

Kapitel 2

Trajektorien und Floating-Car-Daten

*Miss alles, was sich messen lässt, und mach alles messbar,
was sich nicht messen lässt.*

Galileo Galilei

2.1 Erfassungsmethoden

Mit Hilfe von Kameras kann das Verkehrsgeschehen von erhöhten Beobachtungsposten oder Flugzeugen aus direkt erfasst werden. Aus den Video-Bildern oder Foto-Serien lassen sich mit *Tracking-Software* die *Trajektorien* $x_\alpha(t)$, d.h. die Positionen der Fahrzeuge α über die Zeit, verfolgen. Werden die Orts-Zeit-Linien von *allen* Fahrzeugen innerhalb eines raumzeitlichen Bereichs erfasst, spricht man von *Trajektorien*.

Trajektorien stellen damit die detailreichsten Verkehrsinformationen bereit und erlauben als einzige Datenkategorie eine direkte Bestimmung der Verkehrsdichte (vgl. Abschn. 3.3) und der Fahrstreifenwechsel-Ereignisse. Kamerabasierte Messmethoden sind aber in der Regel aufwändige und fehlerträchtige Verfahren, die automatische und robuste Algorithmen zum Fahrzeug-Tracking benötigen. Sie stellen oft auch die teuerste Lösung dar.

Zur Erfassung sogenannter *Floating-Car-Daten* (FC-Daten) werden einzelne Messfahrzeuge (*floating cars*) eingesetzt, die im Verkehrsstrom „mitschwimmen“. Diese Fahrzeuge zeichnen ihre Geschwindigkeiten $v_\alpha(t)$ und teils auch ihren (per GPS bestimmten) Ort $x_\alpha(t)$ auf. Ansonsten errechnet man den Ort durch Integration der Geschwindigkeit. In jüngster Zeit werden FC-Daten auch von Navigationsgeräten erfasst und (anonymisiert) an die Hersteller gesendet. Die Messfahrzeuge können zusätzlich mit weiteren Messsensoren (z.B. Radarsensoren) ausgestattet sein, so dass sich auch Geschwindigkeits- und Abstandsunterschiede zum Vorderfahrzeug erfassen lassen. Eine derartige Ausstattung sowie die Datenauswertung sind recht kostenintensiv. Es besteht außerdem die Gefahr, dass die Daten nicht repräsentativ sind, da ausgestattete Fahrzeuge oftmals auch überdurchschnittlich leistungsfähig sind.

Beide Datenkategorien enthalten den Ort $x_\alpha(t)$ von Fahrzeugen α als Funktion der Zeit, sie unterscheiden sich aber in folgenden Aspekten:

- Während Trajektorien-Daten die Orts-Zeit-Kurven $x_\alpha(t)$ aller Fahrzeuge innerhalb eines raumzeitlichen Bereichs enthalten, erhält man im Falle von FC-Daten nur Informationen über einen geringen Teil der Fahrzeuge, nämlich den der ausgestatteten *Floating Cars*.
- Im Gegensatz zu Trajektorien-Daten enthalten FC-Daten meist keine Information über den genutzten Fahrstreifen.
- Teilweise sind in FC-Daten weitergehende Informationen wie Abstand zum Vorderfahrzeug, Gaspedalstellung, Bremsdruck, Informationen über gesetzte Blinker etc. enthalten. Im Prinzip können in Floating Cars alle Daten als Zeitreihen aufgezeichnet werden, die über den *CAN-Bus* (eine Schnittstelle über die alle modernen Fahrzeuge verfügen) abgerufen werden können. Derartige Informationen fehlen in den Trajektorien-Daten aufgrund der im Allgemeinen optischen Datenerfassung.

2.2 Darstellung im Raum-Zeit-Diagramm

In den Abb. 2.1 und 2.2 sind zwei Beispiele von Trajektorien-Daten für jeweils einen Fahrstreifen in einem *Raum-Zeit-Diagramm* aufgetragen. Als Konvention vereinbaren wir eine Auftragung des Ortes (als Ordinate) über der Zeit (Abszisse). Aus einem solchen Trajektorien-Diagramm kann man folgende Informationen entnehmen:

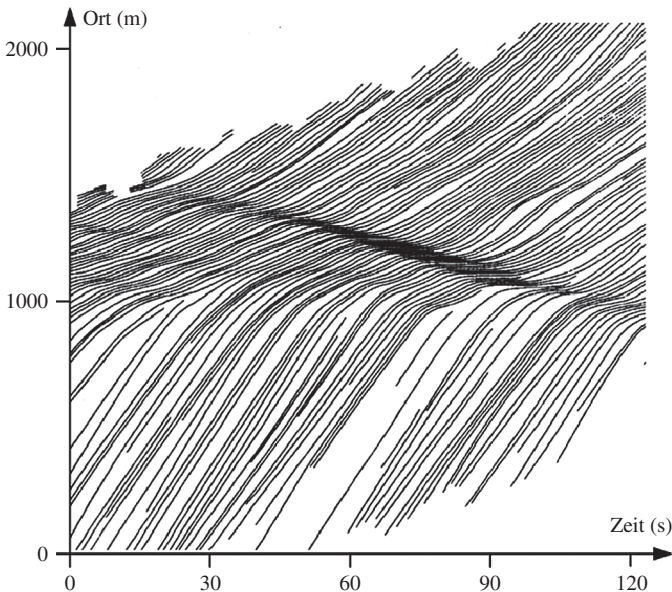


Abb. 2.1 Trajektorien von laufenden Stop-and-Go-Wellen auf einem britischen Autobahnabschnitt (Quelle: Treiterer et al., 1970)

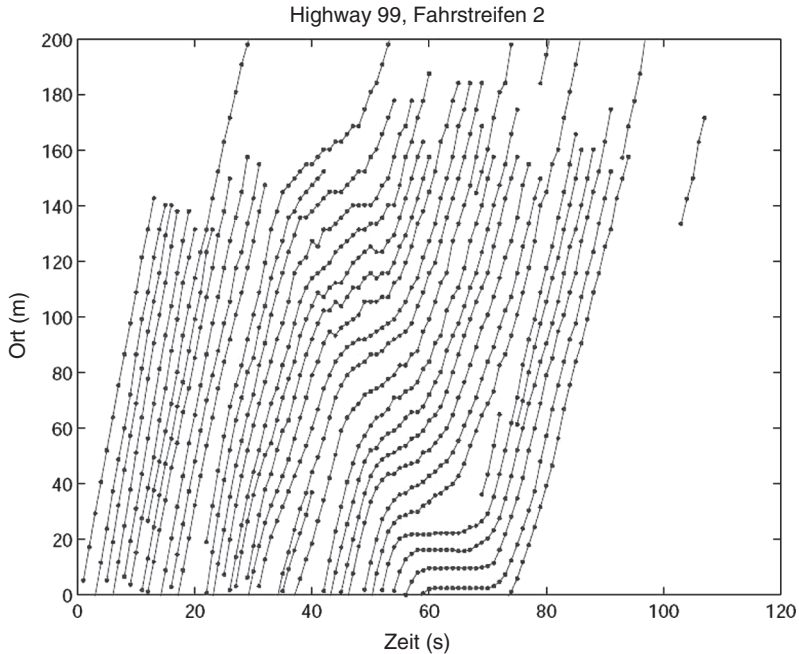


Abb. 2.2 Trajektorien von laufenden Stop-and-Go-Wellen auf dem amerikanischen Highway 99 (Quelle: www.ece.osu.edu/~coifman/shock)

- Die lokale Geschwindigkeit am Ort x zur Zeit t ist durch die Steigung der Trajektorien gegeben. Eine horizontale Trajektorie entspricht der Geschwindigkeit Null.
- Die Brutto-Folgezeit Δt_α (vgl. Abschn. 3.1) ist gleich dem horizontalen Abstand benachbarter Kurven.
- Der Verkehrsfluss lässt sich anhand seiner Definition *Zahl der einen bestimmten Ort pro Zeiteinheit passierenden Fahrzeuge* als Zahl der Trajektorien ablesen, welche ein horizontales Liniensegment kreuzen. Er ist damit gleich dem *zeitlichen Mittel* des Kehrwertes der Bruttoabstände.
- Der räumliche Bruttoabstand zweier Fahrzeuge ist gleich dem vertikalen Abstand der entsprechenden Trajektorien.
- Die Verkehrsdichte lässt sich direkt anhand ihrer Definition *Fahrzeugzahl pro Streckenlänge zu einer bestimmten Zeit* als Zahl der Trajektorien ablesen, welche ein vertikales Liniensegment kreuzen. Sie ist damit gleich dem *räumlichen Mittel* des Kehrwertes der Bruttoabstände (vgl. Abschn. 3.3).
- Das Ende einer Trajektorie entspricht einem Fahrstreifenwechsel auf einen anderen Fahrstreifen. Entsprechend zeigt der Beginn einer Trajektorie einen Wechsel von einem anderen Fahrstreifen an.
- Die Steigung einer Verkehrsverdichtung gibt die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Staus an. Bei den in den Abb. 2.1 und 2.2 zu sehenden Verdichtungen sind die

Steigungen (Geschwindigkeiten) negativ. Es handelt sich um Stauwellen, welche den Fahrzeugen entgegenkommen.

Werden neben den longitudinalen Fahrzeugpositionen $x_\alpha(t)$ zudem die lateralen Positionen $y_\alpha(t)$ ermittelt, erhält man *2D-Trajektoriendiagramme*, aus denen auch die Dauer für das Vollziehen eines Fahrstreifenwechsels sowie seitliche Beschleunigungen ermittelt werden können.

Kann man aus Trajektoriendaten die aktuelle Reisezeit zum Durchfahren einer Strecke bestimmen? Wie würde man eine staubedingte Reisezeitverlängerung berechnen? Unter welcher zusätzlichen Annahme kann man damit die Zeitverluste aller durch den Stau fahrenden Personen abschätzen?

Übungsaufgaben

2.1 Floating-Car-Daten

In Zukunft soll ein gewisser Anteil von mit GPS-Systemen ausgestatteten Fahrzeugen (Genauigkeit: etwa 20 m) in festen Zeitabständen anonymisiert Orte und dazugehörige Zeiten an eine Verkehrszentrale senden. Könnte man mit diesen Daten (1) Trajektorien (Orts-Zeit-Linien) einzelner Fahrzeuge, (2) Orte und Zeiten von Fahrstreifenwechseln, (3) die Verkehrsdichte (Fahrzeuge pro Kilometer), (4) den Verkehrsfluss (Fahrzeuge pro Stunde), (5) die Fahrzeuggeschwindigkeit und (6) die Länge von Staus und Lage von Staufronten rekonstruieren? Geben Sie jeweils eine kurze Begründung.

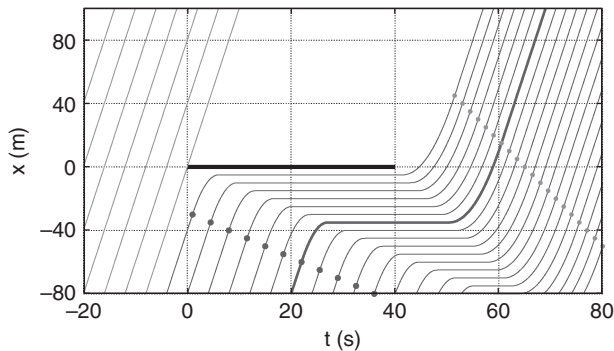
2.2 Auswertung empirischer Trajektoriendaten

Betrachten Sie das Trajektoriendiagramm 2.2.

1. Bestimmen Sie die Verkehrsdichte (Fahrzeuge pro Strecke), den Verkehrsfluss (Fahrzeuge pro Zeit) und die Geschwindigkeit in ausgewählten raumzeitlichen Bereichen mit freiem und mit gestautem Verkehr. Sie können die Bereiche $[10 \text{ s}, 30 \text{ s}] \times [20 \text{ m}, 80 \text{ m}]$ (freier Verkehr) und $[50 \text{ s}, 70 \text{ s}] \times [20 \text{ m}, 100 \text{ m}]$ (Stau) auswerten.
2. Mit welcher Geschwindigkeit breitet sich die Stauwelle aus? Propagiert sie in oder entgegen der Fahrtrichtung?
3. Welchen Zeitverlust verursacht die Stauwelle einem Fahrzeug, dessen Trajektorie bei $x = 0 \text{ m}$ zur Zeit $t \approx 50 \text{ s}$ startet?
4. Schätzen Sie für den gesamten dargestellten raumzeitlichen Abschnitt die typische *Fahrstreifenwechselrate*, d.h. Fahrstreifenwechsel pro Kilometer und pro Stunde, ab. Nehmen Sie dabei an, dass in sechs Fällen Trajektorien innerhalb des Bereichs $[0 \text{ s}, 80 \text{ s}] \times [0 \text{ m}, 140 \text{ m}]$ beginnen oder enden.

2.3 Trajektoriendaten eines Verkehrsflusses mit „Störung“

Gegeben sind die Trajektoriendaten in folgender Abbildung:



1. Welche Verkehrssituation könnte hier dargestellt sein? Welche Rolle spielt der horizontale Balken?
2. Wie groß ist die Verkehrsnachfrage, d.h. der Zufluss für $t \leq 20$ s?
3. Wie groß sind die Verkehrsdichte und die Geschwindigkeit in den Bereichen freien Verkehrs stromaufwärts der „Verkehrsbehinderung“?
4. Wie groß ist die Dichte im Stau?
5. Wie groß ist der Ausfluss nach Aufhebung der Behinderung? Geben Sie auch Dichte und Geschwindigkeit des Ausflusses nach Abschluss der Beschleunigungsphase (in der Abbildung durch Punkte gekennzeichnet) an.
6. Wie groß sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Übergangszonen „freier Verkehr \rightarrow Stau“ sowie „Stau \rightarrow freier Verkehr“?
7. Welche Reisezeitverzögerung erfährt das zur Zeit $t = 20$ s bei $x = -80$ m ein-fahrende Fahrzeug durch die „Behinderung“?
8. Ermitteln Sie schließlich die Bremsverzögerung und die Beschleunigung der Fahrzeuge unter der Annahme konstanter Verzögerungen bzw. Beschleunigungen. Der Beginn der Verzögerung und das Ende der Beschleunigung sind im Diagramm gekennzeichnet.

Literaturhinweise

- May, A.D.: Traffic Flow Fundamentals. Prentice Hall, Eaglewood Cliffs, N.J. (1990)
- Treiterer, J., et al.: Investigation of traffic dynamics by aerial photogrammetric techniques. Interim Report EES 278-3, Ohio State University, Columbus, OH (1970)
- Thiemann, C., Treiber, M., Kesting, A.: Estimating acceleration and lane-changing dynamics from next generation simulation trajectory data. Transp. Res. Rec. **2088**, 90–101 (2008)



<http://www.springer.com/978-3-642-05227-9>

Verkehrsdynamik und -simulation
Daten, Modelle und Anwendungen der
Verkehrsflussdynamik

Treiber, M.; Kesting, A.

2010, XII, 368 S. 176 Abb., 56 in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-642-05227-9