

2 Grundlagen

Um Simulationsmodelle entwickeln zu können, werden Datenquellen benötigt, die reale Straßenverläufe abbilden. Wichtige Grundlagen aus dem Bereich der Straßenkarten und Geoinformatik werden daher in Abschnitt 2.1 beschrieben. Darauf aufbauend können Grundlagen der Verkehrsforschung (Abschnitt 2.2), der Computersimulation (Abschnitt 2.3), sowie der Verkehrssimulation im Speziellen (Abschnitt 2.4) genutzt werden, um Verkehrssimulationssysteme zu entwickeln.

2.1 Straßenkarten und Geodaten

Straßenkarten gehören zur Gruppe der Geodaten. Geodaten werden grundlegend zwischen Raster- und Vektordaten unterschieden.

Rasterdaten zerlegen einen Kartenausschnitt mit Hilfe eines Rasters in Zellen. Jede Zelle kann verschiedene Eigenschaften annehmen, z.B. eine Höhe über Normalnull oder einen mittleren Niederschlag. Rasterdaten können in gängigen Rasterbildformaten gespeichert werden.

Vektordaten setzen geometrische Objekte aus Punktkoordinaten zusammen. Eine Folge von Punkten kann einen Straßenzug oder einen Fluss darstellen - ein geschlossener Linienzug ein Polygon. Es existieren verschiedene Formate für Geovektorinformationen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Quasi-Standard *Shapefile* verwendet.

Geodaten werden in verschiedene Layer aufgeteilt, sodass sie logisch gruppiert sind. Eine mögliche Aufteilung wäre nach Polygonen, Linienzügen und Punkten. Die Aufteilung in Layer bietet zusätzlich die Möglichkeit, bei der Datenvisualisierung die Layer übereinander zu rendern.

Für die Entwicklung eines Verkehrssimulationssystems werden vorrangig Straßenkarten benötigt. Es gibt unterschiedliche Gruppen von Straßenkarten. Kommerzielle Karten - z.B. von Navteq - werden für Navigationssysteme - z.B. von Garmin und BMW - verwendet. Kostenlos nutzbar, jedoch nicht frei herunterladbar, sind die Straßenkarten von Google Maps. In der Geoinformationswirtschaft haben offene Systeme in der Vergangenheit an Bedeutung gewonnen [Neis und Zipf, 2008]. Mit OSM (OpenStreetMap) ist ein Sytem

entstanden, das ähnlich zu Wikipedia jedermann an der Bearbeitung und Gewinnung von Daten teilnehmen lässt. Es handelt sich um den größten freien Geodatenbestand.

Zur Angabe von Koordinaten auf der Erdoberfläche werden meist sphärische Koordinaten genutzt. Eine Einführung in diese Systematik gibt [Hennermann, 2006, S.86ff]. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Grenzen von Kartenausschnitten im Format WGS84 (World Geodetic System 1984) angegeben. Die Koordinaten [länge, breite] = [8, 0046850, 47, 8739607] bezeichnen beispielsweise die Position des Gipfels des Feldbergs im Taunus. Koordinaten in WGS84 können rund um den Globus angegeben werden. Das GPS arbeitet ebenfalls mit WGS84-Koordinaten. Eine Transformation in andere Koordinatensysteme ist möglich.

Intern wird im Rahmen dieser Arbeit mit kartesischen Koordinaten gearbeitet. Dies ist möglich, indem der Erdball in Abschnitte unterteilt wird, für die jeweils eine eigene Projektion berechnet wird. Abweichungen müssen dennoch in Kauf genommen werden. Der Vorteil dieser Koordinaten ist jedoch, dass Positionen und Distanzen ohne weitere Umrechnungen metrisch angegeben werden können. Für das Bundesland Hessen ist die korrekte Projektion EPSG:31463 (European Petroleum Survey Group Geodesy). Weitere Informationen können [Bartelme, 2005, S. 217ff] entnommen werden.

Zur Nutzung von Höheninformationen werden Digitale Geländemodelle (DGM) genutzt. Ein DGM gibt für Koordinatenpaare die Höhe über Normalnull an. Die Höhe für nicht gegebene Koordinaten muss interpoliert werden.

2.2 Verkehrsforschungsgrundlagen

Mit der Ausbreitung des Automobils in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts begann der Bereich der Verkehrsforschung zu entstehen. Schon sehr früh wurden Studien durchgeführt, die durch Verkehrsbeobachtung grundlegende Zusammenhänge z.B. zwischen Verkehrsdichte $\rho(x, t)$, Verkehrsfluss $f(x, t)$ und mittlerer Geschwindigkeit $V(x, t)$ am Ort x zum Zeitpunkt t untersuchten (vgl. [Greenshield, 1935] und [Wardrop, 1952]).

Die Verkehrsdichte wird in verschiedenen Arbeiten entweder in prozentualer Auslastung der Straße oder in einer Anzahl an Fahrzeugen pro Streckenabschnittslänge angegeben. Der Verkehrsfluss $f(x, t)$ [$\# \text{Autos} \cdot h^{-1}$] definiert die Anzahl an Autos, die pro Zeiteinheit (z.B. Stunde oder Sekunde) eine Position passiert haben. Der Verkehrsfluss lässt sich mittels einer Kontaktschwelle auf einer Straße bestimmen. Die Verkehrsdichte kann über zwei

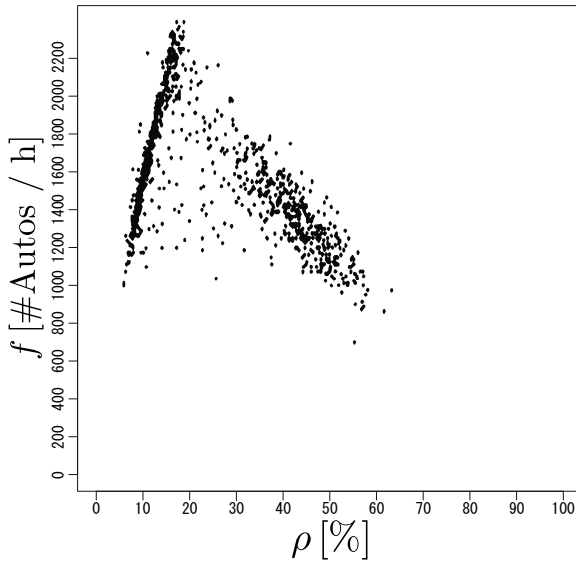


Abbildung 2.1: Fundamentaldiagramm nach [Hall et al., 1986].

Kontaktschwellen bestimmt werden, mit deren Hilfe die Anzahl an Fahrzeugen, die in das Messgebiet eintreten bzw. es wieder verlassen, gemessen wird.

Abbildung 2.1 zeigt den Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte und Verkehrsfluss. Die Daten wurden anhand von Messungen im Straßenverkehr ermittelt. Der Verlauf des Diagramms ist in der Verkehrsforschung grundlegend - es wird daher als Fundamentaldiagramm bezeichnet. Bei sehr geringen Verkehrsdichten passieren wenige Autos die Flussmessschwelle. Bei steigender Verkehrsdichte steigt auch der Verkehrsfluss, bis eine kritische Verkehrsdichte mit maximalem f erreicht ist.

An dieser Stelle ist die mittlere Geschwindigkeit $V(x, t)$ der Autos auf Grund von Wechselwirkungen mit anderen Autos und zu haltenden Sicherheitsabständen bereits stark verringert. Dieser Effekt führt bei weiterem Anstieg von ρ zu einer Verringerung von f . Bei $\rho = 100\%$ wird $f = 0$, da sich kein Auto mehr bewegen kann.

Der Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte, Verkehrsfluss und mittlerer Geschwindigkeit kann mit der *hydrodynamischen Formel* abgeschätzt werden:

$$\rho(x, t) = \frac{f(x, t)}{V(x, t)} \quad (2.1)$$

Hierbei muss $V(x, t)$ das räumliche Mittel der Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t bestimmen und nicht das zeitliche Mittel der Geschwindigkeit am Ort x [Treiber und Kesting, 2010].

Bei Untersuchungen über Verkehrsmengen wird häufig die Fahrzeugfolgедauer angegeben. Sie bezeichnet den zeitlichen Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen an einer Messstelle. Sie kann bei der Bestimmung des Verkehrsflusses zusätzlich angegeben werden.

2.3 Simulation

Zu analysierende Sachverhalte sind nicht immer mit vertretbarem Aufwand analytisch zu untersuchen. Dies tritt häufig auf, wenn nichtlineare Verknüpfungen der Systemelemente zu komplexen Wirkungsstrukturen führen [Bossel, 2004]. In diesem Fall kann eine Simulationsstudie Abhilfe schaffen.

Definition 2.3.1 (Simulation)

Simulation ist die Nachbildung eines dynamischen Prozesses in einem Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind (VDI-Richtlinie). [Suhl und Mellouli, 2007]

Simulationen werden verwendet, wenn die reale Durchführung eines Experiments zu kostspielig oder moralisch nicht vertretbar wäre. Heutige Verfahren ermöglichen realistische Crash-Tests mit Hilfe von Computermodellen bereits vor Produktion eines Prototypen. Somit können Fehler im Entwicklungsprozess frühzeitig erkannt und behoben werden (siehe [Frisch, 2004]). In vielen Bereichen werden Simulationssysteme zur Ausbildung von Fachpersonal verwendet. Angehende Chirurgen können beispielsweise Operationen mit Hilfe von VR-Systemen (Virtuelle Realität) trainieren [Satava, 2001].

Nach [Law, 2007] muss grundlegend zwischen den folgenden Simulationsarten unterschieden werden:

Statisch / Dynamisch Ein statisches Simulationsmodell berechnet den Zustand des zu simulierenden Systems zu einem Zeitpunkt. Dynamische Si-

Simulationsmodelle berücksichtigen Veränderungen über die Zeit und können somit größere Zeitspannen modellieren.

Deterministisch / Stochastisch In deterministischen Modellen werden nicht vorhersagbare Schwankungen nicht abgebildet. Stochastische Modelle verwenden hierfür Wahrscheinlichkeitsverteilungen.

Kontinuierlich / Diskret Physikalische Kenngrößen - z.B. Temperatur, Gewicht oder Zeit - haben kontinuierliche Werte. In Simulationsmodellen werden diese häufig diskretisiert. Ein Simulationsmodell kann den Folgezustand eines Systems (z.B. die Position eines Balles) in unterschiedlichen Größenordnungen bestimmen. Wenn die Position mit 1 Hz aktualisiert wird, würde die Simulation als zeitdiskret eingeordnet werden. Je kleiner die Zeitscheiben werden, desto zeitkontinuierlicher wird die Simulation. Die Position des Balles (seiner Geschwindigkeit, Beschleunigung, Verformung, ...) kann analog verortet werden.

Auch Mischungen von kontinuierlichen und diskreten Simulationsteilen werden eingesetzt (hybride Simulation). Ein Spezialfall der Diskreten Simulation ist die Ereignisorientierte Simulation. Die Simulationszeit wird verwendet, um Ereignisse hervorzurufen, die ihrerseits den Simulationszustand verändern [Ross, 2006]. Ein Beispiel ist die Simulation einer Warteschlange. Ereignis 1 könnte das Eintreten in die Schlange sein, ein weiteres Ereignis 2 das Verlassen der Schlange. Wenn Ereignis 1 auftritt, folgt nach einer bestimmten Zeit Ereignis 2.

Wenn ein System aus einer Vielzahl sich gegenseitig beeinflussender Subsysteme besteht - z.B. die Simulation eines Aktienmarktes - so entsteht das Gesamtverhalten - z.B. der DAX - aus dem Zusammenspiel der Verhaltensweisen der Subsysteme - z.B. der Anleger. Das Gesamtverhalten lässt sich oftmals nicht vorhersagen, ohne die Verhaltensweisen der enthaltenen Subsysteme zu simulieren. Einzelne Simulationsentitäten können als Agenten modelliert werden. Einen Überblick liefert [Yilmaz und Ören, 2009]. Die Agententechnologie eignet sich beispielsweise für sozialwissenschaftliche Untersuchungen [Gilbert, 2007].

Definition 2.3.2 (Agent)

Ein Agent ist ein Computersystem, das sich in einer Umgebung befindet und die Fähigkeit hat, autonome Aktionen in dieser Umgebung durchzuführen, um seine gesetzten Ziele zu erreichen. (nach [Wooldridge, 2009]).

Nach Definition 2.3.2 lassen sich beispielsweise eigenständige Staubsauger als Agenten auffassen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Verkehrsteilnehmer als Akteure oder Agenten aufgefasst. Verkehrsteilnehmer müssen weitere Eigenschaften besitzen, um komplexe urbane Verkehrsszenarien modellieren zu können. Es wird zwischen Agenten und intelligenten Agenten unterschieden. Nach [Timm, 2004] wird die folgende Definition 2.3.3 von weiten Teilen der Agentenforschung akzeptiert.

Definition 2.3.3 (Intelligenter Agent)

Ein intelligenter Agent ist eine Software, die

- *Autonom (agiert selbständig)*
- *Sozial (Interaktionen mit anderen Agenten werden genutzt, um Ziele zu erreichen)*
- *Reaktiv (ist in der Lage, die Umgebung wahrzunehmen und auf Änderungen zu reagieren, um die definierten Ziele zu erreichen)*
- *Proaktiv (führt Aktionen aus, um Ziele zu erreichen)*

ist. (nach [Wooldridge und Jennings, 1995])

Das Zusammenspiel einer Menge von Agenten kann zu emergentem Verhalten führen. Es entstehen Situationen, die nicht durch das Verhalten einzelner Agenten entstehen, sondern durch deren Wechselwirkungen. Ein Beispiel negativer Emergenz ist ein Stau. Das Zusammenspiel staatenbildender Insekten kann zu positiver Emergenz führen - beispielsweise die Ermittlung kürzester Wege durch Ameisen (vgl. [Kennedy et al., 2001]).

Multi-Agenten-Simulationen (MAS) werden in verschiedenen Bereichen eingesetzt. Die Granularität kann hierbei zwischen makroskopischen (z.B. Simulation der Wechselwirkungen zwischen Städten [Sanders, 2007]) und mikroskopischen Systemen (z.B. Simulation eines Spielplatzes [Koizumi et al., 2010]) unterschieden werden. Wenn sowohl makroskopische als auch mikroskopische Modelle verwendet werden, kann ein Übergang zwischen beiden mittels mesoskopischer Modellierung geschehen (z.B. makroskopische Modellierung des Autoverkehrs einer Autobahn und mikroskopische Modellierung einer konkreten Auf- oder Abfahrt [Rose, 2003]).

2.4 Verkehrssimulation

Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf Systemen, die zur Simulation von Verkehr im Allgemeinen und urbanen Verkehr im Speziellen genutzt werden können. Hierbei liegt ein Augenmerk auf Simulationssystemen, die mit einem GIS (Geoinformationssysteme) gekoppelt sind. Dies ermöglicht die Nutzung von Straßenkarten zur Erstellung eines Simulationsgraphen zur agentenbasierten Verkehrssimulation [Schüle et al., 2004].

Im Bereich der Verkehrssimulation wurden erste Untersuchungen bereits Anfang der 1930er Jahre durchgeführt (vgl. [Greenshield, 1935]), da eine steigende Verkehrsdichte nach Prognosemethoden für Verkehrsaufkommen und Modellen zur Optimierung der Verkehrsleittechnik verlangte. Damalige Verkehrsmodelle waren makroskopisch.

Makroskopische Kenngrößen (Verkehrsfluss, Verkehrsdichte usw.) werden hierbei mittels physikalischer Flussmodelle ermittelt. Lighthill und Whitham haben die Kontinuitätsgleichung eingeführt, nach der der Verkehrsfluss und die durchschnittliche Geschwindigkeit proportional zur Verkehrsdichte sind. Unabhängig von dieser Arbeit hat Richards identische Überlegungen angestellt, sodass das Modell Lighthill-Whitham-Richards-Modell (LWR) genannt wird [Lighthill und Whitham, 1955, Richards, 1956]. Erweiterte Modelle nehmen die durchschnittliche Geschwindigkeit als dynamische Variable in das Simulationsmodell auf und berücksichtigen die beschränkte Beschleunigungsfähigkeit von Automobilen [Kerner und Konhäuser, 1994, Treiber et al., 1999]. Makroskopische Verkehrsmodelle lassen sich zur Vorhersage makroskopischer Kenngrößen kalibrieren, sofern ausreichend große Zeiträume und Streckenabschnitte betrachtet werden.

Eine feinere Granularität ermöglichen mikroskopische Simulationsmodelle, die die Bewegung einzelner Verkehrsteilnehmer modellieren. Heterogene Fahrverhaltensweisen lassen sich simulieren und makroskopische Kenngrößen können extrahiert werden. Der Zusammenschluss aus Fahrzeug und Fahrer wird meistens als eine Entität betrachtet und kann durch Agenten modelliert werden [Kesting et al., 2009]. Ein Überblick wird in [Kesting et al., 2008] gegeben.

Bei der Betrachtung von Verkehrsmodellen werden häufig Zeitpunkte t verwendet. Es sei beispielsweise $x_n(t)$ die Position des Autos n zum Zeitpunkt t und $\dot{x}_n(t)$ dessen Geschwindigkeit. Der Zeitpunkt t bezieht sich auf die Simulationszeit. Diese korreliert nicht mit der Uhrzeit. Ein Simulationslauf wird für gewöhnlich zum Zeitpunkt $t = 0$ gestartet und die Simulationszeit erhöht sich während der Simulation. Je nach Simulationsart können hierbei äquidistante Zeitschritte genutzt werden. Eine gängige Praxis

ist, pro simulierter Sekunde einmal alle Zustände der Verkehrsteilnehmer zu aktualisieren, um der typischen menschlichen Reaktionszeit Rechnung zu tragen. Es werden jedoch auch andere - meist geringere - Zeitscheiben verwendet, um feingranularer modellieren zu können.

Eine besondere Gruppe der Verkehrssimulationssysteme sind multimodale Systeme. Sie berücksichtigen multiple Arten von Simulationsentitäten, z.B. Autos, Fahrräder und Fußgänger. Die genutzten Modelle sind in der Regel mikroskopisch, da makroskopische Modelle die benötigten punktuellen Wechselwirkungen zwischen den Verkehrsteilnehmertypen nicht modellieren können.

Innerhalb mikroskopischer Modelle können unterschiedliche Detaillierungsgrade erzielt werden. High-Fidelity-Modelle können teilweise sehr komplexe Wirkungszusammenhänge abbilden. Je nach Anwendungsgebiet können Parameter wie z.B. der Winkel des Gaspedals simuliert werden.

Simulation des Straßenverkehrs in der Großstadt
Das Mit- und Gegeneinander verschiedener
Verkehrsteilnehmertypen

Dallmeyer, J.

2014, XIX, 274 S. 90 Abb., 21 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-05206-5