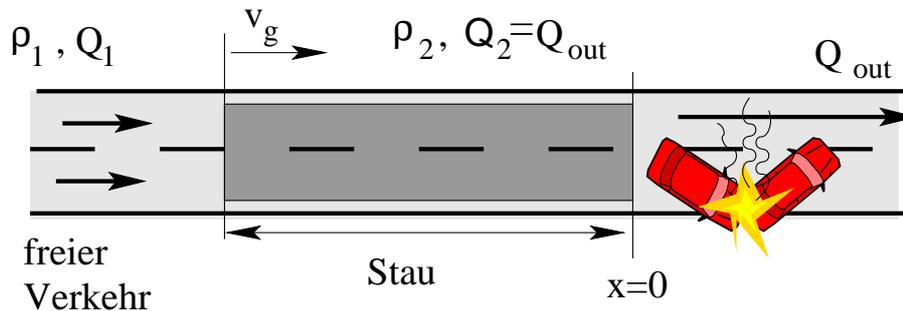


Verkehrsdynamik und -simulation

SS 2024, Übung Nr. 6

Aufgabe 6.1: Staudynamik I: Unfall

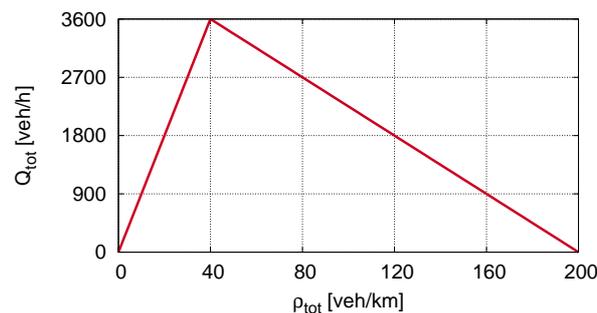
Auf der abgebildeten zweispurigen Autobahn kommt es in der abendlichen Rush-hour um 17h zu einem Unfall, der für drei Stunden den rechten Fahrstreifen blockiert.



Auf der verbleibenden linken Fahrbahn können $Q_{\text{out}} = 1800$ Fahrzeuge pro Stunde die Engstelle passieren. Das Verkehrsaufkommen auf dieser Autobahn (beide Spuren zusammengekommen) beträgt

$$Q_1 = \begin{cases} 2700 \text{ Fahrzeuge pro Stunde} & 17\text{h} \leq t \leq 18\text{h}, \\ 900 \text{ Fahrzeuge pro Stunde} & t > 18\text{h}. \end{cases}$$

Nehmen Sie an, dass sich sowohl der freie als auch der gestaute Verkehr hinter der Engstelle im Gleichgewicht befindet und der über die beiden Spuren summierte Verkehrsfluss durch folgendes Fundamentaldiagramm gegeben ist:

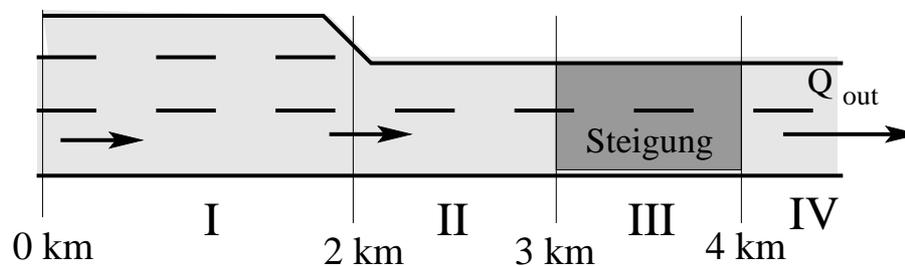


- Zeigen Sie anhand des Fundamentaldiagramms, dass die Verkehrsdichte im hinter der Engstelle entstehenden Stau $\rho_2 = 120$ Fahrzeuge/km beträgt.
- Mit welcher Geschwindigkeit pflanzt sich das Stauende in der Zeit von 17h bis 18h nach hinten fort?

- (c) Wie groß ist die maximale Staulänge? Wie lange befinden sich die Fahrer maximal im Stau? Wie hoch ist der größte Zeitverlust? Wann löst sich der Stau wieder auf?
- (d) Der mathematisch gebildete "Gesunde Menschenverstand" sagt einem, dass sich der Stau nach 2 Stunden wieder auflösen müsste (17-18h: Verkehrsaufkommen um 900 Fahrzeuge/h über der Kapazität, danach: um 900 Fahrzeuge/h unter der Kapazität). Die Rechnung aus Teil (c) ergibt jedoch eine etwas spätere Auflösung. Wie ist das anschaulich erklärbar?

Aufgabe 6.2: Staudynamik II: Steigung und Spurzahlreduktion

Untersucht wird die Staudynamik auf einer Fernstraße mit Steigungsstrecke sowie Spurzahlreduktion:



Wegen hohen LKW-Aufkommens ist die mittlere freie Geschwindigkeit im Bereich der Steigung nur $V_0^{(2)} = 60$ km/h, während davor und danach $V_0^{(1)} = 120$ km/h gilt. Die Folgezeit wird im Bereich der Steigung von $T_1 = 1.5$ s auf $T_2 = 1.9$ s erhöht. Die mittlere Länge einschließlich Mindestabstand beträgt $l_{\text{eff}} = 10$ m. Das Fahrverhalten wird gemäß dem *Lighthill-Whitham*-Modell mit folgender Geschwindigkeitsrelation modelliert:

$$V_e(\rho) = \min \left[V_0, \frac{1}{T} \left(\frac{1}{\rho} - l_{\text{eff}} \right) \right].$$

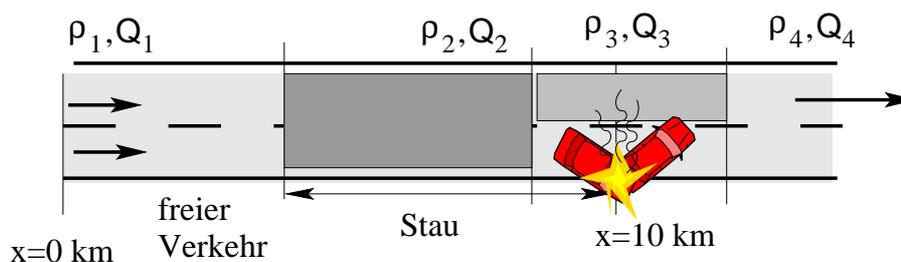
- (a) Zeigen Sie, dass die Kapazität pro Spur außerhalb der Steigungszone 2000 Fz/h beträgt, aber in der Steigungszone auf 1440 Fz/h abfällt.
- (b) Von 15h bis 16h herrscht bei $x = 0$ ein konstanter über alle Spuren summierter Zufluss von 2000 Fahrzeugen/Stunde und es herrscht überall freier Verkehr. Wird der Zustand freien Verkehrs aufrechterhalten? Geben Sie die fahrstreifenbezogenen und die gesamten Verkehrsdichten sowie die Geschwindigkeiten in den Bereichen I bis IV an.
- (c) Um 16h erhöht sich das Gesamt-Verkehrsaufkommen bei $x = 0$ schlagartig auf 3600 Fahrzeuge/Stunde. Bricht der Verkehr zusammen? Wenn ja, wann und wo?

Hinweis: Der Verkehr bricht am stromaufwärtigen Ende des ersten Streckenabschnitts zusammen, welcher eine Kapazität unterhalb des Verkehrsaufkommens aufweist. Berechnen Sie die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Verkehrszustands mit erhöhtem Fluss mit der Schockwellen-Formel.

- (d) Nehmen Sie nun einen Zusammenbruch bei $x = 3$ km an und betrachten Sie zwei Situationen: (i) die stromaufwärtige Staufront liegt im Bereich I bei $x = 1$ km, (ii) die Staufront liegt im Bereich II bei $x = 2.5$ km.
- Ermitteln Sie für die beiden Fälle Flüsse und Dichten auf der Gesamtstrecke.
- Hinweis:* Unterscheiden Sie die Bereiche I bis IV und zusätzlich im Bereich, in dem sich das stromaufwärtige Stauende befindet, die Situation vor dem Stau und im Stau.
- (e) Mit welcher Geschwindigkeit breitet sich die Staufront in den Situationen (i) und (ii) von Aufgabenteil (d) aus? Welche Reisezeit ist in Situation (i) für die Strecke von $x = 0$ bis $x = 4$ km zu veranschlagen?
- (f) Stellen Sie die gesamte Verkehrsflussentwicklung ab 16:00 grafisch in einem Raum-Zeit-Diagramm dar. Geben Sie dabei in jedem unterschiedlichen raumzeitlichen Bereich jeweils den Gesamtfluss Q_{tot} an.
- (g) Wie groß ist die gesamte Reisezeit durch die 4 km lange Strecke, wenn das betreffende Fahrzeug bei $x = 1$ km auf den Stau trifft? Wie groß ist der Zeitverlust?

Aufgabe 6.3: Staudynamik III: Unfall

Untersucht wird der Verkehrsfluss auf einem Fernstraßenabschnitt mit zwei Richtungsfahrbahnen zwischen Strecken-Kilometer 0 und 10 während und nach der Sperrung einer Spur infolge eines Unfalls bei Kilometer 10 um 15:00 h. Im betrachteten Zeitraum liegt die Verkehrsnachfrage auf diesem Abschnitt konstant bei 3024 Fahrzeugen/h. Die Sperrung dauert bis zur Räumung des Unfalls um 15:30 h an.



Der Verkehrsfluss wird mit dem LWR-Modell mit dreieckigem Fundamentaldiagramm unter Verwendung der Parameter $s_0 = 4$ m, $T = 1.5$ s, $v_0 = 28$ m/s und einer mittleren Fahrzeuglänge von 4 m modelliert.

- (a) Berechnen Sie zunächst die Streckenkapazität pro Spur und die Gesamtkapazität vor dem Unfall. Ist die Kapazität ausreichend? Welche Verkehrsdichte herrscht auf der Strecke? Wie hoch ist die Reisezeit zum Durchfahren des 10 km langen Abschnitts (Streckenkilometer 0 bis 10)?

- (b) Zeigen Sie, dass die Kapazität einer Spur geringer als die Nachfrage ist, es also ab 15 h an der Unfallstelle zu einem Stau kommt. Wie hoch ist die Verkehrsdichte und die Geschwindigkeit im Bereich gestauten Verkehrs? Berücksichtigen Sie dabei, dass im verwendeten Modell der Ausfluss aus dem Stau gleich dem maximal möglichem Fluss ist und sich die Fahrzeuge, wo dies möglich ist, gleichmäßig auf beiden Spuren verteilen. Wie sieht es hingegen im einspurigen Engstellenbereich 3 selbst aus?
- (c) Mit welcher Geschwindigkeit breitet sich die stromaufwärtige Staufront aus? Falls Sie (b) nicht gerechnet haben, rechnen Sie im Stau mit einer Dichte von 72.5 Fz/km/Spur und einem Fluss von 1008 Fz/h/Spur . *Tipp*: Unterscheiden Sie sorgfältig Verkehrsdichten und Flüsse auf der Gesamtfahrbahn und spurbezogene Dichten und Flüsse!
- (d) Nach Räumung der Unfallstelle sind beide Spuren wieder frei und der Stau löst sich von der Unfallstelle her auf. Mit welcher Geschwindigkeit bewegt sich der Übergang Stau \rightarrow freier Verkehr stromaufwärts? Wann löst sich der Stau vollständig auf? *Tipp*: Angabe in Sekunden seit 15:00 genügt.
- (e) Zeichnen Sie die Grenzen des Verkehrsstaus in ein raumzeitliches Diagramm.
- (f) Berechnen Sie die Reisezeit zum Durchfahren der 10 km langen Strecke für ein um 15:30 in den Streckenabschnitt einfahrendes Fahrzeug.