

# Klausur zur Vorlesung Verkehrsdynamik und -simulation

SS 2011

Lösungsvorschlag

Insgesamt 120 Punkte

## Aufgabe 1 (25 Punkte)

Anwendung	Querschnittsdaten	FCD privat	FCD Logistik	Floating Phones
A	+	+	+	+
B	-	+	-	0
C	+	-	-	-
D	0	+	+	+
E	-	+	+	0
F	-	+	+	-
G	-	+	+	0

**Erklärung** (nicht bei der Lösung der Klausur verlangt)

**Querschnittsdetektoren** erlauben als einzige der Detektionsquellen eine Vollerfassung und sind damit zur Bestimmung extensiver Größen (Fluss, Dichte) unerlässlich. Bei fließendem Verkehr kann man durch Flussbilanzierung auch die Reisezeiten auf Autobahnen bestimmen. Da sie weder stehenden Verkehr detektieren können noch auf Land- und Stadtstraßen vorhanden sind, sind sie für die andere Anwendungen nicht nützlich.

**FCD von Privatautos** Aufgrund der Genauigkeit und der Fähigkeit, auch stehenden Verkehr zu erfassen, für alle Zwecke gut geeignet, außer, wenn eine Vollerfassung notwendig ist (Flussmessung).

**FCD von Logistik-Unternehmen.** Da überwiegend LKW-Verkehr berücksichtigt wird, ist die Geschwindigkeit und damit die Reisezeit auf wenig ausgelasteten Netz nicht repräsentativ. Im Stau sind aber alle gleich, so dass dann diese Daten ebenfalls gut geeignet sind.

**Floating Phones:** Wegen der räumlichen Ungenauigkeit und der Fehlsignale durch Mobiltelefone außerhalb von Kfz in der Stadt sind diese nicht brauchbar. Auf dem Land und auf Autobahnen ist dagegen wegen des typischen Abstandes zweier Straßen von mindestens mehreren hundert Metern problemlos map-Matching auf das Straßennetz möglich (aufgrund des pulkmäßigen Auftretens von Signalen sind Telefone von Bus- oder Bahnpassagieren leicht separierbar; aufgrund der Kontinuität sind auch Autobahnen von parallel laufenden Landstraßen trennbar)

## Aufgabe 2 (25 Punkte)

- (a) –  $V_0$ : Wunschgeschwindigkeit  
–  $T$ : Netto-Folgezeit (Nettozeitlücke) bei gebundenem Verkehr  
–  $l_{\text{eff}}$  Effektive Fahrzeuglänge: Mittlere physikalische Fahrzeuglänge zuzüglich mittlerer Nettoabstand zwischen zwei Fahrzeugen bei stehendem Verkehr
- (b) Tabelle:

Verkehrssituation	$V_0$	$T$	$l_{\text{eff}}$
Autobahn-Baustelle	60-80 km/h	1.5 s	8 m
Tempo-30 Zone	30 km/h	1.5 s	7 m
Radfahrer	20 km/h	1.0 s	2 m
Fußgänger Gänsemarsch	4 km/h	1.0 s	0.5 m.

[Angaben bei  $T$  und  $l_{\text{eff}}$ , welche bis 50% nach oben bzw. 30% nach unten gehen (bzw. +100% und -50% bei Fußgänger), sind ebenfalls richtig. Nicht hingegen 100 km/h bei BAB-Baustellen, da dort Tempolimit 60 oder 80 (außer, man sagt explizit, dass man Temposünder modelliert!)] Die effektive Länge  $l_{\text{eff}}$  ist im Stadtverkehr etwas kürzer, da in der Stadt die Leute bei Ampel-Warteschlangen tendenziell dichter auffahren als bei Stillstand auf der Autobahn (und nicht etwa wegen der Relativitätstheorie, dann wären wegen der Längenkontraktion die schnelleren Autos kürzer ;-)

- (c) Ausbreitungsgeschwindigkeit nach der Schockwellenformel:

$$c = \frac{Q_2 - Q_1}{\rho_2 - \rho_1}.$$

Dabei bezeichnet das Subskript “1” die Verkehrssituation auf der unverstauten Strecke stromaufwärts der Staufont und das Subskript “2” die Verhältnisse im Stau.

**Flüsse und Dichten stromaufwärts der Staufont:** Der Fluss ist gemittelt pro Fahrstreifen zu verstehen und die Dichte ist anhand des freien Zweiges des Fundamentaldiagramms aus dem Fluss zu bestimmen, also

$$Q_1 = 1\,667 \text{ Fz/h} \quad \text{bzw } 1\,333 \text{ Fz/h} \quad \text{bzw } 1\,000 \text{ Fz/h},$$
$$\rho_1 = 12.82 \text{ Fz/km} \quad \text{bzw } 10.26 \text{ Fz/km} \quad \text{bzw } 7.69 \text{ Fz/h}.$$

**Flüsse und Dichte stromabwärts der Staufont:** Unabhängig vom Zufluss ist die Situation nur durch die Engstelle bzw. der Engstellenkapazität bestimmt. Pro Fahrstreifen beträgt diese

$$Q_2 = \frac{\text{Engstellenkapazität}}{3} = 1\,333 \text{ Fz/h} = 0.3704 \text{ Fz/s}.$$

Die Dichte ist aus dem Fluss durch den *gestauten* Zweig des Fundamentaldiagramms zu berechnen. Dabei ist es sinnvoll (wie auch immer bei Simulationen!), in der Rechnung auf SI-Einheiten zu gehen (also hier  $s^{-1}$  für den Fluss):

$$\rho_2 = \rho_{\text{cong}}(Q_2) = \rho_{\text{max}}(1 - Q_2 T) = 0.0555 \text{ Fz/m} = 55.5 \text{ Fz/km}$$

*Achtung!* Diese Formel ist nur für fahrstreifengemittelte Größen gültig, also hier  $Q_2 = \text{ein Drittel der Engstellenkapazität!}$  Die maximale Dichte  $\rho_{\max} = 1/l_{\text{eff}} = 0.125 \text{ Fz/m}$  *pro Fahrstreifen* ist gleich dem Kehrwert der effektiven Fahrzeuglänge. Damit

$$\begin{aligned} \text{Zufluss } 5\,000 \text{ Fz/h: } c &= \frac{Q_2 - Q_1}{\rho_2 - \rho_1} = -7.80 \text{ km/h,} \\ \text{Zufluss } 4\,000 \text{ Fz/h: } c &= 0, \\ \text{Zufluss } 3\,000 \text{ Fz/h: } c &= 6.96 \text{ km/h} \end{aligned}$$

Bei 4000 Fz/h ist die Nachfrage (=der Zufluss) gleich groß wie das Angebot (=Engstellenkapazität). Infolgedessen ist die stromaufwärtige Staufront, ebenso wie die stromabwärtige, an der Engstelle, stationär: Der Stau bleibt gleich groß.

### Aufgabe 3 (25 Punkte)

(a) **Bedingung 1: Mindestlücke zum sich nähernden Hauptstraßenfahrzeug:**

Für das sich der Einfahrt nähernde Fahrzeug darf die IDM-Bremsverzögerung  $-\dot{v}$  bei Beginn des Einfahrvorgangs (Geschwindigkeit des einbiegenden Fahrzeugs = Vorderfahrzeug des betrachteten Fahrzeugs,  $\Delta v = v$ ) den Wert  $b$  nicht überschreiten. Es gilt also die Bedingung

$$\dot{v} = a \left[ 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^4 - \left( \frac{s^*}{s} \right)^2 \right] > -b \quad (1)$$

Das Fahrzeug auf der Hauptstraße fährt anfänglich mit der Wunschgeschwindigkeit,  $v = v_0$ . Außerdem ist (nach Aufgabenstellung)  $a = b$ . Damit wird die Bedingung (1) zu  $-b(s^*/s)^2 > -b$  bzw.  $s^*/s < 1$  und nach Einsetzen des IDM-Ausdrucks für  $s^*$

$$s > s^* = s_0 + vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} = s_0 + vT + \frac{v^2}{2b}.$$

Der Mindestabstand ist also im Wesentlichen gleich dem Anhalteweg (Reaktionsweg+Bremsweg) des sich nähernden Fahrzeugs unter der Annahme, dass die Folgezeit  $T$  gleich der Reaktionszeit ist! Zahlenwerte:

- $V_0 = 50 \text{ km/h} = 50/3.6 \text{ m/s}$ :  $s > 64.1 \text{ m}$ ,
- $V_0 = 70 \text{ km/h} = 70/3.6 \text{ m/s}$ :  $s > 116.0 \text{ m}$ .

(b) **Bedingung 2: Mindestlücke zum letzten vorbeigefahrenen Fahrzeug**

Hier wird das IDM auf das einfahrende Fahrzeug angewandt, dessen anfängliche Geschwindigkeit  $v = 0$  ist. Damit ist  $s^* = s_0$  und die Bedingung einer positiven Beschleunigung ergibt

$$\dot{v} = a \left[ 1 - \left( \frac{s_0}{s} \right)^2 \right] > 0 \quad \Rightarrow \quad s > s_0 = 2 \text{ m}$$

Unabhängigkeit von der Geschwindigkeit auf der Hauptstrecke beträgt die Mindestlücke gerade gleich dem Mindestabstand. Es kann (bei exaktem Timing) dennoch nichts passieren, da sich dieser Abstand wegen des großen Geschwindigkeitsunterschieds zunächst rasch vergrößert.

#### Aufgabe 4 (45 Punkte)

- (a) Da es sich hier um langsame Geschwindigkeiten von maximal 50 km/h handelt und der Luftwiderstand, welcher quadratisch mit der Geschwindigkeit steigt, sich erst bei höheren Geschwindigkeiten wesentlich auswirkt. (Allerdings ergibt sich dennoch bereits bei Tempo 50 bei Berücksichtigung des Luftwiderstandes ein Mehrverbrauch von etwa 10 %).
- (b) Verbrauch bei Konstantfahrt  $\dot{v} = 0$  auf ebener Strecke ( $\beta = 0$ ):

$$\frac{dC}{dx}(v) = \frac{1}{\gamma w_{\text{cal}}} \left( \frac{P_0}{v} + F \right) = C_{\text{spez}} \left( \frac{P_0}{v} + mg\mu \right)$$

mit  $C_{\text{spez}} = 1/(\gamma w_{\text{cal}}) = 0.303$  Liter/kWh. Damit

$$\text{Tempo 30: } \frac{dC}{dx}(30/3.6) = 0.0000450 \text{ Liter/m} = 4.50 \text{ Liter/100km}$$

$$\text{Tempo 50: } \frac{dC}{dx}(50/3.6) = 0.0000369 \text{ Liter/m} = 3.69 \text{ Liter/100km}$$

- (c) Da  $a = b$ , sind Beschleunigungs- und Bremsweg  $s_a$  bzw.  $s_b$  gleich und ergeben sich nach der üblichen "Bremswegformel" zu

$$s_a = s_b = \frac{v_0^2}{2b}$$

also

$$\text{Tempo 30, } v_0 = 30/3.6 \text{ m/s: } s_a = s_b = 17.36 \text{ m,}$$

$$\text{Tempo 50, } v_0 = 50/3.6 \text{ m/s: } s_a = s_b = 48.23 \text{ m.}$$

- (d) Summe der benötigten mechanischen Energie:

$$W = W_{\text{kin}} + F_R L_{\text{eff}} + P_0 t_{\text{eff}}$$

mit

- der kinetischen Energie=Bewegungsenergie aus Aufgabenstellung:  $W_{\text{kin}} = \frac{1}{2}mv_0^2$ ,
- der Energie zum Überwinden der Reibungskraft:

$$F_R L_{\text{eff}} = mg\mu(L - s_b),$$

- der Energie zum Bestreiten der Grundleistung für die Zeit, in welcher diese nicht aus der Bewegungsenergie (Schubabschaltung) gewonnen wird:

$$P_0 t_{\text{eff}} = P_0 \left( \frac{v_0}{a} + \frac{L - s_a - s_b}{v_0} \right)$$

Der Gesamtverbrauch auf der 500 m langen Strecke von Stillstand zu Stillstand ergibt sich dann aus

$$C = C_{\text{spez}} W$$

mit dem spezifischen Verbrauch  $C_{\text{spez}} = 0.303$  Liter/kWh von oben.

– **Tempo 30:**

$$L_{\text{eff}} = 483 \text{ m}, \quad t_{\text{eff}} = 60.0 \text{ s}, \quad W = 314\,000 \text{ Ws} = 0.0873 \text{ kWh}, \quad C = 26.4 \text{ ml}$$

– **Tempo 50:**

$$L_{\text{eff}} = 452 \text{ m}, \quad t_{\text{eff}} = 36.0 \text{ s}, \quad W = 350\,000 \text{ Ws} = 0.0971 \text{ kWh}, \quad C = 29.4 \text{ ml}$$

In der Tat wird also bei Tempo 30 insgesamt weniger Treibstoff verbraucht als bei Tempo 50, obwohl der streckenbezogene Verbrauch bei Konstantfahrt bei Tempo 50 geringer ist.

(e) Systemweite CO<sub>2</sub>-Emission des Dieselfahrzeugs:

$$29 \text{ ml} * 3 \text{ g/ml} = \underline{\underline{87 \text{ gCO}_2}}$$

Systemweite CO<sub>2</sub>-Emission des Elektrofahrzeugs:

$$0.085 \text{ kWh} * 550 \text{ g/kWh} = \underline{\underline{44 \text{ gCO}_2}}$$

*Bemerkung (nicht für die Bewertung relevant)* Die Gesamtemissionen des E-Fahrzeugs beim Betrieb sind also hier nur halb so hoch wie beim (bereits sparsam angenommenen) Dieselfahrzeug. Ohne häufige Beschleunigungs- und Bremsmanöver, insbesondere bei längerer Konstantfahrt ist allerdings der Vorteil des E-Fahrzeugs (bei den Parameter-Spezifikationen dieser Aufgabe) nur insignifikant. Deshalb eignen sich E-Fahrzeuge vor allem für die Stadt. Die Life-Cycle-Kosten sind beim E-Fahrzeug sogar etwas höher, da die Herstellung und Entsorgung der schweren Batterien mehr Energie bzw. CO<sub>2</sub> kostet als die entsprechenden Komponenten beim Verbrennungsmotor-Fahrzeug.