Verkehrsökonometrie für Bachelor-Studierende

Sommersemester 2024, Lösungsvorschläge zu Übung Nr. 9

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 9.1: Stellplatzplanung eines neuen Einkaufszentrums

Bei einer gleichverteilten Parkdauerverteilung $T \sim U(0,2)$ gilt für die Dichte- und Verteilungsfunktionen

$$f_T(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{2\mathrm{h}} & 0 \leq \tau \leq 2\,\mathrm{h} \\ 0 & \text{sonst}, \end{cases}$$

$$F_T(\tau) = \begin{cases} 0 & \tau < 0 \\ \frac{\tau}{2\,\mathrm{h}} & 0 \leq \tau \leq 2\,\mathrm{h} \\ 1 & \tau > 2\,\mathrm{h} \end{cases}$$

und damit für die stündliche Diskretisierung

$$F_0 = 0, \quad , F_1 = 1/2, \quad F_T = 1 \text{ für } T \geq 2.$$

Für die Vorlesungsformel des Verlaufs der Besetzungszahlen ergibt dies

$$n_t = \frac{3}{4} Q_t^{\text{in}} + \frac{1}{4} Q_{t-1}^{\text{in}}$$

dies ergibt (mit $Q_t^{\text{in}} = 0$ für alle $t \notin 9, 10, 11, 12$) folgende Ganglinie:

Zeit	t	Q_t^{in}	n_t
7-8	8	0	0
8-9	9	1 000	750
9-10	10	2 000	1750
10-11	11	1 800	1850
11-12	12	1000	1200
12-13	13	0	250
13-14	14	0	0

Beispiel 9 h: Seit 8 h kommen gleichmäßig bis 9 h 1 000 Fahrzeuge an, die gleichverteilt 0 bis 2 Stunden dort parken. Das erste um 8 h ankommende Fahrzeug ist um 9 h also mit 50 %-iger Wahrscheinlichkeit noch da, das gerade erst um 9 h angekommene mit 100 %, und alle angekommenen Fahrzeuge im Mittel zu 75 %, also um 9 h 750 Fahrzeuge vor Ort.

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 9.2: Evakuierung

(a) Die Zahl der sich in Bezirk i um 13 h ($t = 13$) aufhaltenden Personen kann analog zur QZG-basierten Parkmengenberechnung abgeschätzt werden, nur dass (i) die Division durch die Besetzungszahl entfällt, (ii) alle Verkehrsmodi berücksichtigt werden, (iii) die Anfangszahl um Mitternacht gleich der in diesem Bezirk wohnenden Personen n_i ist. Das heißt, man kann direkt die Ergebnisse der Verkehrserzeugung (Aktivitätenwahl) und die zugehörigen kumulierten Tagesganglinien heranziehen:

$$n_i^{13\ \mathrm{h}} = n_i - \sum_g Q_i^{\mathrm{g}} F_{\mathrm{TGL}}^g + \sum_g Z_i^{\mathrm{g}} F_{\mathrm{TGL}}^g$$

(b) Die Zahl der mindestens verfügbaren Fahrzeuge ist gleich der Vorlesungsformel der QZG-basierten Parkmengenberechnung mit Mitternachts-Anfangswert $n_{i0}^{\mathrm{Pkw}} = 0$:

$$n_i({}^{\mathrm{Pkw}}t) = \sum_g \left(Z_{i,\mathrm{Pkw}}^{(\mathrm{F,g})} - Q_{i,\mathrm{Pkw}}^{(\mathrm{F,g})} \right) F_{\mathrm{TGL}}^{(g)}(t)$$

mit

$$Q_{i,\mathrm{Pkw}}^{(\mathrm{F,g})} = \sum_{j \neq i} \frac{V_{ij,\mathrm{Pkw}}^{(\mathrm{g})}}{b^{(\mathrm{g})}}, \quad Z_{i,\mathrm{Pkw}}^{(\mathrm{F,g})} = \sum_{j \neq i} \frac{V_{ji,\mathrm{Pkw}}^{(\mathrm{g})}}{b^{(\mathrm{g})}}$$

Man beachte, dass man die Begrenzung der Summe über j auf $j \neq i$ auch weglassen könnte, da dann bei den Quellen die den Bezirk i nicht verlassenden Fahrten zwar fehlerhaft abgezogen würden, bei den Zielen aber die gleiche Anzahl von innerbezirklichen Fahrten nicht hinzugefügt würde.

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 9.3: Platzbedarf im ruhendem Verkehr

(a) [im Tutorial Bilder zeichnen]

Plausible Annahmen:

- Pkw-Länge 4.5 m und Breite (einschl. Spiegel) 2 m
- Beim Querparken benötigt man auf Straßenseite 0.25 m und gegenüber 0.75 m Platz (z.B. zum Ausräumen) und zwischen den Fahrzeugen 1 m Platz (etwa Türbreite)
- Beim Längsparken benötigt man einen Rangier/Einparkabstand von 1.5 m und 0.25 m Platz auf der Straßenseite und gegenüber
- Die Fahrräder werden an Radbügeln geparkt, 2 Räder pro Bügel, Bügel in 1.5 m Abstand, Radlänge einschl. Lücken vorne und hinten 2 m

Dies ergibt:

- Querparken: $5.5\,\mathrm{m} * 3\,\mathrm{m} = 16.4\,\mathrm{m}^2$
- Längsparken: $6\,\mathrm{m} * 2.5\,\mathrm{m} = 15\,\mathrm{m}^2$

– Fahrräder an Bügeln: $2\,\mathrm{m} * 1.5\,\mathrm{m}/2 = 1.5\,\mathrm{m}^2$

(b) Wir nehmen die Längsparkfläche von $A = 15\,\mathrm{m}^2$:

$$A_{\mathrm{ges}} = 48 * 10^6 * 1.7 * 15\,\mathrm{m}^2 = 1\,224 * 10^6\,\mathrm{m}^2 = 1\,224\,\mathrm{km}^2$$

Bei einer Fläche Deutschlands von $357\,588\,\mathrm{km}^2$ ergibt dies einen Anteil von $0.34\,\%$.

Lösungsvorschlag zu Aufgabe 9.4: Platzbedarf im fließendem Verkehr

Formel der *Zukunft Mobilität*:

$$A_{\mathrm{ZM}}(v) = \frac{b(v)(l_{\mathrm{eff}} + 2vT_r + \frac{v^2}{2b_{\mathrm{brems}}})}{b_{\mathrm{Fz}}}$$

(a) Der Flächenbedarf ist gleich dem Fahrzeug-Flächenverbrauch geteilt durch die Belegungszahl. Der Fahrzeug-Flächenverbrauch ist gleich Spurbreite * Abschnittslänge, die beide von der Geschwindigkeit abhängen. Die Fahrstreifenbreite gering (von 2.75 m auf Tempo-30-Straßen bis 3.75 m auf Autobahnen), die Abschnittslänge stark: Sie ist gleich effektive Länge (wie beim Längsparken) zuzüglich doppelten Reaktionsweg $2vT_r$ + Bremsweg $v^2/(2b_{\mathrm{brems}})$ bzw. einfachen Reaktionsweg plus Anhalteweg.

(b) Diese Formel ist aufgrund des quadratisch mit v steigendem Bremsweganteils überaus pessimistisch. De-facto kürzt sich im Worst-Case der Bremsweg nämlich heraus: Nimmt man an, dass das Vorderfahrzeug unmotiviert mit maximaler Verzögerung zum Stopp abbremst und das mit der Lücke vT mit gleicher Geschwindigkeit folgende Fahrzeug dies nach der Reaktionszeit T_r ebenfalls tut, gibt es einen Crash (Lücke $s < 0$, falls der Anhalteweg des Folgefahrzeugs abzüglich der Anfangslücke größer ist als der Bremsweg des Führungsfahrzeugs:

$$\begin{aligned} s &= \frac{v^2}{2b_{\mathrm{brems}}} + vT - (\frac{v^2}{2b_{\mathrm{brems}}} + vT_r) < 0 \\ T &< T_r \end{aligned}$$

Einen Crash gibt es also, falls die Folgezeit T kleiner ist als die Reaktionszeit. Der Bremsweg fällt im Worst Case heraus.

Der Anhalteweg ist nur dann relevant, wenn man plötzlich vor einem stehenden Hindernis bremsen muss (Kind läuft bei dichtem Verkehr auf die Straße oder Ampel wird rot). Die Mindest-Gelbzeiten der LSA (3 s bei 50 km/h und 5 s bei 70 km/h) berücksichtigen dies (bei einer implizierten Verzögerung von etwa $3.5\,\mathrm{m/s}^2$). Falls man das Kind nicht antizipiert (ist fast immer der Fall), ist bei üblichen Folgezeiten bei Tempi $\geq 50\,\mathrm{km/h}$ ein Auprall nahezu unvermeidlich.

(c) Die einfache Formel nimmt eine Abschnittslänge von $l_{\text{eff}} + vT$ an und die vereinfahcte Platzformel ist damit

$$A_T(v) = \frac{b(v)(l_{\text{eff}} + vT)}{b_{\text{Fz}}}$$

Berechnung der Pkw-Folgezeit nach "Abstand=halber Tacho":

$$\begin{aligned}
\text{Abstand [m]} &= 0.5 \text{ Tacho [km/h]} \\
\frac{s}{\text{m}} &= 0.5 \frac{v}{\text{km/h}} \\
T &= \frac{s}{v} = 0.5 \frac{\text{m}}{\text{km/h}} \\
&= 0.5 \frac{\text{m}}{\text{m/s}/3.6} \\
&= 1.8\,\text{s}
\end{aligned}$$

Berechnung der Pkw-Verzögerung nach "Bremsweg in cm gleich quadrierte Geschwindigkeit in km/h":

$$\begin{aligned}
\frac{s}{\text{cm}} &= \left(\frac{v}{\text{km/h}}\right)^2 \\
\frac{s}{\text{m}} &= 0.01 \left(\frac{v}{\text{km/h}}\right)^2 \\
b_{\text{brems}} &= \frac{v^2}{2s} \\
&= \frac{v^2}{2 * 0.01\text{m} \left(\frac{3.6v}{\text{m/s}}\right)^2} \\
&= \frac{50}{3.6^2 \text{m/s}^2} \\
&= 3.85\,\text{m/s}^2.
\end{aligned}$$

Dies ist übrigens nachezu die implizierte Verzögerung bei einer Reaktionszeit $T_r = 1\,\text{s}$ bei den Ampelgelbzeiten.

- Auto, 50 km/h:

$$A_{\text{ZM}} = 130\,\text{m}^2, \quad A_T = 70.7\,\text{m}^2$$

- Rad, 20 km/h:

$$A_{\text{ZM}} = 17.1\,\text{m}^2, \quad A_T = 12.0\,\text{m}^2$$

- Bus, 50 km/h:

$$A_{\text{ZM}} = 13.3\,\text{m}^2, \quad A_T = 6.88\,\text{m}^2$$

(d) Der Platzbedarf des fließenden Pkw-Verkehrs (ohne Busse, LKW, Räder usw) in der Rush-hour ist gegeben durch

$$A_{\text{tot}} = n^{\text{Pkw}} A_T^{\text{Pkw}}$$

Die Gesamtzahl der *fahrenden* Pkw ergibt sich aus der Beobachtung, dass Pkws im Mittel nur eine Stunde pro Tag gefahren werden, was eine mittlere Anzahl von 48 Mio/24 ergibt. jetzt findet in der Rush-hour aber nicht 1/24 des Tagesverkehrs, sondern 1/5 dieses Verkehrs statt. In der Rush-hour ergibt sich somit ein Faktor 24/5 und damit

$$n^{\mathrm{Pkw}} = \frac{48\,\mathrm{Mio}}{5}$$

und damit

$$A_{\mathrm{tot}} = 9.6\,\mathrm{Mio} * 70.7\,\mathrm{m}^2 = 679\,\mathrm{km}^2 \widehat{=} 0.19\,\%$$

Mit der ZM-Formel ergibt sich übrigens nahezu der gleiche Wert wie beim Flächenbedarf des ruhenden Pkw-Verkehrs ($1\,250\,\mathrm{km}^2$ bzw $0.35\,\%$)