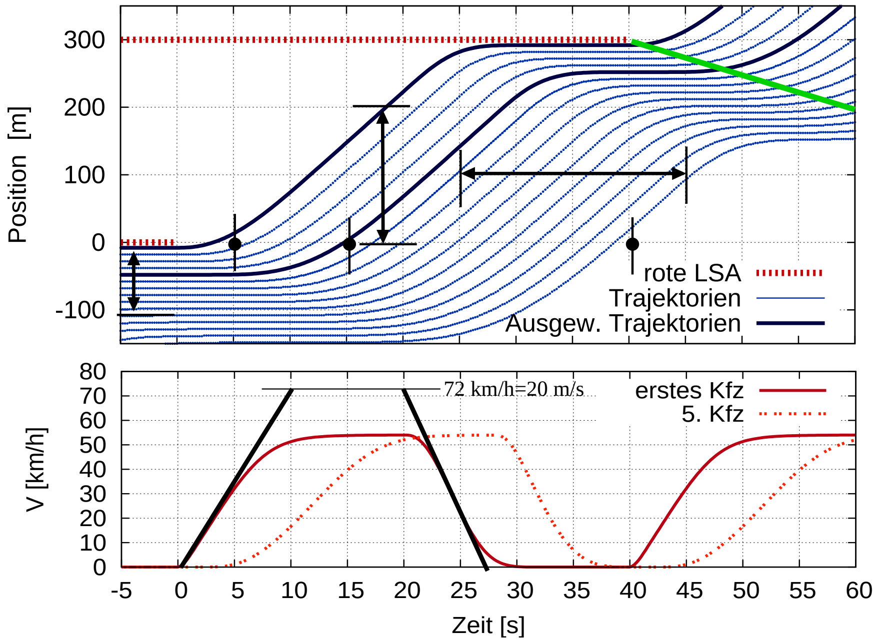
Klausur zur Vorlesung
Verkehrsdynamik und -simulation
WS 2009/10

Lösungsvorschlag

Insgesamt 120 Punkte

Aufgabe 1 (40 Punkte)



(a) Eine Stadtsituation mit zwei LSA, in der mehrere wartende Autos nach Grünwerden der ersten LSA zur zweiten LSA fahren und wieder anhalten bis auch diese LSA grün wird. (*5 Punkte*)

(b) Verkehrsdichte im Stau (siehe Abb., linker Markierungs-Doppelpfeil):

$$\rho_{\max} = \frac{1}{l_{\text{eff}}} = \frac{10\,\text{Fz}}{100\,\text{m}} = \underline{\underline{100\,\text{Fz/km}}}.$$

Analog Dichte bei maximalen Verkehrsfluss (Markierungs-Doppelpfeil in der Mitte):

$$\rho_{\text{K}} = \frac{6\,\text{Fz}}{200\,\text{m}} = \underline{\underline{30\,\text{Fz/km}}}.$$

(*10 Punkte*)

(c) Freie Kapazität heißt maximal möglicher stationärer Fluss ohne Hindernisse wie LSA: In der Abb. kann man die *dynamische* freie Kapazität = Ausfluss aus dem Stau ablesen (horizontaler Doppelpfeil in der Mitte):

$$K = Q_{\max} == \frac{9\,\text{Fz}}{20\,\text{s}} = \underline{\underline{1\,620\,\text{Fz/h}}}$$

(Man nehme entweder nur die rechte oder nur die linke Trajektorie in die Zäh;lung mit; der Wert 8/20, entsprechend 1 440 Fz/h, würde auch gehen. (*5 Punkte*)

(d) Die Zahl n der Fahrzeuge bei verschiedenen Grünzeiten τ sind die Fahrzeuge zwischen den schwarzen Punkten:

$$n(5) = 1, \quad n(15) = 5, \quad n(40) = 15.$$

Daraus

$$\beta = K^{-1} = \frac{40\,\mathrm{s} - 15\,\mathrm{s}}{15 - 5} = \underline{\underline{\frac{5}{2}}}\,\mathrm{s}.$$

(der Wert β ist gleich dem Kehrwert der Kapazität und dies stimmt im Rahmen der "Messgenauigkeit" von einem Fahrzeug überein. Man hätte β auch aus der kleinsten und mittleren Grünzeit ebrechnen können, was zum selben Ergebnis führt: (5-1)/10 s=1 440 Fz/h.) Daraus nun die Zusatzzeit für das erste Fahrzeug:

$$\tau_0 = 15\,\mathrm{s} - 4\beta = \underline{\underline{5\,\mathrm{s}}}.$$

(*7 Punkte*)

(e) Steigung der hellgrünen Geraden:

$$c_{\mathrm{cong}} = -\frac{100\,\mathrm{m}}{20\,\mathrm{s}} = \underline{\underline{-5\,\mathrm{m/s} = -18\,\mathrm{km/h}}}.$$

(*5 Punkte*)

(f)
- Wunschgeschwindigkeit = Maximalgeschwindigkeit auf leerer Strecke = $\underline{\underline{15\,\mathrm{m/s}}}$ = $\underline{\underline{54\,\mathrm{km/h}}}$.
- Folgezeit $T = 1/(\rho_{\mathrm{max}} c_{\mathrm{cong}}) = 2\,\mathrm{s}$.
- Beschleunigungen (maximale bzw. minimale Tangentensteigung des ersten Fahrzeugs im unteren Plot:

  $$a = \frac{20\,\mathrm{m/s}}{10\,\mathrm{s}} = \underline{\underline{2\,\mathrm{m/s}^2}}, \quad b = \frac{20\,\mathrm{m/s}}{7\,\mathrm{s}} = \underline{\underline{2.9\,\mathrm{m/s}^2}}.$$

  (jeder Wert zwischen 2 und 3 ist OK)
- Effektive Länge $l_{\mathrm{eff}} = 1/\rho_{\mathrm{max}} = 10\,\mathrm{m}$.

(*8 Punkte*)

Aufgabe 2 (30 Punkte)

(a) Maximaler Fluss bei freiem Verkehr:

$$Q_{\text{max}}^{\text{free}} = v_0 \rho_{\text{max}}^{\text{free}} = \underline{\underline{2\,400\,\text{Fz/h}}}.$$

(*5 Punkte*)

(b) Der gestaute Zweig entspricht dem gestauten Zweig des dreieckigen Fundamentaldiagramms des Section Based Modells: $Q_{\text{cong}}(\rho) = 1/T(1-\rho l_{\text{eff}})$ mit $l_{\text{eff}} = l + s_0 = 6.6\,\text{m}$. Der freie Zweig wird an derselben Stelle geschnitten wie bei einem dreieckigen Fundamentaldiagramm ohne Hysteresis, also bei

$$\rho_{\text{min}}^{\text{cong}} = \rho_{\text{out}} = \frac{1}{v_0 T + l_{\text{eff}}} = \underline{\underline{16.67\,\text{Fz/km}}}.$$

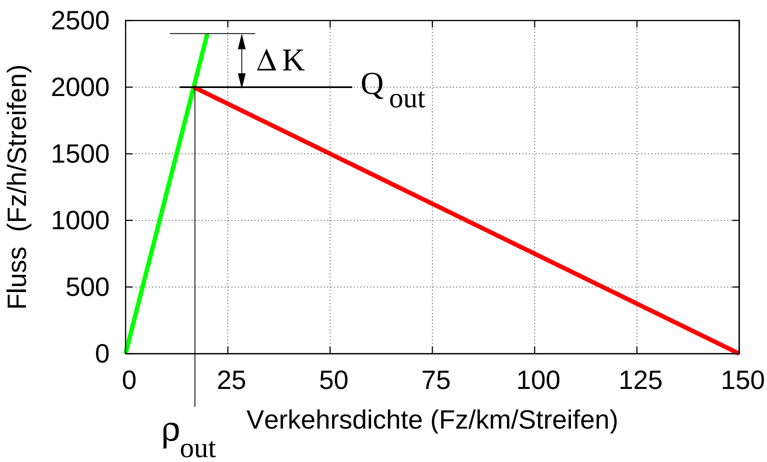
(*9 Punkte*)

(c) Ausfluss aus dem Stau: $Q_{\text{out}} = v_0 \rho_{\text{out}} = 2\,000\,\text{Fz/h}$. Der „Capacity Drop" ist damit gegeben durch

$$\Delta Q = Q_{\text{max}} - Q_{\text{out}} = \underline{\underline{400\,\text{Fz/h}}} \quad \text{bzw.} \quad 16.7\,\%.$$

Die Dichte des Ausflussbereiches ist dieselbe wie die minimale Dichte des gebundenen Verkehrs, also $16.67\,\text{Fz/h}$. Im Dichtebereich $\rho \in [\rho_{\text{out}}, \rho_{\text{max}}^{\text{free}}]$, also innerhalb $[16.67\,\text{Fz/h}, 20\,\text{Fz/h}]$ können zwei Werte des Flusses auftreten, die dem freien bzw. gestauten Zweig entsprechen. (*8 Punkte*)

(d) Quantitatives Fundamentaldiagramm: (*8 Punkte*)



Aufgabe 3 (20 Punkte)

(a) Bei gleichen Bedingungen (gleicher Abstand, gleiche Wunschgeschw., gleiche Geschwindigkeit) sollte die Beschleunigung um so geringer bzw. Bremsverzögerung umso höher sein, je höher die Annäherungsrate (schließlich wird dann die Situation kritisch), also $\lambda > 0$. (*5 Punkte*)

(b) Betrachung nur der OV-Funktion $v_{\text{opt}}(s)$: Leere Strecke bedeutet: $s \to \infty$, also

$$v_0 = \lim_{s\to\infty} \frac{\beta_1}{1 + \frac{\beta_2}{s}} = \underline{\underline{\beta_1}} = \underline{\underline{15\,\text{m/s}}}.$$

Folgezeit T durch Auflösen der OV-Funktion nach s:

$$s_{\text{opt}}(v) = \frac{\beta_2 v}{\beta_1 - v}, \quad \lim_{v\to 0} s_{\text{opt}}(v) = \frac{v\beta_2}{\beta_1}$$

und damit

$$T = \frac{s}{v} = \frac{\beta_2}{\beta_1} = \underline{\underline{1.6\,\text{s}}}.$$

(*8 Punkte*)

(c) Hier wird die volle Gleichung verwendet:

- Sehr große Entfernung: $s \to \infty$, also $v_{\text{opt}}(s) = v_0$.
- rote LSA ist stehendes virtuelles Fahrzeug: $\Delta v = v$.
- "maximal erreichbare" Geschwindigkeit: Es wird nicht mehr beschleunigt, also $\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t} = 0$.

Eingesetzt ergibt dies

$$0 = \frac{v_0 - v}{\tau} - \lambda v \quad \Rightarrow \quad v = \frac{v_0}{1 + \lambda\tau} = \frac{v_0}{4} = \underline{\underline{\frac{\beta_1}{4}}} = \underline{\underline{3.75\,\text{m/s}}} = \underline{\underline{13.5\,\text{km/h}}}.$$

Trotz beliebig großen Abstand wird also nur ein Schleichtempo erreicht! (bereits das Erkennen, dass die Δv-Abhängigkeit nicht für $s \to \infty$ verschwindet, gibt einige Punkte). (*7 Punkte*)

Aufgabe 4 (30 Punkte)

(a) Leistung bei Konstantfahrt:

$$P = P_0 + v\left[mg(\mu+\beta) + m\dot{v} + c_v v^2\right] = \underline{\underline{20\,\mathrm{kW}}}.$$

Hierbei wurden $\beta = 0.02$ (Steigung 2 %) und $\dot{v} = 0$ (Konstantfahrt) eingesetzt und der Vorfaktor des Luftwiderstandes abgekürzt: $c_v = \frac{1}{2}c_w\rho_L A$. (*12 Punkte*)

(b) Wirkungsgrad γ durch Ablesen des Kennfeldes bei 20 kW und den entsprechenden Drehzahlen:

- 2. Gang: $\gamma_2 = 0.16$,
- 3. Gang: $\gamma_3 = 0.21$ (auch 0.20 ist OK),
- 4. Gang: $\gamma_4 = 0.24$,
- 5. Gang: $\gamma_5 = 0.26$.

Also ist der 5. Gang am verbrauchseffizientesten. Der Verbrauch auf 100 km beträgt mit $\gamma = \gamma_5$:

$$C_{100} = T_{100}\frac{P}{\gamma w_{\mathrm{cal}}} = \underline{\underline{9.62\,\mathrm{Liter}/100\,\mathrm{km}}}.$$

Hierbei ist $T_{100} = 100\,\mathrm{km}/v$ die Zeit für 100 km, $P = 20\,\mathrm{kW}$ und w_{cal} der angegebene Energiegehalt des Kraftstoffs. (*8 Punkte*)

(c) Die maximale Leistung wird am oberen Ende des Kennfeldes erreicht, also für den 2. Gang 110 kW, den dritten 80 kW und den vierten und fünften noch weniger. Also runterschalten in den 2. Gang.[1]

Zur Bestimmung der anfänglichen Beschleunigung muss man für diese Leistung und $v = 80\,\mathrm{km/h}$ die Formel bei (a) nach der Beschleunigung auflösen:

$$\begin{aligned}\frac{P-P_0}{v} &= mg(\mu+\beta) + m\dot{v} + c_v v^2\\ \dot{v} &= \frac{1}{m}\left[\frac{P-P_0}{v} - mg(\mu+\beta) - c_v v^2\right] = \underline{\underline{2.69\,\mathrm{m/s^2}}}.\end{aligned}$$

Der Verbrauch spielte während des Überholens keine Rolle. Er erreicht kurzfristig beträchtliche Höhen: Wirkungsgrad am oberen Rand: $\gamma_{\mathrm{Vollgas}} = 0.16$. Damit mit der Formel von (b):

$$C_{100} = T_{100}\frac{110\,\mathrm{kW}}{\gamma_{\mathrm{Vollgas}} w_{\mathrm{cal}}} = \underline{\underline{86\,\mathrm{Liter}/100\,\mathrm{km}}}.$$

(*10 Punkte*)

[1] Allerdings müsste man dann während des Überholens schnell wieder hochschalten, da bei knapp 100 km/h die Grenze dieses Gangs bei knapp 6000 Umdrehungen erreicht ist, also wäre in realer Fahrt Runterschalten auf den 3. Gang sinnvoll. Wer so argumentiert, der bekommt auch volle Punktzahl.