Klausur zur Vorlesung
Verkehrsdynamik und -simulation
SS 2013

Lösungsvorschlag

Insgesamt 120 Punkte

Aufgabe 1 (20 Punkte)

(i) Es handelt sich um eine großflächge Maßnahme (Urlaub, Autobahnbaustelle) und es kommt im Wesentlichen auf den makroskopischen Verkehrsfluss bzw. Stau oder Nichtstau an – also *makroskopische Modelle*.

(ii) Die Auswirkungen eines Fahrstils (dem der Fahrzeuge mit ACC oder anderen verkehrsrelevanten Assistenzsystemen) auf andere (die "nichtausgestatteten" Fahrzeuge) kann man nur mit Modellen untersuchen, bei denen explizit eine Beschreibung verschiedener Fahrstile möglich ist – also *mikroskopische Modelle*.

(iii) Hier werden modale Verbrauchsmodelle benötigt, welche auf Geschwindigkeit und Beschleunigung einzelner Fahrzeuge, also auf die endogenen Variablen *mikroskopischer Modelle* aufsetzen.

Hinweis: Wenn jemand mit *speed profile Modellen* oder ähnlichen detaillierten makroskopischen Verbrauchsmodellen argumentiert (siehe Treiber/Kesting "Traffic Flow Dynamics"), dann ergibt auch "Makro" volle Punktzahl.

Aufgabe 2 (20 Punkte)

(a) Sowohl beim Ampelstart als auch beim Startschuss eines Marathonlaufs gibt es anfangs zwei Zustände: "Maximale Dichte" (hinter der Ampel bzw. Startlinie) und "kein Verkehr bzw. Dichte null" (davor). Beim Umschalten bzw. beim Startsignal entsteht bei beliebigen LWR-Modellen, also auch hier, jeweils ein Maximalflusszustand $(\rho_c, Q_{\max})$ wobei $Q_{\max} = Q_e(\rho_c)$ ist.

- Beim "runden" Fundamentaldiagramm I hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit $Q_e'(\rho)$ von der Dichte ab mit dem Maximalwert für $\rho \to 0$, null für $\rho = \rho_c$ und minimal (also negativ) für $\rho = \rho_{\max}$. Also weicht die anfänglich scharfe Front auf $\Rightarrow$ Verhältnisse beim Marathonlauf, also (I)-(ii).
- Beim dreieckigen Fundamentaldiagramm II gibt es einen Übergang $\rho = \rho_{\max} \to \rho_c$, der sich mit der einheitlichen Geschwindigkeit $c = Q_e'(\rho)|_{\rho > \rho_c}$ rückwärts ausbreitet und einen Übergang $\rho = \rho_c \to 0$ mit der einheitlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit $Q_e'(\rho)|_{\rho < \rho_c} = v_0$. Die Fronten bleiben also scharf, wie beim Autoverkehr, also (II)-(i).

(b) Im dargestellten Punkt $(\rho_\mathrm{P}, Q_\mathrm{P})$ des Fundamentaldiagramms (III) ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit $Q_e'(\rho_\mathrm{P})$ (Tangentensteigung) größer als die Fahrzeuggeschwindigkeit $V_\mathrm{P} = Q_p/\rho_\mathrm{P}$ (Steigung der Ursprungsgeraden durch P). Also breiten sich Informationen auch *relativ zu den fahrenden Autos* von hinten nach vorne aus. Folglich beschreibt dieses Fundamentaldiagramm beim Punkt P den unrealistischen Fall eines Fahrverhaltens, welches maßgeblich vom Fahrzeg *dahinter* (z.B. via Hupe oder Lichthupe) abhängt.

Aufgabe 3

(a) Allgemein gilt für die fahrstreifengemittelten Größen ρ und Q der Hauptfahrbahn auf Höhe von Rampen die Kontinuitätsgleichung

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{Q_{\text{rmp}}}{IL} = \nu.$$

Hier gilt $Q_{\text{rmp}} = 490\,\text{Fz/h}$, $I = 2$ und $L = 200\,\text{m}$, also

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 1.225\,\text{Fz}\,\text{h}^{-1}\text{m}^{-1}$$

bzw. in SI-Einheiten

$$\nu = \frac{Q_{\text{rmp}}}{IL} = 0.00034\,\text{Fz}\,\text{h}^{-1}\text{m}^{-1}.$$

(b),(d) Das Fundamentaldiagramm ist jeweils durch die durch die Punkte $(0,0)$, $(\rho_c, Q_{\max})$ und $(\rho_{\max}, 0) = (1/l_{\text{eff}}, 0)$ aufgespannten Dreiecke definiert. Nur die Spitze der Dreiecke ändert sich beim Übergang von Schönwetter zu Regen.

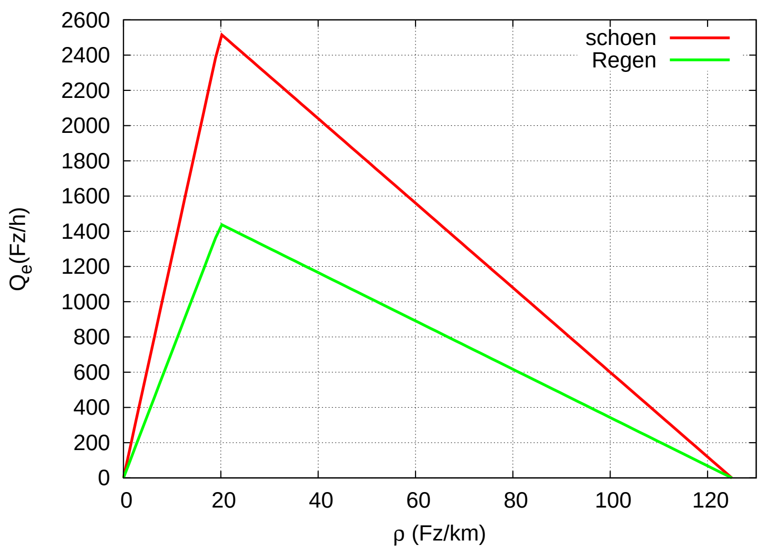
- Schönwetter:

$$\begin{aligned} \rho_c &= \tfrac{1}{v_0 T + l_{\text{eff}}} &&= 20\,\text{Fz/km/Spur}, \\ Q_{\max} &= v_0 \rho_c &&= 0.7\,\text{Fz/s/Spur} = 2\,520\,\text{Fz/h/Spur}. \end{aligned}$$

- Regen:

$$\begin{aligned} \rho_c &= \tfrac{1}{v_0 T + l_{\text{eff}}} &&= 20\,\text{Fz/km/Spur}, \\ Q_{\max} &= v_0 \rho_c &&= 0.4\,\text{Fz/s/Spur} = 1\,440\,\text{Fz/h/Spur}. \end{aligned}$$

Plot des Fundamentaldiagramms für schönes Wetter (rot) und Regen (grün):



(c) Nein, dann die über alle Fahrstreifen summierte Kapazität beträgt $K = 2Q_{\max} = 5\,040\,\text{Fz/h}$ während die maximale tatsächliche Verkehrsbelastung maximal (und zwar stromabwärts der Zufahrt) $Q_{\text{tot}} = Q_{\text{in}} + Q_{\text{rmp}} = 3\,290\,\text{Fz/h}$ beträgt. Also ist der Fluss überall durch die Nachfrage und die Dichte durch Q/ρ gegeben:

Zustandsgröße	stromauf	stromab
Q_{tot}	2 800 Fz/h	3 290 Fz/h
$\rho_{\text{tot}} = \frac{Q_{\text{tot}}}{V_0}$	22 Fz/km	26.1 Fz/h

(e) Bei Regen kommt es hingegen zum Stau, da nun die Kapazität

$$K_{\text{Regen}} = 2Q_{\text{max,Regen}} = 2\,880\,\text{Fz/h}$$

geringer als die maximale Verkehrsbelastung liegt, da letztere nach wie vor bei 3 290 Fz/h liegt. Also kommt es zum Stau und der Gesamtfluss im Stau ist durch die Engstellenkapazität gegeben. Da es auf der Zufahrt nach Voraussetzung nicht zum Stau kommt, fahren alle Fahrzeuge staufrei ein und die Engstellenkapazität ist gegeben durch

$$K_{\text{bottl}} = 2Q_{\text{max,Regen}} - Q_{\text{rmp}} = 2\,390\,\text{Fz/h}$$

Stromabwärts der Engstelle herrscht nun der Maximalflusszustand, während stromaufwärts im Staubereich der Gesamtfluss durch die Engstellenkapazität, im noch weiter stromausfwärts liegenden freien Bereich hingegen durch die Nachfrage $Q_{\text{in}} = 2\,800\,\text{Fz/h}$ gegeben ist. Im Stau ist die Dichte *pro Fahrstreifen* durch den gestauten Zweig des Fundamentaldiagramms, $\rho_{\text{cong}}(Q) = \rho_{\text{max}}(1 - QT)$, gegeben, sonst durch den freien Zweig $\rho_{\text{free}}(Q) = Q/V_0$:

Zustandsgröße	stromauf frei	stromauf gestaut	stromab
Q_{tot}	2 800 Fz/h	2 390 Fz/h	2 880 Fz/h
Q	1 400 Fz/h	1 195 Fz/h	1 440 Fz/h
ρ	19.4 Fz/km	37.9 Fz/km	20.0 Fz/km
ρ_{tot}	38.9 Fz/km	75.7 Fz/km	40.0 Fz/km

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Übergangs frei → Stau stromaufwärts der Zufahrt:

$$c_{12} = \frac{Q_1 - Q_2}{\rho_1 - \rho_2} = \frac{Q_1 - Q_2}{\frac{Q_1}{V_0} - \rho_{\text{max}}(1 - Q_2 T)} = -3.09\,\text{m/s}.$$

Aufgabe 4

(a)
- 0-10 s: Start mit langsamer Geschwindigkeit mit weit entferntem Vorderfahrzeug, deshalb Beschleunigung auf die Wunschgeschwindigkeit
- 10-20 s: Annäherung an das etwas langsamere Vorderfahrzeug mit langsamer Verzögerung
- 20-100 s: Dynamische Folgefahrt: Ein Merkmal dafür ist, dass Abstand und Geschwindigkeit positiv korreliert, so dass die Folgezeit (Abstand durch Geschwindigkeit) geringere Schwankungen aufweist: Das betrachtete Fahrzeug folgt dynamisch den wechselnden Geschwindigkeiten des Vorderfahrzeugs unter Maßgabe einer nahezu konstanten Zeitlücke
- 100-143 s: Passieren einer "Stauwelle", in welcher eine sehr geringe Geschwindigkeit (15 km/h und eine hohe Dichte (Abstand (etwa 7 m) herrschen
- 143 s: Das Vorderfahrzeug wechselt die Spur, so dass sich der Abstand abrupt erhöht. Prinzipiell könnte das Vorderfahrzeug auch abbiegen, aber da es schneller als 50 km/h fährt (das betrachtete fährt zu dieser Zeit 53 km/h und der Abstand vergrößert sich, also isy das Vorderfahrzeug noch schneller), kommt dies eher nicht in Betracht.
- 143-170 s: Erst Beschleunigen fast auf die Wunschgeschwindigkeit, dann Abbremsen bis zum Stopp
- ab 170 s: Warteschlange bzw. stehender Verkehr.

Bemerkung: Dies ist nur ein Lösungsvorschlag. Man kann ihn auch anders gliedern. Jede überzeugende Darstellung ergibt volle Punktzahl.

(b) Der mittlere Abstand beträgt etwa $\bar{s} = 20\,\text{m}$ und die mittlere Geschwindigkeit $\bar{V} = 36\,\text{km/h} = 10\,\text{m/s}$. Damit ist die mittlere Folgezeit

$$\bar{T} = \frac{\bar{s}}{\bar{v}} = 2\,\text{s}.$$

Bemerkung: Da Geschwindigkeit und Abstand fast proportional verlaufen (z.B. ein maximaler Abstand von 25 m bei 45 km/h) sind die Schwankungen der Folgezeit um $\bar{T}$ deutlich geringer als die des Abstandes oder der Geschwindigkeit getrennt betrachtet

Bemerkung 2: Zur korrketen Bearbeitung dieses Teils genügt die Angabe des Schätzwertes "um 2 s".

(c) Der Abstand vergrößert sich abrupt, während Geschwindigkeit und Beschleunigung keine Auffälligkeiten zeigen. Dies ist ein Indiz eines passiven Spurwechsels: Das Vorderfahrzeug verlässt die Spur. Prinzipiell ist auch ein aktiver Spurwechsel denkbar (mit mehr Abstand auf der neuen Spur). Das würde aber im Allgemeinen mit Auffälligkeiten in der Beschleunigung einhergehen.

Bemerkung Jeder Verweis auf einen Spurwechsel bringt volle Punktzahl

(d) Hierzu ist nur der mittlere Graphh mit der Geschwindigkeits-Zeitreihe notwendig. Die zurückgelegte Strecke

$$L = x(t_e) - x(t_a) = \int_{t_a}^{t_e} v(t)\ \mathrm{d}t$$

mit $t_a = 0$ und $t_e = 180\,\mathrm{s}$ ist die Fläche unter der Geschwindigkeitskurve. Wegen den weit auseinanderliegenden Antwort-Optionen ist nur eine grobe Abschätzungf nötig: Mittlere Geschwindigkeit etwa 30 km/h, also einen Kilometer alle 2 Minuten, also bei 180 s=3 Minuten etwa $L = 1.5\,\mathrm{km}$. Dies liegt eindeutig am nächsten bei (ii)1 600 m.

(e)
- v_0 gibt die Wunschgeschwindigkeit an. Sie wird durch die maximale Geschwindigkeit abgeschätzt: $v_0 = 57\,\mathrm{km/h}$. Streng genommen ist die maximale Geschwindigkeit nur eine untere Schranke der Wunschgeschwindigkeit, deshalb sind z.B. 60 km/h auch OK.
- s_0 gibt den Mindestabstand bei stehenden Verkehr an, wird also aus dem obersten Graph für $t > 170\,\mathrm{s}$ abgelesen: Er ist etwas über 0, aber deutlich unter 5 m. Alles zwischen 0.5 m und 3 m ist OK.
- a gibt die Maximalbeschleunigung an, welche bei niedriger eigener Geschwindigkeit und freier Straße erreicht wird, also ganz am Anfang. Die 3. Grafik bei $t = 0\,\mathrm{s}$ ergibt etwa $2\,\mathrm{m/s}^2$.
- b gibt die komfortable Bremsverzögerung an, also die Bremsverzögerung, welche in kontrollierten Situationen nicht überschritten wird. Da passive Cut-in Spurwechsel (jemand fährt vor einem in kurzem Abstand ein) nicht in den Daten enthalten sind (nur ein passiver Cut-Out-Spurwechsel), kann man zu jeder Zeit eine kontrollierte Situation annehmen. Also $b \approx 2\,\mathrm{m/s}^2$

  Hinweis: Eine genauere Analyse zeigt, das der Fahrer bei etwa $t = 120\,\mathrm{s}$ etwas "geschlafen" hat und nicht rechtzeitig bremste (das IDM hätte in dieser Parametrisierung eher gebremst). Ferner muss ein Folgefahrer natürlich auch dann mit mehr als b verzögern, wenn dies der Vorderfahrer über einen längeren Zeitraum macht. Daher ist b meist am schwersten zu schätzen.
- T gibt die Folgezeit bei nicht zu dynamischer Folgefahrt an, also (vgl. Aufgabenteil (b)) $T \approx 2\,\mathrm{s}$.

(f) Der OVM-Parameter τ (Geschwindigkeits-Anpassungszeit) ist mit der maximalen Beschleunigung bzw. komfortablen Verzögerung durch die Beziehungen

$$\tau \approx \frac{v_0}{a} \approx \frac{v_0}{b}$$

angenähert. Also hier

$$\tau \approx \frac{57/3.6\,\mathrm{m/s}}{2\,\mathrm{m/s}^2} \approx 8\,\mathrm{s}$$

Hinweis 1: Bei all den obigen Näherungen und Abschätzungen sind genauere Angaben wie z.B. $\tau = 7.9166667\,\mathrm{s}$ sinnlos!

Hinweis 2: Würde man den Folgefahrer tatsächlich mit dieser Parametrisierung simulieren, wird zwar die anfängliche beschleunigung gut reproduziert, später aber ein Crash erzeugt!