Klausur zur Vorlesung
Verkehrsdynamik und -simulation
SS 2012

Lösungsvorschlag

Insgesamt 120 Punkte

Aufgabe 1

(a) *Mikroskopische Modelle* beschreiben die Dynamik einzelner Fahrzeuge. Jedes Fahrzeug α hat seine eigenen dynamischen Variablen: Ort x_α, Geschwindigkeit v_α, Abstand s_α zum Vorderfahrzeug, Beschleunigung $\dot{v}_\alpha$ usw.

Makroskopische Modelle beschreiben den Verkehrsfluss als "Fluss" mit den dynamischen Variablen Dichte $\rho(x,t)$, lokale Geschwindigkeit $V(x,t)$, Fluss-Stärke $Q(x,t)$ usw. Die zusätzliche räumliche unabhängige variable übernimmt die Rolle des Fahrzeugindex der Mikromodelle.

(b) Welche Modellklasse ist besser?

Anwendung	bessere Modellklasse	Begründung
A	Mikro	mit Makro nicht möglich
B	Makro	Mikro zu detailliert
C	Mikro	Heterogenität der Fahrzeuge ist wichtig
D	Makro	Mikro zu detailliert und zu langsam
E	Mikro	hängt entscheidend vom Ausstattungsgrad ab

Aufgabe 2

(a) Wunschgeschwindigkeit des ersten Kfz aus der rechten Zeitreihe: 54 km/h=15 m/s. Das zweite Fahrzeug kann eine höhere (jedoch nicht eine geringere) haben. Da es nicht schneller fahren kann als das erste, kann man dies jedoch nicht anhand der Trajektorie entscheiden.

Mindestlücke des zweiten und des ersten Fahrzeugs: 2 m (linke Zeitreihe).

Zeitlücke des zweiten Fahrzeugs zum ersten aus dem Folgeabstand bei Konstantfahrt mit 15 m/s:

$$T = \frac{32\,\mathrm{m} - 2\,\mathrm{m}}{15\,\mathrm{m/s}} = 2\,\mathrm{s}.$$

(b) Die Maximalbeschleunigung findet beim ersten Fahrzeug am Anfang statt, z.B. abgelesen anhand der Geschwindigkeitsdifferenz in den ersten 5 Sekunden

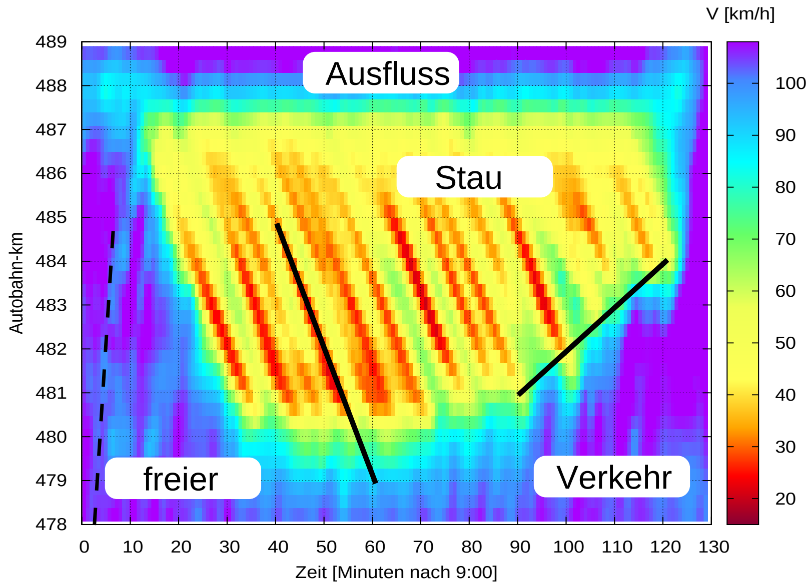
$$\dot{v}_{\max} = \frac{27\,\mathrm{km/h}}{5\,\mathrm{s}} = \frac{7.5\,\mathrm{m/s}}{5\,\mathrm{s}} = 1.5\,\mathrm{m/s}^2$$

Die Maximalverzögerung findet beim zweiten Fahrzeug in der Annäherungsphase statt, z.B. abgelesen anhand der Geschwindigkeitsdifferenz im Intervall 35 s bis 40 s:

$$\dot{v}_{\min} = \frac{15\,\mathrm{km/h} - 45\,\mathrm{km/h}}{5\,\mathrm{s}} = \frac{-8.3\,\mathrm{m/s}}{5\,\mathrm{s}} = -1.67\,\mathrm{m/s}^2.$$

Aufgabe 3

(a) Ausbreitungsgeschwindigkeit c von Stauwellen z.B. anhand der Welle, welche um 16:40 den Ort 485 km quert (vgl. die Abbildung):



$$c = \frac{-6\,\mathrm{km}}{20\,\mathrm{min}} = -18\,\mathrm{km/h} = -5\,\mathrm{m/s}$$

Die Wunschgeschwindigkeit kann man direkt anhand der maximalen Geschwindigkeit des Codierungsbalkens rechts ablesen:

$$V_0 = 108\,\mathrm{km/h} = 30\,\mathrm{m/s}.$$

(Werte 105-115 km/h sind auch OK.) Dazu wird ausgenutzt, dass bei einem dreieckigem Fundamentaldiagramm die Wunschgeschwindigkeit bei freiem Verkehr *immer* gleich dem Fließgleichgewicht entspricht (für das IDM benötigte man Daten einer sehr wenig befahrenen Autobahn, die hier nicht gegeben sind.)

Alternativ könnte man V_0 auch aus der Propagationsgeschwindigkeit von Strukturen im freien Verkehr (gestrichelte Linie) bestimmen, da diese bei dreieckigem FD ebenfalls sich mit V_0 fortbewegen. Dies ist allerdings sehr ungenau.

(b) Maximale Dichte:

$$\rho_{\max} = Q_{\max}\left(\frac{1}{V_0} - \frac{1}{c}\right) = 117\,\mathrm{Fz/km}$$

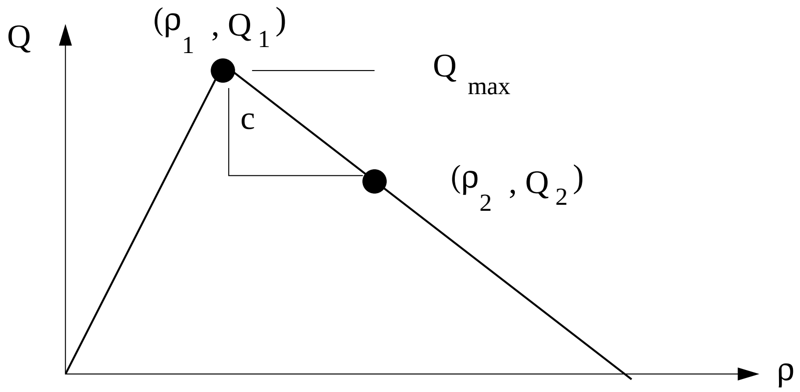
Folgezeit:

$$T = -\frac{1}{\rho_{\max} c} = \frac{1}{Q_{\max}(1 - c/V_0)} = 1.71\,\mathrm{s}.$$

Das Trickreiche dieses Aufgabeteils ist, dass sowohl $\rho_{\max}$ als auch T bestimmt werden sollen, so dass Formeln wie $T = -1/(\rho_{\max} c)$ alleine nicht zum Ziel führen. Vielmehr muss man diese Formel und die Formel für die Kapazität, $Q_{\max} = 1/(T + l_{\text{eff}}/V_0)$ mit $l_{\text{eff}} = 1/\rho_{\max}$ verwenden, so dass man zwei Gleichungen für die zwei unbekannten T und $\rho_{\max}$ hat. Direkt ergibt sich das Ergebnis auch aus der Schockwellengleichung, indem man die Geschwindigkeit des Übergangs Stau ($\rho_1 = \rho_{\max}$, $Q_1 = 0$) zum Maximalflusszustand ($\rho_2 = \rho_K = Q_{\max}/V_0$, $Q_2 = Q_{\max}$) gleich der bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit c setzt:

$$\begin{aligned} c &= \tfrac{Q_1 - Q_2}{\rho_1 - \rho_2} = \tfrac{0 - Q_{\max}}{\rho_{\max} - Q_{\max}/V_0} \\ &\Rightarrow \ \rho_{\max} = Q_{\max}\left(\tfrac{1}{V_0} - \tfrac{1}{c}\right). \end{aligned}$$

(c) Der Zufluss ist nahe dem maximalen Zufluss, wie folgende Abbildung zeigt:



Die Sekantensteigung zwischen dem freien Verkehr (Punkt an der Spitze) und dem Stau (Punkt auf der rechten Seite) ist nur dann gleich c, wenn im freien Verkehr der maximale Fluss $Q_{\max}$ herrscht.

(d) Der Fluss im gestauten Bereich sei nun im Mittel $Q_2 = 1\,500\,\text{Fz/h} = 1\,500/3\,600\,\text{Fz/s}$. Ferner ergibt sich aus der eingezeichneten Geraden in der Abbildung der Aufgabenstellung die (mittlere) Staufront-Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen 10:30 und 11:00 zu

$$c_{12} = \frac{3\,\text{km}}{30\,\text{min}} = 6\,\text{km/h} = 1.67\,\text{m/s}.$$

Aus der Schockwellengleichung

$$c_{12} = \frac{Q_1 - Q_2}{\rho_1 - \rho_2} = \frac{Q_1 - Q_2}{\frac{Q_1}{V_0} - \rho_{\max}(1 - Q_2 T)}$$

ergibt sich durch Auflösen nach dem gesuchten Zufluss Q_1:

$$Q_1 = \frac{Q_2(1 + c_{12}\rho_{\max}T) - \rho_{\max}c_{12}}{1 - \frac{c_{12}}{V_0}} = 0.382\,\text{Fz/s} = 1\,380\,\text{Fz/h}$$

Mit den Werten $T = 1.7\,\text{s}$ und $\rho_{\max} = 0.115\,\text{Fz/m}$ ergibt sich, auf drei signifikanten Stellen, kein anderes Ergebnis.

Aufgabe 4

(a) Bei konstanter Geschwindigkeit und ebener Straße kann ein Elektroauto keine mechanische Energie (in chemische Batterie-Energie) zurückgewinnen, ebensowenig wie ein Auto mit Verbrennungsmotor. Insofern ist der Bedarf an mechanischer Energie bei beiden Autotypen gleich (zumindest wenn die sonstigen Attribute wie Masse, cw-Wert etc. gleich sind, was hier angenommen wurde.) Die benötigte Motorleistung bei $v = 130/3.6\,\mathrm{m/s} = 36.1\,\mathrm{m/s}$ beträgt

$$P = P_0 + Fv = P_0 + \left(mg\mu + \frac{1}{2}c_w A\rho v^2\right) v = 31.00\,\mathrm{kW}$$

Damit beträgt die benötigte mechanische Energie zur Bereitstellung der Grundleistung P_0 und Überwinden des Fahrwiderstandes auf $L = 1\,\mathrm{km}$ Strecke:

$$W = P\tau = P\frac{L}{v} = 858\,000\,\mathrm{Ws} = 0.238\,\mathrm{kWh}.$$

Hierher auch direkt durch "Arbeit=Grundleistung mal Zeit + Kraft mal Weg":

$$W = P_0\tau + FL = \frac{P_0 L}{v} + \left(mg\mu + \frac{1}{2}c_w A\rho v^2\right) L.$$

(b) Dieselfahrzeug:

$$\begin{aligned} \text{Verbrauch:} \quad & C = C_{\mathrm{spez}} W = 0.0504\,\text{Liter} \\ \text{direkte } CO_2 \text{ Emission:} \quad & E_{\mathrm{CO2}} = C * 2.68\,\mathrm{kgCO2/Liter} = 0.134\,\mathrm{kg}. \end{aligned}$$

E-Fahrzeug:

$$\text{indirekte } CO_2 \text{ Emission:} \qquad E_{\mathrm{CO2}} = W * 550\,\mathrm{gCO_2/kWh} = 0.131\,\mathrm{kg}.$$

Bemerkung: Die Emissionen sind fast gleich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die effektiven spezifischen Emissionen des Dieselfahrzeugs,

$$\epsilon^*_{\mathrm{CO2}} = C_{\mathrm{spez}} 2.68\,\mathrm{kgCO2/Liter} = 563\,\mathrm{g/kWh},$$

nahezu identisch zur spezifischen Emissionen des deutschen Energiemixes

$$\epsilon_{\mathrm{CO2}} = 550\,\mathrm{g/kWh}$$

sind.

(c) Bedarf an mechanischer Energie beim Dieselfahrzeug:

$$W_D = P_0\tau + FL + 2W_{\mathrm{kin}} = 965\,000\,\mathrm{Ws} = 0.268\,\mathrm{kWh}$$

mit

$$\begin{array}{ll} P_0 = 2\,\mathrm{kW}, & \tau = 2 * (120\,\mathrm{s} - 10\,\mathrm{s}) = 220\,\mathrm{s}, \\ F = \mu m g = 294\,\mathrm{N}, & L = 1\,\mathrm{km} - 2 * 100\,\mathrm{m} = 800\,\mathrm{m}, \\ v = 50/3.6\,\mathrm{m/s}, & 2W_{\mathrm{kin}} = mv^2 = 289\,000\,\mathrm{Ws}. \end{array}$$

E-Fahrzeug: Bedarf an nicht rekuperierbarer mechanischer Energie:

$$W_E = P_0\tau + FL = 774\,000\,\mathrm{Ws} = 0.215\,\mathrm{kWh}$$

mit

$$\begin{array}{ll} P_0 = 2\,\mathrm{kW}, & \tau = 2 * 120\,\mathrm{s} = 240\,\mathrm{s}, \\ F = 294\,\mathrm{N} & L = 1\,\mathrm{km}. \end{array}$$

Hinweis: Bei der Bearbeitung dieses Aufgabenteils und des Teils (d) ist es wichtig, dass 1 km *zwei* Start-Stopp-Zyklen entsprechen!

(d) Dieselfahrzeug:

$$\begin{aligned} \text{Verbrauch:} \quad & C = C_{\text{spez}} W_D = 0.0563\,\text{Liter} \\ \text{direkte CO}_2 \text{ Emission:} \quad & E_{\text{CO2}} = C * 2.68\,\text{kg/Liter} = \epsilon^*_{\text{CO2}} W_D = 0.151\,\text{kg}. \end{aligned}$$

E-Fahrzeug:

$$\text{indirekte CO}_2 \text{ Emission:} \quad E_{\text{CO2}} = \epsilon_{\text{CO2}} W_E = 0.118\,\text{kg}.$$

Bemerkung Die Gesamtemissionen pro Kilometer sind in der Stadt beim E-Fahrzeug deutlich niedriger als beim (bereits sparsam angenommenen) Diesel. Dies wird zum größten Teil durch die Rekuperation der kinetischen Energie beim Bremsen ermöglicht, die beim Diesel entfällt. Bei längerer Konstantfahrt, insbesondere auf Autobahnen, ist allerdings der Vorteil des E-Fahrzeugs (bei den Parameter-Spezifikationen dieser Aufgabe) nur insignifikant, da die effektive spezifische Emission des Dieselfahrzeugs nahezu der des Energiemixes zum Beladen des E-Fahrzeugs ist. Reduziert man die spezifischen Emissionen des Energiemixes, ergibt sich Verringerungspotenzial für das E-Fahrzeugs, während die Reduktionsmöglichkeiten der spezifischen Emissionen des Dieselfahrzeugs (da die Verbrennungs-Reaktionsgleichung fest ist, kommt nur Motoroptimierung, also Verbesserung des Wirkungsgrades, in Frage) nahezu ausgereizt sind. Allerdings ist der prozentuale Anstieg bei Betrachtung des gesamtes *Life-Cycles* beim E-Fahrzeug höher als beim Dieselfahrzeug: Die Herstellung und Entsorgung der schweren Batterien mehr Energie bzw. CO_2 kostet als die entsprechenden Komponenten (einschließlich Herstellung und Transport des Treibstoffs) beim Verbrennungsmotor-Fahrzeug.