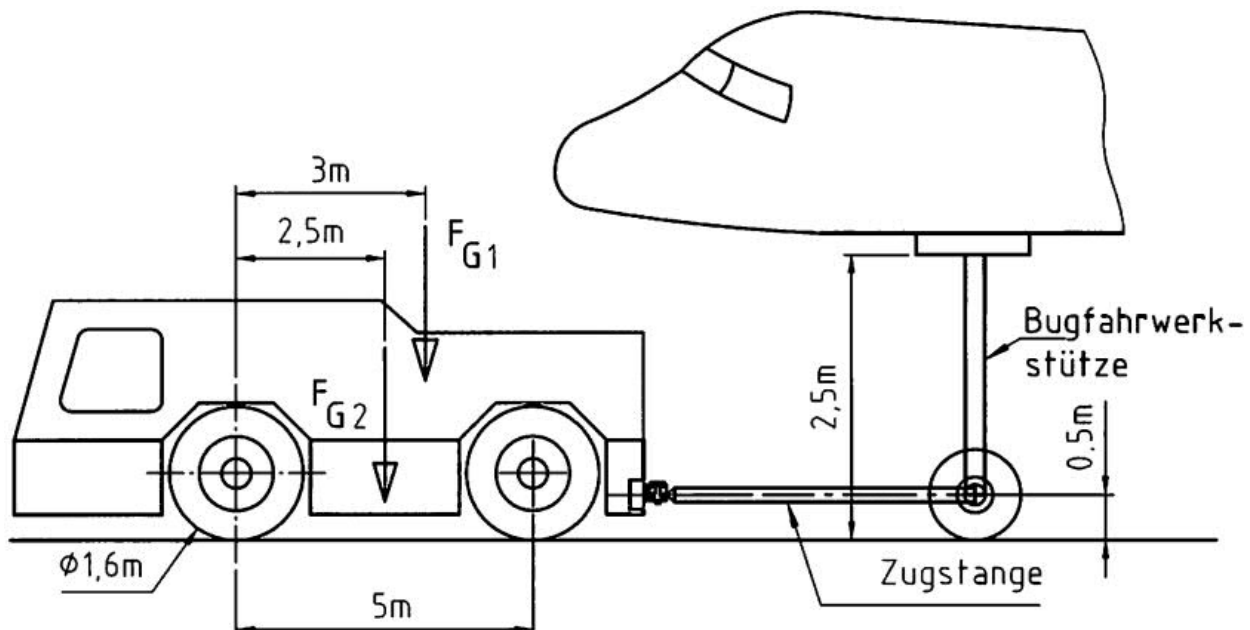


tgtm HP 2014/15-1: Flugzeugschlepper

(Pflichtaufgabe)

Der hinterradgetriebene Flugzeugschlepper bewegt Flugzeuge auf einem Flughafen. Hierzu wird die Bugfahrwerkstütze des Flugzeugs über eine Zugstange mit dem Flugzeugschlepper verbunden. Um genügend Reibung aufbauen zu können, wurde der Schlepper mit einem Zusatzgewicht F_{G1} ausgestattet.

Die Gewichtskräfte der Zugstange und der Bugfahrwerkstütze bleiben in den weiteren Betrachtungen unberücksichtigt.



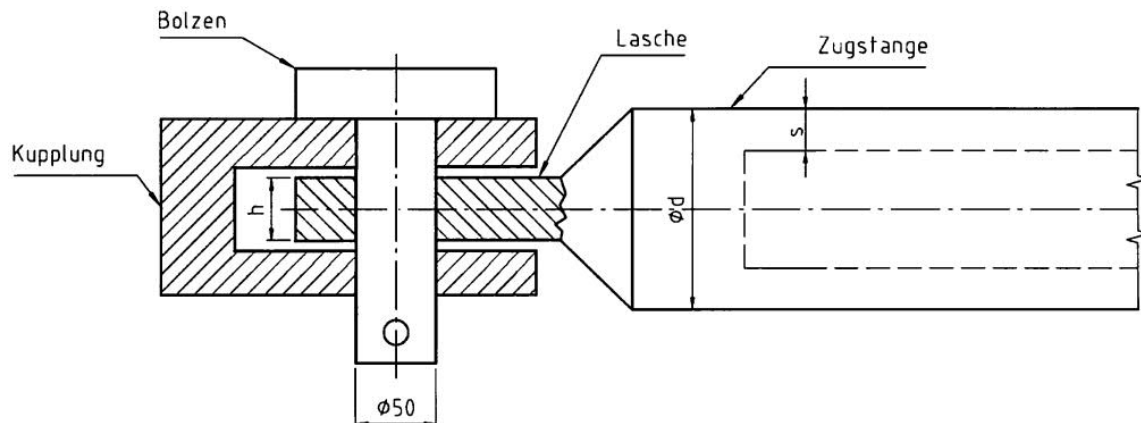
Gewichtskraft Zusatzgewicht: $F_{G1} = 180 \text{ kN}$
 Gewichtskraft Schlepper: $F_{G2} = 320 \text{ kN}$

- 1 Flugzeugschlepper
- 1.1 Schneiden Sie den stehenden Flugzeugschlepper frei. 4,0
 Berechnen Sie die Aufstandskräfte an der Vorder- und Hinterachse.
- 1.2 Um Lenken zu können, darf beim Schleppen das Vorderrad nicht abheben. 4,0
 Weisen Sie rechnerisch nach, dass der Flugzeugschlepper bei einer maximalen Zugkraft an der Zugstange von $F_{zmax} = 200 \text{ kN}$ mit hoher Sicherheit nicht abhebt.



2 Zugstange

Die Zugstange ist mit einer Bolzenverbindung am Flugzeugschlepper befestigt und soll hinsichtlich der vorgegebenen Zugkraft F_z ausgelegt werden.



Zugkraft:		F_z	=	200 kN
Bolzen:		$p_{zul \text{ Bolzen}}$	=	120 N/mm ²
		$T_{azul \text{ Bolzen}}$	=	85 N/mm ²
Rohr:	DIN EN 10297-1	R_e	=	305 N/mm ²
	Sicherheit gegen Zug	v	=	3

- 2.1 Ermitteln Sie die notwendige Höhe h der Lasche hinsichtlich einer Belastung auf Flächenpressung bei $p_{zul \text{ Lasche}} = 80 \text{ N/mm}^2$. 2,0
- 2.2 Überprüfen Sie den Bolzendurchmesser und beurteilen Sie das Ergebnis. 4,0
- 2.3 Aus Gewichtsgründen soll die Zugstange im mittleren Bereich als Rohr ausgeführt werden. 3,0

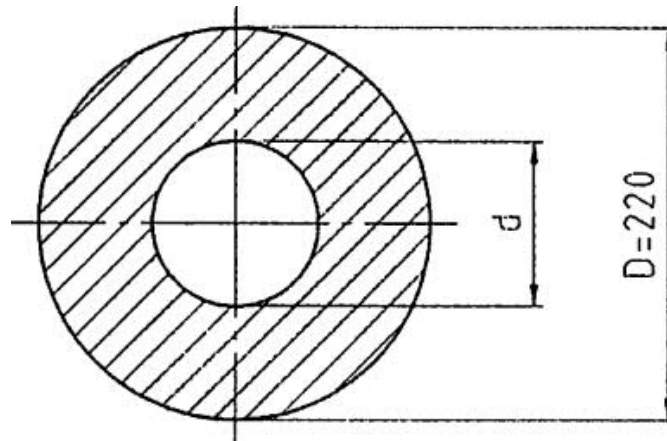
Dimensionieren Sie den erforderlichen Rohrquerschnitt und geben Sie das Rohr normgerecht an.



3 Bugfahrwerkstütze

Die Bugfahrwerkstütze kann als einseitig eingespannter Träger angesehen werden. Reibkräfte am Rad der Bugfahrwerkstütze bleiben unberücksichtigt. Die vom Flugzeugschlepper ausgeübte Zugkraft ist mit $F_z = 200 \text{ kN}$ anzunehmen.

- 3.1 Berechnen Sie das maximale Biegemoment in der Bugfahrwerkstütze. 2,0
- 3.2 Die Bugfahrwerkstütze ist - wie unten dargestellt - als Rohrquerschnitt ausgelegt. Sie besteht aus einer Titanlegierung mit einer Biegegrenzspannung von $\sigma_{bF} = 895 \text{ N/mm}^2$. Die Sicherheit gegen Verbiegung soll $v = 1,5$ betragen. 4,0



Bestimmen Sie den erforderlichen Innendurchmesser d der Bugfahrwerkstütze.

- 3.3 Im Betrieb ist die Bugfahrwerkstütze weiteren Belastungen ausgesetzt. 2,0
 Untersuchen Sie, im Sinne einer Beschreibung, die Bugfahrwerkstütze hinsichtlich von zwei weiteren möglichen Beanspruchungen und analysieren Sie deren Ursache.
- 3.4 Rohre aus Titanlegierungen sind ca. 30 bis 35 mal teurer als Stähle vergleichbarer Festigkeit. 2,0
 Erläutern Sie, warum Flugzeugbauer bei mechanisch belasteten Bauteilen wie z.B. Komponenten des Fahrwerks trotzdem Titanlegierungen einsetzen.



4 Dieselmotor

Der Flugzeugschlepper soll durch einen Dieselmotor mit folgenden Zustandsgrößen angetrieben werden.

Zustandsgrößen des Kreisprozesses:

	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4
V [Liter]	1,6	0,08	0,1812	1,6
p [bar]	0,9	59,7	59,7	2,8
t [°C]	20	698,1	1927	647,6

- 4.1 Stellen Sie das p-V-Diagramm für den idealisierten Dieselprozess ohne Ladungswechselschleife dar. 3,0
 Skizzieren Sie die zu- und abgeführten Arbeiten und Wärmen.
 Kennzeichnen Sie die Nutzarbeit.
 Nummerieren Sie die Eckpunkte gemäß oben angegebenen Zustandsgrößen.
- 4.2 Berechnen Sie die Masse der angesaugten Luft. 2,0
- 4.3 Bestimmen Sie die Nutzarbeit des Dieselprozesses in Joule, wenn 1,7 g Luft angesaugt werden. 3,0
- 4.4 Der Dieselmotor soll bei einer Drehzahl von 4000 min^{-1} eine Leistung von 80 kW erbringen. 3,0
 Überprüfen Sie, ob diese Leistung tatsächlich erbracht wird.
- 4.5 Die Nutzarbeit soll gesteigert werden. 2,0
 Analysieren und dokumentieren Sie hierzu zwei technische Möglichkeiten.

40,0



Lösungsvorschläge

Statik (8 P): Benannte BG freimachen; Aufstandskräfte; Kippen;
 Festigkeit (15 P): BolzenØ (Flächenpressung, Scherung); Rohr (Zug, Biegung); Mbmax;
 Technik (4 P): Beanspruchung; Gründe für Werkstoff
 Energie (13 P): Diesel; p, V-Diagramm; Luftmasse; Nutzarbeit; Leistung aus Nutzarbeit berechnen; Verständnisfragen zu Formeln

1 Flugzeugschlepper

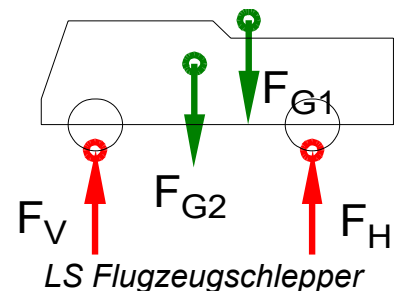
1.1 Aufstandskräfte:

$$\Sigma M_H = 0 = -F_V \cdot 5 \text{ m} + F_{G2} \cdot (5 - 2,5) \text{ m} + F_{G1} \cdot (5 - 3) \text{ m} \Rightarrow$$

$$F_V = \frac{F_{G2} \cdot 2,5 \text{ m} + F_{G1} \cdot 2 \text{ m}}{5 \text{ m}} = \frac{320 \text{ kN} \cdot 2,5 + 180 \text{ kN} \cdot 2}{5} = 232 \text{ kN}$$

$$\Sigma F_y = 0 = F_V - F_{G2} - F_{G1} + F_H \Rightarrow$$

$$F_H = -F_V + F_{G2} + F_{G1} = -232 \text{ kN} + 320 \text{ kN} + 180 \text{ kN} = 268 \text{ kN}$$



Hinweis 1: Der Begriff „stehend“ im Aufgabentext weist darauf hin, dass keine Zugkraft F_z wirkt.

Hinweis 2: RadØ spielen bei Statikaufgaben selten eine Rolle, auch hier nicht.

Hinweis 3: Wenn man den Drehpunkt um die Vorderachse wählt, wird die Berechnung der Hebelarme etwas einfacher, aber diesen Ansatz kann man nicht in die folgende Aufgabe übertragen.

Hinweis 4: In meinem Ansatz kommt F_{G2} vor F_{G1} , weil ich die Lageskizze systematisch von links nach rechts durchgehe. Systematisches Vorgehen ist immer ein gutes Mittel, um die eigene Fehlerquote zu senken.

1.2 Abheben

Berechnung über die zulässige Kraft F_{zzul} ($F_V = 0$):

Beim Abheben wird die Vorderachskraft $F_V = 0$.

$$\Sigma M_H = 0 = +F_{G2} \cdot (5 - 2,5) \text{ m} + F_{G1} \cdot (5 - 3) \text{ m} - F_{zzul} \cdot 0,5 \text{ m} \Rightarrow$$

$$F_{zzul} = \frac{F_{G2} \cdot 2,5 \text{ m} + F_{G1} \cdot 2 \text{ m}}{0,5 \text{ m}} = \frac{320 \text{ kN} \cdot 2,5 + 180 \text{ kN} \cdot 2}{0,5} = 2320 \text{ kN}$$

$F_{zzul} = 2320 \text{ kN} > 200 \text{ kN} = F_{zmax}$ bedeutet, dass der Schlepper nicht abhebt.

Berechnung über die (Rest-)Kraft an der Vorderachse F_V :

$$\Sigma M_H = 0 = -F_V \cdot 5 \text{ m} + F_{G2} \cdot (5 - 2,5) \text{ m} + F_{G1} \cdot (5 - 3) \text{ m} - F_{zmax} \cdot 0,5 \text{ m} \Rightarrow$$

$$F_V = \frac{F_{G2} \cdot 2,5 \text{ m} + F_{G1} \cdot 2 \text{ m} - F_{zmax} \cdot 0,5 \text{ m}}{5 \text{ m}} = \frac{320 \text{ kN} \cdot 2,5 + 180 \text{ kN} \cdot 2 - 200 \text{ kN} \cdot 0,5}{5} = 212 \text{ kN}$$

$F_V = 212 \text{ kN} > 0$ bedeutet, dass die Vorderachse noch nicht abhebt.

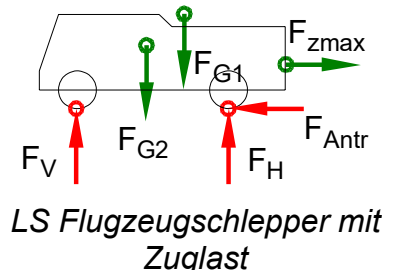
Berechnung über den Kippsicherheitsfaktor:

Der Kippsicherheitsfaktor γ ist der Quotient aus der Summe der haltenden (hier: linksdrehenden) Momente zu den kippenden (hier: rechtsdrehenden) Momenten (hier: um die Hinterradauflage).

$$\gamma = 0 = \frac{|\Sigma M_{Links}|}{|\Sigma M_{Rechts}|} = \frac{|F_{G2} \cdot (5 - 2,5) \text{ m} + F_{G1} \cdot (5 - 3) \text{ m}|}{| - F_{zzul} \cdot 0,5 \text{ m} |} = \frac{320 \text{ kN} \cdot 2,5 + 180 \text{ kN} \cdot 2}{200 \text{ kN} \cdot 0,5 \text{ m}} = 11,6$$

$\gamma > 1$ bedeutet, dass der Schlepper nicht abhebt.

Hinweis 5: Ob die Bedingung „hohe Sicherheit“ erfüllt ist, kann man in keinem Fall sicher beurteilen, weil man keine Definition für „hoch“ hat. ¹



1 Da beim Landen des Flugzeuges die Belastungen auf das Fahrwerk vermutlich wesentlich höher sind, kann man annehmen, dass die Sicherheiten im Bodenbetrieb hoch sind.



2 Zugstange

2.1 Laschenhöhe h

Hinweis 6: Die Flächenpressung findet an der Lasche und am Bolzen statt; gerechnet werden muss nur die Lasche, weil ihr Werkstoff die niedrigere zulässige Flächenpressung p_{zul} hat.

$$p_{zul} > p = \frac{F}{A} \Rightarrow A_{erf} = \frac{F}{p_{zul}} = \frac{200 \text{ kN}}{80 \text{ N/mm}^2} = 2500 \text{ mm}^2$$

$$A = d \cdot h \Rightarrow h_{notwendig} = \frac{A}{d} = \frac{2500 \text{ mm}^2}{50 \text{ mm}} = 50 \text{ mm}$$

2.2 Bolzendurchmesser

Auf Biegung kann man den Bolzen nicht berechnen, weil das Spaltmaß zwischen Lasche und Kupplung nicht bekannt ist. Bei kleinen Spaltmaßen muss die Biegung auch nicht berechnet werden.

Auf Flächenpressung muss man den Bolzen nicht berechnen, wenn in Aufg. 2.1 die Laschenhöhe auf $p_{zul, Lasche} = 80 \text{ MPa}$ ausgelegt wurde \rightarrow dann hält der Bolzen mit der größeren $p_{zul, Bolzen} = 120 \text{ MPa}$ auch. Diese Überlegung sollte man aber angeben.

$$p_{zul} > p = \frac{F}{A} \Rightarrow A_{erf} = \frac{F}{p_{zul, Bolzen}} = \frac{200 \text{ kN}}{120 \text{ N/mm}^2} = 1667 \text{ mm}^2$$

$$A = d \cdot h \Rightarrow d_{erf} = \frac{A}{h_{notwendig}} = \frac{1667 \text{ mm}^2}{50 \text{ mm}} = 33,3 \text{ mm}$$

Auf Abscherung:

$$\frac{\tau_{aF}}{V} = \tau_{azul} > \tau_a = \frac{F}{2 \cdot S} \Rightarrow$$

$$S_{erf} = \frac{F_z}{2 \cdot \tau_{azul}} = \frac{200 \text{ kN}}{2 \cdot 85 \text{ N/mm}^2} = 1176 \text{ mm}^2$$

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \Rightarrow d_{erf} = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1176 \text{ mm}^2}{\pi}} = 38,7 \text{ mm}$$

Der vorhandene Bolzen $\varnothing 50$ reicht aus.

2.3 Rohrquerschnitt

Auf Zug:

$$\frac{\sigma_{zlim}}{V} = \sigma_{zzul} > \sigma_z = \frac{F}{S} \Rightarrow$$

$$\sigma_{zzul} = \frac{R_e}{V} = \frac{305 \text{ N/mm}^2}{3} = 101,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$S_{erf} = \frac{F}{\sigma_{zzul}} = \frac{200 \text{ kN}}{101,7 \text{ N/mm}^2} = 1967 \text{ mm}^2 = 19,67 \text{ cm}^2$$

Gewählt: Rohr DIN 10297-1 – 70x12,5 mit dem Querschnitt $S = 22,58 \text{ cm}^2$



3 Bugfahrwerkstütze

3.1 Maximales Biegemoment

$$M_{bmax} = |F_Z \cdot 2,5 \text{ m}| = 200 \text{ kN} \cdot (2,5 - 0,5) \text{ m} = 400 \text{ kNm}$$

3.2 Rohrquerschnitt

$$\frac{\sigma_{bF}}{v} = \sigma_{bzul} > \sigma_b = \frac{M_{bmax}}{W} \Rightarrow$$

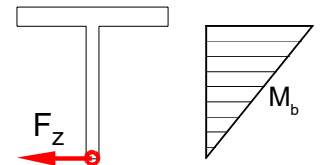
$$\sigma_{bzul} = \frac{\sigma_{bF}}{v} = \frac{895 \text{ N/mm}^2}{1,5} = 596,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$W_{erf} = \frac{M_{bmax}}{\sigma_{bzul}} = \frac{400 \text{ kNm}}{596,7 \text{ N/mm}^2} = 670,4 \text{ cm}^3$$

$$W = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32 \cdot D} \Rightarrow$$

$$d_{erf} = \sqrt[4]{D^4 - \frac{W \cdot 32 \cdot D}{\pi}} = \sqrt[4]{(220 \text{ mm})^4 - \frac{670,4 \text{ cm}^3 \cdot 32 \cdot 220 \text{ mm}}{\pi}}$$

$$= \sqrt[4]{(22 \text{ cm})^4 - \frac{670,4 \text{ cm}^3 \cdot 32 \cdot 22 \text{ cm}}{\pi}} = 17,0 \text{ cm} = 170 \text{ mm} \quad \text{oder kleiner}$$



3.3 Mögliche zusätzliche Beanspruchungen der Bugfahrwerkstütze:

- Druck und Knickung durch die Gewichtskraft des Flugzeuges
- Deutlich höhere und dynamische Kräfte bei der Landung des Flugzeuges
- Zug durch das Gewicht der Räder bei ausgefahrenem Fahrwerk vor der Landung
- Korrosion durch Witterung und Betriebsstoffe
- Kälte durch das Fliegen in großer Höhe
- seitliche Biegebelastung der Bugfahrwerkstütze, wenn der Schlepper in eine Kurve fährt und die Räder des Bugfahrwerkes einlenken.

3.4 Ti-Legierung

Die Formulierung „Stähle vergleichbarer Festigkeit“ schließt Festigkeit als Antwort aus.

Dagegen ist die Dichte von Titan deutlich geringer als die Dichte von Stahl ($\rho_{Ti} = 4,5 \text{ kg/dm}^3 \ll \rho_{St} = 7,9 \text{ kg/dm}^3 \rightarrow$ [EuroTabM] „Dichte, Werte“), dies spart Gewicht und Betriebskosten bzw. erhöht die mögliche Nutzlast eines Flugzeuges und damit die Einnahmen.

Hinweis 7: Wenn man als Schüler keine Ahnung hat, kann man es auch mit den anderen Eigenschaften versuchen, die für Ti-Legierungen in (\rightarrow [EuroTabM] „Titan, Titanlegierungen“) aufgelistet sind. Zwar stellen diese Eigenschaften keine Vorteile gegenüber Stahl dar und rechtfertigen schon gar nicht den Preisunterschied, aber vielleicht ist der Korrektor ja gnädig .. oder hat auch keine .. ;-)

Wie auch immer: Wenn nichts dasteht, kann ein Korrektor keine Punkte vergeben!



4 Dieselmotor

4.1 Zustandsdiagramm

Hinweis 8: Das Zustandsdiagramm des Dieselmotors könnte man bei dieser Aufgabe aus den gegebenen Zustandsgrößen erschließen. In anderen Aufgaben sind diese aber nicht gegeben, ergo muss man die Zustandsänderungen für die im Lehrplan gängigen Wärmekraftmaschinen auswendig kennen.

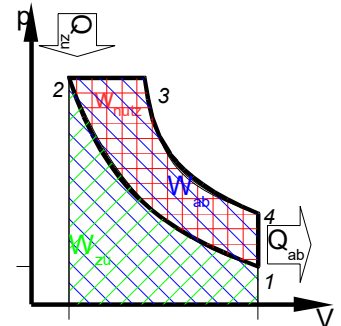
W_{zu} : Fläche unterhalb der Zustandsänderung 1-2

W_{ab} : Fläche unterhalb der Zustandsänderungen 2-3-4

W_{nutz} : Fläche zwischen den Zustandsänderungen 1-2-3-4-1

Q_{zu} : während der Zustandsänderung 2-3 (Verbrennung)

Q_{ab} : während der Zustandsänderung 4-1 (Gaswechsel)



4.2 Luftmasse

Die Luftmasse berechnet man mit den Zustandsgrößen eines der Eckpunkte. Eine der Rechnungen genügt:

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

$$m = \frac{p_1 \cdot V_1}{R_i \cdot T_1} = \frac{0,9 \text{ bar} \cdot 1,6 \text{ dm}^3}{287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot (273 + 20) \text{ K}} = \frac{0,9 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 1,6 \cdot (0,1 \text{ m})^3}{287 \frac{\text{Nm}}{\text{kgK}} \cdot 293 \text{ K}} = 1,71 \text{ g}$$

$$m = \frac{p_2 \cdot V_2}{R_i \cdot T_2} = \frac{59,7 \text{ bar} \cdot 0,08 \text{ dm}^3}{287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot (273 + 698,1) \text{ K}} = \dots = 1,71 \text{ g}$$

$$m = \frac{p_3 \cdot V_3}{R_i \cdot T_3} = \frac{59,7 \text{ bar} \cdot 0,1812 \text{ dm}^3}{287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot (273 + 1927) \text{ K}} = \dots = 1,71 \text{ g}$$

$$m = \frac{p_4 \cdot V_4}{R_i \cdot T_4} = \frac{2,8 \text{ bar} \cdot 1,6 \text{ dm}^3}{287 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot (273 + 647,6) \text{ K}} = \dots = 1,71 \text{ g}$$



4.3 Nutzarbeit W_{Nutz}

Die Nutzarbeit kann man mit der Bilanz der mechanischen Arbeiten oder – kürzer – mit der Bilanz der Wärmemengen berechnen. Geringfügige Abweichungen durch gerundete Werte sind bei solchen Rechnungen typisch und nicht weiter tragisch.

Berechnung mit den Wärmemengen:

$$0 = \Sigma Q + \Sigma W = \Sigma Q + W_{\text{Nutz}} \Rightarrow$$

$$W_{\text{Nutz}} = -Q_{12} - Q_{23} - Q_{34} - Q_{41} = 0 - 2099,6 \text{ J} - 0 - (-766,0 \text{ J}) \approx -1334 \text{ J}$$

Isobare Zustandsänderung 2-3:

$$Q_{23} = c_p \cdot m \cdot \Delta T_{23} = 1005 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 1,7 \text{ g} \cdot [(273+1927) - (273+698,1)] \text{ K} = 2099,6 \text{ J}$$

Isochore Zustandsänderung 4-1:

$$Q_{41} = c_v \cdot m \cdot \Delta T_{41} = 718 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \cdot 1,7 \text{ g} \cdot [(20+273) - (647,6+273)] \text{ K} = -766,0 \text{ J}$$

Berechnung mit den mechanischen Arbeiten:

$$W_{\text{Nutz}} = \Sigma W = +W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} = 827,1 \text{ J} - 604,2 \text{ J} - 1561 \text{ J} + 0 \approx -1338 \text{ J}$$

Adiabate Zustandsänderung 1-2:

$$W_{12} = -\frac{m \cdot R_i}{1-\kappa} \cdot [T_2 - T_1] = -\frac{1,7 \text{ g} \cdot 287 \text{ J/kgK}}{1-1,4} \cdot [(273+698,1) - (273+20)] \text{ K} = 827,1 \text{ J}$$

oder

$$W_{12} = -\frac{m \cdot R_i \cdot T_1}{1-\kappa} \cdot \left[\left[\frac{V_1}{V_2} \right]^{\kappa-1} - 1 \right] = -\frac{1,7 \text{ g} \cdot 287 \text{ J/kgK} \cdot (273+20) \text{ K}}{1-1,4} \cdot \left[\left[\frac{1,6 \text{ l}}{0,08 \text{ l}} \right]^{1,4-1} - 1 \right] = 827,1 \text{ J}$$

oder

$$W_{12} = -\frac{m \cdot R_i \cdot T_1}{1-\kappa} \cdot \left[\left[\frac{p_2}{p_1} \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] = -\frac{1,7 \text{ g} \cdot 287 \text{ J/kgK} \cdot 293 \text{ K}}{1-1,4} \cdot \left[\left[\frac{59,7 \text{ bar}}{0,9 \text{ bar}} \right]^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] = 827,1 \text{ J}$$

Isobare Zustandsänderung 2-3:

$$W_{23} = -p_2 \cdot \Delta V_{23} = -59,7 \text{ bar} \cdot (0,1812 - 0,08) \text{ l} = -59,7 \cdot 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot 0,1012 (0,1 \text{ m})^3 = -604,2 \text{ J}$$

Adiabate Zustandsänderung 3-4:

$$W_{34} = -\frac{m \cdot R_i}{1-\kappa} \cdot [T_4 - T_3] = -\frac{1,7 \text{ g} \cdot 287 \text{ J/kgK}}{1-1,4} \cdot [(273+647,6) - (273+1927)] \text{ K} = -1560,5 \text{ J}$$

oder

$$W_{34} = -\frac{m \cdot R_i \cdot T_3}{1-\kappa} \cdot \left[\left[\frac{V_3}{V_4} \right]^{\kappa-1} - 1 \right] = -\frac{1,7 \text{ g} \cdot 287 \text{ J/kgK} \cdot 2200 \text{ K}}{1-1,4} \cdot \left[\left[\frac{0,1812 \text{ l}}{1,6 \text{ l}} \right]^{1,4-1} - 1 \right] = -1560,6 \text{ J}$$

oder

$$W_{34} = -\frac{m \cdot R_i \cdot T_3}{1-\kappa} \cdot \left[\left[\frac{p_4}{p_3} \right]^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] = -\frac{1,7 \text{ g} \cdot 287 \text{ J/kgK} \cdot 2200 \text{ K}}{1-1,4} \cdot \left[\left[\frac{2,8 \text{ bar}}{59,7 \text{ bar}} \right]^{\frac{1,4-1}{1,4}} - 1 \right] = -1563,9 \text{ J}$$



4.4 Leistung²

Die Aufgabe lässt offen, ob es sich um einen Zwei- oder Viertakt-Diesel handelt.³
Für Schüler genügt eine der Lösungen:

Viertakt-Diesel: Bei einem Viertakt-Motor findet nur bei jeder zweiten Kurbelwellen-Umdrehung ein Arbeitstakt statt, daher der Teiler 2 in der Rechnung:

$$P = \left| \frac{W_{\text{nutz}}}{t} \right| = \left| W_{\text{Nutz}} \cdot \frac{n}{2} \right| = 1335 \text{ J} \cdot \frac{4000 \text{ min}^{-1}}{2} = 1335 \text{ J} \cdot \frac{4000}{2 \cdot 60 \text{ s}} = \frac{1335 \text{ J}}{0,03 \text{ s}} = 44,5 \text{ kW}$$

Die geforderte Leistung wird von einem Viertakt-Diesel bei weitem nicht erbracht.

Zweitakt-Diesel: Bei einem Zweitakt-Motor findet bei jeder Kurbelwellenumdrehung ein Arbeitstakt statt, deshalb entfällt der Teiler 2:

$$P = \left| \frac{W_{\text{nutz}}}{t} \right| = \left| W_{\text{Nutz}} \cdot n \right| = 1335 \text{ J} \cdot 4000 \text{ min}^{-1} = 1335 \text{ J} \cdot \frac{4000}{60 \text{ s}} = \frac{1335 \text{ J}}{0,015 \text{ s}} = 89 \text{ kW}$$

In der Zweitakt-Variante wird die geforderte Leistung erbracht.

Hinweis 9: Wer in Aufg. 4.3 kein Ergebnis hat, kann für Aufg. 4.4 eines annehmen, zB: „Ich nehme an, dass $|W_{\text{Nutz}}| = 100 \text{ J}$ ist.“

4.5 Steigerung der Nutzarbeit

Hinweis 10: Hier muss man nichts von Motoren verstehen, sondern Schlussfolgerungen aus dem Zustandsdiagramm und den Formeln ziehen⁴.

Aus dem Zustandsdiagramm kann man folgende Möglichkeiten herauslesen, um seine Fläche und damit die Nutzarbeit zu vergrößern:

- V_1 und $V_4 \uparrow \rightarrow$ Hubraum vergrößern (größere oder mehr Zylinder)
- $V_2 \downarrow$ und $p_2 \uparrow \rightarrow$ Verdichtung erhöhen (wird genutzt, macht aber andere Probleme)
- $V_3 \uparrow$ und $p_4 \uparrow = Q_{\text{zu}}$ steigern \rightarrow mehr Kraftstoff(-Luft-Gemisch) verbrennen⁵.
- Zustandsänderungen verbiegen \rightarrow im idealisierten Zustandsdiagramm nicht möglich (d.h., man kann p_1 nicht unabhängig von p_2 , V_2 nicht unabhängig von V_3 usw. ändern)

Aus den Formeln für W_{nutz} kann man weitere Möglichkeiten entnehmen⁶:

- m erhöhen \rightarrow Ladedruck erhöhen (Turbolader, Kompressor ..), Luft verdichten (Ladeluftkühler ..), langsamere Drehzahl und ausgefeilte Ansaugtechniken (polierte Ansaugrohre, Resonanzsaugrohre ..) erhöhen die Zylinderfüllung
- c_v und c_p bzw. R_i und κ variieren \rightarrow Zusammensetzung der Gase ändern.⁷
- T_3 erhöhen \rightarrow Kraftstoffe mit höheren Verbrennungstemperaturen verwenden (gelegentlich im Rennsport)

- 2 Wie schnell fährt ein Schlepper mit 80 kW und 200 kN Zuglast? Ein zukünftiger Ingenieur sollte das im Kopf rechnen können: $P = F \cdot v \Rightarrow v = P/F = (80 \text{ kW})/(200 \text{ kN}) = 0,4 \text{ m/s} = 24 \text{ m/min} = 1,44 \text{ km/h}$. Wer das im Abi rechnet und dann an seinen Werten zweifelt, hat wohl ein Problem.
- 3 Auch im idealisierten Zustandsdiagramm ohne Ladungswechselschleife kann man den Unterschied nicht erkennen und was gerade marktüblich ist, muss ein Schüler nicht wissen. Gegeben hat es im Motorenbau schon alles!
- 4 Damit kommt man weiter als mit unverdauten Schlagworten: Direkteinspritzung, V-Motor, ..., Alu-Felgen ;-)
- 5 Bei Dieselmotoren beeinflusst das Gaspedal die Menge des eingespritzten Kraftstoffes bei konstanter Luftmenge. Mehr Kraftstoff einzuspritzen ist einfach, aber sinnlos, wenn nicht genügend Luft vorhanden ist (=Rußgrenze). Deshalb bleibt die Luftmenge m das konstruktive Problem im Motorenbau ($\rightarrow m$ erhöhen).
- 6 Die Interpretation der Formeln ist schwieriger, weil manche Werte in verschiedenen Formeln entgegengesetzt wirken. Beispiel: Eine kleine Temperatur T_2 senkt die zugeführte Arbeit W_{12} (und steigert scheinbar indirekt W_{nutz}), gleichzeitig senkt sie auch den Druck p_2 und damit die abgegebenen Arbeiten W_{23} und W_{34} .
- 7 Solche Maßnahmen gibt es zwar, sie verfolgen aber andere Ziele. Beispiel: Abgasrückführung oder Wasser im Diesel sollen die Verbrennungsspitzen-temperatur und damit den Stickoxid-Gehalt im Abgas senken.