

**Ereignisorientierte Routenwahl
in spontan gestörten Stadtstraßennetzen
zur Anwendung eines selbstorganisierten
Störfallmanagements**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)
von

M.Sc. Markus Rausch
geboren am 14.11.1985 in Rathenow

genehmigt von der
Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“
der Technischen Universität Dresden

Eingereicht am 2. April 2015

Erstgutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Karl Nachtigall (Technische Universität Dresden)

Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. Peter Wagner (Technische Universität Berlin/DLR)

Tag des Rigorosums und der Verteidigung: 20. Januar 2016

Kurzfassung der Dissertation

Die Mobilität von Personen und Gütern, insbesondere in Städten, ist der Motor einer Volkswirtschaft. Dieser Motor kommt jedoch ins Stottern, wenn Staubbildung im Stadtstraßennetzwerk einsetzt. Eine unvermeidbare Ursache von Staubbildung stellen Verkehrsstörfälle dar, die schlimmstenfalls zu Gridlocks führen können. In der Folge werden hohe Kosten für Verkehr, Wirtschaft und Umwelt verursacht. Mit welchen Gegenmaßnahmen kann die Staubbildung im Netzwerk effektiv bewältigt werden? Wie können entsprechende Gegenmaßnahmen realistisch noch vor einem praktischen Einsatz bewertet werden? Ausgehend von diesen Fragestellungen, widmet sich diese Dissertation der Entwicklung eines ereignisorientierten Routenwahlmodells für den Stadtstraßenverkehr und eines selbstorganisierten Störfallmanagements als Gegenmaßnahme zur Reduzierung negativer Auswirkungen der Staubbildung.

Zur Modellierung des Routenwahlverhaltens in ereignisreichen Stadtstraßennetzen wird das ereignisorientierte Routenwahlmodell entwickelt. Der Ausgangspunkt des Modells ist die diskrete Wahltheorie. Entscheidungsprozesse einzelner Autofahrer werden vor und während der Fahrt direkt simuliert. Der Entscheidungsprozess ist dabei maßgeblich von Beobachtungen lokaler Verkehrsbedingungen geprägt. Somit wird nachgebildet, dass Autofahrer flexibel auf unvorhergesehene Ereignisse durch Routenwechsel reagieren können. Auf diese Weise ist eine realistische Simulation des Routenwahlverhaltens von Autofahrern in der Stadt möglich. Das ereignisorientierte Routenwahlmodell ist zudem generisch formuliert. Es lässt sich zur Bewertung von Gegenmaßnahmen für störfallbedingte Staubbildung einsetzen und bedient darüber hinaus ein breites Anwendungsspektrum.

Der zweite Beitrag dieser Dissertation ist ein selbstorganisiertes Konzept für ein Störfallmanagement in Stadtstraßennetzen als Gegenmaßnahme zur Staubbildung. Es vereint zwei lokal wirkende Prinzipien, deren Ausgangspunkte die Lichtsignalanlagen im Stadtnetzwerk sind. Mit verlängerten Rotzeiten werden Fahrzeuge an einer Kreuzung an der Einfahrt in einen Straßenabschnitt gehindert, wenn ein vorgesehener Rückstaubereich ausgeschöpft ist, da andernfalls Blockaden auf den Kreuzungen entstehen. Gleichzeitig werden noch freie Richtungen an der Kreuzung durch verlängerte Grünzeiten attraktiver gestaltet, um Autofahrer zum Umfahren der Staubbildung zu motivieren. Die Anwendung der lokalen Wirkungsprinzipien stellt sich vollständig selbstorganisiert, d. h. ohne Vorgabe eines Planers, mit dem Ausmaß der Staubbildung im Netzwerk ein. Simulationsstudien in zwei unterschiedlich komplexen Netzwerken haben die Machbarkeit des selbstorganisierten Störfallmanagements nachgewiesen. Gegenüber einem gewöhnlichen Netzwerk konnte für alle untersuchten Störfälle die Akkumulation zusätzlicher Fahrzeuge im Netzwerk während des Störfalls signifikant reduziert werden.

Thesis Outline

The mobility of people and goods, especially in urban areas, is of significant importance for national economies. However, recurrent congestion in urban road networks, caused by increased traffic demand, considerably restrains mobility on a daily basis. Another significant source of congestion are traffic incidents which even might lead to gridlock situations. Congestion raises high costs for traffic, economy and environment. Which countermeasures should be applied for an effective management of urban congestion? How can appropriate countermeasures be realistically evaluated? Based on these questions, this thesis is devoted to the development of an event-oriented route choice model for urban road traffic and a self-organized incident management strategy as an effective countermeasure for urban congestion.

The first contribution of this thesis is an event-oriented route choice model for urban road networks. It is based on discrete choice theory and models decision-making processes of individual motorists before and during their journey. A key aspect of the proposed model is the motorist's ability to observe local traffic conditions. These observations are then included in the decision process. In this way, it can be modeled that motorists respond to unforeseen events by route revisions. This allows a realistic simulation of the route choice behavior of motorists in naturally eventful urban road networks. Furthermore, the event-oriented route choice model is flexibly formulated. It can be used for the evaluation of countermeasures for incident-related congestion and, moreover, allows a wide range of applications.

The second contribution of this thesis is a self-organized concept of an incident management strategy in urban road networks as a countermeasure for urban congestion. It combines two locally acting principles on the basis of traffic lights in an urban road network. The inflow of vehicles into a road segment is regulated with restricted or skipped green times as soon as an allocated queuing capacity is depleted. Otherwise, blockages would result on the intersection. At the same time, yet free alternative directions are served with regular or even extended green times and, thus, might become more attractive to the driver than the original congested direction. The application of these local principles is realized in a completely self-organized manner, thereby scaling directly with the extent of congestion in the urban road network. Simulation studies in two networks with different complexity have proven the feasibility of the self-organized incident management. Compared to an ordinary network, the extents of additional vehicles due to investigated incidents were significantly reduced.

Danksagung

Diese Dissertation ist innerhalb von drei Jahren an der Professur für Verkehrsökonomie und -statistik¹ an der Technischen Universität Dresden entstanden. Ohne die großartige Unterstützung vieler Menschen wäre dies nicht zu bewerkstelligen gewesen.

Zunächst bedanke ich mich ganz herzlich bei meinem Doktorvater *Prof. Dr. Karl Nachtigall* für die Bereitschaft zur Übernahme der Betreuung dieser Dissertation. Sein Interesse an meiner Forschungsarbeit und seine fortwährende Unterstützung waren nicht selbstverständlich. Einen ganz herzlichen Dank richte ich ebenso an *Prof. Dr. Peter Wagner* für seine hilfreichen Anmerkungen während der Entstehung dieser Dissertation.

Ein ganz besonderer Dank geht an *Dr. Martin Treiber* für seine fortwährende Unterstützung meiner Forschungsarbeit. Er hat die Entwicklung des ereignisorientierten Routenwahlmodells entscheidend mitgeprägt und stand mir mit hilf- und lehrreichen Anmerkungen stets zur Seite.

Für konstruktive Kritik und das Korrekturlesen dieser Arbeit bedanke ich mich vielmals bei *Dr. Kathrin Kormoll, M.Sc. Claudia Korneli* und *Dipl.-Phys. Nicolas Fischer*. Ein herzliches Dankeschön geht außerdem an *B.Sc. Khaled Nasr* für die großartige Unterstützung bei der Erstellung des komplexen Netzwerks für die Simulationsstudie. Ferner möchte ich mich auch ganz herzlich bei allen Mitarbeitern der Professur für Ökonometrie und Statistik, insb. im Verkehrswesen für meine herzliche Aufnahme in den Kollegenkreis und den stets freundlichen und kollegialen Umgang miteinander danken.

Einen ganz herzlichen Dank richte ich auch an meine Ehefrau *Caroline*. Ihre fortwährende Unterstützung hat mein Vorankommen in der Entstehung dieser Dissertation überhaupt erst ermöglicht. Nicht zuletzt danke ich auch meinen Eltern sehr dafür, dass sie stets an mich geglaubt und mich so vielfältig in meiner Entwicklung unterstützt haben.

Mein herzlichster Dank geht jedoch an *Dr.-Ing. Stefan Lämmer*: Er hat mir vor drei Jahren die Chance gegeben, an einem hochspannenden Forschungsprojekt mitwirken zu können. Seine hohen Erwartungen waren stets mit der größtmöglichen Unterstützung meiner Arbeit verbunden. Seine wertvollen Anregungen haben schließlich maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Mein letzter Dank richtet sich an die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Forschungsprojekts „Lichtsignalgestütztes selbstorganisiertes Störfallmanagement auf Basis mesoskopischer nichtgleichgewichtiger Verkehrsmodelle“, in dessen Rahmen diese Dissertation entstanden ist.

¹Im Zuge der Neubesetzung der Professur hat sich der Name des Lehrstuhls in *Professur für Ökonometrie und Statistik, insb. im Verkehrswesen* geändert.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
1.1 Einordnung und Problemstellung	1
1.1.1 Gridlocks	2
1.1.2 Bewertung	3
1.1.3 Lösungsansätze der Verkehrstelematik	3
1.1.4 Lichtsignalanlagen	5
1.2 Beitrag der Dissertation	6
1.2.1 Ereignisorientiertes Routenwahlmodell	6
1.2.2 Selbstorganisiertes Störfallmanagement	7
1.2.3 Wesentliche Ergebnisse	9
1.3 Kapitelübersicht der Dissertation	9
2 Routenwahlmodellierung im Stadtstraßenverkehr	12
2.1 Eine Einführung in die diskrete Wahltheorie	12
2.1.1 Ausgewählte Eigenschaften diskreter Wahlmodelle	14
2.1.2 Ausgewählte Modelle der diskreten Wahltheorie	15
2.1.3 Die Anwendung diskreter Wahlmodelle	20
2.2 Routenwahlmodelle in der Verkehrsumlegung	21
2.2.1 Pfade und Routen	21
2.2.2 Routenaufteilung	22
2.2.3 Nutzergleichgewicht und Systemoptimum nach Wardrop	23
2.3 Geeignete Spezifizierung von Routenmengen	25
2.3.1 Das Suchen von mehreren kürzesten Pfaden	26
2.3.2 Implizite Pfadaufzählung: Effiziente Pfade	27
2.4 Berücksichtigung von Routenüberlappungen	27
2.4.1 Commonality-Logit-Modell	28
2.4.2 Path-Size-Logit-Modell	29
2.4.3 Probit-Modell mit strukturierter Kovarianzmatrix	29
2.4.4 Nested-Logit-Modell	30
2.4.5 Cross-Nested-Logit- und Link-Nested-Logit-Modell	30
2.4.6 Paired-Combinatorial-Logit-Modell	31
2.4.7 Link-Based Joint Network GEV-Modell	32

2.4.8	Path-Size-Weibit-Modell	32
2.4.9	Rekursives Logit-Modell	33
2.5	Verkehrereignisse im städtischen Straßenverkehr	33
2.5.1	Bedeutung für das Routenwahlverhalten	33
2.5.2	Dynamische Verkehrsbedingungen im Entscheidungsprozess	35
2.5.3	Kritik am Nutzergleichgewicht in städtischen Netzwerken	38
2.6	Zusammenfassung und Schlüsselherausforderungen	40
3	Das ereignisorientierte Routenwahlmodell	42
3.1	Motivation	42
3.2	Formulierung des Modells	43
3.2.1	Anforderungen	43
3.2.2	Die Routenwahlmenge eines individuellen Autofahrers	44
3.2.3	Der individuelle Entscheidungsprozess	45
3.2.4	Deterministische Nutzenfunktion	47
3.2.5	Spezifikation des Zufallsnutzens	50
3.3	Modellparameter und Eigenschaften des Modells	51
3.3.1	Aufteilung von Kanten	51
3.3.2	Berücksichtigung überlappender Routen	53
3.4	Untersuchung der Routenaufteilung in einfachen Straßennetzwerken	54
3.4.1	Einfaches Netzwerk mit verschiedenen langen Routen	54
3.4.2	Routenwahl im Netzwerk mit überlappenden Routen	55
3.4.3	Routenwahl im gestörten Netzwerk	60
3.5	Zusammenfassung, Einordnung und Diskussion	65
3.5.1	Einordnung in die Literatur	66
3.5.2	Diskussion	67
4	Simulation von Verkehrsstörfällen und Gegenmaßnahmen	70
4.1	Verkehrsstörfälle in städtischen Netzwerken	70
4.1.1	Simulationen mit dem ereignisorientierten Routenwahlmodell	72
4.1.2	Anforderungen an Simulationsumgebungen	73
4.2	Gegenmaßnahmen von Störfällen und deren Bewertungen	74
4.2.1	Schritte eines Störfallmanagements	74
4.2.2	Detektion von Verkehrsstörfällen	75
4.2.3	Informationsbereitstellung im Störfall	76
4.2.4	Verkehrsbeeinflussung im Störfall	78
4.2.5	Simulative Bewertung von Gegenmaßnahmen	78
4.3	Zusammenfassung und Diskussion	79

5	Ein selbstorganisiertes Störfallmanagement	80
5.1	Motivation und Einordnung	80
5.1.1	Steuerungsverfahren in signalisierten Netzwerken	82
5.1.2	Grenzen optimierender Steuerungsverfahren im Störfall	84
5.2	Anforderungen an ein Steuerungskonzept im Störfall	85
5.2.1	Steuerung von Lichtsignalanlagen im übersättigten Stadtverkehr . . .	85
5.2.2	Hemmung der Gridlock-Entstehung im übersättigten Netzwerk	86
5.2.3	Ausnutzen verfügbarer Straßenkapazitäten	86
5.2.4	Ein selbstorganisierter Ansatz eines Störfallmanagements	87
5.3	Erstes Wirkungsprinzip: Rückstauregulierung durch Zufussdosierung	89
5.3.1	Integration der Zufussdosierung	89
5.3.2	Methoden zur Schätzung von Staulängen	94
5.4	Zweites Wirkungsprinzip: Umverteilung der Verkehrsströme	97
5.4.1	Grünzeiten für nicht vom Stau betroffene Richtungen	98
5.4.2	Förderung der Umverteilung der Verkehrsströme	98
5.5	Anordnung von Fahrstreifen auf der Knotenzufahrt	99
5.6	Selbst-Heilung von gestörten Stadtstraßennetzwerken	100
5.6.1	Erhalt von Abflusskapazitäten des Netzwerks	101
5.6.2	Segmentierte Staubildung	101
5.6.3	Umverteilung betroffener Verkehrsströme	101
5.6.4	„Selbst-Heilung“ von gestörten Stadtstraßennetzwerken	103
5.7	Zusammenfassung und Diskussion	103
 6	 Simulationsstudien	 107
6.1	Simulationsdurchführung	107
6.1.1	Simulationsumgebung	107
6.1.2	Bemessung der Lichtsignalanlagen	110
6.1.3	Modellierung der Verkehrsnachfrage	112
6.1.4	Modellierung der Störfälle	112
6.1.5	Simulationslauf und Messgrößen	112
6.1.6	Terminologie	113
6.2	Untersuchungen in einem gitterförmigen Netzwerk	114
6.2.1	Das gitterförmige Netzwerk N1	115
6.2.2	Störfallszenario A – Blockade eines Straßenabschnitts	115
6.2.3	Störfallszenario B – Blockade einer Kreuzung	116
6.2.4	Störfallszenario C – Nachfrageerhöhung	123
6.3	Untersuchungen in einem komplexen Netzwerk	128
6.3.1	Das komplexe Netzwerk N2	129
6.3.2	Störfallszenario D – Blockade eines Straßenabschnitts	129
6.3.3	Störfallszenario E – Blockade einer Kreuzung	132

6.3.4	Störfallszenario F – Nachfrageerhöhung	135
6.4	Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse	136
6.4.1	Hemmung lokaler Gridlocks und Erhalt von Abflusskapazitäten	137
6.4.2	Ausnutzung verfügbarer Straßenkapazitäten im Störfall	137
6.4.3	Gitterförmiges vs. komplexes Netzwerk	139
6.4.4	Festzeitsteuerung vs. Selbst-Steuerung	140
6.5	Diskussion	140
7	Zusammenfassung und Ausblick	144
7.1	Zusammenfassung der Dissertation	144
7.2	Ausblick	146
7.2.1	Ereignisorientiertes Routenwahlmodell und Verkehrsumlegung	146
7.2.2	Anwendungen im aktiven Verkehrsmanagement	148
7.2.3	Lernende Autofahrer und psychologische Aspekte	149
7.2.4	Erweiterungen des selbstorganisierten Störfallmanagements	151
	Anhang	153
A	Weiterführende Ergänzungen	154
A.1	Ereignisorientiertes Routenwahlmodell als binäres Probit-Modell	154
A.1.1	Vergleich der analytischen und numerischen Routenwahl	156
A.2	Generisches Schema eines Umlegungsverfahrens	158
	Symbolverzeichnis	159
	Abkürzungsverzeichnis	163
	Literaturverzeichnis	165
	Stichwortverzeichnis	181

Abbildungsverzeichnis

1.1	Gridlocks in Städten.	2
1.2	Typisches Wechselverkehrszeichen in Dresden.	5
1.3	Wirkungsprinzipien des selbstorganisierten Störfallmanagements.	8
2.1	Routenwahlverhalten der Autofahrer in der Stadt.	35
3.1	Die aktuelle Routenwahlmenge eines Autofahrers.	46
3.2	Deterministischer Nutzen eines modellierten Autofahrers.	49
3.3	Aufteilung einer Kante.	52
3.4	Einfaches Netzwerk mit drei unabhängigen Routen.	54
3.5	Wahlhäufigkeiten in einem einfachen Netzwerk.	56
3.6	Das Überlapp-Netzwerk.	57
3.7	Routenwahlhäufigkeiten in Abhängigkeit des Überlapp-Parameters.	59
3.8	Numerische Untersuchung des linearen Beobachtungsmodells.	62
3.9	Numerische Untersuchung des exponentiellen Beobachtungsmodells.	63
4.1	Anwendungen des ereignisorientierten Routenwahlmodells.	72
5.1	Wirkungsprinzipien des selbstorganisierten Störfallmanagements.	88
5.2	Wartenschlangenmodell für einen einfachen Straßenabschnitt.	91
5.3	Anordnung der Fahrstreifen und die Zuflussdosierung.	99
5.4	Rekursive Anwendung des selbstorganisierten Störfallmanagements.	102
6.1	Die Implementierung der Zuflussdosierung in der Simulationsumgebung.	108
6.2	Übersicht über die Zusammensetzung der Simulationsläufe.	113
6.3	Das Netzwerk N1.	116
6.4	Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen im Störfallszenario A.	117
6.5	Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen in den Störfallszenarien B 1.1 u. B 1.2.	118
6.6	Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen im Störfallszenario B 2.	120
6.7	Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen im Störfallszenario B 3.	121
6.8	Szenario B 4: Median und Quantile der Fahrzeugakkumulation.	122
6.9	Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen im Störfallszenario C 1.	124
6.10	Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen im Störfallszenario C 2.	125
6.11	Rückkopplungsmechanismus der Rückstauausbreitung.	127
6.12	Komplexes Netzwerk N2.	128

6.13	Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen in den Störfallszenarien D 1 und D 2.	130
6.14	Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen in den Störfallszenarien E 1 und E 2.	133
6.15	Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen im Störfallszenario F.	135
A.1	Auswahlwahrscheinlichkeiten mit dem binären Probit-Modell.	155
A.2	Routenwahlhäufigkeiten und Auswahlwahrscheinlichkeiten im binären Fall. . .	157

1 Einleitung

1.1 Einordnung und Problemstellung

Verkehr resultiert aus dem alltäglichen Bedürfnis der Menschen, räumliche Distanzen zu überwinden. Er ermöglicht die Mobilität von Personen und Gütern und hat daher eine sehr hohe Bedeutung für die Volkswirtschaft einer Nation. Mit 74 % entfällt der größte Teil der Gesamtverkehrsleistung eines durchschnittlichen Tages in der Bundesrepublik Deutschland auf Kernstädte und verdichtete Kreise [78]. Umso wichtiger ist das Bestreben, den Verkehr in *Stadtnetzwerken* „flüssig“ zu organisieren. Von flüssigem Verkehr profitieren alle: Verkehrsteilnehmer erreichen schnell ihre Ziele, die Wirtschaft kann auf dem Fundament einer leistungsfähigen Infrastruktur aufbauen und auch die Umwelt wird durch Abgas- und Lärmemissionen nicht stärker als nötig belastet. Hohe Mobilität durch flüssigen Verkehr bedeutet Lebensqualität, ist zugleich aber auch Bedürfnis und Anspruch einer modernen Gesellschaft.

Flüssiger Verkehr in Städten ist jedoch nur dann realisierbar, wenn für die gewachsene Verkehrsnachfrage ein entsprechendes Verkehrsangebot geschaffen werden kann. Die effektive Verflechtung sämtlicher Verkehrsmodi innerhalb der städtischen Infrastruktur trägt einen großen Anteil an der Bewältigung wachsender Verkehrsnachfrage. Zeitgleich wird die Organisation flüssigen Verkehrs auf den *Straßen* der Stadt, insbesondere in den alltäglichen Hauptverkehrszeiten mit einer hohen Verkehrsnachfrage, zu einer echten Herausforderung, der sich Verkehrsingenieure und -planer täglich stellen. Übersteigt die Verkehrsnachfrage das Verkehrsangebot in der Hauptverkehrszeit, entsteht *wiederkehrende* Staubbildung im Stadtstraßennetzwerk, die nicht nur die Mobilität stark einschränkt, sondern mit mannigfachen negativen Konsequenzen einhergeht:

- Erhöhter Zeitbedarf für die Durchführung eines Weges.
- Beeinträchtigung des öffentlichen Nahverkehrs und anderer Verkehrsmodi.
- Erhöhter Treibstoffverbrauch für motorisierte Verkehrsteilnehmer.
- Zusätzliche Luftverschmutzungen und Lärmbelästigungen in der Stadt.
- Verminderte Verkehrssicherheit.

Die unmittelbaren und mittelbaren Folgen von Staubbildung in den Ballungszentren der Vereinigten Staaten von Amerika haben Schrank u. a. [173] in mehreren Aspekten quantifiziert.

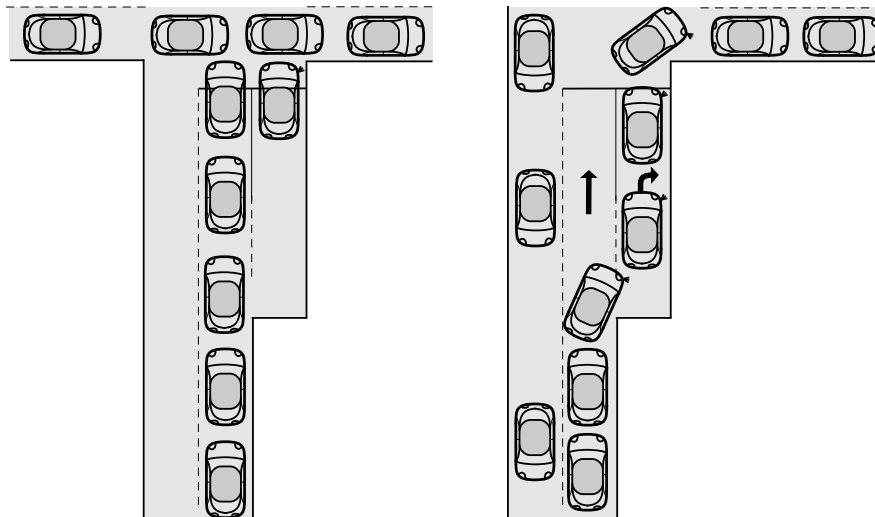


Abbildung 1.1: Vereinfachte Darstellung typischer Gridlocks in städtischen Netzwerken. Die Ursache der Gridlock-Bildung ist das Überlaufen von Fahrzeugschlangen auf Kreuzungen. Ein Fortkommen eigentlich nicht betroffener Verkehrsströme ist dann nicht mehr möglich, obwohl prinzipiell Kapazitäten (Grünzeiten oder freie Straßen) bereitstehen. Da jede Behinderung oder Blockade ein neuer Ausgangspunkt für Staubildung ist, schreitet die Ausbreitung von Rückstaus schnell im Netzwerk voran.

Im Jahr 2011 wurden die volkswirtschaftlichen Kosten, die auf Staubildung zurückzuführen sind, auf 121 Mrd. US-Dollar geschätzt. Dabei mussten die Verkehrsteilnehmer insgesamt 5,5 Mrd. Stunden zusätzlicher Fahrtzeit aufwenden. Indessen belief sich der zusätzliche Kraftstoffverbrauch auf circa 11 Mrd. Liter. Bei einem Mehrausstoß von 25,4 Mrd. kg Kohlenstoffdioxid wird auch die Dimension der ökologischen Folgeerscheinungen deutlich sichtbar.

1.1.1 Gridlocks

Planerisch schwer zu fassen, und deshalb besonders problematisch, ist die Entstehung *nicht wiederkehrender Staubildung*, die aus spontan einsetzenden und kurzfristig bestehenden Verkehrereignissen (z. B. Unfälle, liegengebliebene Fahrzeuge, Lieferwagen) resultiert und im Gegensatz zu wiederkehrender Staubildung die Verkehrsteilnehmer im Netzwerk völlig unvorbereitet erfasst. Weil sich weder Infrastruktur noch Verkehrsteilnehmer vorher auf die Staubildung haben einstellen können, kann die Ausbreitung nicht wiederkehrender Staubildung im Stadtnetzwerk schnell dazu führen, dass sich Verkehrsströme auf den Kreuzungen gegenseitig behindern.¹ Auch ursprünglich nicht von der Staubildung betroffene Verkehrsströme können dabei unnötigerweise in Mitleidenschaft gezogen werden. Da die Behinderungen selbst wieder Ausgangspunkte für Staubildung sind, setzt im Netzwerk ein sich selbst verstärkender

¹Grundsätzlich können lokale Blockaden auch durch wiederkehrende Staubildung entstehen. Weil sie unvorhergesehen einsetzt und alle Autofahrer zunächst auf deren Ursache zufahren, ist das Problem lokaler Gridlocks für die nicht wiederkehrende Staubildung deutlich relevanter.

Prozess ein, der dessen Abflusskapazitäten umso stärker reduziert, je mehr weitere Fahrzeuge in das Netzwerk einfahren. Dieser selbstverstärkende Prozess wird *Gridlock* [64] genannt. Er ist dadurch charakterisiert, dass ein höherer Zufluss in ein Netzwerk keinen entsprechend hohen Abfluss aus dem Netzwerk nach sich ziehen kann. Abb. 1.1 zeigt zwei typische Beispiele *städtischer Gridlocks*: Nicht betroffene Autofahrer werden lokal derart behindert, dass ihr Fortkommen *trotz* freier Kapazitäten in der gewünschten Richtung nicht mehr oder nur eingeschränkt möglich ist. Dies passiert, wenn Fahrzeugschlangen über Kreuzungen oder Spuraufweitungen hinaus anwachsen.

1.1.2 Bewertung

Wie die Verkehrsnachfrage so ist auch das städtische Verkehrsangebot historisch gewachsen. Die moderne Infrastruktur kann dem Großteil der Anforderungen heutiger Mobilitätsbedürfnisse zwar gerecht werden, dennoch entsteht Staubildung im Stadtstraßennetzwerk infolge zu hoher Verkehrsnachfrage oder plötzlich einsetzender Störungen. Sie ist mit hohen Kosten für den Verkehr, die Wirtschaft und die Umwelt verbunden. Angesichts des hohen technologischen Fortschritts der Menschheit in vielen Bereichen erscheint die Überzeugung, dass die staubedingten Kosten deutlich reduziert werden können, keineswegs unangemessen.

Lösungsansätze können allerdings nur aus dem Bestreben gewonnen werden, den Straßenverkehr in Stadtnetzen effizienter und nachhaltiger zu gestalten. Die Erweiterung der Infrastruktur auf Kosten ohnehin limitierter Stadtflächen kann nicht nachhaltig zur Linderung oder gar Vermeidung wiederkehrender Staubildung beitragen.² Dies gilt erst recht für nicht wiederkehrende Staubildung: Der Mehrwert einer Angebotsverbesserung kann sich nicht ergeben, wenn diese aufgrund von lokalen Blockaden (Gridlocks) gar nicht ausgenutzt werden kann. Zudem lässt sich nicht wiederkehrende Staubildung nicht planen, da sie überall im Netzwerk einsetzen kann.³ Um die negativen Folgeerscheinungen von Staubildung zu reduzieren, bedarf es deshalb intelligenter Konzepte zur Erhöhung der Effizienz, der Leistungsfähigkeit und des Reaktionsvermögens der städtischen Infrastruktur. Das Ziel muss darin bestehen, den Stadtstraßenverkehr auch unter schwierigen Bedingungen noch flüssig zu organisieren. Der Weg zur Erreichung dieser hochgesteckten Ziele wird über die Verkehrstelematik und die Lichtsignalanlagen in einem Stadtstraßennetzwerk gehen.

1.1.3 Lösungsansätze der Verkehrstelematik

Da die Erweiterung der Infrastruktur keine nachhaltige Lösung für das Problem der Staubildung in städtischen Netzwerken ist, wird heutzutage verstärkt auf *intelligente* Konzepte der Verkehrstelematik gesetzt. Im englischen Sprachraum wird die Verkehrstelematik unter dem

²Es wird angenommen, dass die Angebotsverbesserung auf lange Sicht sogar weitere Verkehrsnachfrage schürt [178].

³Dennoch kann es räumliche und zeitliche Schwerpunkte für nicht wiederkehrende Störfälle geben (z. B. Unfälle). Weiterhin kann wiederkehrende Staubildung nicht wiederkehrende bedingen, was einen Teufelskreis darstellt [147].

Begriff der Intelligent Transportation Systems (ITS) gefasst; Barfield und Dingus [16] geben eine Definition und führen vorrangige Ziele der Verkehrstelematik an:

„Intelligent Transportation Systems (ITS) Program is a cooperative effort by government, private industry, and academia to apply advanced technology to resolving the problems of surface transportation. The objective is to improve travel efficiency and mobility, enhance safety, conserve energy, provide economic benefit and protect the environment.“

Eine wichtige Maßnahme der Verkehrstelematik ist die Bereitstellung von Verkehrsinformationen. Dabei wird das Ziel verfolgt, das Verhalten von Verkehrsteilnehmern so zu beeinflussen, dass es einer effizienten Nutzung der Infrastruktur zuträglich ist [55]. Falls Staubbildung vorherrscht, trägt die Informationsbereitstellung zur Entlastung der Verstopfung bei, wenn betroffene Verkehrsströme auf nicht überlastete Netzelemente umverteilt werden können. Im Rahmen der Verkehrstelematik lassen sich allgemeine und individuelle Informations- und Leitsysteme unterscheiden [40]. Sie erfassen Verkehrsdaten, bereiten sie gegebenenfalls auf und machen sie den Verkehrsteilnehmern über geeignete Kommunikationskanäle zugänglich. Typische Vertreter allgemeiner Informations- und Leitsysteme sind frei programmierbare Hinweistafeln, die über die zu erwartenden Verkehrsbedingungen einer Richtung informieren (Abb. 1.2) oder Routenempfehlungen abgeben. Die individuelle Informationsbereitstellung wird über *bordeigene* Systeme realisiert und im Rahmen der Verkehrstelematik unter dem Konzept des *Advanced Traveller Information System* (ATIS) gefasst. Typische Vertreter des ATIS sind moderne Navigationssysteme, die Verkehrslageschätzungen durchführen, die Autofahrer entsprechend informieren und gar eine dynamische Routenführung anbieten können.

Ein weiteres Konzept der Verkehrstelematik umfasst Maßnahmen zur direkten Beeinflussung des Straßenverkehrs im Stadtnetzwerk. Diese Maßnahmen werden dem Oberbegriff des *Advanced Traffic Management System* (ATMS) zugeordnet, dessen Ziel ebenfalls darin besteht, die Nutzung der Infrastruktur, vor allem unter dem Einfluss von Staubbildung, effizienter zu gestalten. Mögliche Maßnahmen sind die Einrichtungen von Umleitungen, um übersättigte Netzelemente zu entlasten oder Geschwindigkeitsreduktionen, um den Verkehrsfluss zu homogenisieren. Dabei kommen Knoten- (z. B. Zuflussregelung), Strecken- (z. B. Wechselverkehrszeichen) und Netzverkehrsbeeinflussungsanlagen (z. B. Wechselwegweiser) [40] zum Einsatz.

Die Verkehrstelematik hat ein enormes Entwicklungspotenzial. In der Zukunft kann es ihr gelingen, mit intelligenten Ansätzen der Entstehung wiederkehrender Staubbildung entgegenzuwirken [147]. Bedeutend herausfordernder ist die Bewältigung nicht wiederkehrender Staubbildung im Stadtstraßennetzwerk, da sie grundsätzlich nicht vermieden werden kann. Die Entwicklung und Anwendung effektiver Gegenmaßnahmen, die zusätzlich zu den Maßnahmen der Verkehrstelematik eingesetzt werden können, kann zur Reduzierung der negativen Auswirkungen nicht wiederkehrender Staubbildung beitragen. Dabei wird es darauf ankommen, lokale Gridlocks effektiv zu vermeiden. Intelligent gesteuert, können Lichtsignalanlagen nicht nur Gridlocks vermeiden, sondern die Staubbildung im Stadtstraßennetzwerk effizient bewältigen.



Abbildung 1.2: Wechselverkehrszeichen in der Dresdner Bergstraße (stadteinwärts) mit einer Informationsbereitstellung über die Verkehrsbedingungen in Richtung Innenstadt.

1.1.4 Lichtsignalanlagen

Moderne, verkehrsabhängige, Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen⁴ versprechen gegenüber gewöhnlichen Festzeitsteuerungen eine teils signifikante Erhöhung der Verkehrsqualität und -sicherheit signalisierter Knotenpunkte. Sie optimieren das Verkehrsgeschehen im Stadtstraßennetzwerk und können auf diese Weise zu Stauvermeidungsstrategien beitragen. Weil Lichtsignalanlagen mindestens so flexibel reagieren können wie nicht wiederkehrende Staubildung im Netzwerk einsetzt, ist ihre Einbeziehung in ein aktives Verkehrsmanagement als Gegenmaßnahme naheliegend. Aufgrund ihrer kapazitätsregulierenden Natur können sie *aktiv* und *gezielt* in die Staudynamik eingreifen und die Entstehung von städtischen Gridlocks effektiv hemmen. Wird nämlich der Zufluss in ein verstautes Straßensegment durch erweiterte Rotzeiten rechtzeitig verhindert, kann eine gegenseitige Behinderung kreuzender Verkehrsströme lokal vermieden werden. Auf diese Weise werden lokale Gridlocks schon im Ansatz unterbunden. Zusätzlich können freigewordene Grünzeiten anschließend den alternativen Richtungen an der Kreuzung aufgeschlagen werden, um betroffene Verkehrsteilnehmer zu einer Umfahrung des Staus zu ermutigen.

⁴Lichtsignalanlagen können auch zum ATMS aus der Verkehrstelematik gezählt werden [40].

1.2 Beitrag der Dissertation

Diese Dissertation widmet sich dem Verkehr in Stadtstraßennetzwerken. Sie stellt sich der Herausforderung, das Routenwahlverhalten von Autofahrern insbesondere unter dem Einfluss spontaner, nicht wiederkehrender Staubildung zu modellieren. Zu diesem Zweck wird ein ereignisorientiertes Routenwahlmodell für den Stadtverkehr entwickelt, das ein breites Anwendungsspektrum ermöglicht. Eine weitere Herausforderung des Stadtstraßenverkehrs ist die Bewältigung von Staubildung. Das vorrangige Ziel von geeigneten Gegenmaßnahmen besteht darin, die Leistungsfähigkeit der städtischen Infrastruktur auch unter dem Einfluss der Staubildung aufrechtzuerhalten. Insbesondere die durch *Verkehrsstörungen* verursachte nicht wiederkehrende Staubildung lässt sich nur schwer fassen. Im zweiten Teil dieser Dissertation wird deshalb ein einfaches und zugleich effektives *Störfallmanagement* entwickelt, das sich selbstorganisiert an die komplexe Staudynamik im Stadtstraßennetzwerk anpasst und die Auswirkungen der Staubildung signifikant reduzieren kann.

1.2.1 Ereignisorientiertes Routenwahlmodell

Die realistische Modellierung des Routenwahlverhaltens von Autofahrern im dynamischen Stadtstraßenverkehr ist essenziell für die Bewertung und Ableitung von Maßnahmen der Verkehrstelematik und Gegenmaßnahmen für störfallbedingte, d. h. nicht wiederkehrende, Staubildung. Während sich die Infrastruktur mithilfe der Verkehrstelematik immer flexibler auf die jeweilig vorherrschenden Verkehrsbedingungen einstellen kann, darf der Aspekt eines ereignisorientierten und reaktiven Verhaltens der Autofahrer nicht vernachlässigt werden, vgl. [16]. Nur unter dieser Berücksichtigung kann nicht wiederkehrende Staubildung in Städten und die Anwendung entsprechender Gegenmaßnahmen realistisch simuliert werden.

Das Schlüsselkonzept des ereignisorientierten Routenwahlmodells ist die Fähigkeit eines modellierten Autofahrers, lokale Verkehrsbedingungen beobachten zu können. Beobachtungen sind die einzigen nicht-trivialen Informationsquellen eines Autofahrers. Im Falle einer spontanen Änderung der Verkehrsbedingungen (z. B. Staubildung) nehmen sie einen hohen Stellenwert ein. Ferner können Maßnahmen der Verkehrstelematik überhaupt erst durch Beobachtungen des Autofahrers in der Routenwahlentscheidung berücksichtigt werden. Im ereignisorientierten Routenwahlmodell werden die Beobachtungen eines modellierten Autofahrers explizit in dessen Entscheidungsprozessen berücksichtigt. Die Entscheidungsprozesse werden während der Fahrt unregelmäßig wiederholt. Damit wird abgebildet, dass der modellierte Autofahrer bei plötzlich veränderten Verkehrsbedingungen im Straßennetzwerk seine bisherigen Entscheidungen revidieren kann.

Das ereignisorientierte Routenwahlmodell wird auf der Basis eines multinomialen Probit-Modells der diskreten Wahltheorie entwickelt. Entscheidungsprozesse der Routenwahl werden im Gegensatz zu vielen anderen Modellen *direkt* und für individuelle Autofahrer simuliert, sodass die Berechnung von Auswahlwahrscheinlichkeiten nicht relevant ist. Die Alternativenmenge der Autofahrer ist dem Sachverhalt des Stadtstraßenverkehrs angepasst und enthält

alle möglichen Abbiegerichtungen des nächstfolgenden Knotens, und sich daran anschließend, einen jeweilig schnellsten Pfad bis zum Ziel. Die Zufallsnutzen der Alternativen sind so spezifiziert, dass überlappende Routen automatisch in den Entscheidungsprozessen der modellierten Autofahrer korreliert sind. Das ereignisorientierte Routenwahlmodell ist für den effizienten Einsatz in mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen konzipiert. Durch die generische Formulierung der deterministischen Nutzenfunktion kann es ein breites Spektrum möglicher Anwendungsfälle bedienen. Das ereignisorientierte Routenwahlmodell wird in der vorgeschlagenen Formulierung ganz bewusst nicht zur Berechnung eines Nutzergleichgewichts eingesetzt. Für den primären Anwendungskontext des vorgeschlagenen Modells, spontane Verkehrereignisse in Stadtstraßennetzwerken, ist die Annahme eines Nutzergleichgewichts nicht angemessen: Unter Vorherrschen nicht wiederkehrender Staubildung kann ein Autofahrer seine Reisezeit auch durch einseitiges Wechseln der Route verbessern.

In dieser Arbeit wird das ereignisorientierte Routenwahlmodell zur Bewertung eines im Rahmen dieser Dissertation entwickelten selbstorganisierten Störfallmanagements verwendet.

1.2.2 Selbstorganisiertes Störfallmanagement

Die Entstehung störfallbedingter Staubildung kann grundsätzlich nicht vermieden werden. Umso wichtiger ist die sofortige Anwendung von Gegenmaßnahmen, sobald Staubildung das Stadtstraßennetzwerk erfasst. Ein wichtiges Ziel besteht in der Vermeidung von Gridlocks. Daganzo [64] schlägt deshalb vor, den Zufluss weiterer Fahrzeuge in ein betroffenes Gebiet zu beschränken und zielnahen Verkehrsströmen oberste Priorität einzuräumen. Olsson [145] formulierte ein fundamentaleres Prinzip zur Vermeidung von Gridlocks in Städten unter der Anwendung von Lichtsignalanlagen:

*„The fundamental principle for traffic control is;
don't let more traffic in than what can pass out.“*

In dieser Dissertation werden die Ansätze von Daganzo und Olsson zu einem selbstorganisierten Störfallmanagement vereint, das die lokale Anwendung zweier Wirkungsprinzipien lichtsignalgestützt realisiert:

1. Wirkungsprinzip: *Zuflussdosierung*

Die Zuflussdosierung ist eine lokale Kapazitätsregulierung für Straßenabschnitte mit dem Ziel, das Überlaufen von Fahrzeugschlangen auf stromaufwärtige Kreuzungen zu verhindern. Der Zufluss in das betroffene Straßensegment wird mit verlängerten Rotzeiten reduziert, sobald ein vorhergesehener Rückstaubereich auf dem Straßensegment ausgeschöpft ist.

2. Wirkungsprinzip: *Umverteilung betroffener Verkehrsströme*

Alternative Richtungen, die (noch) nicht von einer Staubildung betroffen sind, werden weiterhin oder sogar mit verlängerten Grünzeiten bedient. Unter dem Kontrast außergewöhnlich langer Rotzeiten für die verstaute Zielrichtung und regelmäßiger Bedienung

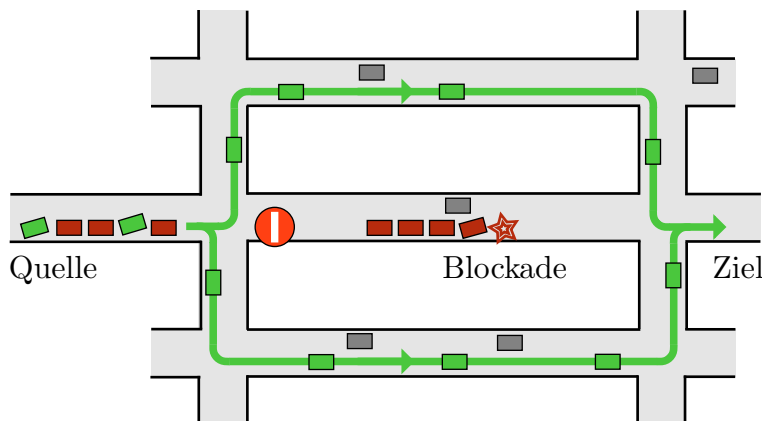


Abbildung 1.3: Schematische Darstellung der Wirkungsprinzipien des selbstorganisierten Störfallmanagements: Der Zufluss weiterer Fahrzeuge in ein verstautes Straßensegment (z. B. infolge eines Unfalls) wird durch verlängerte Rotzeiten gedrosselt, sobald die Länge des Rückstaus eine kritische Grenze überschritten hat. Gleichzeitig werden umfahrende Richtungen weiterhin mit (erweiterten) Grünzeiten bedient, womit eine Umverteilung der von der Staubildung betroffenen Verkehrsströme auf nicht überlastete Ausweichrouten gefördert wird.

alternativer Richtungen werden betroffene Autofahrer dazu ermutigt, die Staubildung zu umfahren. Auf diese Weise können ohnehin noch verfügbare Kapazitäten im gestörten Netzwerk ausgenutzt werden.

Die Vermeidung überlaufender Fahrzeugschlangen im Störfall ist das Schlüsselrezept zur Verhinderung lokaler Gridlocks. Kreuzende Verkehrsströme, die nicht von dem Störfall betroffen sind, können den Knotenpunkt trotz der Staubildung passieren. Gleichzeitig können die von dem Störfall betroffenen Autofahrer eine alternative Route zur Umfahrung der Staubildung wählen. Während also der Zufluss in Richtung der Staubildung gedrosselt ist, wird eine Umverteilung der betroffenen Verkehrsströme entlang ohnehin noch verfügbarer Straßenkapazitäten gefördert (siehe Abb. 1.3).

Durch das selbstorganisierte Störfallmanagement werden lokal effektive Gegenmaßnahmen eingeleitet. Die weitere Stauausbreitung im Netzwerk kann in der Regel jedoch nicht unmittelbar gestoppt werden, da nicht *alle* betroffenen Autofahrer *sofort* die Staubildung umfahren werden. Die lokalen Prinzipien des vorgeschlagenen Störfallmanagements lassen sich jedoch auf alle signalisierten Knotenpunkte des Stadtstraßennetzwerks übertragen: Erreicht der Rückstau den nächstgelegenen Knotenpunkt, werden die Prinzipien auch dort aktiviert. Diese rekursive Anwendung der lokalen Wirkungsprinzipien stellt sich vollständig selbstorganisiert direkt mit dem Ausmaß der Staubildung und ohne Vorgabe eines Verkehrsplaners oder -ingenieurs ein. Entscheiden sich im Mittel mindestens so viele Autofahrer an betroffenen Knotenpunkten für eine Umfahrung wie neue Fahrzeuge an den stromaufwärtigen Enden der Rückstaus zufahren, kann die weitere Stauausbreitung im Netzwerk sogar gestoppt werden und eine „Selbst-Heilung“ des gestörten Netzwerks stellt sich ein. Sie ist dadurch charakterisiert, dass

jeder Autofahrer trotz des Störfalls in endlicher Zeit sein gewünschtes Ziel erreichen kann. Nicht nur der motorisierte Individualverkehr profitiert: Auch Busse oder Einsatzfahrzeuge können schnell ihre Ziele erreichen, wenn der Verkehr im gestörten Stadtstraßennetzwerk flüssig bleibt.

1.2.3 Wesentliche Ergebnisse

Die Machbarkeit des vorgeschlagenen Störfallmanagements konnte simulativ in einem einfachen und einem komplexen Netzwerk nachgewiesen werden. Das Routenwahlverhalten von simulierten Autofahrern wurde dabei mit dem ereignisorientierten Routenwahlmodell abgebildet. Unter dem Einfluss aller untersuchten Störfallszenarien wurden unter der Anwendung des selbstorganisierten Störfallmanagements signifikant weniger zusätzliche Fahrzeuge im Netzwerk akkumuliert. Auch die Wiederherstellung der normalen Verkehrsbedingungen im Netzwerk nach dem Ende des Störfalls verlief schneller als in einem konventionellen Netzwerk. Die Verbesserungen, die sich aus der Anwendung des vorgeschlagenen Störfallmanagements gegenüber eines konventionellen Netzwerks ergeben, konnten bereits mit gewöhnlichen Festzeitsteuerungen erreicht werden. Der Einsatz einer verkehrsabhängigen Lichtsignalanlagensteuerung (Selbst-Steuerung von Lämmer [117]) erhöhte die Wirksamkeit des Störfallmanagements weiter. Ausschließlich im einfachen Netzwerk konnte die weitere Stauausbreitung für mehrere Störfallszenarien während des Störfalls gestoppt, d. h. eine Selbstheilung des Netzwerks erreicht, werden.

1.3 Kapitelübersicht der Dissertation

Der Aufbau dieser Dissertation folgt in wesentlichen Punkten der Darstellung des letzten Abschnitts. In Kapitel 2 wird zunächst ein Überblick über den Forschungsgegenstand der Routenwahlmodellierung und deren Bedeutung im städtischen Verkehr gegeben. Darauf aufbauend wird in Kapitel 3 das ereignisorientierte Routenwahlmodell entwickelt und besprochen. Kapitel 4 führt den Begriff des Verkehrsstörfalls ein, stellt gebräuchliche Gegenmaßnahmen gegenüber und verknüpft das ereignisorientierte Routenwahlmodell mit Simulationen von Störfällen. Das im Rahmen dieser Dissertation vorgestellte selbstorganisierte Störfallmanagement wird in Kapitel 5 behandelt und in Kapitel 6 simulativ bewertet. Eine Zusammenfassung der Dissertation und ein Ausblick auf zukünftige Fragestellungen werden in Kapitel 7 gegeben.

Kapitel 2 gibt zunächst einen kurzen Überblick über die diskrete Wahltheorie, das fundamentale Rahmenwerk des ereignisorientierten Routenwahlmodells. Anschließend wird die Einordnung von Routenwahlmodellen im Kontext der Verkehrsumlegung erläutert. Anhand dreier Schlüsselherausforderungen der Routenwahlmodellierung wird der gegenwärtige Stand der Forschung vorgestellt. Diese umfassen (i) die Spezifikation der Routenmenge, (ii) die realistische Behandlung überlappender Routen und (iii) die Berücksichtigung variabler Verkehrs-

bedingungen im Entscheidungsprozess. Im letzten Teil des Kapitels werden die Implikationen der Routenwahl in gestörten Stadtstraßennetzwerken verdeutlicht.

In **Kapitel 3** wird das ereignisorientierte Routenwahlmodell formuliert. Der Aufbau des Kapitels folgt den Anforderungen, die zur Modellierung des Routenwahlverhaltens von Autofahrern im Stadtverkehr an das Modell gestellt werden.

- Die Alternativenmenge soll auf den Sachverhalt spontaner Verkehrereignisse im Stadtstraßennetzwerk angepasst sein und für alle Abbiegerichtungen am nächstfolgenden Knotenpunkt des Autofahrers eine Routenwahlalternative bis zum Ziel enthalten.
- Autofahrer müssen ihre lokale Umgebung beobachten können. Diese Beobachtungen werden in repetitiven Entscheidungsprozessen berücksichtigt.
- Für realistische Entscheidungsprozesse soll die Spezifikation der Zufallsnutzen des Modells gewährleisten, dass überlappende Routen im Entscheidungsprozess eines Autofahrers miteinander korreliert sind.

Nach der Formulierung des Modells werden Plausibilitätsbetrachtungen hinsichtlich der Routenwahl in einem ungestörten und einem gestörten Netzwerk und unter Betrachtung überlappender Routen durchgeführt.

Kapitel 4 ist das Bindeglied zwischen dem ereignisorientierten Routenwahlmodell und dem selbstorganisierten Störfallmanagement. Zunächst wird der Begriff des Verkehrsstörfalls eingeführt. Für Simulationen von Verkehrsstörfällen bestehen Besonderheiten, die das ereignisorientierte Routenwahlmodell auf eine realistische Weise im Routenwahlverhalten von Autofahrern berücksichtigt. Die Voraussetzungen zur Implementierung des Modells in eine mikroskopische Simulationsumgebung werden beschrieben. Anschließend wird der für diese Dissertation relevante Anwendungsfall der Bewertung von Gegenmaßnahmen eines Verkehrsmanagements beschrieben. Das Kapitel soll zwei wichtige Erkenntnisse transportieren:

- Die realistische Abbildung des Routenwahlverhaltens von Autofahrern im Störfall ist essenziell für eine realistische Bewertung von Gegenmaßnahmen.
- Gebräuchliche Gegenmaßnahmen sind hilfreich. Die Verbreitung von Lichtsignalanlagen in einem städtischen Straßennetzwerk und deren Verbindlichkeit für Verkehrsteilnehmer regen darüber hinaus die Entwicklung eines lichtsignalgestützten Störfallmanagements an. Nicht nur können Reisezeiten betroffener Autofahrer reduziert werden, auch Gridlocks durch überlaufende Fahrzeugschlangen können effektiv gehemmt werden.

Kapitel 5 stellt das selbstorganisierte Störfallmanagement vor. Lichtsignalanlagen in Städten können als Ausgangspunkt eines Störfallmanagements dienen, da sie eine hohe Verbreitung im Stadtstraßennetzwerk aufweisen und naturgemäß durch die Signalisierung Straßenkapazitäten regulieren. Bereits existierende Steuerungsverfahren streben die Optimierung der Bedienfolge an signalisierten Knotenpunkten bezüglich einer festgelegten Zielfunktion an.

Ein wichtiges Paradigma stellt dabei der Ansatz der Koordinierung von Lichtsignalanlagen dar. Optimierende Steuerungsverfahren sind im Falle nicht wiederkehrender Staubildung und überlaufenden Fahrzeugschlangen jedoch Grenzen gesetzt. Zur Vermeidung lokaler Gridlocks durch überlaufende Fahrzeugschlangen wird deshalb die lokale Zuflussdosierung als sekundäre Instanz einer Lichtsignalanlagensteuerung vorgestellt. Mithilfe verlängerter Rotzeiten wird der Zufluss in ohnehin bereits verstaute Straßenabschnitte gedrosselt. Gleichzeitig werden alternative, nicht von der Staubildung betroffene, Abbiegerichtungen mit (verlängerten) Grünzeiten bedient, sodass die Ausnutzung noch verfügbarer Straßenkapazitäten gefördert wird. Die selbstorganisierte Anwendung des Störfallmanagements auf ein gesamtes Stadtstraßennetzwerk führt auf das Konzept der Selbstheilung.

In **Kapitel 6** wird das ereignisorientierte Routenwahlmodell für die simulative Bewertung des selbstorganisierten Störfallmanagements herangezogen. Dazu werden zwei modellierte Straßennetze (einfach und komplex) betrachtet, in denen typische Störfälle unterschiedlicher Schwere und der Einsatz der Zuflussdosierung simuliert werden. Für die Untersuchung kommen zwei unterschiedliche primäre Steuerungsverfahren zum Einsatz: (i) gewöhnliche Festzeitsteuerungen und (ii) die verkehrabhängige Selbst-Steuerung von Lämmer [116]. Das ereignisorientierte Routenwahlverhalten der modellierten Autofahrer wird durch ein Beobachtungsmodell für Rotzeiten modelliert. Es reflektiert, dass Autofahrer bei lang andauernden Rotzeiten zunehmend ungeduldiger werden. Die Simulationsstudie weist die Machbarkeit des selbstorganisierten Störfallmanagements nach. Bereits unter der Verwendung von gewöhnlichen Festzeitsteuerungen konnte die Anzahl der zusätzlichen Fahrzeuge im Netzwerk unter dem Einfluss des untersuchten Störfalls signifikant reduziert werden. Eine weitere Verbesserung stellte sich unter Verwendung der Selbst-Steuerung ein, da die Grünzeiten an den betroffenen Knoten so umverteilt wurden, dass alternative Richtungen erhöhte Bedienkapazitäten zugewiesen bekamen. Dies wurde von betroffenen Autofahrern ausgenutzt.

2 Routenwahlmodellierung im Stadtstraßenverkehr

Die Routenwahlmodellierung ist ein bedeutender und herausfordernder Forschungsgegenstand in der Verkehrsplanung. Routenwahlmodelle operieren typischerweise im Kern von Verkehrsumlegungsverfahren und repräsentieren dort die verhaltensbezogenen Annahmen der Entscheidungen modellierter Autofahrer. Ein weit verbreitetes Rahmenwerk für die Routenwahlmodellierung ist die diskrete Wahltheorie, deren Grundlagen zunächst vorgestellt werden. Für eine verständliche Einordnung von Routenwahlmodellen wird deren primäres Anwendungsgebiet in der Verkehrsumlegung erläutert und die Begriffe des Nutzergleichgewichts und des Systemoptimums eingeführt. Anschließend werden die bedeutendsten Herausforderungen der Routenwahlmodellierung besprochen, zu denen die Suche nach geeigneten Routen im Netzwerk, die Berücksichtigung von Routenüberlappungen im Entscheidungsprozess und die Behandlung von spontanen Verkehrsereignissen in der Routenwahl gehören. Der letzte Teil des Kapitels stellt heraus, dass sich das Routenwahlverhalten unter dem Einfluss wiederkehrender bzw. nicht wiederkehrender Störungen stark unterscheidet. Die oft vertretene Annahme eines Nutzergleichgewichts wird dabei insbesondere für nicht wiederkehrende, d. h. unvorhergesehen eintretende, Phänomene im Stadtverkehr als ungeeignet eingeschätzt. Gleichzeitig besteht Bedarf für ein ereignisorientiertes Routenwahlmodell, das das Routenwahlverhalten unter dem Einfluss spontan eingetretener Verkehrsereignisse besser beschreiben kann und dabei explizit nicht auf Gleichgewichtsannahmen beruht.

2.1 Eine Einführung in die diskrete Wahltheorie

In einem konkreten Kontext beschreiben Modelle der diskreten Wahltheorie die Entscheidungen von Individuen bezüglich einer gegebenen, diskreten Menge an Alternativen. Die Wahl eines Entscheidungsträgers n basiert demnach auf einer Menge von klar unterscheidbaren Alternativen A_n , aus der lediglich eine gewählt werden darf. Damit grenzen sich diskrete Wahlmodelle von Entscheidungskontexten ab, in denen Alternativen in beliebigen Mischungsverhältnissen gewählt werden können, vgl. Maier und Weiss [131, S. 2].

Diskrete Wahlmodelle unterliegen dem Paradigma eines *homo oeconomicus*, einem „Wirtschaftsmenschen“, der bestrebt ist, seinen *Nutzen* zu maximieren. Dabei wird Nutzen als ein Maß für die Attraktivität einer Alternative verstanden, das typischerweise mit den *Kosten* bzw. *Gewinnen* skaliert, die bei der Wahl der betreffenden Alternative anfallen bzw. erreicht werden.

Im Entscheidungsprozess eines diskreten Wahlmodells wird dem Entscheidungsträger n für jede Alternative $r \in A_n$ ein Nutzen U_{nr} zugeordnet. Der Modellierer des Entscheidungsprozesses ist dabei in der Pflicht, eine geeignete *Nutzenfunktion* $U_{nr}(C_{nr}, s_n, \varepsilon_{nr})$ zu spezifizieren, in die beobachtbare *Charakteristika* C_{nr} der Alternativen, sozioökonomische Eigenschaften s_n des Entscheidungsträgers n und nicht beobachtbare Einflüsse ε_{nr} Eingang finden. Dabei können *mehrere* Charakteristika und sozioökonomische Eigenschaften des Entscheidungsträgers Eingang in die Nutzenfunktion finden. In der diskreten Wahltheorie setzt sich diese Nutzenfunktion für eine Alternative r allgemein aus einem deterministischen Anteil V_{nr} und einem stochastischen Anteil ε_{nr} in folgender Weise zusammen:

$$U_{nr}(C_{nr}, s_n, \varepsilon_{nr}) = V_{nr}(C_{nr}, s_n) + \varepsilon_{nr}. \quad (2.1.1)$$

Der deterministische Nutzen V_{nr} ist eine Annahme des Modellierers für die Wahrnehmung des Nutzens aus der Sicht des Entscheidungsträgers. Sie basiert auf für den Modellierer *und* Entscheidungsträger prinzipiell beobachtbaren Charakteristika C_{nr} einer Alternative r , z. B. der Länge einer Route, und möglicherweise auch sozioökonomischen Eigenschaften s_n des Entscheidungsträgers wie beispielsweise dem Einkommen. Der Modellierer kann jedoch nicht *alle* relevanten Faktoren der Wahl beobachten und muss dies in der Nutzenfunktion berücksichtigen. Dieser Unsicherheit wird durch das Einfügen eines stochastischen Anteils ε_{nr} , dem *Zufallsnutzen*, in die Nutzenfunktion gerecht. Der Zufallsnutzen ist eine Zufallsvariable, die einer Wahrscheinlichkeitsverteilung $P_{\varepsilon_{nr}}$ gehorcht, die der Modellierer festzulegen hat. Allgemeiner lässt sich Gl. (2.1.1) in Vektornotation schreiben und umfasst dann alle Alternativen des Entscheidungsträgers:

$$\vec{U}_n(\vec{C}_n, s_n, \vec{\varepsilon}_n) = \vec{V}_n(\vec{C}_n, s_n) + \vec{\varepsilon}_n. \quad (2.1.2)$$

Sei mit R die Anzahl der Alternativen bezeichnet. Dann ist der Zufallsnutzen eine R -dimensionale Zufallsvariable, die durch einen Vektor $\vec{\varepsilon}_n = \langle \varepsilon_{n1}, \dots, \varepsilon_{nR} \rangle$ repräsentiert werden kann und einer gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsverteilung $P_{\varepsilon_n} = P(\vec{\varepsilon}_n)$ gehorcht. Die Wahl der Wahrscheinlichkeitsverteilung P_{ε_n} bestimmt den grundsätzlichen Typ des diskreten Wahlmodells. Ferner ist aufgrund des Zufallsnutzens in Gl. (2.1.2) der „wahre“ Nutzen $\vec{U}_n \sim P_{\varepsilon_n}$ ebenso eine R -dimensionale Zufallsvariable.

Offenkundig sind diskrete Wahlmodelle grundsätzlich stochastisch. Aus der Sicht des Modellierers resultiert ein Entscheidungsprozess daher stets in Auswahlwahrscheinlichkeiten

P_{nr} für alle Alternativen $r \in A_n$ des Entscheidungsträgers n :

$$\begin{aligned}
 P_{nr} &= \text{Prob}(U_{nr} > U_{nq}), \quad \forall q \neq r & (2.1.3) \\
 &= \text{Prob}(V_{nr} + \varepsilon_{nr} > V_{nq} + \varepsilon_{nq}), \quad \forall q \neq r \\
 &= \text{Prob}(\varepsilon_{nr} - \varepsilon_{nq} > V_{nq} - V_{nr}), \quad \forall q \neq r \\
 &= \int_{\varepsilon} \chi(\varepsilon_{nr} - \varepsilon_{nq} > V_{nq} - V_{nr}) \cdot f(\vec{\varepsilon}_n) d\vec{\varepsilon}_n, \quad \forall q \neq r.
 \end{aligned}$$

Hierbei ist $\chi(\cdot)$ die charakteristische Funktion, die auf 1 abbildet, falls das Funktionsargument wahr ist, und auf 0 falls nicht. Ferner bezeichnet $f(\vec{\varepsilon}_n)$ die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte des Zufallsnutzenvektors $\vec{\varepsilon}_n$. Zur Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative ist demnach in der Regel ein mehrdimensionales Integral zu lösen. Aus der Sicht des Entscheidungsträgers ist die Entscheidung jedoch eindeutig.

Diskrete Wahlmodelle fassen alle dem Entscheidungsträger n für den aktuellen Entscheidungsprozess zur Verfügung stehenden Alternativen in einer diskreten Alternativenmenge A_n zusammen. Die Zusammensetzung von A_n geht aus dem jeweiligen Entscheidungskontext hervor und kann, wie der Index n andeutet, für dasselbe Entscheidungsproblem für jeden Entscheidungsträger n unterschiedlich sein. Der Modellierer der Entscheidung legt die Zusammensetzung der Alternativenmenge fest. Sie muss folgende formale Eigenschaften erfüllen:

- A1 Die Elemente der Alternativenmenge müssen sich gegenseitig ausschließen, sodass die Wahl einer Alternative zur Verwerfung aller anderen Elemente führt. Diese Verwerfung ist jedoch nur auf den aktuellen Entscheidungsprozess bezogen. Es können auch mehrere Entscheidungsprozesse modelliert werden, für die sich die Alternativenmenge jeweils neu konstituiert.
- A2 Die Alternativenmenge muss erschöpfend sein, sodass alle Möglichkeiten des aktuellen Entscheidungskontextes in der Betrachtung miteinbezogen werden.
- A3 Die Anzahl der Elemente der Alternativenmenge muss endlich sein. Der Entscheidungsträger hat in einigen Entscheidungskontexten vermeintlich unendlich viele Alternativen zur Verfügung. Aus Sicht des Modellierers und für die Modellierung der Entscheidung ist dies jedoch nicht tragbar. Schließlich steht diese Forderung in Übereinstimmung mit der Tatsache, dass auch ein Entscheidungsträger seine zur Auswahl stehenden Alternativen auf eine finite Anzahl beschränken muss.

2.1.1 Ausgewählte Eigenschaften diskreter Wahlmodelle

Interpretation des Zufallsnutzens

Grundsätzlich repräsentiert der Zufallsnutzen ε_{nr} einer Alternative r die Abweichung des deterministischen Nutzens V_{nr} zum tatsächlichen („wahren“) Nutzen U_{nr} . Die Unsicherheit

bezüglich des wahren Nutzens ist allen Modellen der diskreten Wahltheorie inhärent, wird jedoch nicht in jeder Interpretation explizit dem Modellierer zugeschrieben. Zwei unterschiedliche Interpretationen sind gebräuchlich: In der ersten Interpretation liegt die Unsicherheit nur beim Modellierer, während der Entscheidungsträger selbst alle Faktoren kennt, die zur Auswahl der Alternative geführt haben. Im Gegensatz dazu kann der Zufallsnutzen jedoch auch so interpretiert werden, dass er Faktoren enthält, die dem Entscheidungsträger selbst nicht bekannt sind, sodass der deterministische Nutzen die Rolle des Erwartungswerts für den wahren Nutzen einnimmt. Unabhängig von der Interpretation des Zufallsnutzens hat der Modellierer stets eine probabilistische Sichtweise auf die Wahl eines Entscheidungsträgers. Ferner können die Auswahlwahrscheinlichkeiten auf eine verhaltenshomogene Entscheidungsträgersgesamtheit bezogen werden; sie geben dann den jeweiligen Anteil der Gesamtheit an, der sich für die betrachtete Alternative entschieden hat, vgl. Train [192, S. 17].

Nutzendifferenzen und Nutzenniveau

In diskreten Wahlmodellen sind nur Nutzendifferenzen zwischen den Alternativen für die Entscheidung relevant. Dazu sei Gl. (2.1.3) betrachtet, die die Auswahlwahrscheinlichkeit eines Entscheidungsträgers n für eine Alternative r angibt:

$$P_{nr} = \text{Prob}(U_{nr} > U_{nq}) = \text{Prob}(U_{nr} - U_{nq} > 0) \quad \forall q \in A_n \text{ mit } q \neq r. \quad (2.1.4)$$

Die Auswahlwahrscheinlichkeit für eine Alternative r hängt damit von der Nutzendifferenz $U_{nr} - U_{nq}$ dieser Alternative zu anderen Alternativen ab. Aus dieser Eigenschaft diskreter Wahlmodelle lassen sich weitere Merkmale ableiten. Offensichtlich ändert das Hinzufügen einer Konstante $c \in \mathbb{R}$ nichts an der Auswahlwahrscheinlichkeit, denn

$$P_{nr} = \text{Prob}(U_{nr} - U_{nq} > 0) = \text{Prob}((U_{nr} + c) - (U_{nq} + c) > 0) \quad \forall q \in A_n \text{ mit } q \neq r.$$

Auch die Multiplikation der Nutzen mit einer Konstante α hat keine Auswirkungen auf die Nutzendifferenzen der betrachteten Alternativen, sofern der deterministische Nutzen *und* der Zufallsnutzen mit derselben Konstante multipliziert werden. Allgemeiner formuliert, sind die Auswahlwahrscheinlichkeiten demnach invariant unter identischen Transformationen der Nutzen aller im Entscheidungsprozess betrachteten Alternativen, da sie keinen Effekt auf die Nutzendifferenzen zwischen den Alternativen haben.

2.1.2 Ausgewählte Modelle der diskreten Wahltheorie

Multinomiales Logit-Modell

Das multinomiale Logit-Modell (MNL-Modell) [129, 134] geht von identisch und unabhängig gumbelverteilten Zufallsnutzen aus, d. h. $\varepsilon_{nr} \sim \text{Gu}(\eta, \lambda)$. Die Parameter der Gumbelverteilung sind einerseits ein Lageparameter η , der den Modalwert der Wahrscheinlichkeitsdichte angibt.

Andererseits ist λ ein Skalierungsparameter, der proportional zum Inversen der Standardabweichung ist. Eine wichtige Konsequenz der Wahl der Gumbelverteilung für das MNL-Modell ist, dass die Auswahlwahrscheinlichkeiten analytisch ausgedrückt werden können. Für Alternative r und Entscheidungsträger n ergibt sich die Auswahlwahrscheinlichkeit zu

$$P_{nr} = \frac{\exp(V_{nr})}{\sum_{r' \in A_n} \exp(V_{nr'})}. \quad (2.1.5)$$

Dieser Ausdruck gilt für das binomiale und auch für das multinomiale Logit-Modell. Die analytisch geschlossene Form hängt explizit mit den Eigenschaften der Gumbelverteilung zusammen. Für eine ausführliche Herleitung wird auf die Referenzen [131, 192] verwiesen.

Neben der analytischen Berechenbarkeit der Auswahlwahrscheinlichkeiten weist das MNL-Modell jedoch auch bedeutende Einschränkungen auf. Die Annahme *unabhängig* verteilter Zufallsnutzen impliziert unmittelbar, dass Alternativen, die *Gemeinsamkeiten* teilen, im Zufallsnutzen nicht automatisch korreliert sind. Dies ist insofern problematisch, als dass der Entscheidungsträger Alternativen mit Gemeinsamkeiten als eigenständig und vollwertig bewertet, was schließlich zu verzerrten Auswahlwahrscheinlichkeiten führt. Später wird gezeigt, dass die Korrelation jedoch auch in den deterministischen Nutzen der Alternativen reflektiert werden kann. Im *klassischen* MNL-Modell wird dieser Ansatz jedoch nicht verfolgt, sodass Gemeinsamkeiten von Alternativen im Entscheidungsprozess grundsätzlich nicht berücksichtigt werden. Ferner sind die gumbelverteilten Zufallsnutzen des (klassischen) MNL-Modells *identisch*, d. h. mit identischen Verteilungsparametern, verteilt. Bei gegebener und *fester* Nutzendifferenz sind die Auswahlwahrscheinlichkeiten damit unabhängig von der Größenordnung des deterministischen Nutzens. Unterscheiden sich beispielsweise die Reisezeiten zweier Routen um 5 min, so sind deren Auswahlwahrscheinlichkeiten stets identisch, egal ob die absoluten Reisezeiten der beiden Routen 5 und 10 min oder 100 und 105 min betragen.¹ Diese *Translationsinvarianz* der Auswahlwahrscheinlichkeiten unter der Verschiebung des Nutzenniveaus stellt eine starke Restriktion des MNL-Modells dar, da das Nutzenniveau nicht in die Entscheidung einfließt.

Eine wichtige Eigenschaft des MNL-Modells ist seine *Independence from Irrelevant Alternatives-Eigenschaft* (IIA-Eigenschaft)², die im MNL-Modell mit der Annahme unabhängig gumbelverteilter Zufallsnutzen zusammenhängt [vgl. 35, S. 109]. Sie drückt aus, dass das Verhältnis der Auswahlwahrscheinlichkeiten von je zwei Alternativen unabhängig von den Charakteristika anderer Alternativen ist. Dies lässt sich mathematisch leicht zeigen, wenn das Verhältnis der Auswahlwahrscheinlichkeiten von den Alternativen r und q gebildet wird. Mit

¹Hier sei vorausgesetzt, dass der Nutzen einer Route durch ihre negative Reisezeit gegeben ist.

²Auf Deutsch: Unabhängigkeit von nicht relevanten Alternativen. Es gilt dabei zu beachten, dass i. Allg. aus der Annahme unabhängig verteilter Zufallsnutzen nicht zwingend die IIA-Eigenschaft folgt. Im MNL-Modell folgt die IIA-Eigenschaft aus der Annahme unabhängig und identisch gumbelverteilter Zufallsnutzen. Dies gilt auch umgekehrt, d. h. die IIA-Eigenschaft folgt aus der Annahme unabhängig und identisch gumbelverteilter Zufallsnutzen.

Gl. (2.1.5) folgt

$$\frac{P_{nr}}{P_{nq}} = \frac{\exp(V_{nr})}{\exp(V_{nq})} = \exp(V_{nr} - V_{nq}). \quad (2.1.6)$$

Demnach ist das Verhältnis der Auswahlwahrscheinlichkeiten nur abhängig von den deterministischen Nutzen der beiden Alternativen selbst. Wird eine weitere Alternative s mit $P_{ns} > 0$ in das Entscheidungsproblem eingeführt, so verringern sich folglich die Auswahlwahrscheinlichkeiten der Alternativen r und q in demselben Maße wie sie für s wachsen.³ Da das Verhältnis der Auswahlwahrscheinlichkeiten von r und q in Gl. (2.1.6) jedoch unabhängig von P_{ns} ist, müssen die Auswahlwahrscheinlichkeiten P_{nr} und P_{nq} sinken, damit P_{nr}/P_{nq} konstant bleibt und $P_{nr} + P_{nq} + P_{ns} = 1$ gilt [vgl. 192, S. 45]. Eine einsichtige Darstellung dieser Folge der IIA-Eigenschaft wurde von McFadden [136] mit dem sogenannten „Red Bus/Blue Bus“-Paradoxon angeregt.

Multinomiales Probit-Modell

Das multinomiale Probit-Modell (MNP-Modell) (z. B. Daganzo [60]) ist, bezogen auf die Verteilungsannahme der Zufallsnutzen, eines der flexibelsten diskreten Entscheidungsmodelle. Die Zufallsnutzen der Alternativen gehorchen einer Normalverteilung, d. h. $\varepsilon_{nr} \sim \mathcal{N}(\mu, \sigma^2) \forall r \in A_n$. Dabei bezeichnet μ den Erwartungswert und σ^2 die Varianz der Normalverteilung. Im einfachsten Fall sind die Zufallsnutzen identisch und unabhängig normalverteilt. Im Gegensatz zum MNL-Modell jedoch weist das MNP-Modell auch in diesem Fall *nicht* die IIA-Eigenschaft auf. Unter der Betrachtung eines Zufallsnutzenvektors $\vec{\varepsilon}_n$ tritt die Flexibilität des MNP-Modells deutlich zu Tage: Mit der multivariaten Normalverteilung und der Kovarianzmatrix Σ gilt für den Zufallsnutzenvektor

$$\vec{\varepsilon}_n \sim \mathcal{N}(\vec{\mu}, \Sigma).$$

Dabei ist $\vec{\mu}$ der Erwartungswertvektor und Σ gegeben durch

$$\Sigma = \text{Cov}(\varepsilon_n) = (\text{Cov}(\varepsilon_{nr}, \varepsilon_{nq})) \quad \forall r, q \in A_n, \text{ wobei } \text{Cov}(\varepsilon_{nr}, \varepsilon_{nr}) = \text{Var}(\varepsilon_{nr}). \quad (2.1.7)$$

Die Kovarianzmatrix repräsentiert demnach die paarweise Kovarianz aller Elemente des Zufallsnutzenvektors als Matrix und die Varianzen der Zufallsnutzen auf der Hauptdiagonalen. Durch die Spezifizierung der Kovarianzmatrix erhält das MNP-Modell seine Flexibilität und erlaubt dementsprechend Korrelationen zwischen einzelnen Alternativen über deren Zufallsnutzen. Die Annahme normalverteilter Zufallsnutzen ist konsistent mit dem zentralen Grenzwertsatz, nach der die Summe vieler einzelner Zufallsvariablen mit endlicher Varianz annähernd einer Normalverteilung gehorcht [z. B. 7]. Train [192, S.97] weist jedoch auch darauf hin, dass die Annahme normalverteilter Zufallsnutzen nicht für alle Entscheidungsprobleme plausibel ist.

³Eine zur Einführung einer neuen Alternative äquivalente Formulierung ist die Verbesserung einer bereits bestehenden Alternative s , die schließlich zu einer höheren Auswahlwahrscheinlichkeit P_{ns} führt.

Der Flexibilität des Probit-Modells steht die fehlende analytische Lösbarkeit für die Ausdrücke der Auswahlwahrscheinlichkeiten im multinomialen Fall gegenüber. Lediglich für das binäre Wahlproblem können die Auswahlwahrscheinlichkeiten mithilfe der Standardnormalverteilungsfunktion $\Phi(x)$ analytisch⁴ berechnet werden:

$$P_1 = \Phi\left(\frac{V_1 - V_2}{\sigma_\varepsilon}\right) \quad \text{und} \quad P_2 = 1 - P_1, \quad (2.1.8)$$

wobei $\sigma_\varepsilon^2 = \sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 - 2\sigma_{12}^2$ die Varianz der Zufallsnutzendifferenz beider Alternativen ist.⁵ Für die mehrdimensionale Normalverteilungsfunktion existiert hingegen keine analytisch geschlossene Form, sodass die Auswahlwahrscheinlichkeiten im Sinne von Gl. (2.1.3) numerisch berechnet werden müssen. In der Literatur sind mehrere Ansätze zur Lösung beschrieben, z. B. Train [192].

Generalized-Extreme-Value-Modelle (GEV)

Die fehlende Berücksichtigung korrelierender Zufallsnutzen im MNL-Modell stellt eine starke Restriktion dar. Sie kommt aufgrund unabhängig gumbelverteilter Zufallszahlen zustande, die wiederum auch die IIA-Eigenschaft des Logit-Modells bedingen. Die Korrelationen zwischen den Zufallsnutzen der Alternativen können in einem MNP-Modell durch eine Kovarianzmatrix zwar exakt spezifiziert werden. Gleichzeitig steigt der Aufwand zur Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeiten deutlich, da es für sie im MNP-Modell keine geschlossene Form gibt.

Einen alternativen Ansatz zur Überwindung der Einschränkungen des klassischen MNL-Modells und des Rechenaufwands des MNP-Modells bildet die Klasse der *Generalized-Extreme-Value-Modelle* (GEV-Modelle)⁶, die auf McFadden [135] zurückgeht. Allen Modellen dieser Klasse ist gemein, dass die Zufallsnutzen der Alternativen einer multivariaten Extremwertverteilung gehorchen. Im Gegensatz zur univariaten Gumbelverteilung, die im MNL-Modell zur Anwendung kommt, erlauben multivariate Extremwertverteilungen Korrelationen der Alternativen untereinander über den Zufallsnutzenvektor $\vec{\varepsilon}_n$ von Entscheidungsträger n .

Der Ausgangspunkt von GEV-Modellen ist eine Generatorfunktion $G(y_1, \dots, y_J)$ auf einer Menge $y = \{y_1, \dots, y_J\}$, die zu einer gültigen Extremwertverteilungsfunktion

$$F(y_1, \dots, y_J) = \text{Prob}(Y_1 \leq y_1, \dots, Y_J \leq y_J) = \exp(-G(y_1, \dots, y_J))$$

⁴Analytisch meint hier die tabellierte Standardnormalverteilungsfunktion. In vielen numerischen Bibliotheken können jedoch auch entsprechende Implementierungen verwendet werden.

⁵Die Herleitung des binären Probit-Modells gelingt über Gl. (2.1.3), falls o. B. d. A. Auswahlwahrscheinlichkeit P_1 berechnet wird. Im binomialen Fall ergibt sich $P_1 = F_{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}(V_1 - V_2)$; die Verwendung der Standardnormalverteilung führt auf die Relation.

⁶Auf Deutsch: Allgemeine Extremwert-Modelle

führt, falls $G(y_1, \dots, y_J)$ eine nicht-negative, homogene⁷ und differenzierbare Funktion ist. Bezogen auf die diskrete Wahltheorie resultiert aus einer geeigneten Spezifizierung der Generatorfunktion G eine multivariate Verteilung der Elemente des Zufallsnutzenvektors $\vec{\varepsilon}_n$, deren eindimensionale Randverteilungen wiederum Gumbelverteilungen $\text{Gu}(\eta, \lambda)$ sind, die den Verteilungen der einzelnen Zufallsnutzen ε_{nr} der Alternativen entsprechen. Schließlich hat McFadden [135] gezeigt, dass die multivariate Extremwertverteilung der Zufallsnutzen auf ein diskretes Wahlmodell mit der allgemeinen Auswahlwahrscheinlichkeit

$$P_{nr} = \frac{\exp(V_{nr})G_r(\exp(V_{n1}), \dots, \exp(V_{nq}), \dots, \exp(V_{nR}))}{G(\exp(V_{n1}), \dots, \exp(V_{nq}), \dots, \exp(V_{nR}))} \quad \text{mit } q = 1, \dots, R \in A_n \quad (2.1.9)$$

für Alternative r führt, das konsistent ist mit dem Paradigma der individuellen Nutzenmaximierung. Dabei bezeichnet $G_r(\exp(V_{n1}), \dots, \exp(V_{nq}), \dots, \exp(V_{nR})) = \partial G / \partial \exp(V_{nr})$ die partielle Ableitung von $G(\cdot)$ nach dem r -ten Argument. Erst durch die Spezifizierung der Generatorfunktion kann ein konkretes Wahlmodell abgeleitet werden. Gegenüber einem MNP-Modell haben GEV-Modelle den Vorteil einer analytisch geschlossenen Form für die Auswahlwahrscheinlichkeiten.

Nested-Logit-Modell

Das am weitesten verbreitete Beispiel aus der Klasse der GEV-Modelle ist das Nested-Logit-Modell (NL-Modell). Die Generatorfunktion des Nested-Logit-Modells [z. B. 131, S. 162] führt auf eine multivariate Extremwertverteilung, in der die Zufallsnutzen der Alternativen, also die Elemente des Zufallsnutzenvektors, untereinander korreliert sein können. Die Alternativenmenge ist mehrdimensional und ergibt sich aus dem kartesischen Produkt eindimensionaler Alternativenmengen [vgl. 131, S. 153]. Elemente dieser mehrdimensionalen Alternativenmenge können Gemeinsamkeiten bezüglich einer oder mehrerer Dimensionen aufweisen [vgl. 35, S. 277]. Die mehrdimensionale Alternativenmenge ist dabei so partitioniert, dass Alternativen, die Gemeinsamkeiten besitzen, in Untermengen, sogenannten *Nestern*, zusammengefasst werden. Die Zufallsnutzen von Alternativen in einem Nest sind schließlich korreliert, wohingegen die Zufallsnutzen von Alternativen in unterschiedlichen Nestern weiterhin unkorreliert sind.

Weil sich die mehrdimensionale Alternativenmenge aus dem kartesischen Produkt eindimensionaler Alternativenmengen zusammensetzt, repräsentiert jedes Nest N_k eine *gemeinsame* Eigenschaft seiner enthaltenden Alternativen. Die Ableitung der Auswahlwahrscheinlichkeiten P_{rk} einer Alternative r in Nest N_k kann direkt aus Gl. (2.1.9) mithilfe der für das

⁷Z. B. nach Arens u. a. [7, S. 830]: Eine Funktion $f: \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}$ ist homogen vom Grad n genau dann, wenn

$$f(\alpha x_1, \dots, \alpha x_k) = \alpha^n \cdot f(x_1, \dots, x_k).$$

MNL-Modell spezifischen Generatorfunktion G erfolgen [siehe 192]:

$$P_{rk} = \frac{\exp(V_{nr}/\mu_k) \left(\sum_{q \in N_k} \exp(V_{nq}/\mu_k) \right)^{\mu_k - 1}}{\sum_{\ell=1}^K \left(\sum_{q \in N_k} \exp(V_{nq}/\mu_\ell) \right)^{\mu_\ell}}. \quad (2.1.10)$$

Dabei ist μ_k der „Nestkoeffizient“, der ein Maß für die Korrelationen der Zufallsnutzen der Alternativen in Nest N_k darstellt. Für $\mu_k = 1$ besteht keine Korrelation zwischen den Zufallsnutzen der Alternativen, sodass das NL-Modell in ein klassisches MNL-Modell übergeht. Aus Gl. (2.1.10) kann ferner hergeleitet werden, dass die IIA-Eigenschaft (i) gültig für Alternativen in demselben Nest und (ii) hinfällig für nestübergreifende Alternativen ist [z. B. 192, S. 80].

Ausgangspunkt eines alternativen Ansatzes zur Herleitung von Gl. (2.1.10) ist die Aufteilung der Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative in eine bedingte und eine marginale Wahrscheinlichkeit. Die marginale Wahrscheinlichkeit $P(k)$ ist die Auswahlwahrscheinlichkeit für das Nest N_k , wohingegen die bedingte Wahrscheinlichkeit die Auswahlwahrscheinlichkeit für Alternative r wiedergibt, falls Nest N_k gewählt wurde. Für eine Alternative r in Nest N_k ergibt sich:

$$P_{rk} = P(r|k) \cdot P(k).$$

Sie führt auf denselben Ausdruck wie in Gl. (2.1.10) [vgl. 35, 131].

2.1.3 Die Anwendung diskreter Wahlmodelle

Diskrete Wahlmodelle beschreiben das Wahlverhalten von Entscheidungsträgern. Zur korrekten Beschreibung des Entscheidungsverhaltens werden in der Regel Stichproben tatsächlich realisierter Entscheidungen eines Kontextes zur *Schätzung* des Wahlmodells verwendet. Neben der Spezifizierung der Verteilung der Zufallsnutzen legt der Modellierer eine parametrisierte deterministische Nutzenfunktion fest, deren Parameter es schließlich zu schätzen gilt. Die Durchführung dieser Schätzung ist von hoher Bedeutung für die Ökonometrie und wird extensiv in der weiterführenden Literatur behandelt [z. B. 35, 131, 192]. Insbesondere für die Routenwahlmodellierung werden die Daten oft im Rahmen einer *Stated-Choice*-Befragung erhoben, in der der Modellierer eine Stichprobe von realen Personen hypothetisch in die Lage einer Entscheidungssituation versetzt und aus den Antworten der Befragten schließlich eine Schätzung der Parameter durchführt [z. B. 180, 132]. Stehen keine Daten für die Schätzung des Modells zur Verfügung, können diskrete Wahlmodelle dennoch als Rahmenkonzept einer Entscheidungsmodellierung dienen. Wie im Schätzproblem ist dabei eine deterministische Nutzenfunktion zu spezifizieren und eine Annahme über die Verteilung der Zufallsnutzen zu treffen.

Zur Überwindung analytisch nicht geschlossener Formen für die Auswahlwahrscheinlichkeiten können die Entscheidungen von Entscheidungsträgern auch *direkt* simulativ modelliert werden. Dabei durchläuft jeder Entscheidungsträger einen *individuellen* Entscheidungsprozess und wählt nach der Bewertung (Berechnung der Nutzen) jeder betrachteten Alternative diejenige

mit dem höchsten Nutzen aus. Dabei werden die Zufallsnutzen rechnergestützt erzeugt und zum deterministischen Nutzen der Alternativen hinzuaddiert. In der Literatur sind geeignete Techniken zur Generierung von Zufallszahlen, die einer bestimmten Verteilung gehorchen, beschrieben [z. B. 161].

2.2 Routenwahlmodelle und ihre Rolle in der Verkehrsumlegung

Eine weit verbreitete Anwendung diskreter Wahlmodelle ist die Routenwahlmodellierung. Routenwahlmodelle werden in der Regel in übergeordneten *Verkehrsumlegungsverfahren* für die Zuteilung einer gegebenen Verkehrsnachfrage auf das vorhandene Verkehrsangebot eingesetzt. Sie beschreiben die Entscheidungsprozesse, die modellierte Autofahrer für die Wahl einer Route durchlaufen und bestimmen die Aufteilung von Verkehrsströmen auf eine zu spezifizierende Routenmenge einer Origin-Destination-Relation (OD-Relation) zwischen einem Quellbezirk (eng.: Origin) und einem Zielbezirk (eng.: Destination) in einem abstrakten Netzwerkmodell [vgl. 6, „Relation“ S. 17]. Verkehrsrelationen werden im Folgenden als OD-Relationen bezeichnet. Sie beziehen sich ausschließlich auf den motorisierten Individualverkehr. Der *Routenaufteilung* kommt in dem übergeordneten Verfahren der Verkehrsumlegung eine tragende Rolle zu. Falls nicht explizit anders bemerkt, wird der Begriff des Netzwerks für den Rest dieser Arbeit stets mit einem Straßennetzwerken verknüpft.

Zwischen der Routenwahl modellierter Verkehrsströme und den Verkehrsbelastungen auf den Routen der OD-Relation, die aus der Routenwahl resultieren, besteht eine Wechselwirkung. Diesbezüglich stellen die Konzepte des *Nutzergleichgewichts* und *Systemoptimums* [202] bekannte Annahmen für die *Verteilung der Verkehrsströme* dar, die in Verfahren der Verkehrsumlegung gesucht werden. Das Routenwahlmodell dient dabei als Werkzeug zur Routenaufteilung unter der Annahme gegebener und temporär konstanter Reisezeiten auf den Kanten des Netzwerks. Die alleinige Anwendung eines Routenwahlmodells führt jedoch i. Allg. nicht auf ein Nutzergleichgewicht oder Systemoptimum, [vgl. z. B. 54, S. 14] (siehe auch Kap. 7). Der Begriff der Verkehrsstromverteilung darf nicht mit der *Verkehrsverteilung* im Sinne der Verkehrsplanung verwechselt werden.

Der Entscheidungsprozess von Routenwahlmodellen kann auf der Ebene individueller Autofahrer oder für eine verhaltenshomogene Autofahrergesamtheit einer OD-Relation beschrieben werden. Aus Gründen der Einfachheit wird vereinbart, dass der Begriff des Autofahrers verhaltenshomogene Verkehrsströme mit einschließt.

2.2.1 Pfade und Routen

Ein „Pfad“ ist die eindeutige Abfolge von paarweise verschiedenen Knoten eines mathematischen Graphen, wobei jedes Knotenpaar durch eine Kante verbunden ist.⁸ Im Gegensatz zu dieser mathematischen Sichtweise ist eine „Route“ ein Pfad im Sinne einer Alternative

⁸Für eine exakte Definition eines Pfades siehe Diestel [69, S. 7].

der diskreten Wahltheorie. Demnach repräsentiert die Route r eines Autofahrers n einen Pfad mit festzulegenden Charakteristika C_{nr} . Mit der deterministischen Nutzenfunktion $V_{nr} = V(C_{nr}, \dots)$ und der Spezifizierung der Verteilung der Zufallsnutzen assoziiert Autofahrer n mit Route r einen Nutzen U_{nr} , welcher in einem Entscheidungsprozess herangezogen wird.

2.2.2 Routenaufteilung

Unter der Maßgabe einer Routenmenge R_{ij} für OD-Relation ij bestimmt das vom Modellierer festzulegende Routenwahlmodell die Aufteilung der Verkehrsströme auf diese Routenmenge. Dabei lässt sich zwischen der Routenaufteilung vor dem Fahrtantritt (*pre-trip*) und während der Fahrt (*en route*) in dynamischen Modellen unterscheiden. Typischerweise werden für den Entscheidungsprozess die Reisezeiten T_ℓ auf den Kanten $\ell \in \mathcal{L}(r)$ einer Route $r \in R_{ij}$ in einem abstrakten Netzwerk \mathcal{G} herangezogen. Bezogen auf alle betrachteten OD-Relationen bestimmt die Routenaufteilung schließlich die Verkehrsbelastungen f_ℓ [Fzg./h] auf allen Kanten des Netzwerks. Capacity-Restraint-Funktionen (CR-Funktionen)⁹ mit der allgemeinen Vorschrift $T(f_\ell) = T_\ell$ stellen einen funktionalen Zusammenhang zwischen einer gegebenen Verkehrsbelastung f_ℓ und der zu erwartende Reisezeit T_ℓ auf Kante ℓ her. Auf Grundlage dieser Kanten-Reisezeiten führt die Routenwahl im Umlegungsverfahren auf neue Kantenbelastungen f'_ℓ :

$$\text{Routenaufteilung im Umlegungsverfahren : } T_\ell(f_\ell) \rightarrow f'_\ell \quad \forall \ell \in \mathcal{G}.$$

Der Vektor, der alle Kantenbelastungen des Netzwerks enthält, wird als *Verkehrstromverteilung* \vec{f} bezeichnet.

Deterministische Routenaufteilung

In deterministischen Modellen ist der Entscheidungsprozess weder für den modellierten Autofahrer noch für den Modellierer zufallsbehaftet. Die Routenwahlentscheidung basiert auf einer deterministischen Nutzenfunktionen U_r^{det} für jede betrachtete Route r :

$$U_r^{\text{det}} = - \sum_{\ell \in \mathcal{L}(r)} T_\ell(f_\ell) = -T_r.$$

Hier wird vereinfachend angenommen, dass lediglich die Reisezeit T_r von Route r im Entscheidungsprozess herangezogen wird. Unter der Maßgabe des Konzepts der Nutzenmaximierung wählen *alle* Autofahrer des Verkehrsstroms letztlich nur eine einzige Route s mit $U_s^{\text{det}} > U_r^{\text{det}} \quad \forall r \neq s$. In der englischsprachigen Literatur ist dieser Ansatz unter dem Begriff der „All-or-Nothing“-Methode¹⁰ bekannt, die im übergeordneten Verfahren der Ver-

⁹Die weiterführende Literatur gibt einen erschöpfenden Überblick über CR-Funktionen (siehe Referenzen [48, 27, 165, 175])

¹⁰Auf Deutsch: „Alles oder nichts.“

kehrsumlegung iterativ durchgeführt wird (siehe Abschnitt 2.3). Bei der Routenaufteilung mit der All-or-Nothing-Methode wird stets die beste (hier: schnellste) Route auf der Grundlage aktueller Verkehrsbelastungen ausgewählt. Für den Entscheidungsprozess besitzen die modellierten Autofahrer vollkommene Kenntnisse über die Reisezeiten auf den verfügbaren Routen.

Stochastische Routenaufteilung

Stochastische Routenwahlmodelle resultieren in Auswahlwahrscheinlichkeiten, die in der Regel für *mehrere* Routen der OD-Relation verschieden von Null sind. Der Grad der Streuung der Routenaufteilung ist dabei abhängig vom Streuungsmaß der Wahrscheinlichkeitsverteilung, die dem stochastischen Nutzen unterliegt. Die Nutzenfunktion eines diskreten Routenwahlmodells ist typischerweise gegeben durch

$$U_r = - \sum_{\ell \in \mathcal{L}(r)} T_\ell(f_\ell) + \varepsilon_r = -T_r + \varepsilon_r. \quad (2.2.1)$$

Im Rahmen der Routenwahlmodellierung kann der Zufallsnutzen ε_r als Einfluss persönlicher Präferenzen und Points of Interest (POIs)¹¹ oder als Reisezeitvariabilität interpretiert werden [9, 150, 144]. Im Entscheidungsprozess kann der Modellierer diese Unterscheidung nicht auseinanderhalten. Sie könnte jedoch relevant für die konkrete Spezifizierung des Zufallsnutzens sein.

2.2.3 Nutzergleichgewicht und Systemoptimum nach Wardrop

Die Verkehrsstromverteilung in einem Netzwerk ergibt sich aus der Wechselwirkung zwischen den Reisezeiten der betrachteten Routen einer OD-Relation und den Routenwahlentscheidungen der Autofahrer. Folglich koppelt die Verkehrsstromverteilung, die aus der Routenwahl der Autofahrer resultiert, zurück auf die Routenentscheidungen. Verfahren der Verkehrsumlegung verfolgen das Ziel, eine Verkehrsstromverteilung zu finden, unter der das Verkehrssystem entweder im Zustand des *Nutzergleichgewichts* oder des *Systemoptimums* ist. Diese Zustände stellen Annahmen für die Aufteilung von Autofahrern einer OD-Relation auf verfügbare Routen dar, die auf Wardrop [202] zurückgehen.

- Erstes Wardrop'sches Prinzip: *Deterministisches Nutzergleichgewicht*
Ein Nutzergleichgewicht zwischen den Autofahrern auf allen benutzten Routen einer OD-Relation, die ihre Reise zum selben Zeitpunkt begonnen haben, ist erreicht und stabil, falls kein Autofahrer seine Reisezeit durch einseitiges Wechseln seiner Route verbessern kann [175, S.19]. Die korrespondierende Verkehrsstromverteilung ergibt sich aus dem individuell nutzenmaximierenden (egoistischen) Verhalten aller Verkehrsteilnehmer und ist dadurch charakterisiert, dass die Reisezeiten aller Routen minimal und im Mittel

¹¹Auf Deutsch: Ort von Interesse

gleich sind. Die Suche einer solchen Verkehrsstromverteilung führt über die Lösung des Optimierungsproblems [vgl. 175, S. 59]

$$\min Z(\vec{f}) = \sum_{\ell} \int_0^{f_{\ell}} T(\omega) d\omega, \quad (2.2.2)$$

wobei \vec{f} der Vektor der Verkehrsstromverteilung und $T_{\ell}(f_{\ell})$ eine CR-Funktion ist. Die Optimierung erfolgt dabei unter der Nebenbedingung, dass \vec{f} die vorgegebenen OD-Relationen erfüllt.

- Zweites Wardrop'sches Prinzip: *Systemoptimum*

Die Verkehrsstromverteilung einer OD-Relation befindet sich in einem Systemoptimum, falls die Gesamtreisezeit aller Autofahrer auf allen benutzten Routen minimal ist [nach 175, S. 69]. Diese Aufteilung resultiert nicht aus der individuellen Nutzenmaximierung der Verkehrsteilnehmer, sondern setzt gar voraus, dass einige Autofahrer einer schlechteren Route gegenüber einer besseren den Vorzug geben müssen. Im Systemoptimum können daher Autofahrer einseitig die Route wechseln und dabei die Reisekosten verbessern; auf Kosten der Allgemeinheit. Das Optimierungsproblem zur Suche einer Verkehrsstromverteilung \vec{f} im Systemoptimum ist gegeben durch [vgl. 175, S. 69]

$$\min Z(\vec{f}) = \sum_{\ell} f_{\ell} T(f_{\ell}), \quad (2.2.3)$$

wobei dieselbe Notation wie für Gl. (2.2.2) benutzt wurde. Sheffi [175] bemerkt, dass sich ein Systemoptimum nicht von allein einstellt und dann auch nicht stabil wäre, da die verhaltensbezogenen Annahmen für die Autofahrer nicht realistisch sind [vgl. auch 48, S. 332]. Andererseits argumentiert Cascetta [48], dass das Systemoptimum exakt der Zustand ist, den beispielsweise Verkehrsleitzentralen durch geeignete Kontrollmechanismen erreichen möchten, z. B. mithilfe einer Maut oder Grünzeitaufteilungen von Lichtsignalanlagen.

In der Literatur liegt der Fokus vor allem auf der Suche eines Nutzergleichgewichts anstatt eines Systemoptimums. Andererseits können die beiden Zustände der Verkehrsstromverteilung sogar ineinander überführt werden: Für eine ausführliche Gegenüberstellung von Nutzergleichgewicht und Systemoptimum vgl. Referenz [37].

Hinsichtlich des verwendeten Routenwahlmodells lässt sich zwischen einem deterministischen und stochastischen Nutzergleichgewicht unterscheiden. Im stochastischen Nutzergleichgewicht wird berücksichtigt, dass die Routenwahl mit Unsicherheiten behaftet ist und die Autofahrer eine gewisse *Wahrnehmung* des Nutzens der verfügbaren Routen haben.

- *Stochastisches Nutzergleichgewicht*

Ein stochastisches Nutzergleichgewicht zwischen den Autofahrern auf allen benutzten Routen einer OD-Relation, die ihre Reise zum selben Zeitpunkt begonnen haben, ist

erreicht, falls kein Autofahrer seine *wahrgenommene* Reisezeit durch einseitiges Wechseln seiner Route verbessern kann [175, S. 310]. Die zu dem stochastischen Nutzergleichgewicht korrespondierende Verkehrsstromverteilung ergibt sich aus der Tatsache, dass Routen mit einer gewissen Auswahlwahrscheinlichkeit ausgewählt werden. Im Gegensatz zum deterministischen Nutzergleichgewicht sind die Reisezeiten auf den benutzten Routen der OD-Relation in der Regel auch im Mittel *nicht* gleich. Die Suche nach einer solchen Verkehrsstromverteilung folgt ebenso auf ein Optimierungsproblem, auf dessen Formulierung hier verzichtet und stattdessen auf die Fachliteratur verwiesen wird, siehe Referenz [175, S. 312].

Im Anhang A.2 wird das generische Schema eines Verfahrens zur Suche eines Nutzergleichgewichts erläutert.

2.3 Geeignete Spezifizierung von Routenmengen

In städtischen Netzwerken existiert eine Vielzahl an *möglichen* Routen bereits lediglich für eine OD-Relation; die Gesamtzahl aller möglichen Routen in einem Netzwerk kann erheblich und daher für die Routenwahlmodellierung problematisch sein. Sowohl für Umlegungsverfahren als auch für zu schätzende Routenwahlmodelle können nicht alle möglichen Routen tatsächlich betrachtet werden. Dies ist einerseits mit endlichen Ressourcen selbst moderner Computer und andererseits damit zu begründen, dass Autofahrer auch in der Realität nicht alle möglichen Pfade der gegebenen OD-Relation kennen werden. Die Gesamtheit aller möglichen Pfade ist also auf eine praktikable Menge *sinnvoller* Pfade zu reduzieren. Da Pfade im Netzwerk nicht direkt sichtbar sind [vgl. 41], müssen geeignete Techniken zur Extrahierung von Pfaden entwickelt werden und zur Anwendung kommen. Dies ist eine große Herausforderung der Routenwahlmodellierung.

Wie im letzten Abschnitt erläutert, kann das Suchen einer geeigneten Routenmenge als Problem eines Verkehrsumlegungsverfahrens aufgefasst werden. Weil die Anwendung eines Routenwahlmodells auf eine Routenmenge auch in Abwesenheit eines übergeordneten Umlegungsverfahrens möglich ist, kann die Routensuche auch als Problem der Routenwahlmodellierung selbst aufgefasst werden. Grundsätzlich lässt sich zwischen *expliziter* und *impliziter* Pfadaufzählung [z. B. 159, 41, 48] unterscheiden. Bei der expliziten Pfadaufzählung wird für eine gegebene OD-Relation eine Menge expliziter (d. h. vollständige) Pfade generiert, die abhängig ist von einschränkenden Kriterien (z. B. Reisezeit, Länge, Maut, Straßentypen) und anschließend im Entscheidungsprozess betrachtet wird. Die explizite Pfadaufzählung verwendet typischerweise Kürzeste-Wege-Algorithmen unter Verwendung unterschiedlicher Kriterien. Bei der impliziten Routenaufzählung entstehen Pfade implizit aus der iterativen Abfolge von Kanten, die in der Routenaufteilung eine von Null verschiedene Auswahlwahrscheinlichkeit haben.

Bekannte Ansätze und Techniken aus der Literatur werden im Folgenden kurz skizziert. Weiterführende Details zur Generierung von Routenmengen liefern u. a. die Referenzen [41, 159, 160]. Ferner existieren in der Literatur weitere Techniken der expliziten und impliziten Pfadaufzählung [z. B. 80, 82, 87, 22, 28]. Darüber hinaus wurde die Fragestellung behandelt, wie groß die Übereinstimmung von generierten Routenmengen mit tatsächlich beobachteten Routenrealisierungen ist. Vgl. dazu beispielsweise die Referenzen [42, 160, 22, 164].

2.3.1 Das Suchen von mehreren kürzesten Pfaden

Klassische Algorithmen zur Bestimmung von kürzesten Pfaden ziehen in der Regel nur ein Zielkriterium heran und bestimmen demnach nur *einen* kürzesten Pfad. Typische Vertreter solcher Algorithmen sind die von Moore [141], Dijkstra [70] und Floyd [77]. Zur Umgehung dieser Einschränkung wurden Ansätze entwickelt, mit denen sich eine Anzahl k kürzester Pfade mit $k > 1$ für eine gegebene OD-Relation bestimmen lassen. Dabei ist allen Ansätzen gemein, dass klassische Algorithmen iterativ angewendet werden.

Mit der *Link Elimination*-Methode [10] wird ein iterativer Kürzester-Pfad-Algorithmus mit einem Algorithmus zur Streichung von Kanten in der folgenden Weise kombiniert: In k Iterationen werden k kürzeste Pfade gesucht, wobei die letzte Kante des kürzesten Pfades, der in der letzten Iteration $k - 1$ gefunden wurde, gestrichen wird. Durch die Streichung der Kante kommt in der nächsten Iteration ein neuer kürzester Pfad zustande. Der vorgeschlagene Ansatz repräsentiert eine Erweiterung von Martins Algorithmus [133], in dem gar *vollständige* kürzeste Pfade aus dem Netzwerk in jeder Iteration gestrichen werden.

Heuristische Ansätze

Darüber hinaus existieren heuristische Ansätze zur Generierung geeigneter Routenmengen, die ebenso Kürzeste-Pfade-Algorithmen iterativ anwenden. Der nachfolgend beschriebene Ansatz wird im englischen Sprachraum als *Link Labeling* bezeichnet und geht auf Ben-Akiva u. a. [29] zurück. Das vorgeschlagene Verfahren bestimmt kürzeste Pfade einer gegebenen OD-Relation für jedes betrachtete Zielkriterium. Diese Zielkriterien können beispielsweise die Minimierung der Reisezeit oder Pfadlänge oder die Maximierung der Benutzung von Autobahnen sein. Für jedes Zielkriterium wird ein *Label* auf allen Kanten des Netzwerks erzeugt, das geeignet quantifiziert werden muss. Dies wird mithilfe einer Funktion realisiert, die den Widerstand der Kante bezogen auf dieses Zielkriterium wiedergibt. Für jedes betrachtete Label kommen anschließend klassische Kürzeste-Pfade-Algorithmen zur Anwendung. Angewandt auf ein reales Netzwerk und unter Betrachtung aller im zugehörigen Artikel vorgeschlagenen Label haben Ben-Akiva u. a. [29] knapp 90 % von in einer Umfrage erhobenen Pfaden generieren können.

Einen weiteren Ansatz haben de la Barra u. a. [17] entwickelt, der in der Literatur als *Link Penalty-Methode* bekannt ist. Im Gegensatz zur Streichung werden systematisch die Gewichte (z. B. die Reisezeit) *aller* Kanten des gefundenen Pfades erhöht, sodass in der

darauffolgenden Iteration ein neuer kürzester Pfad ermittelt wird. Prato [159] konnte mit der Link Penalty-Methode 81,3 % von in der Realität beobachteten (d. h. gewählten) Pfaden generieren.

Anstatt die Kantengewichte eines gefunden kürzesten Pfades systematisch nach jeder Iteration zu erhöhen, haben Sheffi und Powell [176] einen stochastischen Ansatz entwickelt, in dem die Kantengewichte in jeder Iteration zufällig variiert werden. Aus dieser *zufallsbehafteten* Variation der Kantengewichte ergibt sich für jede Iteration ein neuer kürzester Pfad, der in die Alternativenmenge aufgenommen werden kann. Diese Methode wird in der Literatur dem „simulativen Ansatz“ zugeordnet.

Alle besprochenen Ansätze verwenden Kürzeste-Pfade-Algorithmen zur Generierung von Mengen expliziter Routen für eine gegebene OD-Relation. Prato [159] weist jedoch darauf hin, dass diese Ansätze den Nachteil besitzen, dass sie teilweise zu ähnliche Pfade generieren, die nicht mit dem Routenwahlverhalten von Autofahrern in der Realität in Übereinstimmung stehen. Andererseits wurden in Untersuchungen (s. o.) hohe Übereinstimmungen zwischen generierten und real gewählten Pfaden festgestellt.

2.3.2 Implizite Pfadaufzählung: Effiziente Pfade

Die implizite Pfadaufzählung wird in der Literatur oft im Rahmen eines stochastischen Umlegungsverfahrens mit dem Schritt der Routenaufteilung verknüpft. Dabei konstituieren sich Pfade iterativ aus der Abfolge von Kanten während der Routenaufteilung; um dabei lediglich sinnvolle Pfade zu extrahieren, werden auch für die implizite Pfadaufzählung Heuristiken angewendet.

Zur Vermeidung einer expliziten Pfadaufzählung schlägt Dial [68] das Konzept „vernünftiger“ Pfade vor, hinter dem ein stochastisches Umlegungsverfahren mit einem MNL-Modell steht. Dabei fordert er, dass nur „vernünftige“ Pfade auf den OD-Relationen benutzt werden dürfen. Ein Pfad ist vernünftig, wenn er als Abfolge von Knoten und Kanten an keiner Stelle erneut in Richtung der Quelle des Verkehrs führt. Eine stärkere Forderung ist, dass der Eingangsknoten einer Kante stets näher an der Quelle des Verkehrs liegen muss als ihr Ausgangsknoten. In diesem Sinne muss jede neue Kante des Pfades den Autofahrer näher zum Ziel bringen. Diese Rationalität haftet vielen Ansätzen zur impliziten Pfadzählung an.

2.4 Berücksichtigung von Routenüberlappungen

Eine weitere Schlüsselherausforderung der Routenwahlmodellierung besteht darin, die Gemeinsamkeiten unterschiedlicher Routen im Entscheidungsprozess des Autofahrers zu berücksichtigen. Gemeinsamkeiten zwischen Routen bestehen beispielsweise bezüglich gemeinsam genutzter Kanten eines städtischen Netzwerks. Teilen sich zwei Routen eine oder mehrere Kanten, so werden sie als *überlappend* bezeichnet.

Die Begründung für eine Berücksichtigung des Routenüberlapps im Entscheidungsprozess liefert der Grenzfall fast vollständiger Überlappung zweier Routen: Die Unterscheidung zwischen beiden Routen ist praktisch nicht vorhanden, sodass der modellierte Autofahrer die beiden Routen folglich nicht als zwei unabhängige und vollwertige Alternativen betrachten darf. Die Charakteristika der beiden überlappenden Routen sind in diesem Fall hoch korreliert, woraus die Forderung nach einer Korrelation überlappender Routen in deren Nutzen ganz automatisch folgt. Zur Berücksichtigung des Überlapps zweier Routen bieten sich zwei Möglichkeiten an:

- Einführung eines Korrekturterms in der deterministischen Nutzenfunktion, der mit dem Grad der Überlappung skaliert.
- Korrelierende Zufallsnutzen im Falle überlappender Routen.

Während beide Ansätze in der Literatur zur Anwendung kommen, legen Modellschätzungen nahe, dass die Berücksichtigung der Korrelation in den Zufallsnutzen, obwohl typischerweise mit mehr Rechenaufwand verbunden, einem Korrekturterm in der deterministischen Nutzenfunktion vorzuziehen ist [vgl. 25]. Im Folgenden wird eine Auswahl bekannter Routenwahlmodelle beschrieben, die zur Berücksichtigung von Routenüberlappungen den einen oder anderen Ansatz verfolgen. Eine ergänzende Gegenüberstellung von Routenwahlmodellen mit analytisch berechenbaren Auswahlwahrscheinlichkeiten liefern Smits u. a. [185].

2.4.1 Commonality-Logit-Modell

Das in Abschnitt 2.1.2 vorgestellte klassische MNL-Modell hat den Vorteil analytisch geschlossener Formen für die Auswahlwahrscheinlichkeiten, erlaubt aufgrund identisch und unabhängig gumbelverteilter Zufallsnutzen jedoch keine Korrelationen zwischen überlappenden Routen. Stattdessen bietet sich die Einführung eines Korrekturterms in der deterministischen Nutzenfunktion an.

Das *Commonality-Logit-Modell* (CL-Modell) wurde von Cascetta u. a. [49] unter Erhaltung der einfachen Struktur des klassischen MNL-Modells entwickelt. Jeder Route r wird der Commonality Factor (C-Wert)¹² zugewiesen, der sich durch den Vergleich zu jeder anderen Route $s \in A_n$ der Alternativenmenge A_n von Entscheidungsträger n ergibt und ein Maß für die Ähnlichkeit der Routen repräsentiert. In seiner ursprünglichen Formulierung ist der C-Wert (CF) gegeben durch

$$CF_{nr} = \beta_0 \ln \sum_{s \in A_n} \left(\frac{L_{rs}}{L_r^{1/2} L_s^{1/2}} \right)^\gamma, \quad (2.4.1)$$

wobei L_r und L_s die Längen der Routen und L_{rs} die *gemeinsame* Länge der Routen r und s sind; ferner sind β_0 und γ Parameter. In der Literatur lassen sich auch alternative

¹²Auf Deutsch: Gemeinsamkeitswert

Formulierungen des C-Werts finden [vgl. 159]. Die Auswahlwahrscheinlichkeit von Autofahrer n für Route r ergibt sich schließlich zu

$$P_{nr} = \frac{\exp(V_{nr} - CF_{nr})}{\sum_{s \in A_n} \exp(V_{ns} - CF_{ns})}, \quad (2.4.2)$$

wobei A_n alle betrachteten Routen des Autofahrers n auf seiner OD-Relation bezeichnet.

2.4.2 Path-Size-Logit-Modell

Das *Path-Size-Logit-Modell* (PSL-Modell) geht zurück auf Ben-Akiva und Bierlaire [30] und verfolgt konzeptionell denselben Ansatz des CL-Modells: Die Korrelation überlappender Routen wird durch einen Korrekturterm, dem Path-Size-Wert (PS-Wert), in der deterministischen Nutzenfunktion berücksichtigt. Für eine Route $r \in A_n$ in der Alternativenmenge A_n einer OD-Relation ist der PS-Wert in seiner ursprünglichen Form gegeben durch

$$S_{nr} = \sum_{\ell \in \mathcal{L}(r)} \frac{L_\ell}{L_r} \left[\sum_{s \in A_n} \delta_{\ell s} \frac{L_{A_n}^*}{L_s} \right]^{-1}, \quad (2.4.3)$$

wobei $\mathcal{L}(r)$ die Menge aller Kanten von Route r , L_ℓ bzw. L_r die Länge von Kante ℓ bzw. Route r bezeichnen. Ferner ist $\delta_{\ell s} = 1$, falls Kante ℓ zu Route $s \in A_n$ gehört und 0 sonst. Mit $L_{A_n}^*$ wird die Länge der kürzesten Route der Alternativenmenge bezeichnet. In der Literatur existieren ebenso wie für den C-Wert alternative Formulierungen [z. B. 164, 159]. Die Auswahlwahrscheinlichkeiten sind gegeben durch:

$$P_{nr} = \frac{\exp(V_{nr} + \ln S_{nr})}{\sum_{s \in A_n} \exp(V_{ns} + \ln S_{nr})}. \quad (2.4.4)$$

Die Einführung eines Korrekturterms für die deterministische Nutzenfunktion einer Route ist sowohl dem CL-Modell als auch dem PSL-Modell gemein. Dennoch bestehen in der Interpretation der beiden Korrekturterme Unterschiede. Der C-Wert ist ein Maß für die Übereinstimmung zu anderen Routen und reduziert den deterministischen Nutzen um diesen Wert. Der PS-Wert hingegen charakterisiert eine Route hinsichtlich eines Verhältnisses, das angibt, ob die betrachtete Route vollwertig ist. Dementsprechend beträgt der PS-Wert für nicht überlappende Routen 1, wohingegen er kleiner ist für überlappende Routen [vgl. 159]. Dennoch ist $\ln S_{nr}$ sehr ähnlich zu CF_{nr} : Der einzige Unterschied besteht darin, dass S_{nr} auf Kanten und CF_{nr} auf vollständigen Routen basiert.

2.4.3 Probit-Modell mit strukturierter Kovarianzmatrix

Yai u. a. [212] haben ein MNP-Routenwahlmodell explizit für die Routenwahlmodellierung in Schienennetzen vorgeschlagen, um Routenüberlappungen in den Entscheidungen der Verkehrsteilnehmer im Zufallsnutzen berücksichtigen zu können. Grundsätzlich erlaubt das

MNP-Modell korrelierende Zufallsnutzen. Dies erfordert eine entsprechende Spezifikation der Varianz-Kovarianz-Matrix Σ der Normalverteilung. Auf die Routenwahlmodellierung bezogen, schlagen Yai u. a. [212] in ihrem Ansatz vor, den Zufallsnutzen ε_r einer Route r in zwei Anteile aufzuspalten:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r^1 + \varepsilon_r^0 \quad \text{mit Kovarianzmatrix } \Sigma = \Sigma^1 + \Sigma^0.$$

Dabei ist ε_r^1 abhängig von der Länge von Route r und ε_r^0 routenunabhängig verteilt. Genauer ist die Varianz von ε_r^1 proportional zur Länge von Route r bezogen auf eine Einheit x , welche sich auf eine Länge oder Zeit beziehen kann. Die Konstanz der routenspezifischen Zufallsnutzen für eine Autofahrer-Gesamtheit gewährleistet, dass überlappende Routen innerhalb dieser Gesamtheit automatisch korreliert sind. Die Kovarianz (Maß für Korrelation) zweier überlappender Routen r und s ergibt sich zu

$$\text{Cov}(\varepsilon_r^1, \varepsilon_s^1) = n_{rs}\sigma^2(x).$$

Dabei ist n_{rs} die Anzahl gemeinsamer Einheiten x von r und s , und $\sigma^2(x)$ die Varianz einer Einheit. Im Gegensatz zum CL- und PS-Modell können die Auswahlwahrscheinlichkeiten im MNP-Routenwahlmodell nicht analytisch berechnet werden. Andererseits ist die Berechnung des C- bzw. PS-Werts nicht notwendig.

2.4.4 Nested-Logit-Modell

Routenwahlmodelle aus der Klasse der GEV-Modelle erlauben die Korrelation von überlappenden Routen in deren Zufallsnutzen, resultieren jedoch in komplexeren Strukturen für die Alternativenmengen. Dafür sind die Auswahlwahrscheinlichkeiten in GEV-Modellen im Gegensatz zu denen eines MNP-Modells auch im multinomialen Fall analytisch berechenbar.

Abdel-Aty [1] hat ein NL-Modell für die störfallbezogene Routenwahl auf der Grundlage von Umfragedaten geschätzt. Dabei gliederte er die Alternativenmenge in die zwei Nester „auf der Route bleiben“ und „auf alternative Route ausweichen“. Die einzige Alternative im ersten Nest ist dementsprechend die aktuelle Route, wohingegen im zweiten Nest zwischen grundsätzlich verschiedenen Alternativrouten und lediglich einer lokalen Umfahrung (führt auf Originalroute zurück) gewählt werden kann. Die wesentliche Erkenntnis seiner Untersuchung ist, dass ein NL-Modell das Routenwahlverhalten der Umfrageteilnehmer besser repräsentieren kann als ein klassisches MNL-Modell.

2.4.5 Cross-Nested-Logit- und Link-Nested-Logit-Modell

Das Cross-Nested-Logit-Modell (CNL-Modell) wurde von Vovsha [199] entwickelt und erlaubt die Zuordnung einer Alternative in mehrere Nester. Vovsha und Bekhor [200] haben es für das Routenwahlproblem angepasst und die für den Kontext der Routenwahl angepasste Namensgebung Link-Nested-Logit-Modell (LNL-Modell) vorgeschlagen. In diesem Modell stellt jede Kante des Netzwerks ein Nest dar und alle betrachteten Routen, die über diese

Kante führen, sind in dem Nest als Alternativen enthalten. Der Ausdruck zur Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative r ist ungleich komplexer, verglichen mit der des NL-Modells, und ergibt sich zu [vgl. 158]

$$P_{nr} = \frac{\sum_{\ell \in \mathcal{L}(r)} (\alpha_{\ell r} \exp(V_r))^{\frac{1}{\mu_\ell}} \left(\sum_{s \in A_n} (\alpha_{\ell s} \exp(V_s))^{\frac{1}{\mu_\ell}} \right)^{\mu_\ell - 1}}{\sum_{\ell \in \mathcal{L}(r)} \left(\sum_{s \in A_n} (\alpha_{\ell s} \exp(V_s))^{\frac{1}{\mu_\ell}} \right)^{\mu_\ell}}. \quad (2.4.5)$$

Dabei bezeichnet $\ell \in \mathcal{L}(r)$ eine Kante des Netzwerks, die gleichzeitig ein Nest repräsentiert und A_n die Alternativenmenge des Autofahrers n . Ferner ist $0 \leq \mu_\ell \leq 1$ der Nestkoeffizient, der ein Maß für die Korrelation der Alternativen innerhalb des Nests darstellt. Im Fall $\mu_\ell = 1$ geht das Modell in ein klassisches MNL-Modell über, in dem Alternativen nicht über deren Zufallsnutzen korreliert sind. Für das LNL-Modell schlagen Vovsha und Bekhor [200] $\mu_\ell \rightarrow 0$ vor. Die Koeffizienten $\alpha_{\ell r}$ bestimmen die Einordnung von Route r in Nest (Kante) ℓ ; sie sind gegeben durch

$$\alpha_{\ell r} = \frac{L_\ell}{L_r} \delta_{\ell r} \quad \text{mit } 0 \leq \alpha_{\ell r} \leq 1 \quad \text{und} \quad \sum_{\ell} \alpha_{\ell r} = 1, \quad (2.4.6)$$

wobei L_ℓ bzw. L_r die Länge von Kante ℓ bzw. Route r ist und $\delta_{\ell r} = 1$, falls Kante ℓ zu Route r gehört und $\delta_{\ell r} = 0$ sonst.

Vovsha und Bekhor [200] haben das LNL-Modell schließlich in Verfahren der Routenaufteilung und der Verkehrsumlegung angewendet und konnten daraus ableiten, dass die Verkehrsstromverteilung des LNL-Modells, verglichen mit der eines MNL-Modells, realistischer ist. Auch haben sie gezeigt, dass sich das LNL-Modell einfach in stochastische Umlegungsverfahren einbetten lässt. Allerdings weisen die Autoren darauf hin, dass sich die Suche nach kürzesten Pfaden in Verbindung mit dem LNL-Modell schwieriger gestaltet als in anderen Modellen, vgl. Prashker und Bekhor [157]. Auch Bekhor u. a. [26] haben das CNL-Modell in einem stochastischen Umlegungsverfahren angewendet. Im Gegensatz zu Prashker und Bekhor [157] haben sie jedoch zwei komplexe Netzwerke untersucht, aber auch für diese festgestellt, dass das CNL-Modell, in Bezug auf Routenüberlappungen, realistischere Resultate als das klassische MNL-Modell liefert.

2.4.6 Paired-Combinatorial-Logit-Modell

Ein weiteres diskretes Wahlmodell, das in der Routenwahlmodellierung angewendet wurde, ist das Paired-Combinatorial-Logit-Modell (PCL-Modell) [56, 111], das die Einschränkungen des NL-Modells weiter aufhebt, indem es jedem Paar von Alternativen erlaubt, über eine Paar-individuelle Kovarianz korreliert zu sein. Aufgrund dieser Eigenschaft schätzen Chen u. a. [51] das PCL-Modell als das am besten geeignete Modell für die Routenwahl ein, vgl. auch Bekhor und Prashker [23]. Sowohl das CNL-Modell als auch das PCL-Modell lassen sich direkt aus dem allgemeineren Generalized-Nested-Logit-Modell [207] ableiten.

Prashker und Bekhor [157] haben ein CNL-Modell und PCL-Modell an das Entscheidungsproblem der Routenwahl angepasst und diese beiden Modelle zusammen mit dem CL-Modell und dem klassischen MNL-Modell in Untersuchung stochastischer Verkehrsstromaufteilungen gegenübergestellt. Ihre Ergebnisse führten zu der Erkenntnis, dass alle drei erweiterten Modelle die Verkehrsstromaufteilung in den Netzwerken realistischer voraussagten als das MNL-Modell. Dies ist insbesondere unter dem Licht von Routenüberlappungen zu sehen. Ferner weisen sie darauf hin, dass das CNL-Modell den Vorteil hat, die Alternativen (Routen) auf der Ebene der Kanten des modellierten Netzwerks zu betrachten. Dadurch müssen nicht ganze Routen im Entscheidungsprozess gegenübergestellt werden (implizite Pfadaufzählung). Gleichwohl ist die Suche nach kürzesten Routen auf der Ebene von Kanten komplexer als auf der Ebene von Routen selbst (s. o.).

2.4.7 Link-Based Joint Network GEV-Modell

Papola und Marzano [152] entwickelten die Link-Based Joint Network GEV-Modellklasse (LB-JNG-Modell), die eine „Gemeinschaftsauswahl“ von Kanten, die in ihrer Gesamtheit eine Route konstituieren, modelliert. Ein Joint-Network-GEV-Modell ist charakterisiert durch m Wahldimensionen, wobei zu jeder Dimension eine Alternativenmenge gehört, die *elementare* Alternativen (Kanten) zusammenfasst. Die *gemeinsame* Alternativenmenge enthält dann alle *möglichen* Zusammenschlüsse von elementaren Alternativen, aus denen die Routen hervorgehen. Die Struktur der gemeinsamen Alternativenmenge entspricht damit einer mehrstufigen Cross-Nested-Struktur (siehe CNL-Modell in Abs. 2.4.5). Die Vorteile dieses Modells sind seine Flexibilität hinsichtlich der Korrelationen überlappender Routen und die analytisch geschlossene Form für die Auswahlwahrscheinlichkeiten. Die Autoren haben ein konkretes LB-JNG-Modell in eine stochastische Verkehrsstromaufteilung implementiert, das in Verfahren zur Verkehrsumlegung angewendet werden kann. Eine explizite Pfadaufzählung ist dabei nicht notwendig. Die Integration in ein Umlegungsverfahren steht jedoch noch aus.

2.4.8 Path-Size-Weibit-Modell

Castillo u. a. [50] haben ein multinomiales, diskretes Wahlmodell mit weibullverteilten Zufallsnutzen vorgeschlagen (MNW-Modell), das routenspezifische (z. B. bezogen auf die Länge, Reisezeit oder andere Charakteristika) Varianzen der weiter unabhängig verteilten Zufallsnutzen der Routen (Heteroskedastizität) vorsieht. Ein bedeutender Vorteil weibullverteilter Zufallsnutzen ist die Aufhebung der Translationsinvarianz der Auswahlwahrscheinlichkeiten unter einer gegebenen Nutzendifferenz, vgl. Abschnitt 2.1.2.

Später haben Kitthamkesorn und Chen [109] auf der Grundlage des MNW-Modells das Path-Size-Weibit-Modell (PSW-Modell) im Rahmen eines stochastischen Umlegungsverfahrens vorgeschlagen. Das PSW-Modell unterliegt der Annahme weibullverteilter Zufallsnutzen, berücksichtigt jedoch im Gegensatz zum MNW-Modell Routenüberlappungen durch die

Korrektur des deterministischen Nutzens mit einem Path-Size-Wert.¹³ Die Varianzen der Zufallsnutzen sind dabei abhängig von der Länge (oder allgemeiner: den Kosten) der Route. Die Autoren konnten zeigen, dass das PSW-Umlegungsmodell ähnliche Verkehrsstromverteilungen (Nutzergleichgewicht) voraussagt wie ein Umlegungsverfahren mit dem MNP-Modell. Die Autoren schlussfolgern ferner, dass das PSW-Modell auch für die Anwendung in realistisch dimensionierten Netzwerken geeignet ist.

2.4.9 Rekursives Logit-Modell

Fosgerau u. a. [80] haben ein rekursives Logit-Modell (RL-Modell) entwickelt, in dem jeder Knoten des modellierten Netzgraphen einen Entscheidungspunkt zur Wahl der ausgehenden Kanten des Knotens darstellt. Der Entscheidung wird der „instantane“ Nutzen für die jeweilige ausgehende Kante und ein Nutzen für alle folgenden Kanten zugrunde gelegt, deren Auswahl aus der rekursiven Anwendung des Entscheidungsproblems entlang der zugehörigen Knoten folgt. Eine explizite Pfadaufzählung ist nicht notwendig; durch den rekursiven Routenwahlprozess auf der Basis von Kanten ist die Alternativenmenge unbeschränkt und kann theoretisch alle möglichen Routen enthalten. Um die Überlappung von Routen berücksichtigen zu können, haben die Autoren in Anlehnung an das PSL-Modell einen additiven Link-Size-Wert eingeführt, der die Korrelation überlappender Routen auf der Basis von Kanten in den deterministischen Anteil des Nutzens überträgt und sich dabei an das PSL-Modell anlehnt. Die Autoren haben schließlich demonstriert, dass sich das Modell mit großen Datenmengen effizient schätzen lässt. Ferner regen die Autoren die Integration des RL-Modells in ein übergeordnetes Umlegungsverfahren an.

2.5 Verkehrereignisse im städtischen Straßenverkehr

Die Verkehrsbedingungen in städtischen Straßennetzwerken sind von einer hohen Variabilität bezüglich des Angebots und der Nachfrage geprägt. Eine dominierende Quelle der Verkehrsfluss-Variabilität städtischen Verkehrs sind *Störungen* mit einer un abzählbaren Menge an potenziellen Auslösern. Störungen sind Verkehrereignisse, die sich als *wiederkehrend* oder *nicht wiederkehrend* charakterisieren lassen; ihr Auftreten kann mit einer Staubildung verbunden sein, die von weiteren negativen Konsequenzen begleitet wird. Die Berücksichtigung insbesondere nicht wiederkehrender Störungen in der Routenwahl von Autofahrern lässt sich als eine bedeutende Schlüsselherausforderung in der Routenwahlmodellierung ansehen [95].

2.5.1 Bedeutung für das Routenwahlverhalten

Wiederkehrende und nicht wiederkehrende Störungen haben ganz unterschiedliche Bedeutungen für die Routenwahl von Autofahrern im städtischen Stadtstraßennetzwerk.

¹³In Anlehnung an das PSL-Modell, Abschnitt 2.4.2.

- *Wiederkehrende Störungen*

Wiederkehrende Störungen ereignen sich über einen größeren Zeitraum periodisch in den Hauptverkehrszeiten oder sind durchgehend aktiv (z. B. langfristige Baustelle). Für Autofahrer, die regelmäßig Fahrten im Netzwerk durchführen (Pendler), setzt ein Lernprozess unter dem Einfluss der Störung ein, der maßgeblich von beobachtbaren „Rückmeldungen“ des Netzwerks (z. B. Stau) gespeist wird [vgl. 41, 9] und zu individuellen Reisezeitschätzungen für die regelmäßig befahrenen Gebiete des Netzwerks führt. Aus der Sicht des Autofahrers bilden wiederkehrende Störungen demnach ein bestimmtes Muster. Dies führt dazu, dass Autofahrer das Auftreten der Störung noch *vor* dem Fahrtantritt antizipieren und dies entsprechend in ihrer Routenwahl (vor allem *pre-trip*, aber auch *en route*) berücksichtigen.

- *Nicht wiederkehrende Störungen*

Nicht wiederkehrende Störungen ereignen sich zeitlich und räumlich unvorhergesehen und bestehen auf einer kurzfristigen Zeitskala. Folglich ist ihr Auftreten vor Fahrtantritt unbekannt und nicht planbar (antizipierbar), weshalb ein Lernprozess auch für regelmäßig pendelnde Autofahrer nicht stattfinden können. Im Gegenteil finden sich die betroffenen Autofahrer in der *unerwarteten* Situation wieder, in der die plötzlich beobachtbaren Auswirkungen der Störung fehlenden Kenntnissen für deren Ursache gegenüberstehen. Ohne einer hinreichenden Informationsverbreitung können betroffene Autofahrer lediglich aus lokalen Beobachtungen Rückschlüsse ziehen. Gleichzeitig werden die Verkehrsbedingungen im restlichen Netzwerk als sehr unsicher wahrgenommen. Auch in der unvorhergesehenen Situation werden Autofahrer Entscheidungen treffen. Dabei ist jedoch unklar, welche Kriterien dafür konkret herangezogen werden. Stehen alternative, umfahrende Routen zur Verfügung, ist davon auszugehen, dass zumindest ein gewisser Anteil der Autofahrer eine Anpassung der Routenwahl *en route* vornehmen wird.

Eine bildliche Gegenüberstellung der Auswirkungen von wiederkehrenden und nicht wiederkehrenden Störungen, die sich aus dem unterschiedlichen Routenwahlverhalten ergeben, ist in Abb. 2.1 dargestellt. Die wiederkehrende Störung (linke Grafik) lässt sich als bekannt, d. h. planbar, voraussetzen; aufgrund der Kenntnisse der Autofahrer stellt sich folglich eine Verkehrsstromverteilung ein, die die Existenz der wiederkehrenden Störung berücksichtigt. Dabei haben die Autofahrer noch vor Fahrtantritt umfahrende Routen gewählt, was durch die grünen Pfeile angezeigt wird. Das abgebildete Beispiel stellt jedoch eine ideale Situation dar. Eine Staubildung bei wiederkehrenden Störungen ist nicht grundsätzlich ausgeschlossen. Insbesondere in den Hauptverkehrszeiten (Berufsverkehr, Schülerverkehr) entsteht häufig genug wiederkehrende Staubildung.

Im Gegensatz dazu steht die Verkehrsstromverteilung unter dem Einfluss einer unvorhergesehenen, nicht wiederkehrenden Störung (rechte Grafik). Mit dem spontanen Eintreten der Störung haben die Autofahrer nicht gerechnet. Die ursprünglichen Routenentscheidungen der Autofahrer führen zu einer Staubildung, da sie ohne Kenntnisse unvermindert auf die Störung

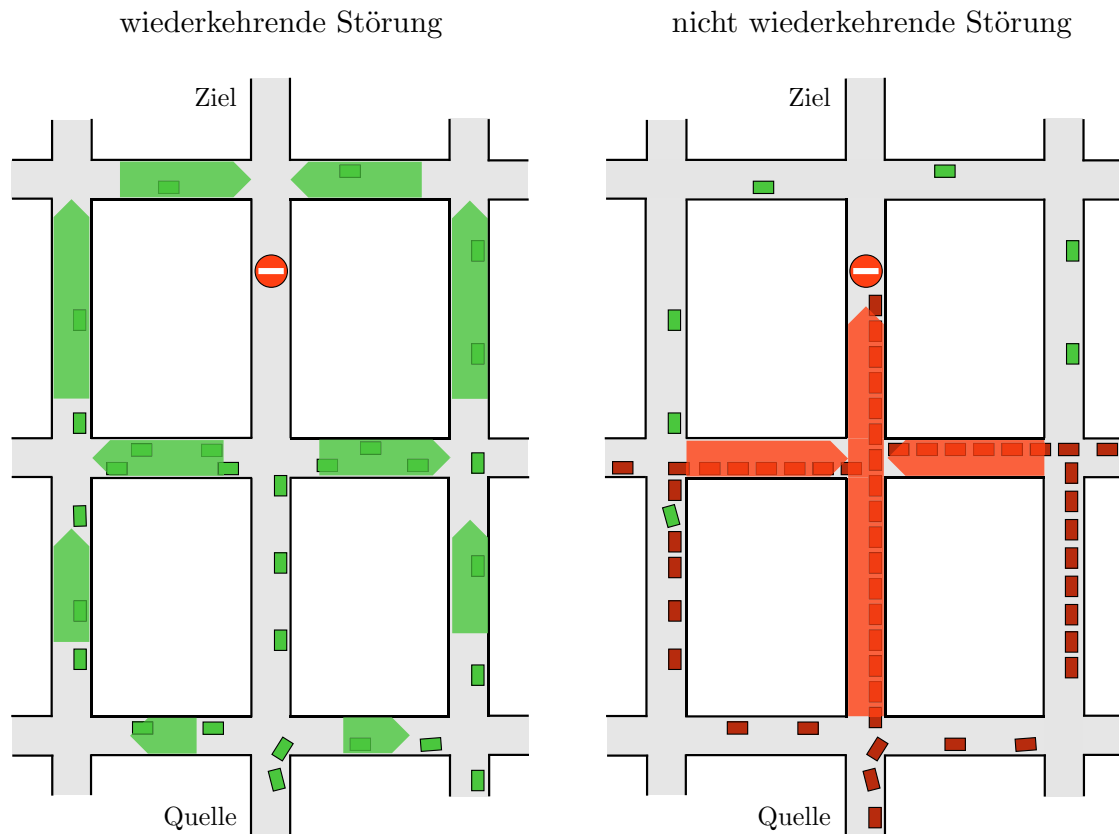


Abbildung 2.1: Gegenüberstellung der Auswirkungen einer bekannten und unbekanntesten Störung auf das Verkehrsgeschehen in einem städtischen Straßennetzwerk. Linke Grafik: Die Existenz der Störung ist bekannt und wird dementsprechend im Routenwahlverhalten der Autofahrer berücksichtigt. Rechte Grafik: Das unvorgesehene Auftreten der Störung wirkt sich dagegen in Staubildung aus, da die Autofahrer ihrer ursprünglichen Route zunächst ohne weitere Kenntnisse folgen und somit direkt auf die Störung zufahren. Im Stau ist die Entscheidung über eine Anpassung der Routenwahl für viele Autofahrer nicht leicht zu treffen, wenn Informationen zunächst nur aus lokalen Beobachtungen gewonnen werden können.

zufahren (rote Pfeile). Es bilden sich Rückstaus, die immer größere Teile des Netzwerks erfassen; überlaufende Fahrzeugschlangen verursachen lokale Gridlocks auf den Kreuzungen des Netzwerks. Die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur ist schließlich stark beeinträchtigt. In Kapitel 4 werden nicht wiederkehrende Störungen, die sich in Staubildung auswirken, explizit als *Verkehrsstörfall* definiert.

2.5.2 Bisherige Ansätze zur Berücksichtigung variabler Verkehrsbedingungen im Entscheidungsprozess der Routenwahl

Während Routenwahlmodelle selbst den Aspekt variabler Verkehrsbedingungen weitestgehend vernachlässigen, wurden in der Vergangenheit viele Simulationsumgebungen und Umlegungsverfahren entwickelt, die auf der Grundlage bereits entwickelter Routenwahlmodelle Verfahren

zur Suche eines dynamischen Nutzergleichgewichts anwenden und dabei entweder statische oder dynamische Verkehrsbedingungen abbilden können. Im Folgenden werden bisherige Ansätze zur Berücksichtigung dynamischer Verkehrsbedingungen im Entscheidungsprozess von Autofahrern beschrieben, die in ausgewählten dynamischen Simulationsumgebungen zur Anwendung kommen. Dabei werden typischerweise Umlegungsverfahren angewendet, in denen die aktuellen (mittleren) Kanten-Reisezeiten, die ggfs. mit historischen Werten kombiniert werden, bekannt sind und Eingang in die deterministische Nutzenfunktion des untergeordneten Routenwahlmodells finden. Auch die Routenwahlmenge konstituiert sich in der Regel aus dynamischen schnellsten Pfaden.

MITSIMLab

In MITSIMLab (*Microscopic Traffic Simulator Laboratory*) [34, 213, 214], einem mikroskopischen Verkehrsflusssimulator, kommt ein PSL-Modell zur Beschreibung des Routenwahlverhaltens zur Anwendung, das die Auswahlwahrscheinlichkeiten eines Autofahrers für *ausgehende* Kanten des nächsten Knotens bestimmt. Der Nutzen $U_\ell(t)$ einer ausgehenden Kante ℓ zum Zeitpunkt t besteht aus einer Schätzung der Reisezeit für diese ausgehende Kante und der sich an diese Kante anschließenden schnellsten Route:

$$U_\ell(t) = \beta_1 c_\ell(t) + \beta_2 C(t + c_\ell(t)) + \beta_3 f$$

Dabei bezeichnet $c_\ell(t)$ die erwartete Reisezeit für die ausgehende Kante ℓ , wenn sie zum Zeitpunkt t erreicht wird, $C_k(t + c_\ell(t))$ ist die erwartete Reisezeit für die anschließende kürzeste Route zum Ziel des Autofahrers und f ist eine Dummy-Variable, in der berücksichtigt wird, ob die Kante eine Autobahn ist oder nicht. Ferner sind β_i ($i = 1, 2, 3$) geschätzte Parameter des Modells. MITSIMLab unterscheidet im Entscheidungsprozess grundsätzlich zwischen informierten und nicht informierten Autofahrern, die jeweils unterschiedliche Wahrnehmungen der Reisezeiten haben. Kürzeste Pfade werden dynamisch u. a. auf der Grundlage aktueller Reisezeiten auf den Kanten des Netzwerk berechnet, wobei in Anlehnung an Dial [68] in MITSIMLab die Einschränkung gilt, dass nur solche Kanten im Entscheidungsprozess als Alternativen berücksichtigt werden, die den Autofahrer näher zum Ziel bringen. Demnach kommt in MITSIMLab eine implizite Pfadaufzählung zur Anwendung. Das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte ereignisorientierte Routenwahlmodell trifft ähnliche Annahmen für Zusammensetzung der Routenmenge eines Autofahrers. Dabei wird jedoch die Reisezeit auf der aktuellen Kante geschätzt, während für die ausgehenden Kanten des nächsten Knotens Annahmen getroffen werden müssen.

Vissim

Vissim (*Verkehr in Städten Simulation*) ist eine mikroskopische Verkehrsflusssimulation der PTV AG [z. B. 76]. Eine dynamische Routenwahlmodellierung kann mit einem dynamischen

Umlegungsverfahren durchgeführt werden, wobei ein MNL-Modell zur Anwendung kommt, dem generalisierte Kosten (u. a. Reisezeiten) von Routen zugrunde gelegt werden. Die aktuellen Reisezeiten auf den Kanten des Netzwerks werden dabei innerhalb von Auswertungsintervallen, deren Länge festzulegen ist, gemessen. Dabei gehen auch die Reisezeiten des letzten Intervalls als historische Informationen mit in die Ermittlung ein. Diese Zeiten werden schließlich dem Entscheidungsprozess der Routenwahl, der nach solch einem Intervall einsetzt, zugrunde gelegt. Routen werden iterativ in mehreren Simulationsläufen gesucht und in einem Katalog gespeichert (explizite Pfadaufzählung). Die Überlappung von Routen kann berücksichtigt werden, wobei ähnlich zum CL-Modell ein Gemeinsamkeitswert für jede Route bestimmt wird, der schließlich in der deterministischen Nutzenfunktion berücksichtigt wird.

SUMO

SUMO (*Simulation of Urban Mobility*) [113] ist eine Open-Source Verkehrsflusssimulation, die auch bei großskaligen Netzwerken zur Anwendung kommen kann. Zum Zeitpunkt dieser Arbeit sind zwei Umlegungsmodelle implementiert, einerseits basierend auf dem CL-Modell [21] und andererseits auf einer simulationsgestützten Umlegung [85].

MEZZO

MEZZO [44] ist eine hybride mikroskopisch-mesoskopische Verkehrssimulation, die ein iteratives, dynamisches Umlegungsmodell verwendet. Die Routenwahlmenge basiert auf der Suche zeitkürzester Routen, wobei neben den aktuellen Reisezeiten auch historische Reisezeiten der Kanten in den Suchalgorithmus eingehen. MEZZO erlaubt informierten Fahrern, die Route ereignisorientiert zu wechseln. Dies wird insbesondere im Kontext von nicht wiederkehrenden Störfällen betrachtet, wobei Verkehrsinformationen Angaben darüber enthalten, auf welcher Kante sich ein Störfall zu welcher Zeit ereignet hat und mit welcher voraussichtlichen Dauer er bestehen wird. Betroffene und informierte Autofahrer führen schließlich Entscheidungsprozesse durch, in denen Reisezeiten der aktuellen Route und der besten Alternativroute herangezogen werden.

DYNASMART

DYNASMART (*Dynamic Network Assignment Simulation Model for Advanced Road Telematics*) [101] lässt sich in die Gruppe der mesoskopischen Verkehrssimulationen einordnen. DYNASMART unterscheidet zwischen Kanten- und Knotendurchläufen der Autofahrer. Individuelle Autofahrer durchlaufen eine Kante gemäß einer Verkehrsfluss-Dichte-Relation. Die Reisezeiten auf den Kanten werden nach jedem Zeitschritt in Abhängigkeit der Verkehrsstärke auf den Kanten aktualisiert. Dabei fließen auch die Wartezeiten an Knotenpunkten bis zur Bedienung mit Freigabezeiten mit ein. Für den Übergang von einer auf die nächste Kante durchlaufen die modellierten Autofahrer die verbindenden Knoten. In den Knotendurchläufen wird das Routenwahlverhalten der Autofahrer simuliert; dabei entscheidet sich der modellierte

Autofahrer für einen Pfad von diesem Knoten bis zum Ziel des Fahrers. Für jeden Knoten werden dabei mehrere Pfade zum Ziel des Fahrers auf der Grundlage aktuell vorherrschender Reise- und Wartezeiten im Netzwerk berechnet. Der Routenwahl liegt schließlich ein deterministisches Routenwahlmodell zugrunde, das dem Autofahrer eine begrenzte Rationalität unterstellt [130]. Dabei vergleicht Autofahrer d am Knoten k die Reisezeit seiner aktuellen Route $TC_d(k)$ mit der besten zur Verfügung stehenden Alternative $TB_d(k)$:

$$TC_d(k) - TB_j(k) > T_s. \quad (2.5.1)$$

Ist der Reisezeitgewinn durch den Wechsel auf die beste Alternativroute höher als ein Schwellenwert T_s , so wird der Autofahrer den Routenwechsel auf die nächstbessere Alternative vollziehen. Somit lässt sich T_s als Bonus der aktuell gewählten Route gegenüber einer alternativen Route einsehen. Die Autoren merken jedoch auch an, dass auch ein diskretes Routenwahlmodell zur Anwendung kommen kann.

In der Literatur sind weitere Simulationsmodelle beschrieben, die ähnliche Ansätze verfolgen, in dieser Arbeit jedoch nicht detailliert betrachtet werden. Dazu zählen beispielsweise DynaMIT [31], METROPOLIS [149, 169], AIMSUN [15, 47], INTEGRATION [3] und PARAMICS [46, 187].

2.5.3 Kritik am Nutzergleichgewicht in städtischen Netzwerken

Eine vielfach vorausgesetzte und fundamentale Annahme statischer und dynamischer Modelle der Verkehrsumlegung ist, dass sich die Verkehrsströme einer OD-Relation in einem (stochastischen) Nutzergleichgewicht befinden. Diese Annahme hat eine lange Tradition in der Verkehrsplanung und ergibt sich direkt aus der Nutzenmaximierung individueller Autofahrer. Für die Modellierung der Verkehrsströme eines Netzwerks mit statischen Verkehrsbedingungen auf einer größeren zeitlichen Skala, auf der kurzfristige und variable Verkehrsbedingungen nicht berücksichtigt werden sollen, ist diese Annahme der Verkehrsstromverteilung zweckentsprechend: Für langfristige Vorhersagen der Verkehrsstromverteilungen eines untersuchten Netzwerks sind variable Verkehrsbedingungen auf der Stunden-Skala, d. h. die Dynamik *innerhalb* eines Verkehrstages, nicht essenziell.

Wie bereits dargelegt, spielt sich der Stadtstraßenverkehr jedoch auf einer deutlich kürzeren Zeitskala mit teils unerwarteten Ereignissen ab. Die dadurch begründete Variabilität städtischen Verkehrs erfordert daher eine Routenwahlmodellierung, die ebenfalls auf der kürzeren Zeitskala veränderliche Verkehrsbedingungen berücksichtigen kann. Statische Modelle sind zur Beschreibung städtischen Verkehrs daher nicht geeignet. Dynamische Modelle der Verkehrsumlegung [z. B. 33, 92, 87, 28, 100, 32] und die vorgestellten Simulationswerkzeuge berücksichtigen variable Verkehrsbedingungen typischerweise auf der Skala von Stunden.¹⁴ Die Annahme eines (stochastischen) Nutzergleichgewichts, das sich auch bei kurzfristigen

¹⁴Prinzipiell können dynamische Modelle jedoch auf jeder Zeitskala arbeiten.

Änderungen der Verkehrsbedingungen unmittelbar einstellt, kann jedoch nicht alle Facetten des *ereignisreichen* Stadtstraßenverkehrs abbilden. Jayakrishnan u. a. [101] stellt diesbezüglich heraus, dass es unklar ist, ob die Annahme eines Nutzergleichgewichts zur Bewertung von Verkehrsmaßnahmen, in denen Echtzeitinformationen bereitgestellt werden gerechtfertigt ist, insbesondere unter dem Einfluss nicht wiederkehrender Staubbildung: Die Annahme eines Nutzergleichgewichts setzt schließlich eine Markttransparenz [vgl. 37] voraus, in dessen Folge die Autofahrer zumindest ungefähre Kenntnisse besitzen oder diese bei kurzfristiger Änderung des Netzzustandes instantan erwerben. Davon ist bei nicht wiederkehrenden Störungen jedoch grundsätzlich nicht auszugehen. Der Anwendungsbereich dynamischer Umlegungsmodelle ist somit auf wiederkehrende Phänomene im Stadtstraßenverkehr begrenzt, für die angenommen werden darf, dass bereits erworbene Kenntnisse in der Routenwahl berücksichtigt werden.

Fehlende Berücksichtigung nicht wiederkehrender Störungen

Unter dem Einfluss einer nicht wiederkehrenden Störung, die sich in Staubbildung auswirkt, kann sich praktisch kein neues Nutzergleichgewicht einstellen. Die folgenden Punkte legen dies dar:

- *Nicht wiederkehrende Störung besteht kurzfristig*
Rausch u. a. [166] argumentieren, dass eine nicht wiederkehrende oder spontane Störung einen Umverteilungsprozess der Verkehrsströme einleitet, der nach einer gewissen Zeit in einem anderen Gleichgewichtszustand resultieren würde. Da nicht wiederkehrende Störungen jedoch nur kurzfristig auf der Skala von Minuten bis Stunden existieren, stellt sich ein an diese Störung angepasstes Nutzergleichgewicht praktisch nicht ein, vgl. auch Li [123].
- *Fehlende Kenntnisse für die Ursache der Störung*
Kurz nachdem die Störung eingetreten ist und noch keine Informationsverbreitung stattgefunden hat, ist die Ursache der Staubbildung für den Großteil der betroffenen Autofahrer völlig unklar. Das Auftreten von Störfällen unterliegt keinem besonderen Muster und ist für viele Autofahrer unvorhergesehen. Die Routenwahl der Autofahrer ist folglich von einer starken Unsicherheit bezüglich der Wahrnehmung netzweiter Verkehrsbedingungen geprägt, da ohne weitere Informationsquellen nur das lokale Verkehrsgeschehen durch Beobachtungen berücksichtigt werden kann. In der Sprache des Wirtschaftlers: Es herrscht keine Markttransparenz.
- *Reisezeiten auf den Routen*
Die Forderung identischer Reisezeiten auf allen Routen in einem deterministischen Nutzergleichgewicht ist praktisch nicht erfüllt, wenn sich eine spontane Störung in Staubbildung auswirkt. Auch ein stochastisches Nutzergleichgewicht kann nicht gegeben sein, da aufgrund der Staubbildung auf Routen der betroffenen Autofahrer die wahrgenommene Reisezeit einer alternativen Route unter dem Einfluss der Störung mit hoher

Wahrscheinlichkeit geringer ist. Folglich können die (wahrgenommen) Reisezeiten der ehemals besten, jedoch von der Störung betroffenen, Route im Störfall durchaus höher sein als die nicht betroffener Alternativrouten.

- *Zeitersparnis durch (einseitiges) Wechseln der Route*

Unter einer nicht wiederkehrenden Störung mit Staubbildung kann die ehemals beste Route plötzlich schlechter sein als zur Verfügung stehende Alternativen. Selbst wenn betroffene Autofahrer in dieser Situation einseitig ihre Route wechseln, können sie ihre Reisekosten verbessern. Die Verfügbarkeit von Umleitungsrouten im Netzwerk ist sogar ein charakteristisches Merkmal wiederkehrender Störungen [73]. Viele Ansätze zur Reduzierung störfallbedingter Staubbildung basieren deshalb auf der Annahme, dass ein Teil der Autofahrer eine alternative Route wählt und so den gestörten und verstaute Bereich umfährt.

Auch andere Autoren argumentieren, dass Modelle, die auf Gleichgewichtsannahmen basieren, die hohe Variabilität des städtischen Verkehrs auf einer kurzen Zeitskala nicht vollständig berücksichtigen können, vgl. dazu Referenzen [163, 20, 19]. Dabei ist anzumerken, dass die hohe Variabilität städtischen Verkehrs insbesondere auf nicht wiederkehrende Störungen zurückzuführen ist, die raumzeitlich völlig spontan eintreten und sich in Staubbildung auswirken können. Für eine realistische Berücksichtigung unvorhergesehener Ereignisse in der Routenwahlmodellierung städtischen Verkehrs sind demnach neue Lösungsansätze gefordert. Im nächsten Kapitel wird ein ereignisorientiertes Routenwahlmodell entwickelt, das die lokalen Auswirkungen unvorhergesehener Ereignisse im Entscheidungsprozess explizit berücksichtigt.

2.6 Zusammenfassung und Schlüsselherausforderungen

Routenwahlmodelle werden oft im Kern von Verkehrsumlegungsverfahren angewendet und repräsentieren die verhaltensbezogenen Annahmen der modellierten Autofahrer. Ihre Hauptaufgabe ist die *Aufteilung* von Verkehrsströmen auf die Routen einer OD-Relation unter gegebenen Charakteristika (z. B. Reisezeit). In der Literatur sind stochastische Routenwahlmodelle sehr verbreitet. In ihnen wird der wahre Nutzen als Zufallsvariable modelliert, die berücksichtigt, dass nicht alle Faktoren der Entscheidung bekannt oder beobachtbar sind. Ein Großteil stochastischer Routenwahlmodelle basiert auf dem Rahmenwerk diskreter Wahlmodelle. Für eine realistische Routenwahlmodellierung müssen Lösungsansätze für wichtige Schlüsselherausforderungen gefunden werden:

- *Generierung einer sinnvollen Alternativenmenge*

Die kombinatorische Vielzahl an möglichen Routen in städtischen Netzwerken erfordert Techniken zur geeigneten Spezifizierung von Alternativenmengen. Grundsätzlich lässt sich dabei zwischen Methoden, die Pfade *explizit* suchen und zu einer Alternativenmenge zusammenfassen und Methoden, die Pfade *implizit* durch die Wahl von nächsten Kanten an Entscheidungspunkten konstituieren, unterscheiden.

- *Berücksichtigung überlappender Routen im Entscheidungsprozess*

Überlappende Routen dürfen im Entscheidungsprozess nicht als vollwertige, voneinander unabhängige, Alternativen betrachtet werden, da es sonst zu unrealistischen Auswahlwahrscheinlichkeiten kommt. Abhängig vom Maß der Überlappung besteht eine Korrelation zwischen den überlappenden Routen, die folglich im Entscheidungsprozess berücksichtigt werden muss. Im Wesentlichen werden dazu die folgenden Ansätze verfolgt:

- Korrelationen überlappender Routen werden im deterministischen Nutzen berücksichtigt (z. B. CL-, PSL- und PSW-Modell)
- Komplexere Struktur der Alternativenmenge durch eine Zusammenfassung ähnlicher Alternativen in sog. Nester (Modelle der GEV-Klasse)
- Explizite Berücksichtigung der Korrelation durch normalverteilten Zufallsnutzen mit geeignet spezifizierter Kovarianzmatrix (MNP-Modell)

Die ersten beiden Ansätze erhalten die einfache Struktur eines MNL-Modells mit analytisch berechenbaren Auswahlwahrscheinlichkeiten, während der letzte Ansatz nur im binomialen Fall analytische Auswahlwahrscheinlichkeiten liefern kann und für den multinomialen Fall rechnergestützte Ansätze erfordert.

- *Berücksichtigung variabler Verkehrsbedingungen*

In städtischen Straßennetzwerken sind die Verkehrsbedingungen von einer hohen Variabilität geprägt, die größtenteils auf wiederkehrende und nicht wiederkehrende Störungen zurückzuführen ist. Während wiederkehrende Störungen mit bisherigen Modellen beschrieben werden können, besteht für die Routenwahlmodellierung unter dem Einfluss nicht wiederkehrender, unvorhergesehener Störungen der Bedarf eines Routenwahlmodells, in dem modellierte Autofahrer lokale Beobachtungen der Auswirkungen explizit und realistisch im Entscheidungsprozess einbeziehen. Ein solcher Ansatz ist der Gegenstand des nächsten Kapitels.

3 Das ereignisorientierte Routenwahlmodell

In diesem Kapitel wird das ereignisorientierte Routenwahlmodell entwickelt. Es beschreibt das Routenwahlverhalten individueller Autofahrer im ereignisreichen Stadtverkehr. Spontane Störungen, deren Auftreten vor Fahrtantritt nicht bekannt war, werden explizit in der Routenwahl berücksichtigt. Der Routenwahlentscheidung liegen dabei einerseits Beobachtungen lokaler Verkehrsbedingungen und andererseits Annahmen über den netzweiten Verkehrszustand zugrunde. In unregelmäßigen Zeitabständen können Entscheidungen revidiert werden, sodass Routenwechsel *en route* ermöglicht werden. Das Rahmenwerk des vorgeschlagenen Routenwahlmodells stellt die diskrete Wahltheorie dar, d. h. das ereignisorientierte Routenwahlmodell ist stochastisch. Entscheidungen werden mikroskopisch *direkt* simuliert, sodass die Berechnung von Auswahlwahrscheinlichkeiten nicht erforderlich ist. Im Entscheidungsprozess wird stattdessen der Nutzen jeder Alternative berechnet und anschließend die Beste ausgewählt. Die Zufallsnutzen der Routen sind normalverteilt und so spezifiziert, dass Routenüberlappungen automatisch in den Entscheidungen berücksichtigt werden. Die Routenwahlmenge, aus der ein individueller Autofahrer auswählt, besteht aus allen möglichen Abbiegerichtungen am nächstfolgenden Knotenpunkt, denen sich jeweils der kürzeste (allgemeiner: schnellste) Pfad bis zum Ziel des Autofahrers anschließt. Nach einer detaillierten Formulierung des Modells werden einfache Untersuchungen für unabhängige, überlappende und gestörte Routen durchgeführt.

3.1 Motivation

Der Verkehrsablauf in städtischen Straßennetzwerken ist *ereignisreich* und lässt sich somit nicht im Sinne der Verkehrsplanung voraussehen. Viele Staus rühren daher, dass Ereignisse eintreten, die für die Autofahrer im Netzwerk nicht vorhersehbar waren. Die Berücksichtigung solcher Verkehrsereignisse im Entscheidungsprozess von Autofahrern ist daher eine bedeutende Herausforderung der Routenwahlmodellierung. Dabei erfordern moderne und immer komplexere Anwendungen der Verkehrstelematik (ITS) spezifische Modelle für eine realistische, rechnergestützte Bewertung. Dabei nimmt das verwendete Routenwahlmodell eine Schlüsselposition ein. In klassischen Umlegungsmodellen können spontane Verkehrsereignisse nicht realistisch im Routenwahlverhalten der Autofahrer abgebildet werden. Sie unterliegen der Annahme eines Nutzergleichgewichts, in dem Autofahrer Kenntnisse über Störungen bereits besitzen oder instantan nach Eintreten erwerben. In diesem Kapitel wird daher ein ereignisorientiertes Routenwahlmodell entwickelt, das die Auswirkungen spontaner Verkehrsereignisse explizit im Entscheidungsprozess berücksichtigen kann und damit ein breites Anwendungsspektrum für

die Verkehrstelematik bietet. Es unterliegt dabei keinen Gleichgewichtsannahmen und ist für den Einsatz in mikroskopischen Simulationsumgebungen bestimmt.

3.2 Formulierung des Modells

Das ereignisorientierte Routenwahlmodell simuliert den Entscheidungsprozess individueller Autofahrer direkt und berücksichtigt dabei die lokalen, beobachtbaren Auswirkungen von Verkehrseignissen explizit in der Routenwahl. Dabei wird vorausgesetzt, dass Autofahrer weder Kenntnisse über das Eintreten der Ereignisse besitzen noch instantan erwerben. Lediglich der Verkehrszustand auf der aktuellen Kante kann durch Beobachtungen eines Autofahrers nicht-trivial abgeleitet werden, während die Verkehrsbedingungen auf nicht sichtbaren Kanten als *ungestört* angenommen werden. Auf diese Weise können modellierte Autofahrer *en route* flexibel auf Änderungen der Verkehrsbedingungen durch eine Anpassung der Routenwahl reagieren.

3.2.1 Anforderungen

- *Berücksichtigung lokaler Verkehrsbedingungen im Entscheidungsprozess*
Die Beobachtung lokaler Verkehrsbedingungen ist maßgebend für eine Routenentscheidung, die unter dem Einfluss eines unvorhergesehenen Verkehrseignisses steht, für das zunächst keine weiteren Informationen zur Verfügung stehen. In dieser Art wird der Entscheidungsprozess von lokalen „Rückmeldungen“ benutzter Routen getrieben [41, 9]. Obwohl das Auftreten eines Verkehrseignisses bei Fahrtantritt gar nicht erwartet wurde, bildet das ereignisorientierte Routenwahlmodell dennoch eine entsprechende Reaktion eines betroffenen Autofahrers ab, die sich aus lokalen Beobachtungen ergibt, die in unregelmäßigen Abständen wiederholt in den Entscheidungsprozessen berücksichtigt werden. Entscheidungen können somit ständig revidiert werden.
- *Angemessene Spezifikation der Routenwahlmenge*
Die Routenwahlmenge des vorgeschlagenen Modells soll dem Sachverhalt unvorhersehbarer Verkehrseignisse gerecht werden. Neben der aktuell gewählten Route stehen in der Regel Alternativrouten zur Verfügung, auf die ausgewichen werden kann. Die Routenmenge soll dabei jedoch einfach gehalten werden und nicht *alle* möglichen Routen bis zum gewünschten Ziel umfassen.
- *Berücksichtigung von Routenüberlappungen*
Die Berücksichtigung von Routenüberlappungen im Entscheidungsprozess ist für eine realistische Routenwahlmodellierung zu fordern. Dies wird im ereignisorientierten Routenwahlmodell mit einer entsprechenden Formulierung für die Zufallsnutzen der Routen gelöst.

- *Mikroskopische Routenwahl*

Die Routenwahl wird für individuelle Autofahrer direkt simuliert. Dies reflektiert einerseits, dass unterschiedliche Autofahrer unterschiedliche Wahrnehmungen der Charakteristika der Routen und auch unterschiedliche Präferenzen haben. Gleichzeitig ist zu fordern, dass die Zeitpunkte der Entscheidungsprozesse eines Autofahrers während der Fahrt unabhängig von denen anderer Autofahrer sind. Jeder Autofahrer soll ferner eine eigene dynamische Alternativenmenge besitzen.

- *Diskretes Wahlmodell*

Das Rahmenwerk für das ereignisorientierte Routenwahlmodell liefert die diskrete Wahltheorie. Im Gegensatz zu typischen Modellen der diskreten Wahltheorie werden jedoch keine Auswahlwahrscheinlichkeiten berechnet, sondern der Entscheidungsprozess eines individuellen Autofahrers direkt simuliert, wobei diejenige Route mit dem höchsten Nutzen ausgewählt wird. Der Zufallsnutzen wird dabei mit einer effizienten Abbildung rechnergestützt für jeden Autofahrer erzeugt und gehorcht einer Normalverteilung, d. h. das ereignisorientierte Routenwahlmodell adaptiert die Struktur eines MNP-Modells (siehe Abschnitt 2.1.2).

3.2.2 Die Routenwahlmenge eines individuellen Autofahrers

In Stadtstraßennetzwerken steht die Routenwahlmodellierung vor der Herausforderung, aus der hohen Anzahl prinzipiell möglicher Pfade eine geeignete Teilmenge für die Entscheidungsmodellierung zu extrahieren.¹ Im vorgeschlagenen ereignisorientierten Routenwahlmodell ergibt sich die Alternativenmenge \mathcal{R}_n^k eines Autofahrers n direkt aus der Anzahl aller *möglichen* Abbiegerichtungen am aktuell nächstfolgenden Knotenpunkt k . Eine Abbiegerichtung ist genau dann möglich, falls sich von der ausgehenden Kante, die zu dieser Abbiegerichtung korrespondiert, ein Pfad finden lässt, der zum gewünschten Ziel des Autofahrers führt. In dieser Art wird die Anzahl der Elemente der Alternativenmenge typischerweise auf drei bis vier (z. B. Kehrtwenden) beschränkt. An jede mögliche Abbiegerichtung am folgenden Knoten schließt sich der kürzeste Pfad (allgemeiner: schnellster oder „billigster“ Pfad)² bis zum Zielknoten an. Zur Bestimmung der schnellsten Pfade wird dabei ein gewichteter, statischer, Graph für das untersuchte Netzwerk und ein Algorithmus zur Suche kürzester (bezogen auf die Kantengewichte) Pfade erforderlich. Für die Kantengewichte können beispielsweise Längen und Reisezeiten aus dem ungestörten Netzwerk herangezogen werden. Die Berechnung der kürzesten Pfade findet vor dem Simulationslauf einmalig statt. Dafür kann der Algorithmus von Floyd und Warshall [77, 203] verwendet werden, der für jedes *Knotenpaar* im gewichteten Graph den kürzesten Pfad berechnet; andere Algorithmen sind ebenso verwendbar. Nach der

¹Für Übersicht einiger Lösungsansätze vgl. auch Abschnitt 2.3.

²Im Zusammenhang mit der numerischen Berechnung der Pfade wird der Begriff „kürzester Pfad“ weiterhin verwendet. Da unterschiedliche Kantengewichte zur Suche eines kürzesten Pfades herangezogen werden können, wird im Folgenden allgemeiner der Begriff des schnellsten Pfades oder der schnellsten Route verwendet.

Berechnung werden die extrahierten Pfade schließlich gespeichert und während der Laufzeit zur Konstitution der Alternativenmenge der Autofahrer dynamisch zusammengestellt.

Im ereignisorientierten Routenwahlmodell wird die Routenmenge eines Autofahrers bei Einfahrt in das Netzwerk zunächst konstituiert. Nach jedem Durchgang eines Knotens wird sie aktualisiert und bezieht sich auf den dann folgenden Knoten. Die aktuell vom Autofahrer gewählte Route bleibt dabei stets in der Alternativenmenge enthalten (Konsistenzbedingung). Abb. 3.1 stellt den Sachverhalt grafisch dar. Die Spezifizierung der Routenmenge im ereignisorientierten Routenwahlmodell impliziert *nicht* notwendigerweise, dass Autofahrer stets *insgesamt* schnellste Routen ihrer OD-Relationen wählen. Bei der Einfahrt ins Netzwerk stehen dem modellierten Autofahrer i . Allg. mehrere Alternativen (abhängig von den möglichen Abbiegebeziehungen am nächstfolgenden Knoten) zur Verfügung, von denen die insgesamt schnellste Route aufgrund des Zufallsnutzens der betrachteten Routen nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit gewählt wird. Ferner können sich *en route* Routenwechsel durch Verkehrsereignisse ergeben, sodass *der* schnellste Pfad der OD-Relation, falls ursprünglich gewählt, spätestens dann für eine längere oder langsamere Route verlassen³ wird.

Die Routenwahlmenge des vorgeschlagenen Modells ist *einfach*, da sie aus der Vielzahl aller möglichen Pfade im Netzwerk diejenigen zusammenfasst, die den lokal möglichen Abbiegerichtungen eines einzelnen Autofahrers am nächstfolgenden Knotenpunkt entsprechen. Ferner ist sie *effizient*, da sich jeder möglichen Abbiegerichtung am nächstfolgenden Knoten jeweils ein statischer, schnellster Pfad zum Ziel des modellierten Autofahrers anschließt, der noch vor dem Simulationsablauf berechnet wird. Die Routenwahlmenge eines Autofahrers ist jedoch *dynamisch*, da sie aktualisiert wird, sobald der Autofahrer den nächstfolgenden Knoten passiert hat.

3.2.3 Der individuelle Entscheidungsprozess

Das ereignisorientierte Routenwahlmodell basiert auf dem Rahmenwerk der diskreten Wahltheorie.⁴ Es wird ein mikroskopischer Ansatz verfolgt, in dem der Entscheidungsprozess von einem individuellen Autofahrer n *explizit* simuliert wird. Dabei wird der tatsächliche Nutzen $U_{nr}(t)$ einer Route r aus der für Autofahrer n zur Verfügung stehenden Routenmenge \mathcal{R}_n^k zu einem Zeitpunkt t *direkt* evaluiert:

$$U_{nr}(t) = V_{nr}(t) + \varepsilon_{nr} = \sum_{\ell \in \mathcal{L}_n^+(r)} (V_\ell(t) + \varepsilon_{n\ell}) \quad \text{für alle } r \in \mathcal{R}_n^k. \quad (3.2.1)$$

Dabei ist $V_{nr}(t)$ der deterministische und ε_{nr} der stochastische Nutzen, den Autofahrer n für Route r wahrnimmt. Beide Nutzenanteile werden in Einheiten der Zeit gemessen. Der

³Selbstverständlich passiert dies nur dann, wenn der Autofahrer für die längere oder langsamere Route einen höheren Nutzen wahrnimmt als für die ursprüngliche Route, beispielsweise aufgrund von Staubbildung.

⁴Für eine kurze Einführung in die diskrete Wahltheorie wird auf Kapitel 2 verwiesen.

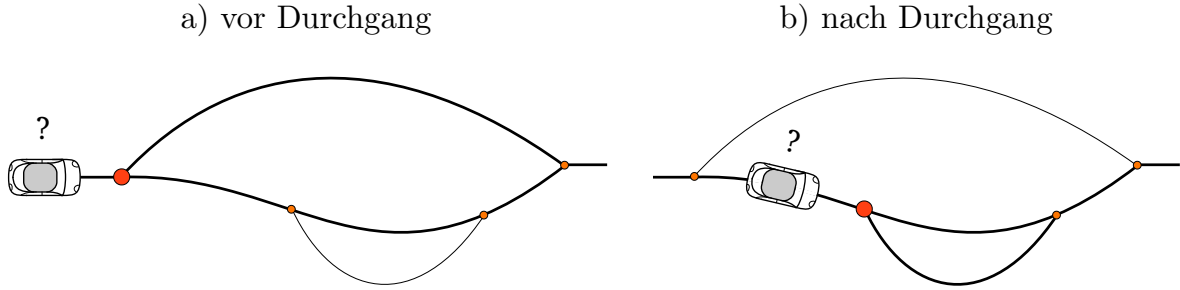


Abbildung 3.1: Die aktuelle Routenwahlmenge eines Autofahrers setzt sich aus den möglichen Abbiegerichtungen am nächstfolgenden Knoten zusammen, an die sich jeweils ein vollständiger, schnellster Pfad anschließt. In dieser Weise korrespondiert jede *lokal* mögliche Abbiegerichtung am nächsten Knoten mit einer Routenalternative. (a) Die fett markierten Routen konstituieren die aktuelle Routenmenge des Autofahrers. Der nächstfolgende Knoten weist zwei mögliche Abbiegerichtungen auf, folglich stehen dem Autofahrer zwei Alternativen zur Verfügung. (b) Die Routenmenge wird aktualisiert, sobald der Autofahrer den nächsten Knoten passiert. Nun sind die möglichen Abbiegerichtungen an diesem Knoten maßgeblich für die Konstitution der aktuellen Routenwahlmenge.

Zufallsnutzen setzt sich aus einzelnen, *normalverteilten*, Kanten-Zufallsnutzen zusammen:

$$\varepsilon_{nr} = \sum_{\ell \in \mathcal{L}_n^+(r)} \varepsilon_{n\ell} \quad \text{mit} \quad \varepsilon_{n\ell} \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2). \quad (3.2.2)$$

Die Varianz der Normalverteilung σ^2 skaliert dabei mit der Länge von Kante ℓ . Der Zufallsnutzen $\varepsilon_{n\ell}$ wird für jede Einheit aus Autofahrer n und Kante ℓ mit einer effizienten Abbildung, die im Abschnitt 3.2.5 eingeführt wird, numerisch generiert. Ferner umfasst die Menge $\mathcal{L}_n^+(r)$ alle von Autofahrer n noch nicht vollständig überfahrenen Kanten ℓ von Route r bis zum gewünschten Ziel.

Der modellierte Autofahrer n unterliegt dem Paradigma des *homo oeconomicus* und maximiert demnach seinen individuellen Nutzen. Nach Durchlauf der Routenbewertungen (s. Gl. (3.2.1)) wird daher diejenige Route q ausgewählt, für die zum Zeitpunkt t des Entscheidungsprozesses gilt, dass

$$U_{nq}(t) > U_{nr}(t) \quad \text{für alle } r \in \mathcal{R}_n^k, \text{ wobei } q \neq r \text{ und } t = \text{const.} \quad (3.2.3)$$

Der Durchlauf eines Entscheidungsprozesses führt stets zur eindeutigen Auswahl einer Route. Das Problem analytisch nicht geschlossener Formen für die Berechnung der Auswahlwahrscheinlichkeiten im MNP-Modell ist für das ereignisorientierte Routenwahlmodell somit nicht relevant.

Routenrevisionen

Entscheidungsprozesse werden von allen Autofahrern bis zum Erreichen des Ziels unregelmäßig, *en route*, wiederholt, sodass lokale Beobachtungen von Auswirkungen unvorhergesehener Verkehrereignisse in den Routenwahlentscheidungen ständig berücksichtigt werden können. Die Zeitintervalle T zwischen zwei aufeinanderfolgenden Entscheidungsprozessen eines Autofahrers sind unabhängig und identisch exponentialverteilt um einen Mittelwert τ :

$$\text{Prob}(T \leq t) = 1 - e^{-t/\tau}. \quad (3.2.4)$$

Dabei ist T unkorreliert bezüglich anderer Autofahrer und bereits vergangener Zeitintervalle. Der Mittelwert τ der Verteilung ist ein Modellparameter, die mittlere Revisionsrate, die beispielsweise Werte im Bereich von 10-30s annehmen kann. Alternativ kann das Durchlaufen eines Entscheidungsprozesses auch an speziell ausgezeichnete Entscheidungspunkte im Netzwerk gebunden sein. Dies kann sinnvoll sein, falls der Abstand zwischen den Knotenpunkten des Netzwerks sehr lang ist, sodass ein Entscheidungsprozess mitten auf der verbindenden Kante nicht notwendig oder nicht sinnvoll ist. Es ist zusätzlich denkbar, bei Eintreten von Ereignissen (z. B. Staubildung) Entscheidungsprozesse von betroffenen Autofahrern auszulösen (Entscheidungsereignisse). Obwohl ein Entscheidungsprozess stets zur Wahl einer Route führt, folgt aus einem erneuten Durchlauf nicht notwendigerweise ein *Wechsel* der Route. Dieser wird nur vollzogen, falls die Bedingung in Gl. (3.2.3) für eine andere Route erfüllt ist.

3.2.4 Deterministische Nutzenfunktion

Der deterministische Nutzen V_{nr} eines Autofahrers n für Route r wird in Einheiten der Zeit gemessen. Dabei *antizipiert* der Autofahrer eine erwartete Reisezeit $T_{nr} = \sum_{\mathcal{L}_n^+(r)} T_\ell$ für alle noch verbleibenden Kanten $\mathcal{L}_n^+(r)$ der Route r , woraus sich der deterministische Nutzen in der Form $V_{nr} = -\sum_{\mathcal{L}_n^+(r)} T_\ell = -T_{nr}$ ergibt.⁵ Der modellierte Autofahrer n unterscheidet ferner zwischen seiner aktuellen Kante ℓ_{cur} und allen sich anschließenden Kanten $\ell \in \mathcal{L}_n(r)$ von Route r , die der Autofahrer noch *nicht* befahren hat. Folgende Notation sei daher vereinbart: Die Kantenmenge $\mathcal{L}_n(r)$ von Autofahrer n umfasst alle noch nicht befahrenen Kanten, während die Kantenmenge $\mathcal{L}_n^+(r)$ zusätzlich die bereits befahrene, aktuelle Kante ℓ_{cur} des Autofahrers einschließt.

Lokale Verkehrsbeobachtungen

Wenn unvorhergesehene Ereignisse eintreten, spielen lokale Verkehrsbedingungen eine wichtige Rolle. Ihre Beobachtung stellt die einzige nicht-triviale Informationsquelle dar, die Autofahrern in einem solchen Fall grundsätzlich zur Verfügung steht. Im ereignisorientierten Routenwahlmodell wird davon ausgegangen, dass ein modellierter Autofahrer n die lokale

⁵Die Formulierung des deterministischen Nutzens einer Kante kann ebenso parametrisiert erfolgen, so dass $V_{n\ell} = -\beta T_\ell$ ist, wobei der Modellparameter $\beta > 0$ die Zeitsensitivität des Autofahrers reflektiert.

Verkehrssituation von seiner Position $x_{\ell_{\text{cur}}}^{nr}(t)$ auf der aktuellen Kante bis zum nächstfolgenden Knoten beobachten und zum Zeitpunkt t auswerten kann. Diese Annahme ist für städtische Straßennetzwerke einerseits gerechtfertigt und reflektiert andererseits auch eine natürliche Restriktion an die Sichtweite des Autofahrers. Dies impliziert jedoch auch, dass beliebig weit entfernte Verkehrssituationen nicht beobachtet werden können. Eine Beobachtung der lokalen Verkehrssituation beginnt in dem Moment, in dem sie für den modellierten Autofahrer sichtbar ist.⁶ Aus dieser realistischen Annahme ergibt sich implizit eine Beobachtungszeit, d. h. die Gesamtdauer einer Beobachtung der lokalen Verkehrssituation, während der der Autofahrer Informationen akquirieren und schließlich zum Zeitpunkt t des Entscheidungsprozesses auswerten kann.

Die Beobachtungen werden auf der aktuellen Kante für jede mögliche Abbiegerichtung vorgenommen, die der Autofahrer wählen kann. Dabei sei vereinbart, dass für die Evaluation des deterministischen Nutzens eine mögliche Abbiegerichtung am nächstfolgenden Knoten direkt mit der anschließend schnellsten Route r korrespondiert. Die von Autofahrer n antizipierte Reisezeit zum Zeitpunkt t des Entscheidungsprozesses für die aktuelle Kante $T_{\ell_{\text{cur}}}^{nr}(t)$ und für Abbiegerichtung (Route) r ergibt sich als eine Funktion möglicher beobachtbarer und bewertbarer lokaler Größen gemäß

$$T_{\ell_{\text{cur}}}^{nr}(t) = T_{\ell_{\text{cur}}}(t, x_{\ell_{\text{cur}}}^{nr}(t), d_{\text{que}}^{nr}(t), S^{nr}(t), \dots), \quad (3.2.5)$$

wobei $d_{\text{que}}^{nr}(t)$ die Warteschlangenlänge und $S^{nr}(t)$ die Signalisierung der Abbiegespur von Route r auf der aktuellen Kante zum Auswertungszeitpunkt t ist. Da der Nutzen im ereignisorientierten Routenwahlmodell in Zeiteinheiten gemessen wird, müssen aus allen betrachteten Größen antizipierte Wartezeiten abgeleitet werden. Beispielsweise könnte aus der Warteschlangenlänge eine Bedienzeit geschätzt werden, die sich aus einer bekannten oder ebenfalls geschätzten Bedienrate ergeben würde. Dabei wird $T_{\ell_{\text{cur}}}^{nr}(t)$ als *ereignisorientierter Anteil* (Ereignisanteil) des deterministischen Nutzens bezeichnet, da in ihm die lokalen Auswirkungen von Verkehrsereignissen reflektiert werden. Er gibt die vom Fahrer erwartete Reisezeit bis zum Erreichen des nächsten Knotens k in Abhängigkeit von der Abbiegerichtung wieder.

Reisezeitschätzung für noch nicht befahrene Kanten der Route

Neben dem Ereignisanteil, der aus lokalen Beobachtungen eines modellierten Autofahrers abgeleitet wird, schätzt der Autofahrer n die Reisezeit für alle noch nicht befahrenen Kanten $\ell \in \mathcal{L}_n(r)$ von Route r . Da diese Kanten nicht oder nur zu einem Teil einsehbar sind, können Informationen über die dortigen Verkehrsbedingungen in der Regel nicht aus Beobachtungen abgeleitet werden. Stattdessen trifft der modellierte Autofahrer *Annahmen* über die Verkehrsbedingungen auf diesen Kanten, die er beispielsweise aus dem (bekannten) ungestörten Netzwerk oder aus typischen historischen Reisezeiten ableitet. Diese können auch

⁶Hier könnte beispielsweise eine maximale Sichtweite von 100 m angenommen werden.

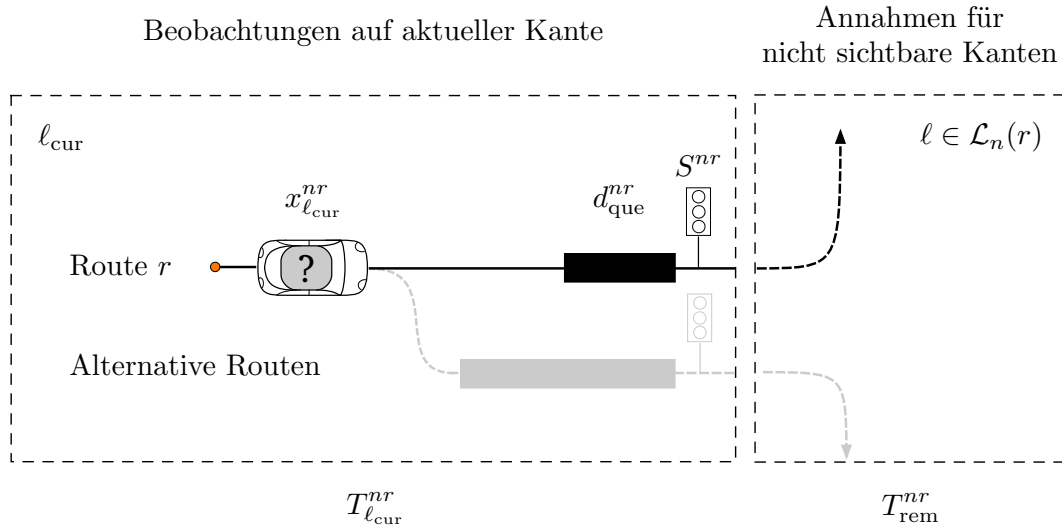


Abbildung 3.2: Der deterministische Nutzen eines Autofahrers für eine Route setzt sich aus zwei Komponenten zusammen: Lokal beobachtbare Verkehrsbedingungen (z. B. aktuelle Position $x_{l_{cur}}^{nr}$, die Länge der Warteschlange d_{que}^{nr} oder die Signalisierung S^r) finden Eingang in die Antizipation der erwarteten Reisezeit $T_{l_{cur}}^{nr}$ für die *aktuelle* Kante l_{cur} . Die Schätzung wird auf der aktuellen Kante für jede mögliche Abbiegerichtung am nächstfolgenden Knoten durchgeführt. Für alle noch nicht befahrenen, verbleibenden Kanten der Routen schätzt der Autofahrer eine auf Annahmen basierende Reisezeit ab. Die Zeitabhängigkeit der Größen wurde hier nicht notiert.

wiederkehrende Staubildungen berücksichtigen. Allgemein ergibt sich die Antizipation der Reisezeit der restlichen Route r zum Zeitpunkt t des Entscheidungsprozesses gemäß

$$T_{rem}^{nr}(t) = \sum_{\ell \in \mathcal{L}_n(r)} T_{\ell}(L_{\ell}, Q_{\ell}(t), \dots). \quad (3.2.6)$$

Dabei ist $T_{\ell}(L_{\ell}, Q_{\ell}(t), \dots)$ eine generische Funktion für die Abschätzung der erwarteten Reisezeit auf Kante ℓ . Die Pfade r und deren Kantenmengen $\mathcal{L}_n(r)$ ergeben sich direkt aus dem gewichteten, statischen, Graphen des Netzwerks. Falls die Kantengewichte nicht in Einheiten der Zeit vorliegen (z. B. als Länge L_{ℓ}), müssen sie geeignet transformiert werden. Zusätzlich können weitere Faktoren zur Laufzeit der Simulation berücksichtigt werden, z. B. die aktuellen Verkehrsflüsse $Q_{\ell}(t)$ auf den Kanten der Route r .

Bevorzugung der aktuellen Route

Um häufige und allzu schnelle Routenwechsel zu vermeiden, wird dem deterministischen Nutzen der aktuell gewählten Route q eine alternativenspezifische Konstante V_0 hinzugefügt. In Übereinstimmung mit dem Ereignisanteil $T_{l_{cur}}^{nq}$ und der geschätzten Reisezeit T_{rem}^{nq} für den verbleibenden Rest von Route q wird V_0 in Einheiten der Zeit gemessen. Sie ist ein weiterer Parameter des Modells, der in einem Bereich von beispielsweise 1-5 min gewählt werden kann.

Aus der Sicht eines modellierten Autofahrers repräsentiert V_0 einen empfundenen Zeitvorteil (Bonus) der gewählten Route gegenüber allen anderen möglichen Alternativen.

Zusammenfassung des deterministischen Nutzens

Zusammenfassend ergibt der deterministische Nutzen für Route r zum Zeitpunkt t des Entscheidungsprozesses aus der Sicht eines Autofahrers n die allgemeine Vorschrift

$$\begin{aligned} V_{nr}(t) &= -T_{nr}(t) = -T_{\ell_{\text{cur}}}^{nr}(t) - T_{\text{rem}}^{nr}(t) + \delta_{rq} V_0 \\ &= -T_{\ell_{\text{cur}}}(x_{\ell_{\text{cur}}}^{nr}(t), d_{\text{que}}^r(t), S^r(t), \dots) - \left(\sum_{\ell \in \mathcal{L}_n(r)} T_{\ell}(L_{\ell}, Q_{\ell}(t), \dots) \right) + \delta_{rq} V_0, \end{aligned} \quad (3.2.7)$$

wobei $\delta_{rq} = 1$, wenn $r = q$ und $\delta_{rq} = 0$ sonst. Der deterministische Nutzen des ereignisorientierten Routenwahlmodells entspricht somit der negativen erwarteten Reisezeit des Autofahrers für den Restweg von Route r . Eine grafische Darstellung der deterministischen Nutzenfunktion ist in Abb. 3.2 zu finden. Die Implementierung des ereignisorientierten Routenwahlmodells in Verkehrsflusssimulationen erfordert eine geeignete Spezifizierung der deterministischen Nutzenanteile $T_{\ell_{\text{cur}}}^{nr}$ und T_{rem}^{nr} . Die generische Formulierung des deterministischen Nutzens in Gl. (3.2.7) bedeutet dabei eine hohe Flexibilität des Routenwahlmodells mit einem breiten Anwendungsspektrum. In Kapitel 5 wird eine mögliche Anwendung des ereignisorientierten Routenwahlmodells im Kontext von Verkehrsstörfällen vorgestellt.

3.2.5 Spezifikation des Zufallsnutzens

Der Zufallsnutzen reflektiert die mit der deterministischen Nutzenfunktion nicht erfassten Faktoren der Routenwahl. Im ereignisorientierten Routenwahlmodell wird der Zufallsnutzen, ebenso wie der deterministische Nutzen, in Einheiten der Zeit gemessen. Er gehorcht dabei einer Normalverteilung; bezogen auf die Struktur des diskreten Wahlmodells wird demnach ein multinomiales Probit-Modell (vgl. Abschnitt 2.1.2) adaptiert.

Im ereignisorientierten Routenwahlmodell ist der Zufallsnutzen für *jede mögliche* Einheit aus einem Autofahrer und einer Kante im Netzwerk definiert. Dabei wird für Autofahrer n ein konstanter Zufallsnutzen ε_{ℓ}^n für jede Kante ℓ im Netzwerk im Entscheidungsprozess berücksichtigt, der gemäß

$$\varepsilon_{\ell}^n \sim \mathcal{N}\left(0, \sigma_{\ell}^2\right), \quad \sigma_{\ell}^2 = \lambda L_{\ell} \quad (3.2.8)$$

definiert ist. Der Erwartungswert des Zufallsnutzens wird auf $E(\varepsilon_{\ell}^n) = 0$ festgelegt, während die Varianz des Zufallsnutzens proportional zur Kantenlänge L_{ℓ} ist. Dabei stellt λ eine *Varianzdichte* dar, die gleichzeitig ein Modellparameter ist. Sie repräsentiert die Dichte von exogenen Faktoren, die dem Zufallsnutzen für diese Kante zu- oder abträglich sind. Dazu zählen beispielsweise Bäckereien, Tankstellen oder andere POIs, die für den modellierten Autofahrer attraktiv sein können, aber auch die persönlichen Präferenzen individueller Autofahrer. Da

der Zufallsnutzen in Einheiten der Zeit gemessen wird, muss die Varianzdichte λ in Einheiten von beispielsweise min^2/km gewählt werden. Plausible Parameterwerte können sich durch die Annahme ergeben, dass die Unsicherheiten des Modellierers über eine Entfernung von 10 km zu einer Standardabweichung von 5-10 min führen, sodass sich ein Bereich $\lambda = 2,5\text{-}10 \text{ min}^2/\text{km}$ ergibt.

Die Zufallsnutzen der Autofahrer-Kante-Einheiten bleiben über die Dauer der Fahrt des Autofahrers konstant. Dies reflektiert die Tatsache, dass Tankstellen, Bäckereien oder andere POIs ihren Ort nicht ändern, zumindest nicht auf der Zeitskala eines typischen Weges im Stadtstraßennetzwerk. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass die persönlichen Präferenzen der Autofahrer während der Fahrt näherungsweise unverändert bleiben. Zwischen den Zufallsnutzen der Autofahrer-Kante-Einheiten besteht *keine* Korrelation bezüglich anderer Autofahrer oder Kanten.

Zur Sicherstellung einer schnellen Simulation lässt sich die Generierung der Zufallsnutzen für Autofahrer-Kante-Einheiten rechnergestützt mithilfe einer effizienten Abbildung realisieren. Dabei werden eindeutige Identifikatoren der Autofahrer und Kanten im Netzwerk in der Simulation in folgender Weise verknüpft:

$$(\text{id}_{\text{Autofahrer } n}, \text{id}_{\text{Kante } \ell}) \rightarrow \varepsilon_{\ell}^n \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{\ell}^2).$$

Es ist jedoch noch eine Methode notwendig, um gleichverteilte Zufallszahlen⁷ in normalverteilte Zufallszahlen zu transformieren [z. B. 161, S. 340 ff.]

3.3 Modellparameter und Eigenschaften des Modells

Insgesamt besitzt das vorgeschlagene Routenwahlmodell drei Parameter, siehe Tab. 3.1. Durch die generische Formulierung der deterministischen Nutzenfunktion können weitere Parameter hinzugefügt oder gar nötig werden: Der ereignisorientierte Anteil $T_{\ell_{\text{cur}}}^r$ kann beispielsweise mit Beobachtungsmodellen spezifiziert werden, die weitere Parameter benötigen könnten. Ferner muss konkret spezifiziert werden, welche Annahmen modellierte Autofahrer für die Reisezeitschätzungen auf noch nicht befahrenen Kanten treffen sollen. Im folgenden Abschnitt werden zwei wichtige Eigenschaften des ereignisorientierten Routenwahlmodells erläutert.

3.3.1 Invarianz der statistischen Eigenschaften des Zufallsnutzens unter der Aufteilung von Kanten

In seiner statistischen Spezifikation ist der Zufallsnutzen additiv bezüglich der Kanten einer Route. Diese Eigenschaft ist auch gegeben, wenn eine Kante selbst in zwei (oder mehrere) Teile aufgespalten wird. Sei diesbezüglich eine Kante ℓ mit Länge L betrachtet und in zwei Teilkanten ℓ_a und ℓ_b mit den dazugehörigen Längen L_a und L_b mit $L_a + L_b = L$ aufgespalten,

⁷Methoden zur Erzeugung gleichverteilter Zufallszahlen, meist im Intervall zwischen $[-1, 1]$ oder $[0, 1]$, stellen viele Programmiersprachen bereit.

Tabelle 3.1: Die Parameter des vorgeschlagenen Routenwahlmodells und typische Parameterwerte. Weitere Parameter können durch die Spezifizierung der deterministischen Nutzenfunktion nötig werden.

Parameter	Beschreibung	Typischer Wert
λ	Die Varianzdichte repräsentiert die Dichte von POIs, z. B. Bäckereien, Tankstellen oder Supermärkte und reflektiert persönliche Präferenzen des Autofahrers.	2,5-10 min ² /km
V_0	Beharrlichkeit des modellierten Autofahrers bezüglich einer einmal getroffenen Routenwahlentscheidung in Form einer alternativenspezifischen Konstante. Sie wird dem deterministischen Nutzen der <i>aktuell</i> gewählten Route bei der Bewertung hinzugefügt (Zeitbonus).	1-5 min
τ	Durchschnittliches Zeitintervall zwischen zwei separaten Entscheidungsprozessen eines Autofahrers (Revisionsrate).	10-30 s

vgl. Abb. 3.3. Dann gilt, dass die statistischen Eigenschaften der Zufallsnutzen der vereinigten Teilkanten ℓ_a und ℓ_b identisch mit denen der ungeteilten Kante ℓ sind: Die Summe zweier unabhängiger, normalverteilter Zufallsvariablen ist wieder eine normalverteilte Zufallsvariable. Für den Erwartungswert und die Varianz des Zufallsnutzens ergibt sich demnach

$$E(\varepsilon_\ell) = E(\varepsilon_{\ell_a} + \varepsilon_{\ell_b}) = 0$$

und $\text{Var}(\varepsilon_\ell) = \lambda \cdot L = \lambda \cdot (L_a + L_b) = \text{Var}(\varepsilon_{\ell_a} + \varepsilon_{\ell_b})$ mit $L_a + L_b = L$.

Dabei wurden die für unabhängig verteilte Zufallsvariablen gültigen Relationen $\text{Var}(X + Y) = \text{Var}(X) + \text{Var}(Y)$ und $E(X + Y) = E(X) + E(Y)$ verwendet.

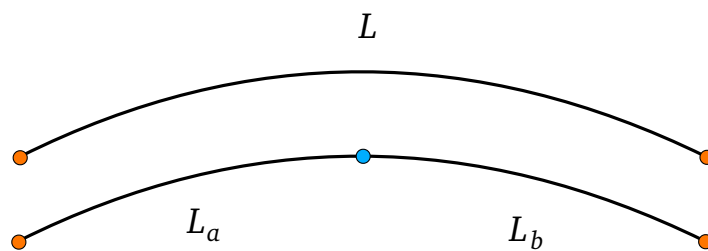


Abbildung 3.3: Die statistische Spezifikation des Zufallsnutzens für eine Kante ℓ mit Länge L erlaubt die Aufteilung der Kante in zwei (oder mehrere) Teile mit den Längen L_a und L_b , ohne dass sich die Varianz des Zufallsnutzens für die gesamte Kante ändert.

3.3.2 Berücksichtigung überlappender Routen

Aus der Formulierung des Zufallsnutzens über eindeutige Autofahrer-Kante-Einheiten ergibt sich eine automatische Korrelation überlappender Routen im ereignisorientierten Routenwahlmodell. Dazu seien zwei Routen r und q betrachtet, die sich zu einem beliebigen Grad überlappen. Aufgrund der Kanten-Additivität des Zufallsnutzens ist es möglich, den Zufallsnutzen der Routen in zwei Anteile aufzuspalten: (i) einen Anteil des Zufallsnutzens ε^u , der sich nur aus exklusiven Kanten ergibt und (ii) einen Anteil ε^s , der sich aus gemeinsamen Kanten beider Routen ergibt. Der Zufallsnutzen für die Routen r und q ist schließlich allgemein gegeben durch

$$\varepsilon_{r/q} = \varepsilon_{r/q}^u + \varepsilon_{rq}^s. \quad (3.3.1)$$

Dabei bezieht sich r/q ausschließlich auf r beziehungsweise q , wohingegen sich rq auf den *gemeinsamen* Anteil beider Routen bezieht. Dieselbe Aufspaltung kann offenkundig auch für die Längen L_r und L_q der beiden Routen durchgeführt werden, woraus folgt:

$$L_{r/q} = L_{r/q}^u + L_{rq}^s.$$

Um zu zeigen, dass die beiden überlappenden Routen korreliert sind, wird die Kovarianz der Zufallsnutzen aus Gl. (3.3.1) der beiden Routen r und q bestimmt:

$$\begin{aligned} \text{Cov}(\varepsilon_r, \varepsilon_q) &= \text{Cov}(\varepsilon_r^u + \varepsilon_{rq}^s, \varepsilon_q^u + \varepsilon_{rq}^s) \\ &= \text{E}(\varepsilon_r^s \varepsilon_q^u) + \text{E}(\varepsilon_r^u \varepsilon_{rq}^s) + \text{E}(\varepsilon_q^u \varepsilon_{rq}^s) + \text{E}(\varepsilon_{rq}^s \varepsilon_{rq}^s) \\ &\quad - \left(\left[\text{E}(\varepsilon_r^u) + \text{E}(\varepsilon_{rq}^s) \right] \cdot \left[\text{E}(\varepsilon_q^u) + \text{E}(\varepsilon_{rq}^s) \right] \right) \\ &= \text{E}((\varepsilon_{rq}^s)^2) - \left(\text{E}(\varepsilon_{rq}^s) \right)^2 \\ &= \text{Var}(\varepsilon_{rq}^s) = \lambda \cdot L_{rq}^s = \lambda \sum_{\ell \in \mathcal{L}^s(rq)} L_\ell. \end{aligned}$$

Hierbei wurde die Definition des Zufallsnutzens in Gl. (3.2.8) für die Varianzdichte λ benutzt und mit $\mathcal{L}^s(rq)$ die Menge der gemeinsamen Kanten ℓ beider Routen r und q bezeichnet. Ferner sind die Zufallsnutzen $\varepsilon_{r/q}^u$ untereinander und bezüglich ε_{rq}^s stochastisch unabhängig, sodass Additivität der Erwartungswerte und Varianzen gegeben ist. Zusätzlich wurde der Verschiebungssatz für Varianzen benutzt [z. B. 7, S. 1308]. Ein dimensionsloses Maß für die Korrelation der beiden überlappenden Routen ergibt sich mit dem Korrelationskoeffizienten, für den im Folgenden ein Ausdruck hergeleitet wird:

$$\rho_{\varepsilon_r, \varepsilon_q} = \rho_{rq} = \frac{\text{Cov}(\varepsilon_r, \varepsilon_q)}{\sqrt{\text{Var}(\varepsilon_r)} \sqrt{\text{Var}(\varepsilon_q)}} = \frac{\lambda L_{rq}^s}{\sqrt{\lambda L_r} \sqrt{\lambda L_q}} = \frac{L_{rq}^s}{\sqrt{L_r L_q}}. \quad (3.3.2)$$

Der Korrelationskoeffizient entspricht folglich dem Anteil der gemeinsamen Länge L_{rq}^s beider Routen an deren mittlerer Länge $\bar{L} = \sqrt{L_r L_q}$, wobei hier das geometrische Mittel zur

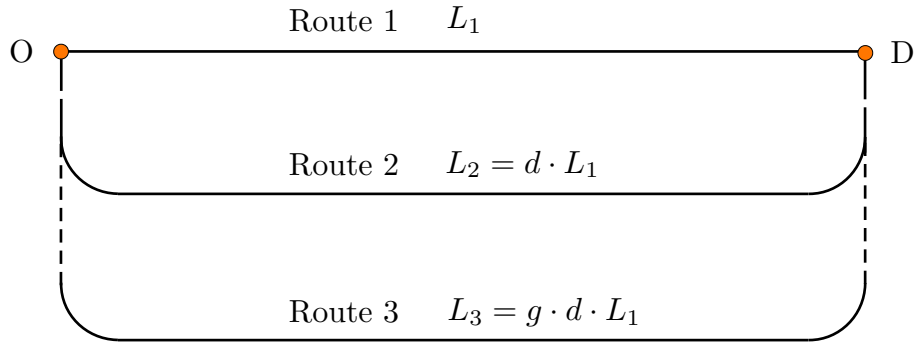


Abbildung 3.4: Einfaches Netzwerk mit drei unabhängigen Routen für numerische Studien des ereignisorientierten Routenwahlmodells. Die Längenverhältnisse der Routen ergeben sich durch das Festlegen der Länge L_1 von Route 1 und eine Variation der Parameter d und g .

Anwendung kommt. Die Korrelation skaliert erwartungsgemäß mit der gemeinsamen Länge zweier überlappender Routen. Da für die Überlappung stets $0 < L_{rq}^s \leq 1$ gilt, ist $0 < \rho_{rq} \leq 1$. Dies ist offensichtlich, falls $L = L_r = L_q$ ist. Dann folgt $\rho_{rq} = L_{rq}^s/L$. Der Korrelationskoeffizient deckt somit den Bereich zwischen den Grenzfällen keiner und vollständiger Korrelation ab und kann auch nicht negativ werden.

3.4 Untersuchung der Routenaufteilung in einfachen Straßennetzwerken

Zur Überprüfung der Plausibilität des vorgeschlagenen Modells werden in diesem Abschnitt Routenwahlsimulationen (Routenaufteilungen) in einfachen Netzwerken durchgeführt. Dabei soll die Routenaufteilung in Abhängigkeit der Routenlänge und Varianzdichte und für überlappende Routen untersucht werden. Ferner werden die Auswirkungen eines Verkehrsereignisses (Totalblockade auf einer Route) auf die Routenwahl modellierter Autofahrer analysiert.

3.4.1 Einfaches Netzwerk mit verschiedenen langen Routen

In dieser Studie wird die Verkehrsstromaufteilung in einem einfachen Netzwerk untersucht, in dem drei unabhängige Routen eine OD-Relation verbinden (Abb. 3.4). Route 1 wird mit der Länge L_1 als die kürzeste Route festgelegt. Die Längen der Routen 2 und 3, L_2 und L_3 , seien um die Faktoren d bzw. $g \cdot d$ größer als L_1 , d. h.

$$\begin{aligned} L_2 &= d \cdot L_1, \\ L_3 &= g \cdot L_2 = g \cdot d \cdot L_1. \end{aligned}$$

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit soll dabei gelten, dass $1 \leq d \leq g$ mit $d, g \in \mathbb{R}$, sodass $L_1 \leq L_2 \leq L_3$. Das Vorherrschen variabler Verkehrsbedingungen wird im Rahmen dieser

Studie vernachlässigt, d. h. der Ereignisanteil des deterministischen Nutzens wird auf $T_{\text{cur}}^{nr} = 0$ für jede Route r gesetzt. Der deterministische Nutzen für jede Route r sei für jeden Fahrer gegeben durch $V_r = -L_r/v$, wobei $v = 15 \text{ m/s}$ eine für alle drei Routen gleichförmige Reisegeschwindigkeit sei. Offensichtlich skalieren die Längenparameter die Nutzen, und damit die Nutzendifferenzen zwischen den Routen. Es wird lediglich ein einziger Entscheidungsprozess modelliert, den alle modellierten Autofahrer simultan und vor Fahrtantritt (*pre-trip*) durchlaufen. Der Parameter τ ist in dieser Studie somit nicht relevant und wird vernachlässigt. Ferner wird keine Route bevorzugt gewählt, d. h. es ist $V_0 = 0$.

Numerische Berechnungen der Auswahlhäufigkeiten von drei unabhängigen Routen

Für die Berechnung von Auswahlhäufigkeiten im einfachen Netzwerk mit drei unabhängigen Routen wird eine numerische Routenaufteilung mit 10 000 modellierten Autofahrern durchgeführt. Dabei werden die Parameter d, g und λ untersucht; die Längenparameter nehmen die Werte $d = \{1; 5\}$ und $g = \{1,5; 5; 10\}$ an und für die Varianzdichte gelte $1 \leq \lambda \leq 100 \text{ s}^2/\text{m}$. Die deterministischen Nutzen V_r der Routen seien für alle Autofahrer gegeben durch

$$V_1 = -\frac{L_1}{v}, \quad V_2 = -\frac{L_2}{v} = -\frac{dL_1}{v} \quad \text{und} \quad V_3 = -\frac{L_3}{v} = -\frac{gdL_1}{v}. \quad (3.4.1)$$

Dabei wird festgelegt, dass die Länge $L_1 = 1000 \text{ m}$ beträgt und $v = 15 \text{ m/s}$ eine über alle drei Routen gleichförmige Reisegeschwindigkeit ist. Die relativen Auswahlhäufigkeiten H_r für alle drei Routen $r = 1, 2, 3$ sind in Abb. 3.5 in Abhängigkeit der Längenparameter und der Varianzdichte aufgetragen.

Erwartungsgemäß bestimmt die Größe der Varianzdichte λ das Streuungsmaß der Routenaufteilung der Autofahrer auf die drei Routen. Je größer die Varianzdichte gewählt wird, desto größer ist der relative Wahlanteil für längere Routen. Für $d = 5$ und $g = 10$ (Abb. 3.5 unten rechts) ist dies offensichtlich, da der relative Wahlanteil H_3 von Route 3 für $\lambda = 100 \text{ s}^2/\text{m}$ noch bei circa 10 % liegt, obwohl sie mit 49 km bzw. 45 km bedeutend länger als Route 1 bzw. 2 ist. Für Parameterbereiche, in denen die Nutzendifferenzen der Routen geringer sind (beispielsweise für $d = 2$ und $g = 1,5$) unterscheiden sich die relativen Wahlanteile entsprechend geringer. Grundsätzlich gilt für die oben angenommene Spezifizierung des deterministischen Nutzens in Gl. (3.4.1) und den festgelegten Parametern, dass die kürzeste Route ($r = 1$) die höchste und die längste Route ($r = 3$) die niedrigste relative Wahlhäufigkeit aufweist, und zwar für alle Werte von λ . Für den Grenzfall $\lambda \rightarrow \infty$ ergäbe sich jedoch $H_r = 1/3$ für alle drei Routen. Gleiches gilt im Fall $d = g = 1$, und zwar für alle Werte von λ .

3.4.2 Routenwahl im Netzwerk mit überlappenden Routen

In dieser Studie wird die Verkehrsstromaufteilung des Routenwahlmodells in einem Netzwerk mit überlappenden Routen untersucht. Im Überlapp-Netzwerk (Abb. 3.6) wird eine OD-Relation durch drei Routen verbunden. Route 1 verläuft über eine eigenständige Kante,

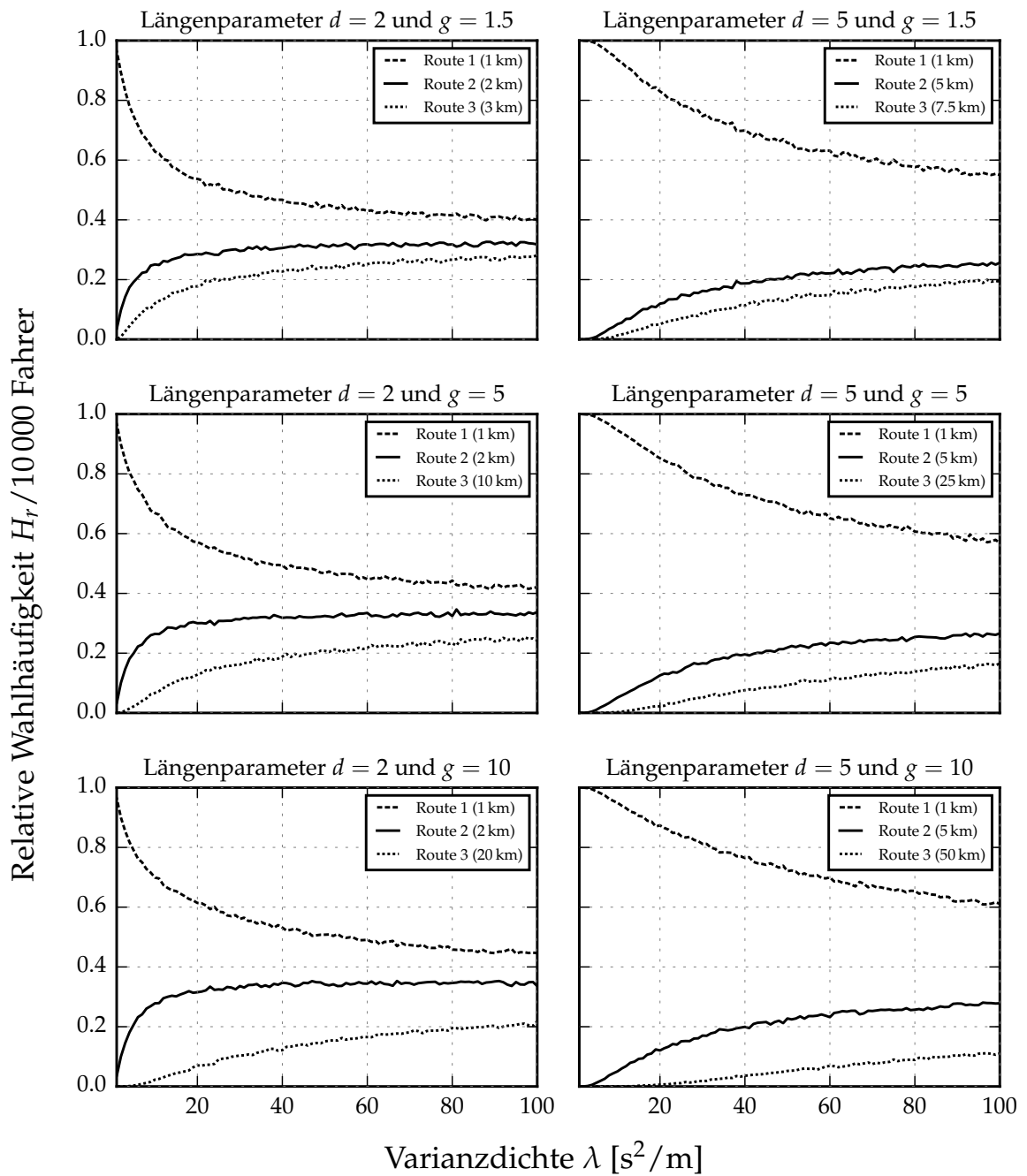


Abbildung 3.5: Relative Wahlhäufigkeiten für die drei Routen des einfachen Netzwerks aus Abb. 3.4, aufgetragen über die Varianzdichte λ und unter Variation der Längenparameter d und g .

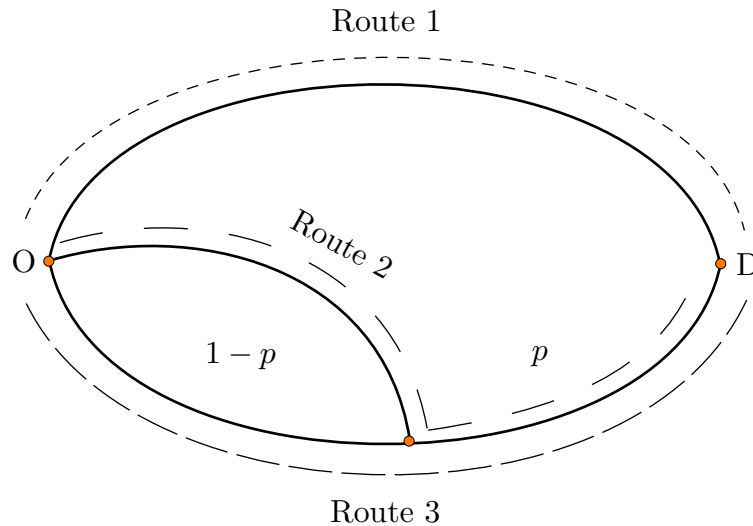


Abbildung 3.6: Im Überlapp-Netzwerk wird eine OD-Relation durch drei gleich lange Routen verbunden. Während Route 1 eine eigenständige Alternative ist, haben die Routen 2 und 3 eine Kante gemeinsam, deren Längenanteil an der Gesamtlänge beider Routen durch $0 < p \leq 1$ parametrisiert ist. Übernommen aus Sheffi [175, S. 294].

wohingegen sich die beiden Routen 2 und 3 zu einem beliebigen Anteil p überlappen können. Variable Verkehrsbedingungen werden vernachlässigt, d. h. $T_{\ell_{\text{cur}}}^{nr} = 0$. Ferner soll vereinfachend gelten, dass alle drei Routen dieselben Längen L haben, sodass sich der deterministische Nutzen für *jede* Route zu $V = -T = -L/v$ ergibt. Ferner wird die Bevorzugung einer der Routen durch eine alternativenspezifische Konstante V_0 vernachlässigt. Wie in der vorangegangenen Untersuchung werden die relativen Wahlhäufigkeiten der drei Routen numerisch ermittelt, wobei die Routenwahl von 10^6 Autofahrern modelliert wird. Da der Entscheidungsprozess nur einmal bei Fahrtantritt durchlaufen wird, ist der Modellparameter τ für diese Untersuchung nicht relevant. Für die Varianzdichte gelte $\lambda = 10 \text{ min}^2/\text{km}$.

Vergleich der Routenwahlanteile zwischen ausgewählten Routenwahlmodellen

Im Folgenden werden die Routenwahlanteile des vorgeschlagenen Modells mit denen bekannter Routenwahlmodelle aus der Literatur verglichen. Dazu zählen das MNL-, CL-, PSL- und LNL-Modell. Dabei werden die drei folgenden Ausprägungen der Überlappungen p der Routen 2 und 3 betrachtet.

1. Marginale Überlappung $p = 0.05$

Im Grenzfall sehr geringer Überlappung sind die beiden Routen 2 und 3 lediglich geringfügig miteinander korreliert. Aus der Sicht des modellierten Autofahrers werden sie demnach als nahezu vollständig unterscheidbare Alternativen wahrgenommen. Erwartungsgemäß liegen die jeweiligen relativen Wahlanteile für die drei Routen bei $H_1 \approx H_2 \approx H_3 \approx 1/3$.

Tabelle 3.2: Vergleich der relativen Wahlhäufigkeiten von 10^6 Autofahrern im Überlapp-Netzwerk im Vergleich mit den Auswahlwahrscheinlichkeiten des MNL-, CL-, PSL- und LNL-Modells für die untersuchten Ausprägungen der Überlappungen. Die Parameter für den C-Wert wurden mit $\beta_0 = 1$ und $\gamma = 1$ gewählt, während das PSL-Modell parameterfrei ist. Ferner wurden die Nest-Koeffizienten des LNL-Modells gemäß Gl. 3.4.2 berechnet.

	Route	Vorgeschlagenes Modell	MNL	CL	PSL	LNL
$p = 0,05$	1	0,337	0,333	0,344	0,338	0,333
	2	0,332	0,333	0,328	0,331	0,333
	3	0,331	0,333	0,328	0,331	0,333
$p = 0,5$	1	0,384	0,333	0,428	0,400	0,352
	2	0,308	0,333	0,286	0,300	0,324
	3	0,308	0,333	0,286	0,300	0,324
$p = 0,95$	1	0,462	0,333	0,497	0,488	0,406
	2	0,269	0,333	0,253	0,256	0,297
	3	0,269	0,333	0,253	0,256	0,297

2. *Signifikante Überlappung $p = 0.5$*

Der Anteil der Überlappung entspricht exakt der Hälfte der Routenlängen und ist somit signifikant. Dementsprechend ist für die relativen Wahlanteile zu erwarten, dass $H_1 > 1/3$ und $H_2 \approx H_3 < 1/3$.

3. *Fast vollständige Überlappung $p = 0.95$*

In diesem Grenzfall fast vollständiger Überlappung verschmelzen die beiden Routen 2 und 3 aus der Sicht eines Autofahrers nahezu zu einer Route. Dennoch werden beide Routen weiterhin im Entscheidungsprozess in Betracht gezogen. Für realistische, relative Wahlanteile ist somit zu erwarten, dass $H_1 \approx 50\%$ und $H_2 \approx H_3 \approx 25\%$.

Im Gegensatz zum vorgeschlagenen Modell können die Auswahlwahrscheinlichkeiten der zu vergleichenden Routenwahlmodelle aus der Literatur analytisch berechnet werden. Für die Auswahlwahrscheinlichkeiten des MNL-Modells wird Gl. (2.1.5) herangezogen, für das CL-Modell Gl. (2.4.2) mit dem C-Wert Gl. (2.4.1), für den die Parameter $\beta_0 = 1$ und $\gamma = 1$ gewählt werden. Für die Auswahlwahrscheinlichkeiten des PSL-Modells wird Gl. (2.4.4) mit dem parameterfreien Path-Size-Wert aus Gl. (2.4.3) herangezogen. Die Auswahlwahrscheinlichkeiten des LNL-Modell sind durch Gl. (2.4.5) gegeben, wobei der Nestkoeffizient gemäß [vgl. 24]

$$\mu_\ell = 1 - \frac{1}{N_\ell} \sum_r \alpha_{\ell r} \quad (3.4.2)$$

berechnet wurde. Die Ergebnisse sind in Tab. 3.2 zusammengefasst.

Die relativen Wahlhäufigkeiten des vorgeschlagenen Modells sind für alle Ausprägungen der Überlappungen in approximativer Übereinstimmung mit den Auswahlwahrscheinlichkeiten des

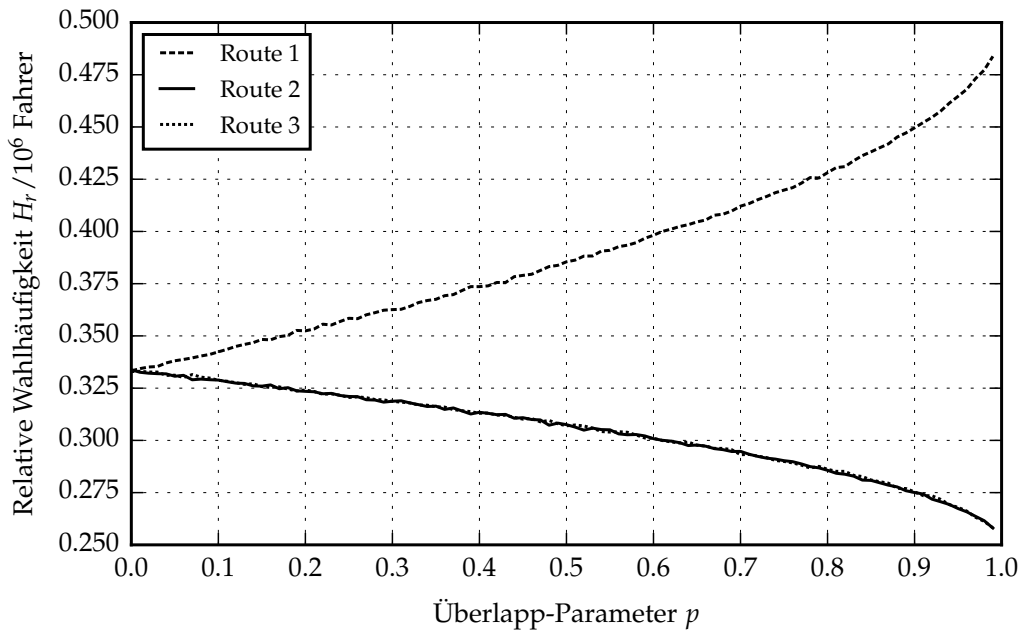


Abbildung 3.7: Routenwahlanteile von 10^6 Autofahrern in Abhängigkeit des Überlapp-Parameters p . Je größer die Überlappung ist, desto geringer ist der Anteil, der auf die Routen 2 und 3 entfällt. Dies steht in Übereinstimmung mit der vorangegangenen Vergleichsstudie.

CL- und PSL-Modells. Die Auswahlwahrscheinlichkeiten des LNL-Modells sind für $p = 0,95$ erkennbar geringer als die der anderen Modelle. Demnach resultiert die Spezifikation des Zufallsnutzens im ereignisorientierten Routenwahlmodell zu realistischen Auswahlwahrscheinlichkeiten, die vergleichbar sind mit denen von Modellen, die speziell zur Behandlung von Routenüberlappungen konzipiert wurden. Ferner hat Sheffi [175, S. 302] einen Vergleich zwischen einem MNL- und MNP-Modell in dem Überlapp-Netzwerk angestellt.

Routenwahlanteile in Abhängigkeit des Überlapp-Parameters

In dieser Studie werden die Verläufe der Routenwahlanteile der drei Routen unter der Variation des Überlapp-Parameters im Wertebereich $0 \leq p < 1$ untersucht (siehe Abb. 3.7). In jedem Schritt wird p um 0,01 erhöht und die Routenwahlsimulation mit 10^6 Autofahrern wiederholt. Die Verläufe der Routenwahlanteile bestätigen das Bild aus der Vergleichsstudie: Je größer der Grad der Überlappung ist, desto kleiner werden die Routenwahlanteile der beiden überlappenden Routen 2 und 3. Es ergibt sich dabei ein monotoner Verlauf der Routenwahlhäufigkeiten, der die Grenzfälle $p \rightarrow 0$ bzw. $p \rightarrow 1$ miteinander verbindet. Sie weisen folgende Werte auf: $H_1 \approx H_2 \approx H_3$ für $p = 0$ und $H_1 \approx 1/2 > H_2 \approx H_3 \approx 1/4$ für $p = 1$. Dies steht in Übereinstimmung mit den Voraussagen der erweiterten Logit-Routenwahlmodelle (z. B. GEV-Modelle) aus der Literatur. Zugleich kann der Verlauf der Routenwahlanteile jedoch von denen der Logit-Modelle etwas abweichen.

3.4.3 Routenwahl im gestörten Netzwerk

In einer weiteren Studie werden die Auswirkungen einer Störung auf die Routenwahl der modellierten Autofahrer untersucht. Dabei wird das einfache Netzwerk aus Abb. 3.4 mit den drei Routen herangezogen, für die $L_1 < L_2 = L_3$ gelten soll; damit ist d variabel und $g = 1 = \text{const}$. Die Störung betrifft nur Route 1 und repräsentiert eine über die Simulationsdauer anhaltende Totalsperrung, die einsetzt, nachdem die modellierten Autofahrer ihre initiale Routenwahl bei Eintritt ins Netzwerk abgeschlossen haben. Während die Autofahrer auf den Routen 2 und 3 nicht von der Störung betroffen sind und ihr Ziel ungehindert erreichen können, beobachten die Autofahrer auf Route 1 die Auswirkungen der Totalsperrung und müssen sich für eine andere Route entscheiden. Nach einer beliebigen Wechseldauer t_{\max} haben sich schließlich *alle* betroffenen Autofahrer auf die umfahrenden Routen 2 und 3 umverteilt, sodass für die Wahlhäufigkeit von Route 1 $H_1(t_{\max}) = 0$ gilt. Dabei soll die Abhängigkeit der Wechseldauer t_{\max} vom Ereignisanteil $T_{\ell_{\text{cur}}}^{n1}$ des deterministischen Nutzens für die gestörte Route 1 und die zeitliche Entwicklung der Routenwahlanteile $H_r(t)$ aller Routen im Netzwerk untersucht werden.

Der deterministische Nutzen jeder ungestörten Route sei analog zu den vorherigen Untersuchungen festgelegt durch $V_r = -L_r/v$, wobei $v = 15 \text{ m/s}$ die mittlere Reisegeschwindigkeit ist, die der Autofahrer für alle Routen antizipiert. Im gestörten Netzwerk werden zwei unterschiedliche Beobachtungsmodelle betrachtet. Beide Modelle verwenden die über die Zeit kumulierte und von betroffenen Autofahrern wahrgenommene (beobachtete) Verweildauer T_S^1 im Stau und geben die aus der Sicht des Autofahrers noch zu erwartende Wartezeit aufgrund der Sperrung wieder.⁸ Grundsätzlich basieren beide Modelle auf der Annahme, dass die Standdauer im Stau mit zunehmender Zeit stärker gewichtet wird, sodass die betroffene Route für den modellierten Autofahrer immer unattraktiver wird.

Ma *Lineares Beobachtungsmodell*

$$T_{\ell_{\text{cur}}}^{n1} = f \cdot T_S^1. \quad (3.4.3)$$

Dabei ist $f \geq 1$ mit $f \in \mathbb{R}$ ein konstanter Faktor, der die beobachtete Verweildauer skaliert. In dieser Studie wird ein Wertebereich $1 \leq f \leq 10$ untersucht.

Mb *Exponentielles Beobachtungsmodell*

$$T_{\ell_{\text{cur}}}^{n1} = 2^\gamma \cdot T_S^1 \quad \text{mit } \gamma = T_S^1/t_{\text{ref}}. \quad (3.4.4)$$

Der Exponent $\gamma \in \mathbb{R}$ entspricht offensichtlich der Verweildauer T_S^1 in Einheiten einer festgelegten und konstanten Referenzzeit t_{ref} . In dieser Studie wird ein Wertebereich $1 \leq t_{\text{ref}} \leq 250 \text{ s}$ untersucht.

⁸Der modellierte Autofahrer weiß natürlich nicht, dass die Totalsperrung über die gesamte Simulationsdauer bestehen bleiben wird.

Die beiden Beobachtungsmodelle finden entsprechend Gl.(3.2.7) als Ereignisanteile Eingang in die deterministische Nutzenfunktion. In Anlehnung an die vorherigen Studien wird die Routenwahl von 10 000 Autofahrern simulativ unter Variation der beiden Beobachtungsmodelle Ma und Mb modelliert. Ferner werden die Simulationen für zwei unterschiedliche Werte für den Längenparameter d durchgeführt: $d_1 = 2$ und $d_2 = 5$. Zusätzlich werden zwei unterschiedliche Werte für die Varianzdichte λ , $\lambda_1 = 2,5 \text{ min}^2/\text{km} = 9 \text{ s}^2/\text{m}$ und $\lambda_2 = 10 \text{ min}^2/\text{km} = 36 \text{ s}^2/\text{m}$, betrachtet.

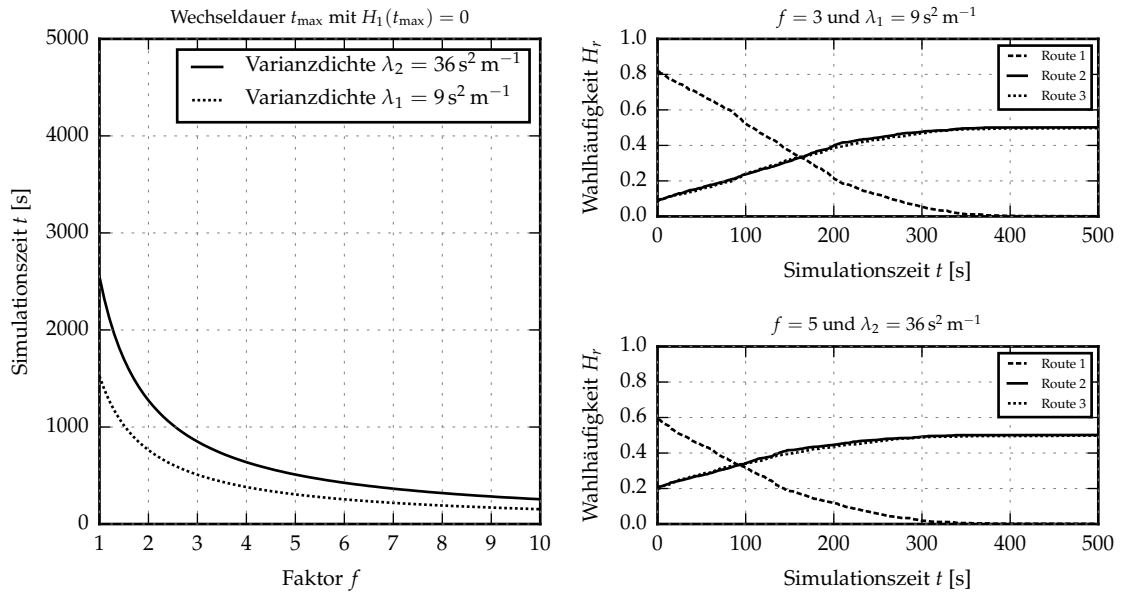
Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird der initiale Entscheidungsprozess $n = 0$ zum Zeitpunkt $t_n = t_0 = 0$ durchlaufen. Die initiale Routenaufteilung der Autofahrer reflektiert die unvollkommene Kenntnis über die Störung auf Route 1, sodass $H_1(t_0) > 0$ zu erwarten ist. In der Simulation werden schließlich jeweils Zeitpunkte t_n gesucht, ab denen im nächsten Entscheidungsprozess $n + 1$ zum Zeitpunkt $t_n + 1$ (erneut) einige Autofahrer der gestörten Route 1 auf die Alternativen ausgewichen sind. Die Verweildauer der Autofahrer auf der gesperrten Route 1 ist zum Zeitpunkt t_n gegeben durch $T_S^n = t_n$ mit $n > 0$. Die Anzahl der Entscheidungsprozesse wird festgelegt durch $1 \leq n \leq n_{\max}$, wobei n_{\max} den Entscheidungsprozess zum Zeitpunkt t_{\max} bezeichnet, nach dem sich kein Autofahrer mehr für die gestörte Route 1 entschieden hat. In Abb. 3.8 (lineares Modell Ma) bzw. 3.9 (exponentielles Modell Mb) ist in der linken Spalte die Wechseldauer t_{\max} in Abhängigkeit von f bzw. t_{ref} für die Längenparameter $d_{1,2} = \{2; 5\}$ und die Varianzdichten $\lambda_{1,2} = \{9; 36\} \text{ s}^2/\text{m}$ aufgetragen. In der rechten Spalte sind jeweils die zeitlichen Verläufe der Routenwahlanteile für eine feste Wechseldauer $t_{\max} = 500 \text{ s}$ und jeweils für $d = d_{1,2}$ und $\lambda = \lambda_{1,2}$ aufgetragen.

Lineares Beobachtungsmodell

Zur Untersuchung des linearen Beobachtungsmodells wird die Entwicklung der Wechseldauer $t_{\max}(f)$ in Abhängigkeit des linearen Faktors $1 \leq f \leq 10$ betrachtet. Hinsichtlich der Längenparameter (a) $d = d_1 = 2$ und (b) $d = d_2 = 5$ ist offensichtlich, dass die Wechseldauer t_{\max} für beide Varianzdichten $\lambda_{1,2}$ größer ist für $d = d_2 = 5$, da der Längenparameter die deterministische Nutzendifferenz bestimmt. Der heuristische Ereignisanteil des deterministischen Nutzens muss diese Nutzendifferenz erst ausgleichen, bevor ein Routenwechsel auf die ungestörte Route vollzogen werden kann. Ferner ist festzustellen, dass die Wechseldauer t_{\max} stets kleiner ist für $\lambda_1 < \lambda_2$.

Die zeitlichen Verläufe der Routenwahlanteile $H_r(t)$ wurden für eine feste Wechseldauer t_{\max} aufgetragen. Aufgrund der Abhängigkeit von t_{\max} vom Faktor f ergeben sich erwartungsgemäß unterschiedliche Werte für die Faktoren f . Die initialen Routenwahlanteile unterscheiden sich jedoch nur in Bezug auf die Varianzdichten $\lambda_{1,2}$. Dabei ist $H_1(0) \approx 80\%$ für $d = d_1 = 2$ und $\lambda = \lambda_1$, während $H_1(0) \approx 60\%$ ist für $\lambda = \lambda_2$. Es entscheiden sich demnach weniger Autofahrer für Route 1, je größer die Varianz der Zufallsnutzen der Routen ist. Dies steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus der ersten numerischen Studie in Abschnitt 3.4.1. In Bezug auf die *Routenwahldynamik* beherbergt dieses Wahlverhalten jedoch einen Widerspruch.

(a) Lineares Beobachtungsmodell mit Längenparameter $d = d_1 = 2$



(b) Lineares Beobachtungsmodell mit Längenparameter $d = d_2 = 5$

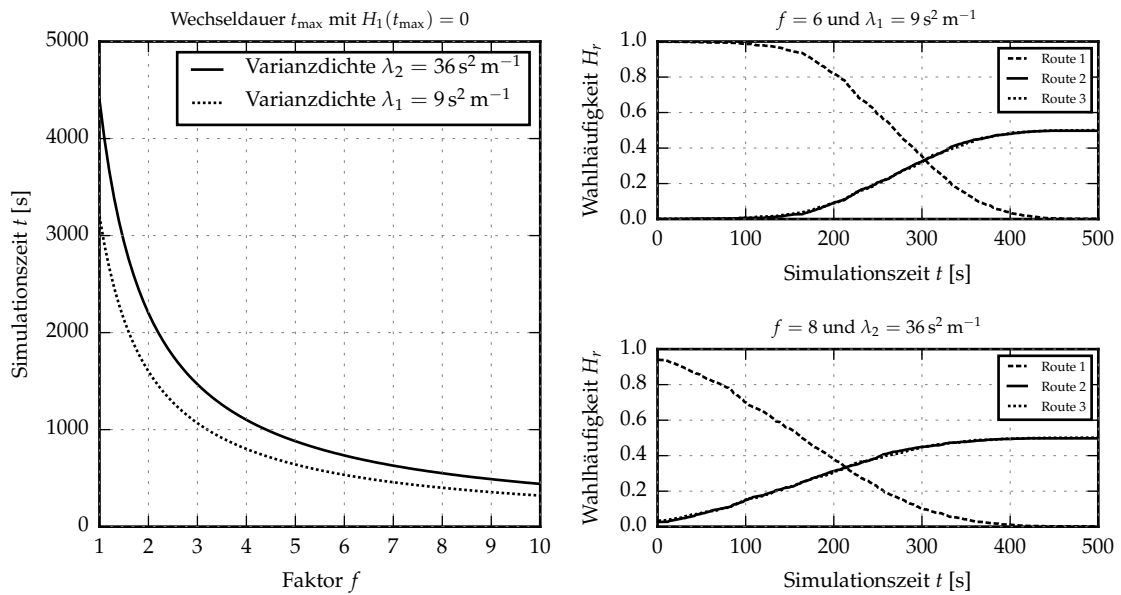
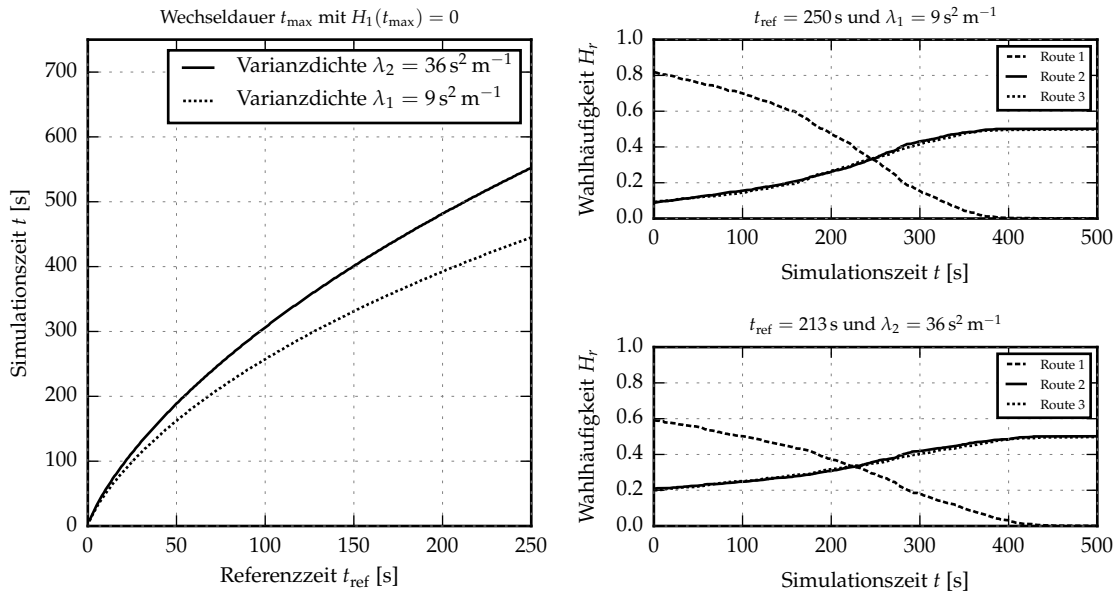


Abbildung 3.8: Für die Längenparameter (a) $d = d_1 = 2$ und (b) $d = d_2 = 5$ ist die Wechseldauer t_{\max} , die sich als Argument aus der Forderung $H_1(t_{\max}) = 0$ ergibt, aufgetragen über einen Wertebereich des linearen Faktors $1 \leq f \leq 10$. Dabei wurden jeweils die Varianzdichten $\lambda_{1,2} = \{9; 36\} \text{ s}^2/\text{m}$ betrachtet. Für jeden Längenparameter werden die Zeitverläufe der Routenwahlanteile $H_r(t)$ ($0 \leq t \leq t_{\max} = 500 \text{ s}$) für die betrachteten Varianzdichten angegeben. Erwartungsgemäß ist die Wechseldauer t_{\max} umso höher, je kleiner der Faktor f und umso höher die Längendifferenz (repräsentiert durch die Längenparameter d_1 und d_2) der betrachteten Routen ist.

(a) Exponentielles Beobachtungsmodell mit Längenparameter $d = 2$



(b) Exponentielles Beobachtungsmodell mit Längenparameter $d = 5$

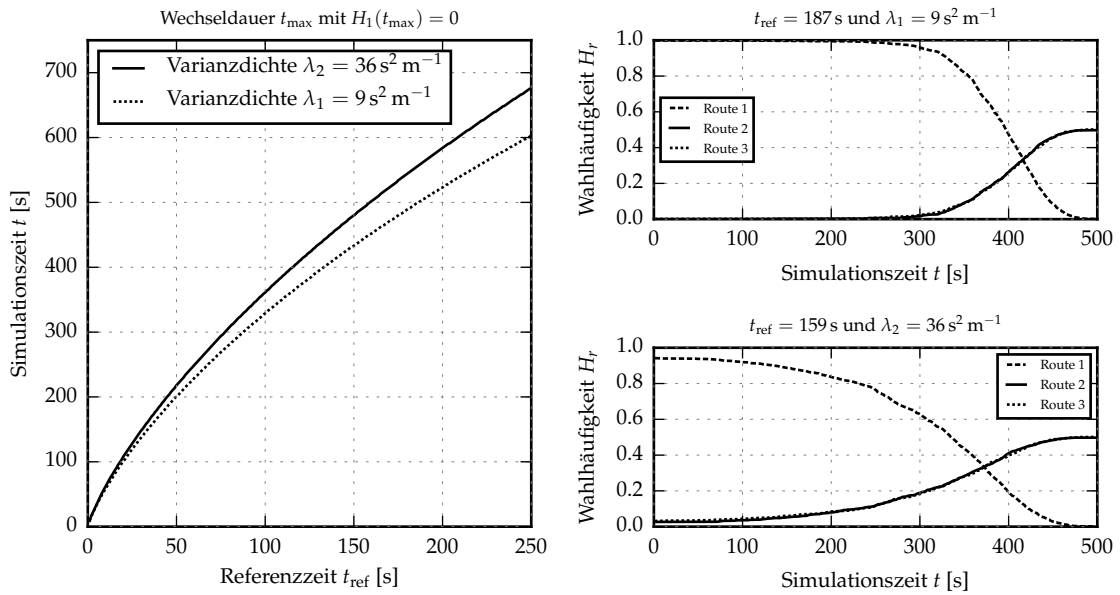


Abbildung 3.9: Für die Längenparameter (a) $d = d_1 = 2$ und (b) $d = d_2 = 5$ ist jeweils die Wechseldauer t_{max} , die sich als Argument aus der Forderung $H_1(t_{\text{max}}) = 0$ ergibt, aufgetragen über einen Wertebereich der Referenzzeit $1 \leq t_{\text{ref}} \leq 250 \text{ s}$ des exponentiellen Modells. Dabei werden jeweils die Varianzdichten $\lambda_{1,2} = \{9; 36\} \text{ s}^2/\text{m}$ betrachtet. Ebenso werden für jeden Längenparameter die Zeitverläufe der Routenwahlanteile $H_r(t)$ ($0 \leq t \leq T_{\text{max}} = 500 \text{ s}$) für die betrachteten Varianzdichten angegeben. Mit dem exponentiellen Modell steigt t_{max} mit größer werdender Referenzzeit t_{ref} . Ferner steigt t_{max} mit der Längendifferenz der betrachteten Routen (repräsentiert durch die Längenparameter $d = d_1$ und $d = d_2$).

Obwohl sich mit $\lambda = \lambda_2$ weniger Autofahrer für Route 1 entschieden haben, ist die Wechseldauer t_{\max} für ein festes f größer als für $\lambda = \lambda_1$ (linke Seite der Abb.). Vgl. dazu den Grenzfall $\lambda \rightarrow 0$, für den das Routenwahlmodell in ein deterministisches übergeht, sodass jeder Autofahrer denselben Nutzen für jede Route wahrnimmt. Verbessert sich nun eine Route, wird der Wechsel auf diese Route von allen Autofahrern zur selben Zeit vollzogen. Die Existenz eines stochastischen Anteils in der Nutzenfunktion weicht die Routenwahldynamik jedoch mitunter deutlich auf. Dies lässt sich daran erkennen, dass die Rate der Routenwechsel, für den gesamten Zeitraum betrachtet, für höhere Varianzdichten (t_{\max} ist stets größer für $\lambda = \lambda_2$) geringer ist.

Im Vergleich der Längenparameter $d = d_1 = 2$ und $d = d_2 = 5$ lässt sich im zeitlichen Verlauf der Routenwahlanteile (rechte Spalte) gut erkennen, dass die anfänglichen Wechselraten (Steigung der Kurven) von Route 1 auf die Routen 2 und 3 geringer sind als für $d = d_1 = 2$. Für $d = d_2 = 5$ hat auch die Wahl der Varianzdichte einen sichtbaren Einfluss auf das anfängliche Wechselverhalten der Autofahrer: Für $\lambda = \lambda_2$ ergibt sich ein *früherer* Wechsel der Autofahrer auf die ungestörten Routen, während für $\lambda = \lambda_1$ ein zunächst verzögertes Ansprechen auf die Totalsperrung zu beobachten ist. Die Wechselrate nimmt dann mit der Zeit jedoch deutlich zu.

Exponentielles Beobachtungsmodell und Gegenüberstellung

Die Erkenntnisse, die mit dem linearen Beobachtungsmodell abgeleitet werden konnten, lassen sich prinzipiell auf das exponentielle Beobachtungsmodell übertragen. Naturgemäß verhält sich die Abhängigkeit der Wechseldauer t_{\max} von der Referenzzeit $1 \text{ s} \leq t_{\text{ref}} \leq 250 \text{ s}$ umgekehrt zum Faktor f : Mit zunehmender Referenzzeit nimmt die Wechseldauer t_{\max} zu. Daraus ergibt sich, dass das Verhältnis $t_{\max}(t_{\text{ref}}, d = d_2 = 5, \lambda_i) / t_{\max}(t_{\text{ref}}, d = d_1 = 2, \lambda_i)$ für größer werdende Referenzzeiten t_{ref} zunimmt. Sonst lassen sich äquivalente Aussagen bezüglich der Längenparameter und Varianzdichten für das exponentielle Modell ableiten, insbesondere in Bezug auf die Wechselraten betroffener Autofahrer.

Der Vergleich der zeitlichen Routenwahlverläufe beider Beobachtungsmodelle Ma und Mb offenbart den linearen und exponentiellen Charakter: Das Ansprechverhalten auf die lokalen Verkehrsbedingungen ist mit dem linearen Modell zunächst schneller. Vgl. dazu die Verläufe der Routenwahlhäufigkeiten $H_r(t)$ für $d = d_2 = 5$ und $\lambda = \lambda_1 = 9 \text{ s}^2/\text{m}$ der beiden Modelle. Unter der Annahme einer festen Wechseldauer t_{\max} hat mit dem linearen Modell bereits nach 200 s ein messbarer Teil der Autofahrer die gestörte Route 1 verlassen, während es mit dem exponentiellen Modell circa 350 s dauert. Auch für $\lambda = \lambda_2$ lässt sich dieser Unterschied zwischen den Modellen erkennen. Da in derselben Wechseldauer t_{\max} dennoch alle Autofahrer die Route 1 verlassen, sind folglich die Maxima der Wechselraten mit dem exponentiellen Modell größer als mit dem linearen. Die Reaktion der Autofahrer auf die Störung ist somit mit dem exponentiellen Modell zunächst zögerlich, dann aber sehr bestimmt. Mit dem linearen Modell ist das Ansprechverhalten zunächst direkter, die Wechselrate bleibt aber stets kleiner als mit dem exponentiellen Modell. Bei dieser Betrachtung ist jedoch zu beachten, dass für

eine geeignete Wahl der Parameter die maximale Wechseldauer für beide Modelle identisch ist und somit nur Unterschiede im *zeitlichen Verlauf* der Routenwahlanteile $H_r(t)$ bestehen.

Zusammenfassung

Zusammengefasst hängt das Routenwechselverhalten der Autofahrer ab von (i) der Dauer der Standzeit T_S^1 , die Eingang in das Beobachtungsmodell findet, (ii) der deterministischen Nutzendifferenz der Routen, (iii) der Größe der Varianzdichte und schließlich (iv) von der Spezifizierung des Beobachtungsmodells, mit der modellierte Autofahrer die noch erwartete Verzögerung aufgrund der bereits erfahrenen Dauer eines Ereignisses antizipiert. Obwohl die Modelle keine Datengrundlage besitzen und somit auf heuristischen Annahmen basieren, reflektieren beide Beobachtungsmodelle dennoch in realistischer Weise, dass Routenwechsel aufgrund von Ereignissen i. Allg. eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen. Diese Studie kann jedoch nur einen Anhaltspunkt für die Wechseldauer und die Entwicklung der Routenwahlanteile geben, da alle betrachteten Autofahrer zur selben Zeit ins Netzwerk eingefahren sind; dies ist weder in der Realität noch in mikroskopischen Simulationen möglich. Ferner wurde vorausgesetzt, dass betroffene Autofahrer stets wechseln konnten, was in der Realität nicht immer der Fall sein muss.

3.5 Zusammenfassung, Einordnung und Diskussion des ereignisorientierten Routenwahlmodells

Das in diesem Kapitel entwickelte Modell bildet die ereignisorientierte Routenwahl in städtischen Straßennetzen auf der kurzfristigen Zeitskala städtischer Phänomene ab. Es modelliert individuelle Autofahrer, die ihre lokale Umgebung fortwährend beobachten und dadurch unvorhergesehen eintretende Verkehrereignisse bemerken und in der Routenwahl explizit berücksichtigen können. Für nicht sichtbare Gebiete des Netzwerks treffen die Autofahrer *Annahmen* über die aktuell vorherrschenden Verkehrsbedingungen. Die Alternativenmenge der Fahrer ist einfach, effizient und auf den Sachverhalt spontaner Ereignisse im Stadtstraßenverkehr angepasst. Das ereignisorientierte Routenwahlmodell adaptiert die Struktur eines MNP-Modells mit normalverteilten Zufallsnutzen, wobei der Entscheidungsprozess für jeden individuellen Autofahrer direkt simuliert wird. Dabei wird jede zur Verfügung stehende Route bewertet und am Ende diejenige mit dem höchsten Nutzen ausgewählt. Während demnach die analytische Berechnung von Auswahlwahrscheinlichkeiten nicht erforderlich ist, werden Methoden zur rechnergestützten Generierung von Zufallszahlen benötigt. Das vorgeschlagene Routenwahlmodell hat folgende Merkmale:

- Es modelliert realistische Autofahrer mit individuellen und repetitiven Entscheidungsprozessen, die konsistent sind mit der Nutzenmaximierung (diskrete Wahltheorie).
- Es berücksichtigt sich lokal auswirkende Verkehrereignisse durch einen flexiblen Ereignisanteil im deterministischen Nutzen für jede Route.

- Es modelliert eine praktische und dynamische Routenwahlmenge für jeden einzelnen Autofahrer, die direkt mit der Anzahl an möglichen Abbiegerichtungen am nächstfolgenden Knoten korrespondiert, an die sich jeweils ein statischer, schnellster Pfad anschließt, der noch vor Laufzeitbeginn auf der Grundlage eines gewichteten Graphs (z. B. Länge, Reisezeiten) berechnet wird.
- Die Formulierung des Zufallsnutzens basiert auf Autofahrer-Kante-Einheiten; in dieser Weise sind überlappende Routen automatisch korreliert.
- Es verwendet eine generische Formulierung der deterministischen Nutzenfunktion, die an viele konkrete Anwendungsfälle angepasst werden kann.
- Es ist flexibel in vielen mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen einsetzbar.

3.5.1 Einordnung in die Literatur

Die Mehrheit bisheriger Ansätze der Routenwahlmodellierung berücksichtigt das Auftreten *unvorhersehbarer* Ereignisse gar nicht oder nur bedingt, da oft die ideale Annahme eines Nutzergleichgewichts getroffen wird, die im ereignisreichen Stadtverkehr jedoch nicht realistisch ist. Dennoch lassen sich in der Literatur Routenwahlmodelle und Simulationsumgebungen finden, die Gemeinsamkeiten mit dem ereignisorientierten Routenwahlmodell aufweisen. Für eine Einordnung wird eine Auswahl dieser Ansätze im Folgenden kurz gegenübergestellt.

Multi-Agenten-Paradigma

Ein *Multi-Agenten-System* (MAS) beschreibt ein System, das aus intelligenten⁹ *Agenten* besteht, die sich in einer untersuchten und in aller Regel nicht-deterministischen¹⁰ *Umgebung* befinden und ein bestimmtes Ziel bestmöglich erreichen wollen [vgl. 209]. Ein Agent wird dabei als Computersystem mit einem gewissen Repertoire an Aktionen verstanden, das es zur Erreichung seiner Ziele einsetzen kann. Nach Wooldridge [209] müssen Agenten im Wesentlichen zwei Fähigkeiten besitzen:

- Autonome Durchführung von Aktionen
- Interaktionen untereinander und mit dem umgebenden System

Der Agent trifft demnach Entscheidungen für oder gegen die Durchführung von Aktionen, um seine Ziele bestmöglich zu erreichen.

Multi-Agenten-Systeme werden weitläufig eingesetzt, darunter auch zur Beschreibung von Verkehrs- und Transportsystemen [52, 189, 20, 18, 19]. Das ereignisorientierte Routenwahlmodell besitzt Ähnlichkeiten zu einem MAS: Die modellierten Autofahrer übernehmen die Rolle

⁹Insbesondere im Kontext der künstlichen Intelligenz wird von einem Agenten typischerweise gefordert, dass er in der Lage ist, zu (i) lernen, (ii) planen und (iii) verstehen. Allerdings ist dies nicht für alle Multi-Agenten-Systeme erwünscht.

¹⁰Nicht-deterministisch bedeutet in diesem Zusammenhang, dass zwei identische Aktionen eines Agenten unter denselben oder ähnlichen Rahmenbedingungen zu völlig unterschiedlichen Ausgängen führen können. Die Begründung dafür ist, dass ein Agent in der Regel nur eine partielle Kontrolle bezüglich seines Einflusses in der Umgebung hat, sodass der Ausgang einer Aktion stochastisch unscharf ist.

von Agenten, die ein individuelles Ziel verfolgen: Erreichung des bestmöglichen Nutzens für die Fahrt zum gewünschten Ziel. Dabei interagieren die Autofahrer mit dem Netzwerk durch lokale Beobachtungen (Schlangenlänge, Signalisierung von Lichtsignalanlagen).

Bisherige Simulationsumgebungen und Routenwahlmodelle

Bisherige Simulationsumgebungen wenden ähnliche Ansätze für die Modellierung der Routenwahl an. MITSIMLab [34] fasst ebenso schnellste Pfade für jede ausgehende Kante am Knoten bis zum Ziel des Autofahrers als individuelle Alternativenmenge zusammen. Dabei werden schnellste Pfade auf der Grundlage *aktuell vorherrschender* Reisezeiten im Netzwerk berechnet und nur solche ausgehenden Kanten betrachtet, die nach Dial [68] effizient sind. Die Routenmenge entsteht dabei infolge einer impliziten Pfadaufzählung, die im ereignisorientierten Routenwahlmodell hingegen nicht zur Anwendung kommt. MITSIMLab versteht sich als vollwertige Simulationsumgebung, in der die Routenwahlmodellierung nur einen Aspekt darstellt, der grundsätzlich mit beliebigen Routenwahlmodellen realisiert werden kann. Ferner besteht ein weiterer Unterschied zum ereignisorientierten Routenwahlmodell: Anstatt die Reisezeit auf der aktuellen Kante zu schätzen, betrachtet der Autofahrer in MITSIMLab die möglichen ausgehenden Kanten am nächsten Knoten. Da Autofahrer in der Regel nur eine begrenzte Sichtweite haben, wird im ereignisorientierten Routenwahlmodell davon ausgegangen, dass Autofahrer in städtischen Netzwerken nur die lokalen Verkehrsbedingungen auf der aktuellen Kante bis zum nächstfolgenden Knoten einsehen können.

Eine Reisezeitschätzung für die möglichen ausgehenden Kanten am nächsten Knoten führen auch modellierte Autofahrer im RL-Modell von Fosgerau u. a. [80] durch. In diesem Modell wird die Routenwahl rekursiv auf das Problem der Kantenwahl zurückgeführt. Dabei werden jedoch unkorrelierte Zufallsnutzen in jedem Rekursionsschritt für ein und denselben Autofahrer angenommen. Im ereignisorientierten Routenwahlmodell hingegen bleiben die Zufallsnutzen für jede Einheit aus Fahrer und Kante über die gesamte Simulationsdauer konstant, was eine realistischere Annahme darstellt. Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Yai u. a. [212] mit ihrem MNP-Routenwahlmodell. Der Zufallsnutzen einer Entscheidungsträger-Gesamtheit enthält ein konstanten routenspezifischen Anteil. In dieser Weise sind wie im vorgeschlagenen Modell überlappende Routen automatisch miteinander korreliert. Das MNP-Modell von Yai u. a. [212] ist jedoch nicht ereignisorientiert und wurde vorrangig für Schienennetze entwickelt, lässt sich prinzipiell jedoch auch für die Routenwahl von Autofahrern einsetzen.

3.5.2 Diskussion

Das ereignisorientierte Routenwahlmodell ist zur Komplementierung bereits bestehender Verkehrsflussmodelle in Simulationsumgebungen konzipiert. Es ergänzt Fahrzeugfolge-, Spurwechsel- und Lichtsignal-Reaktions-Modelle um einen realistischen und reaktiven Autofahrer. Die Routenwahlmenge eines Autofahrers wird dabei dem Sachverhalt spontaner Ereignisse gerecht. Sie umfasst die lokal möglichen Abbiegerichtungen des Autofahrers und den jeweils

dazugehörigen schnellsten (Länge, Reisezeiten) Pfad bis zum Ziel. Für den Fall, dass kürzeste Pfade (bezogen auf die Geometrie des Netzwerks) für den Restweg zum Ziel herangezogen werden, müssten dem modellierten Autofahrer *perfekte* Ortskenntnisse unterstellt werden. In der Realität würde dies kaum für jeden Autofahrer zutreffen, andererseits würden moderne Navigationsanwendungen (Navigationsgeräte und Smartphones) ebenso Alternativrouten in dieser Art vorschlagen können. Der Kenntnisstand eines Autofahrers bezüglich der Verkehrsbedingungen auf der nicht-sichtbaren Restroute kann mit dem ereignisorientierten flexibel modelliert werden. Insbesondere ist es denkbar, dass die Kenntnisse des modellierten Autofahrers über statische, aus dem ungestörten Netzwerk abgeleitete, Reisezeiten hinausgehen, beispielsweise weil Verkehrsinformationen im Rahmen eines ATIS berücksichtigt werden sollen. Im ereignisorientierten Wahlmodell sind die Zufallsnutzen normalverteilt. Die Annahme normalverteilter Zufallszahlen lässt sich mit dem zentralen Grenzwertsatz [z. B. 7, S. 1352] begründen, nach dem eine große Anzahl additiv verknüpfter Zufallszahlen asymptotisch einer Normalverteilung gehorcht.

Das ereignisorientierte Routenwahlmodell ist ein sehr effizientes Modell. Zur Konstitution der Routenwahlmenge werden *vor* dem Simulationsablauf berechnete Pfade aus dem gewichteten Graph des zu untersuchenden Netzwerks herangezogen. Jeder Autofahrer hat dann eine eigene Alternativenmenge, die dynamisch aus den vorab berechneten Pfaden konstituiert wird. Somit ist keine explizite Pfadaufzählung während der Simulation notwendig. Individuelle Entscheidungsprozesse der modellierten Autofahrer werden nicht in jedem Zeitschritt durchlaufen, sondern im Mittel nur alle 10-30 Sekunden. Gleichzeitig können die Entscheidungsprozesse auch an Entscheidungspunkte im Netzwerk (z. B. Knoten) oder lokalen Ereignisse geknüpft sein. Dies trägt nicht nur zur Effizienz bei, sondern bildet in realistischer Weise ab, dass Autofahrer lediglich von Zeit zu Zeit (oder von Ort zu Ort) Entscheidungsprozesse der Routenwahl durchführen. Ferner werden die Zufallsnutzen für jede Einheit aus Autofahrer und Kante mit einer effizienten Abbildung erzeugt.

Im Gegensatz zu vielen anderen Modellen wird das ereignisorientierte Routenwahlmodell nicht zur Suche eines Nutzergleichgewichts eingesetzt. Für den ereignisreichen Stadtverkehr, der u. a. von nicht wiederkehrenden Störungen geprägt wird, ist die Annahme einer Markttransparenz, in der den Autofahrern im Stadtstraßennetzwerk aktuelle Reisezeiten (zumindest ungefähr) bekannt sind, auch unter Bereitstellung von Echtzeit-Informationen nicht gerechtfertigt [101]. Grundsätzlich ist es jedoch denkbar, das Routenwahlmodell in einer Simulationsumgebung zur Suche eines dynamischen Nutzergleichgewichts einzusetzen (siehe auch Kap. 7). Dabei müssten die Reisezeiten auf den Kanten des Netzwerks iterativ aktualisiert werden und anschließend mit in den Entscheidungsprozess einfließen. Das ereignisorientierte Routenwahlmodell entfaltet seine praktische Relevanz jedoch insbesondere für Simulationen von Stadtphänomenen, in denen die Verkehrsstromverteilung fernab eines Nutzergleichgewichts ist und zeitgleich die Beobachtungen von Autofahrern eine wichtige Rolle spielen. Hierbei seien insbesondere *Verkehrsstörfälle* erwähnt, die einen idealen Kontext für die Anwendung des ereignisorientierten Routenwahlmodells bieten. Es kann einen großen Beitrag dazu leisten,

die Auswirkungen von (konkreten) Störfällen zu untersuchen und geeignete Gegenmaßnahmen abzuleiten und zu bewerten. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein selbstorganisiertes Störfallmanagement vorgestellt, das anschließend mit dem ereignisorientierten Routenwahlmodell qualitativ in Simulationen bewertet wird. Prinzipiell ist das mögliche Anwendungsspektrum des ereignisorientierten Routenwahlmodells breit gefächert.

4 Simulation von Verkehrsstörfällen und Gegenmaßnahmen

Verkehrsstörfälle resultieren in nicht wiederkehrender Staubildung und schränken die Mobilität in Städten stark ein. Da sich Störfälle grundsätzlich nicht verhindern lassen, sind effiziente Gegenmaßnahmen zur Reduzierung ihrer negativen Begleiterscheinungen erforderlich. Aus dieser Notwendigkeit heraus ergeben sich wichtige Fragestellungen hinsichtlich des Ausmaßes negativer Auswirkungen von Störfällen im Netzwerk und des Leistungspotenzials der Anwendung konkreter Gegenmaßnahmen. Das ereignisorientierte Routenwahlmodell, mit dem das Routenwahlverhalten von Autofahrern im ereignisreichen Stadtverkehr realistisch abgebildet wird, kann einen bedeutenden Beitrag zur Beantwortung dieser Fragestellungen leisten. Darüber hinaus ermöglicht die flexible Konzeption des vorgeschlagenen Routenwahlmodells ein breit gefächertes Anwendungsspektrum.

Die Übermittlung von Informationen und der Einsatz von Verkehrsbeeinflussungsanlagen in einem Störfall sind wichtige und weit verbreitete Maßnahmen. Ihre Wirkung auf das Verkehrsgeschehen im Netzwerk ist jedoch begrenzt, da sie empfindlich von der Folgebereitschaft der Autofahrer abhängig ist. Eine zusätzliche Voraussetzung dieser Maßnahmen besteht schließlich darin, dass Störfälle räumlich und zeitlich detektiert worden sind. Die hohe Verbreitung und die Verbindlichkeit für Verkehrsteilnehmer regen die Entwicklung eines lichtsignalgestützten Störfallmanagements an. Die Umverteilung von Grünzeiten an betroffenen Knotenpunkten kann die Reisezeitverluste der Autofahrer im Störfall reduzieren. Die Tragweite eines lichtsignalgestützten Störfallmanagements ist jedoch bedeutend größer, da die Bildung von Gridlocks durch überlaufende Fahrzeugschlangen effektiv gehemmt werden kann.

4.1 Verkehrsstörfälle in städtischen Netzwerken

Verkehrsstörfälle (kurz: Störfall) sind nicht wiederkehrende, spontan einsetzende und kurzfristig bestehende Störungen im Verkehrsablauf, die sich gleichermaßen in städtischen Netzwerken und auf Autobahnen ereignen und *grundsätzlich* in nicht wiederkehrender Staubildung resultieren [vgl. auch 146]. Unter ihrem Einfluss entsteht eine Situation, in der die Verkehrsnachfrage unvorhergesehen höher ist als das Verkehrsangebot. Weder die Infrastruktur noch die Autofahrer haben sich auf das Eintreten dieser Situation entsprechend einstellen können.¹ Das

¹Ein Störfall muss nicht zwingend unvorhergesehen eintreten. Eine vorherige Ankündigung, d. h. Informationsbereitstellung, ist zwar denkbar; dennoch kann nicht davon ausgegangen werden, dass *jeder* Verkehrsteil-

kollektive Routenwahlverhalten der vom Störfall betroffenen Autofahrer führt schließlich zu einer schnellen Ausbreitung von Rückstaus im Netzwerk.² Störfälle gehen folglich mit negativen Auswirkungen auf den Verkehr, die Wirtschaft, die Umwelt und die Sicherheit einher. Die möglichen Ursachen eines Störfalls sind vielfältig; einen großen Teil machen jedoch Unfälle und liegengebliebene Fahrzeuge aus [147]. Im Folgenden werden ausschließlich Störfälle in städtischen Netzwerken betrachtet.

Verkehrsstörfälle können einen Gridlock-Prozess [64] im Stadtnetzwerk auslösen. Den Ausgangspunkt eines solchen Prozesses bilden überlaufende Fahrzeugschlangen auf Kreuzungen. Durch den Überlauf werden zwangsläufig auch ursprünglich nicht vom Störfall betroffene Verkehrsströme am Fortkommen behindert, obwohl in deren gewünschten Richtungen prinzipiell noch Straßenkapazitäten bereitstehen. Stattdessen entsteht durch die Behinderung der überlaufenden Fahrzeugschlange auf der Kreuzung ein weiterer Ausgangspunkt für Staubildung. Setzt sich dieser Prozess weiter fort, kann die nicht wiederkehrende Staubildung kaskadenartig große Teile des Netzwerks erfassen und das Verkehrsgeschehen nachhaltig belasten [vgl. auch 62].

Störfälle sind grundsätzlich *unvermeidbar*. Strategien, die das Eintreten von Störfällen verhindern sollen, scheitern einerseits an der unabzählbar großen Menge an möglichen Auslösern und andererseits daran, dass das Eintreten von Ereignissen, selbst wenn mögliche Auslöser im Voraus bekannt sind³, praktisch nicht kontrolliert werden kann. Vielmehr muss der Beseitigung der Ursache eines bestehenden Störfalls die höchste Priorität eingeräumt werden. Da dies typischerweise nicht sofort oder überhaupt nicht⁴ möglich ist, kommt es auf die Anwendung geeigneter Gegenmaßnahmen an. Vereint zu einem Störfallmanagement besteht ihr Ziel offenkundig darin, die negativen Auswirkungen störfallbedingter Staubildung zu reduzieren. In diesem Zusammenhang bestehen mithin wichtige Fragestellungen:

- Wie wirken sich Störfälle im Netzwerk aus? Welches Ausmaß der Staubildung im Netzwerk ist zu erwarten?
- Welche Gegenmaßnahmen sollen angewendet werden?
- Welchen Effekt haben die angewendeten Gegenmaßnahmen auf die Staubildung im Netzwerk?

Die Beantwortung dieser Fragestellungen führt auf Simulationen, die neben einem Netzmodell und einer Nachfragemodellierung auch realistische Modelle zur Abbildung des Routenwahlverhaltens von Autofahrern unter dem Einfluss des spontanen Störfalls benötigen. Diese Anforderung wird durch das ereignisorientierte Routenwahlmodell erfüllt.

nehmer Kenntnisse darüber erworben hat. Insofern hängt die Spontanität eines Ereignisses auch von der Wahrnehmung des Verkehrsteilnehmers ab.

²Die Implikationen für das Routenwahlverhalten der Autofahrer in einem gestörten Netzwerk werden in Abschnitt 2.5.1 besprochen.

³Wiederkehrende Staubildung kann Störfälle, d. h. nicht wiederkehrende Staubildung, bedingen. Dennoch ist nicht klar, wann und wo welcher Störfall, falls überhaupt, eintreten wird.

⁴Bei nachfrageseitigen Störfällen lässt sich die Störfallursache nicht im Sinne eines liegengebliebenen Fahrzeugs beseitigen.

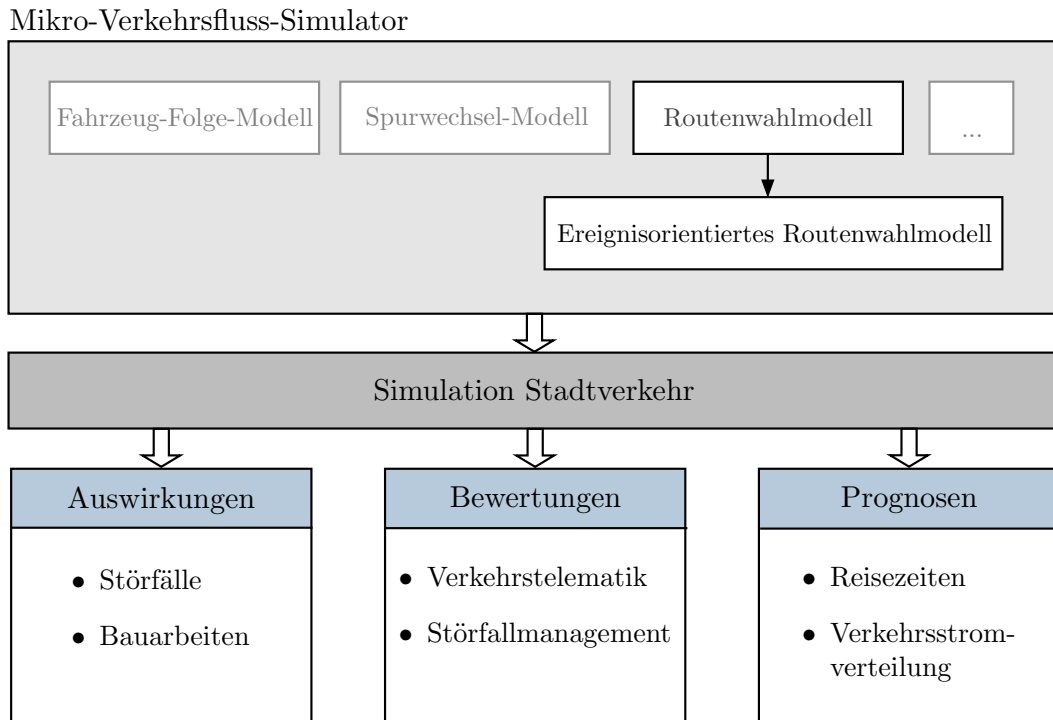


Abbildung 4.1: Übersicht über die Einordnung des ereignisorientierten Routenwahlmodells in eine Simulationsumgebung und ein mögliches Anwendungsspektrum. Das ereignisorientierte Modell ist für die Anwendung im ereignisreichen Stadtverkehr konzipiert und lässt sich auf vielschichtige Problemstellungen anwenden. Die Implementierung des Modells in eine bereits bestehende Simulationsumgebung ist i. Allg. problemlos möglich.

4.1.1 Simulationen mit dem ereignisorientierten Routenwahlmodell

Die Untersuchung von Störfällen in Verkehrssimulationen ist eine wichtige Anwendung für die Beurteilung und Bewertung von Auswirkungen auf das Netzwerk und der Leistungsfähigkeit von Gegenmaßnahmen. Das simulierte Verhalten der Autofahrer muss dabei den Besonderheiten von störfallinduzierter, nicht wiederkehrender Staubildung gerecht werden. Da Störfälle spontane und kurzfristige Ereignisse sind, die kein Autofahrer voraussehen kann, ist deren Routenwahlverhalten entsprechend stark von Unsicherheiten in der Wahrnehmung der Reisezeiten im Netzwerk geprägt. Die Annahme, Autofahrer verfügen über zumindest ungefähre Kenntnisse über die Reisezeiten im gestörten Netzwerk, ist nicht realistisch; die Annahme eines Nutzergleichgewichts ist nicht angemessen.⁵

Das ereignisorientierte Routenwahlmodell bildet die Besonderheiten der Routenwahl im ereignisreichen Stadtverkehr ab. Es erweitert eine bereits bestehende Simulationsumgebung um einen reaktiven Autofahrer, der unvorhergesehene Ereignisse realistisch in der Routenwahl berücksichtigen kann. Es ist unmöglich für modellierte Autofahrer, Störfälle vorauszuahnen; über die Beobachtungen modellierter Autofahrer können, so wie in der Realität, jedoch

⁵Dies wird in Abschnitt 2.5.3 begründet.

plötzliche Änderungen der Verkehrsbedingungen erkannt und in den Entscheidungsprozessen der Routenwahl einbezogen werden. Gleichzeitig wird eine Reisezeitunsicherheit im Netzwerk dadurch abgebildet, dass Annahmen über den Verkehrszustand in nicht sichtbaren Gebieten des gestörten Netzwerke gemacht werden, die aus den Erfahrungen des Autofahrers abgeleitet (beispielsweise aus dem ungestörten Netzwerk) werden.

Das ereignisorientierte Routenwahlmodell ist flexibel konzipiert und erlaubt ein breites Anwendungsspektrum im Kontext des Stadtverkehrs. Die Simulation von Verkehrsstörfällen ist dabei ein idealer Anwendungskontext; Zu möglichen Anwendungen zählen u. a. die

- Untersuchung und Schätzung der Auswirkungen eines Verkehrsstörfalls,
- Ableitung und Bewertung effektiver Gegenmaßnahmen für Störfälle hinsichtlich ihrer Wirksamkeit, Effektivität und Effizienz und
- Durchführung von Verkehrsprognosen für in der Zukunft liegende Zeiträume, in denen typische Störfälle mit gewissen Wahrscheinlichkeiten auftreten.

Diese Anwendungen haben einerseits eine praktische Relevanz für Verkehrsleitzentralen, können jedoch auch Wissenschaftlern dazu dienen, neuartige Ansätze für ein Verkehrsmanagement zu simulieren. Im Rahmen dieser Arbeit wird das ereignisorientierte Routenwahlmodell zur Bewertung eines selbstorganisierten Störfallmanagements eingesetzt, das im nächsten Kapitel vorgestellt wird. Eine Übersicht über die grundsätzliche Einordnung des ereignisorientierten Routenwahlmodells und dessen im Rahmen dieser Arbeit vorgeschlagenen Anwendungsspektrums ist in Abb. 4.1 dargestellt. In Kap. 7 werden weitere mögliche Anwendungsfälle und Erweiterungen des Modells detaillierter angeregt.

4.1.2 Anforderungen an Simulationsumgebungen

Das ereignisorientierte Routenwahlmodell lässt sich i. Allg. nahtlos in eine bereits bestehende mikroskopische Simulationsumgebung integrieren. Es komplementiert dabei vorhandene Fahrzeug-Folge-, Spurwechsel- und Signalreaktionsmodelle. Seitens der verwendeten Simulationsumgebung müssen jedoch bestimmte Anforderungen für die Integration des ereignisorientierten Routenwahlmodells erfüllt sein. Eine wesentliche Voraussetzung ist die Verfügbarkeit einer Schnittstelle zur Beeinflussung der Simulation vor und auch während der Laufzeit. Folgende Anforderungen sind essenziell für die Implementierung des ereignisorientierten Routenwahlmodells:

- Zugriff auf Zustände von Fahrzeugen (z. B. Pfad, Geschwindigkeit) und Anlagen der Infrastruktur (z. B. Signalzustände von Lichtsignalanlagen),
- Abstraktion des modellierten Netzwerks in Kanten und Knoten zur Berechnung von Pfaden und
- Modellierung der Verkehrsnachfrage mit OD-Relationen, d. h. Fahrzeuge haben einen definierten Start und folgen Pfaden bis zum Erreichen eines definierten Ziels.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das ereignisorientierte Routenwahlmodell erfolgreich in den mikroskopischen Verkehrsflusssimulator *Vissim*⁶ [76, 155] der PTV AG implementiert.

4.2 Gegenmaßnahmen von Störfällen und deren Bewertungen

Typische Gegenmaßnahmen von Verkehrsstörfällen umfassen die Verbreitung von störfallbezogenen (Echtzeit-)Informationen und die Abgabe von Routenempfehlungen durch Wechselverkehrszeichen, Navigationsgeräte oder Smartphones. Das vorrangige Ziel der Gegenmaßnahmen besteht darin, die Verkehrsströme entlang alternativer Routen zu führen, auf denen noch Straßenkapazitäten zur Verfügung stehen. Dies gilt sowohl für Autofahrer, die bereits von der Staubildung erfasst wurden sind als auch für jene Autofahrer, die die Staubildung noch nicht erreicht hat. Der Effekt von Gegenmaßnahmen ist jedoch grundsätzlich in dem Sinne beschränkt, dass eine *vollständige* Beseitigung der Auswirkungen eines bestehenden Störfalls durch die Ergreifung von Maßnahmen i. Allg. *nicht* zu erwarten ist. Ein Störfallmanagement kann die Auswirkungen eines Störfalls jedoch umso effektiver mindern, je zeitiger die Gegenmaßnahmen bei Bestehen eines Störfalls ergriffen werden [108].

4.2.1 Schritte eines Störfallmanagements

Ein Störfallmanagement ist eine Abfolge von Maßnahmen zur Wiederherstellung normaler Verkehrsbedingungen nach einem Störfall [197, 147]. Im Rahmen dieser Arbeit werden die folgenden, verkehrlich relevanten, Schritte eines Störfallmanagements betrachtet:⁷

- *Detektion des Störfalls*

Um weitere Maßnahmen ergreifen zu können, muss die Existenz eines Störfalls zunächst detektiert werden. Die Möglichkeiten zur Detektion sind dabei weitreichend; im einfachsten Fall werden Luftüberwachungen durch die Polizei oder anderen Einrichtungen durchgeführt. Moderne Ansätze verwenden Algorithmen, die von den Daten von Verkehrsdetektoren (Induktionsschleifen), Floating-Cars oder Video-Kameras gespeist werden.

- *Verbreitung von Informationen über den Störfall*

Dieser Schritt verfolgt das Ziel, störfallrelevante Informationen an betroffene Autofahrer zu übermitteln, um eine Umfahrung der Verkehrsströme zu fördern. Typische Möglichkeiten zur Verbreitung der Informationen bietet der Verkehrsfunk, Traffic Message Channel (TMC), den u. a. Navigationsgeräte und Smartphones empfangen können, Wechselverkehrszeichen und Konzepte individueller Informations- und Leitsysteme (ATIS).

⁶Version 5.40-08

⁷Allgemeiner betrachtet, umfasst ein Störfallmanagement oft auch die Koordinierung von Einsatzkräften. Dieser Aspekt wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch vernachlässigt. Einen Überblick gibt Referenz [197, S. 1-7ff.]

- *Management der Verkehrsströme*

Dieser Schritt umfasst die Beeinflussung potenziell betroffener Verkehrsströme im Netzwerk. Dabei können Verkehrsbeeinflussungsanlagen eingesetzt und insbesondere Lichtsignalanlagen einbezogen werden.

4.2.2 Detektion von Verkehrsstörfällen

Die Detektion von Störfällen ermöglicht die Anwendung weiterer Maßnahmen eines Störfallmanagements. Bedeutende Herausforderungen für die Detektion von Störfällen bestehen

- in der Differenzierung zwischen störfallbedingter, nicht wiederkehrender und wiederkehrender Staubildung und
- der Vermeidung falscher Alarme.

Die meisten Ansätze zur Störfalldetektion umfassen Algorithmen zur automatischen Störfallerkennung, die sich nach Guin [90] in verschiedene Klassen einteilen lassen: (i) Vergleichende Algorithmen, (ii) statistische Algorithmen, (iii) Zeitreihen- und Filter-Algorithmen, (iv) Algorithmen, die auf der Verkehrsflusstheorie beruhen und (v) hochentwickelte Algorithmen, die beispielsweise Fuzzylogik [z. B. 115, 91] oder neuronale Netzmodelle anwenden. Im Folgenden wird eine Auswahl an Methoden vorgestellt, die Daten von Verkehrsdetektoren und Floating-Car-Daten zur Detektion verarbeiten. Einen umfassenden Überblick über bis dahin entwickelte Methoden und deren Bewertung liefern zudem Parkany und Xie [153].

Detektion mit Daten von Verkehrsdetektoren oder Floating-Cars

Samant und Adeli [170] schlagen die Verwendung von vorverarbeiteten Rohdaten (z. B. Verkehrsstärken oder Belegungsgrade) aus Verkehrsdetektoren in einem neuronalen Netzmodell eines realen Netzwerks für eine automatische Detektion von Störfällen vor. Das Hauptaugenmerk ihres Artikels liegt dabei jedoch auf der Entwicklung des vorverarbeitenden Algorithmus; dieser kombiniert eine Wavelet-Transformation und eine lineare Diskriminanzanalyse zur Extraktion von untypischen Charakteristiken der Rohdaten, die Auswirkungen eines Störfalls indizieren könnten. Anschließend finden die vorverarbeiteten Daten Eingang in das neuronale Netzmodell; dies wird in einem weiteren Artikel [171] besprochen. Simulationen zeigen schließlich, dass die Durchführung einer Wavelet-Transformation die Zuverlässigkeit der Detektion von Störfällen wesentlich verbessern kann; dabei konnten insbesondere falsche Alarme vermieden werden.

Tang und Gao [188] schlagen einen Algorithmus zur Vorhersage von Verkehrsstärken im Netzwerk zur Anwendung einer automatischen Störfalldetektion vor. Die Verkehrsflussvorhersage wird von einem nicht-parametrischen Regressionsmodell geschätzt, das auf der Grundlage historischer Beobachtungen *und* dem aktuellen Zustand der Verkehrsstärken oder Geschwindigkeiten im Netzwerk eine Prognose für die nähere Zukunft ableitet. Diese Verkehrsflussprognose wird anschließend in einem einfachen Detektionsalgorithmus verwertet, der die Abweichung

der Verkehrslage $x(t)$ (z. B. Verkehrsstärken oder Geschwindigkeiten) im aktuellen Zeitraum t zur ursprünglich prognostizierten Verkehrslage $\hat{x}(t)$ bestimmt. Konkret wird ein Wert

$$\text{SND}(t) = \frac{\hat{x}(t) - x(t)}{S} \quad (4.2.1)$$

berechnet, wobei S die Standardabweichung einer Stichprobe *historischer* Verkehrslagen bezeichnet. Ist der Wert $\text{SND}(t)$ für ein bestimmtes t größer als ein vorab festgelegter Schwellenwert, hat der Algorithmus einen *möglichen* Störfall detektiert. Aus Simulationen schlussfolgern die Autoren, dass die Zuverlässigkeit dieser einfachen Detektionslogik empfindlich von der Wahl des Schwellenwerts abhängt.

Auch Floating-Car-Daten können zur Störfalldetektion verwendet werden. Beispielsweise haben Kerner u. a. [107] eine Methode zur Verkehrslageschätzung mit Floating-Car-Daten entwickelt, die sich zur Störfalldetektion in Verkehrsleitzentralen eignet. Neuere Ansätze, z. B. von Dia und Thomas [65] verbinden die Daten von Verkehrsdetektoren und Floating-Cars, wobei die Fusion der beiden Datenquellen eine Herausforderung darstellt und geeignet erfolgen muss.

Störfalldetektion mithilfe von Videokameras

In der Vergangenheit wurde neben der Verwendung von Algorithmen der Einsatz von Videokameras zur Störfalldetektion vorgeschlagen [z. B. 138, 139, 215]. Trivedi u. a. [195] haben die Grundidee einer Architektur entwickelt, die auf der Grundlage von dezentralen Videokameras Störfälle detektieren und überwachen kann. Dabei umfasst ihr Vorschlag die Ausstattung von Straßensegmenten mit Sensorgruppen, die eine Reihe von verschiedenen lokalisierten Kameras enthalten, die für den betrachteten Abschnitt geeignet ausgerichtet sind. Die Bilddaten werden kontinuierlich analysiert und beispielsweise für Verkehrsleitzentralen bereitgestellt, die geeignete Gegenmaßnahmen ergreifen können, falls sich ein Störfall ereignet hat. Ein konkreter Algorithmus zur Störfallerkennung wird jedoch nicht vorgestellt. Einen Überblick über die Störfalldetektion mit Videokameras und insbesondere dem Umgang mit verschiedenen Umgebungsbedingungen (z. B. Wetter, Tageszeiten) geben Shehata u. a. [177].

4.2.3 Informationsbereitstellung im Störfall

Ein naheliegender Schritt zur Reduzierung der Auswirkungen eines Störfalls ist die Verbreitung von störfallbezogenen Informationen unter den Autofahrern im Netzwerk. Die Übermittlung der Störfallinformationen sollte dabei solange anhalten, bis sich der störfallbedingte Stau aufgelöst hat [197]. Das Ziel der Übermittlung von Störfallinformation ist es, Autofahrer auf die spontan veränderten Verkehrsbedingungen hinzuweisen, um eine schnelle Umleitung betroffener Verkehrsströme zu fördern [186]. Noch nicht betroffene Autofahrer können mit der Störfallkenntnis noch vor Erreichen des Rückstaus eine Umfahrung in Betracht ziehen, während der Informationserwerb für betroffene Autofahrer eine Unterstützung in den Ent-

scheidungsprozessen der Routenwahl *en route* sein kann. Schließlich können Autofahrer, die das Netzwerk noch gar nicht befahren haben, eine zeitliche Verlagerung des Weges oder die Nutzung eines anderen Verkehrsmittels erwägen.

Folgen betroffene Autofahrer den Informationen oder Empfehlungen eines bordeigenen Informations- und Leitsystems (ATIS), können sie ihre Reisezeitverluste infolge der störfallbedingten Staubildung teils deutlich reduzieren [122, 210]. Die Wirksamkeit von ATIS wird jedoch auch vom Ausstattungsgrad der Autofahrer im Netzwerk bestimmt. Al-Deek und Kanafani [4] haben den Effekt eines ATIS unter der Betrachtung eines variablen Ausstattungsgrads der Autofahrer im Netzwerk untersucht. Dabei konnten sie feststellen, dass die Wirksamkeit der individuellen Informationsübermittlung abnimmt, je größer der Anteil ausgestatteter Autofahrer ist. Falls er einen kritischen Wert überschreitet, kann es zur Staubildung auf alternativen Routen kommen, da mehr Autofahrer die Störstelle umfahren als die alternativen Routen tatsächlich aufnehmen können.

Unabhängig davon, ob allgemeine oder individuelle Informationssysteme verwendet werden, spielt das Verhalten der Autofahrer unter Informationsbereitstellung eine bedeutende Rolle. Kattan u. a. [105] haben eine Untersuchung zum Verhalten von Autofahrern in Calgary in Kanada bei Unfällen durchgeführt, wobei die Störfallinformationen mithilfe von Wechselverkehrszeichen übermittelt wurden. Zur Auswertung wurden die Angaben von circa 500 Autofahrern in einer Telefonumfrage erhoben, auf deren Grundlage ein diskretes Wahlmodell für das Ausweichverhalten der Autofahrer als Reaktion auf die bereitgestellte Information geschätzt wurde. Circa zwei Drittel aller untersuchten Autofahrer haben ihre Routenwahl aufgrund der bereitgestellten Informationen geändert. Sehr wenige Autofahrer haben ihren Zielort angepasst. Das geschätzte Modell zeigt ferner, dass neben den Informationen u. a. auch die Reiselänge und -zeit, Ortskenntnisse und weitere Informationen aus anderen Datenquellen wichtige Einflussfaktoren für das Verhalten der Autofahrer sind. Die Autoren stellen ferner allgemein fest, dass zusätzlich die Folgebereitschaft der Autofahrer bezüglich abgegebener Routenempfehlungen eine sehr wichtige Rolle spielt.

Die Verbreitung von Informationen ist jedoch *nicht immer* positiv: Wahle und Bazzan [201] haben simulativ gezeigt, dass die Verbreitung von Informationen auch zu instabilen Mustern der Verkehrsstromverteilung im Netzwerk führen kann, infolgedessen die Leistungsfähigkeit des Netzwerk sogar reduziert werden kann. Ungeachtet dessen ermöglicht der gezielte Einsatz der Informationsbereitstellung die Umleitung der Verkehrsströme im gestörten Netzwerk überhaupt erst. Bazzan u. a. [20] schlussfolgern jedoch, dass die Umleitung betroffener Verkehrsströme im gestörten Netzwerk noch effizienter organisiert werden kann, falls neben der Informationsbereitstellung beispielsweise Lichtsignalanlagen oder andere Methoden der Verkehrsbeeinflussung zusätzlich angewendet werden.

4.2.4 Verkehrsbeeinflussung im Störfall

Neben der Übermittlung von Informationen über den Störfall im Netzwerk lassen sich zusätzlich Verkehrsbeeinflussungsanlagen und Lichtsignalanlagen im Rahmen eines Störfallmanagements anwenden. Oft kommen Wechselverkehrszeichen⁸ zum Zweck der Umleitung der Verkehrsströme im gestörten Netzwerk zum Einsatz. Durch die hohe Verbreitung in städtischen Netzwerken und die Verbindlichkeit für Verkehrsteilnehmer eignen sich auch Lichtsignalanlagen für die Einbeziehung in ein Störfallmanagement. Rausch u. a. [166] haben in einer simulativen Untersuchung gestörter Netzwerke gezeigt, dass die Anpassung der Grünzeiteaufteilung an betroffenen Lichtsignalanlagen die unvermeidliche Erhöhung von Reisezeiten teils deutlich reduzieren kann. Dazu wurden in einem einfachen bzw. komplexen Netzwerk die Grünzeiteaufteilungen betroffener Lichtsignalanlagen iterativ angepasst, bis sich das Nutzergleichgewicht mit der geringsten durchschnittlichen Gesamtreisezeit eingestellt hat. Für alle untersuchten Störfälle hat sich eine optimale Lösung dann eingestellt, falls die Bedienungskapazitäten primär für umfahrende Richtungen bereitgestellt wurden. Zum Stau führende Richtungen hingegen wurden zwangsläufig mit signifikant weniger Bedienungskapazitäten bemessen. Da jedoch von deterministischen Gleichgewichtsbedingungen ausgegangen wurde, sind die verhaltensbezogenen Annahmen für die Routenwahl der Autofahrer im Störfall nicht realistisch abgebildet worden. In einer simulativen Studie haben Wirtz u. a. [208] Strategien eines Verkehrsmanagements unter der Existenz verschiedener Störfälle auf städtischen Autobahnen untersucht. Im Ergebnis haben sie festgestellt, dass die Anpassung der Signalisierung bereits existierender Lichtsignalanlagen auf den städtischen Ausweichstrecken die Staubildung signifikant reduzieren konnte.

4.2.5 Simulative Bewertung von Gegenmaßnahmen

Das Routenwahlverhalten von Autofahrern in gestörten städtischen Netzwerken nimmt eine Schlüsselposition in der Bewertung von Gegenmaßnahmen ein. Das ereignisorientierte Routenwahlmodell bildet dieses Routenwahlverhalten realistisch ab. Gleichzeitig bietet es eine hohe Flexibilität: Viele konkrete Gegenmaßnahmen lassen sich in der flexibel konzipierten deterministischen Nutzenfunktion des ereignisorientierten Routenwahlmodell integrieren. Die Grenzen der Implementierung von Gegenmaßnahmen sind dabei maßgeblich durch die verwendete Simulationsumgebung und weniger durch das ereignisorientierte Routenwahlmodell vorgegeben. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Verhaltensmodell für Autofahrer implementiert, das auf beobachteten Rotzeiten sichtbarer Lichtsignalanlagen basiert. Dies wird in Kap. 6 beschrieben.

⁸Wechselverkehrszeichen sind örtlich gebundene, variable Verkehrsschilder, die verkehrsrelevante Informationen in *Echtzeit* anzeigen können und dabei das Verhalten von Autofahrern beeinflussen sollen [nach 74, S. 1-1]. Dabei können beispielsweise textuelle Verkehrswarnungen angezeigt, Routenempfehlungen abgegeben oder Geschwindigkeitsbeschränkungen angepasst werden.

4.3 Zusammenfassung und Diskussion

Das ereignisorientierte Routenwahlmodell ermöglicht eine realistische Simulation des Routenwahlverhaltens von Autofahrern im ereignisreichen Stadtverkehr. Ein idealer Anwendungskontext sind Verkehrsstörfälle mit einem breit gefächerten Anwendungsspektrum. Dies umfasst neben der Untersuchung der Auswirkungen von Störfällen insbesondere die Ableitung und Bewertung von Gegenmaßnahmen für die störfallbedingte Staubildung im Netzwerk.

Die Übermittlung von Informationen (z. B. ATIS) im Störfall ist in vielen Fällen hilfreich zur Reduzierung der negativen Auswirkungen im Netzwerk. Der Effekt der Informationsbereitstellung ist jedoch maßgeblich abhängig von

- einer guten Erreichbarkeit,
- der Art und Qualität der Information,
- einer örtlich *und* zeitlich gerechten Übermittlung,
- und in letzter Instanz auch von der Folgebereitschaft der Autofahrer [105, 123, 110].

Zusätzlich wurde in der Literatur gezeigt, dass die Wirksamkeit der individuellen Informationsbereitstellung umso geringer ist, je größer der Anteil ausgestatteter Autofahrer ist. Zudem können dynamische Informationen zu einer instabilen Verkehrsstromverteilung im Netzwerk führen und die Situation damit sogar verschlechtern.

Im Rahmen eines Störfallmanagements lassen sich auch Maßnahmen zur Beeinflussung der Verkehrsströme im Netzwerk einbeziehen (ATMS). Eine besonders vielversprechende Beeinflussung des Verkehrs im Störfall kann mit Lichtsignalanlagen realisiert werden. Maßgeblich hierfür ist, dass Lichtsignale verbindlich für alle Verkehrsteilnehmer im Netzwerk sind und die Signalzeiten direkt die Kapazitäten an den Knotenpunkten regulieren. In der Literatur konnten die negativen Auswirkungen von Störfällen durch eine Anpassung der Grünzeiteaufteilung betroffener Lichtsignalanlagen im Sinne einer geringerer Reisezeiten und weniger Staubildung nachgewiesen werden. Das Potenzial von Lichtsignalanlagen im Störfall ist jedoch bedeutend größer, da sie sich effektiv in Konzepte zur Verhinderung oder Hemmung von Gridlock-Prozessen einsetzen lassen. Ein einfaches und zugleich effektives Konzept für ein lichtsignalgestütztes Störfallmanagement wird im nächsten Kapitel vorgestellt. Die Wirkungsprinzipien des vorgeschlagenen Ansatzes sind (i) die explizite Vermeidung von überlaufenden Fahrzeugschlangen auf Kreuzungen und (ii) die Förderung der Umverteilung betroffener Verkehrsströme auf nicht überlastete Netzelemente durch die Erhöhung der entsprechenden Bedienkapazitäten. Die Anwendung der Prinzipien wird dabei *selbstorganisiert* durch das Ausmaß der Staubildung realisiert. Dabei ist weder eine großflächige Störfalldetektion notwendig noch sind zusätzliche Verkehrsbeeinflussungsanlagen zwingend.

5 Ein selbstorganisiertes Störfallmanagement als Anwendung des ereignisorientierten Routenwahlmodells

Die negativen Konsequenzen eines Verkehrsstörfalls können die Leistungsfähigkeit städtischer Infrastruktur nachhaltig beeinträchtigen. Gegenmaßnahmen können die negativen Auswirkungen reduzieren. Dabei ist die Verbreitung von störfallbezogenen Informationen und die Abgabe von Routenempfehlungen weit verbreitet. Oft sind diese Maßnahmen jedoch nicht ausreichend, da sie empfindlich von der Folgebereitschaft der Autofahrer abhängen. In diesem Kapitel wird ein einfaches und zugleich effektives Störfallmanagement vorgestellt, das sich die kapazitätsregulierende Natur von Lichtsignalanlagen in städtischen Netzwerken zunutze macht. Ein wesentlicher Aspekt des vorgeschlagenen Störfallmanagements ist die Regulierung von Fahrzeugschlangen auf Straßenabschnitten mit einer Zuflussdosierung, die ein Anwachsen einer Fahrzeugschlange bis über stromaufwärtige Kreuzungen hinaus vermeidet. Da die Kreuzungen für nicht betroffene Verkehrsströme passierbar bleiben, ist die Bildung von Blockaden (lokale Gridlocks), die ihrerseits wieder Ausgangspunkte für Rückstaus sind, stark gehemmt. Gleichzeitig werden alternative, nicht betroffene Richtungen, in denen noch Kapazitäten zur Verfügung stehen, weiterhin mit Grünzeiten bedient. Autofahrer, die ursprünglich in den verstaute Abschnitt einfahren wollten, werden auf diese Weise zum Umfahren der Störstelle ermutigt. Dadurch werden ohnehin noch verfügbare Straßenkapazitäten im umliegenden Netzwerk ausgeschöpft, während die Störstelle selbst von weiteren Zuflüssen entlastet wird. Im günstigsten Fall resultiert die Anwendung beider Prinzipien in einer *Selbst-Heilung* des gestörten Netzwerks, die dadurch charakterisiert ist, dass alle Autofahrer im Netzwerk trotz des Störfalls in endlicher Zeit ihre Ziele erreichen können.

5.1 Motivation und Einordnung

Die Bildung von Warteschlangen an Knotenpunkten eines städtischen Netzwerks ist aufgrund des Einsatzes von Lichtsignalanlagen auch unter normalen Verkehrsbedingungen unausweichlich. Die Steuerungen gewährleisten ein konfliktfreies Abfließen der Warteschlangen auf den Zufahrten des Knotenpunkts und sind typischerweise dafür ausgelegt, dass die Warteschlangen während eines Umlaufs vollständig bedient, d. h. geleert, werden können. Unter übersättigten Verkehrsbedingungen stoßen insbesondere Festzeitsteuerungen jedoch schnell an ihre Grenzen,

sodass ein Anwachsen der Warteschlangen von Umlauf zu Umlauf nicht zu verhindern ist. Die Bildung von langen Rückstaus ist jedoch ungünstig, da Straßenkapazitäten gebunden und somit die Abflusskapazitäten des Netzwerks vermindert werden. Eine problematische Ursache für Übersättigung im Stadtnetzwerk ist die *störfallbedingte* Staubildung, die dadurch entsteht, dass sich weder die Infrastruktur (z. B. Lichtsignalanlagen oder Wechselverkehrszeichen) noch die Autofahrer auf den Eintritt eines Störfalls haben einstellen können. Ohne Ergreifung geeigneter Gegenmaßnahmen erfassen lokal propagierende Rückstaus schnell größere Teile des Netzwerks und beeinträchtigen die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur nachhaltig. Weit verbreitete Gegenmaßnahmen sind die Informationsbereitstellung und Verkehrsbeeinflussung mit dem Ziel, eine Umverteilung betroffener Verkehrsströme auf alternative, nicht übersättigte Netzelemente zu fördern. Sämtliche Gegenmaßnahmen sind jedoch vergebens, falls

- Rückstaus sich so ausbreiten können, dass sich die Verkehrsströme gegenseitig blockieren (überlaufende Fahrzeugschlangen) und
- die Umleitungsrouten, auf denen Straßenkapazitäten zur Verfügung stehen, nicht genügend Autofahrer aufnehmen können, weil die Grünzeitaufteilungen an den betroffenen Knotenpunkten nicht auf diese neue Situation angepasst sind.

Diese Problematik kann durch die Einbeziehung von Lichtsignalanlagen in ein aktives Störfallmanagement vermieden werden. Die folgenden Merkmale von Lichtsignalanlagen sind dabei für ein Störfallmanagement sehr bedeutend:

- *Verfügbarkeit*
Lichtsignalanlagen sind in städtischen Netzwerken allgegenwärtig. Insbesondere sind Kreuzungen von Hauptstraßen, entlang denen ein großer Teil des Straßenverkehrs fließt, typischerweise signalisiert.
- *Verbindlichkeit für Autofahrer*
Die Signalisierung einer Lichtsignalanlage ist verbindlich für alle Verkehrsteilnehmer. In der Straßenverkehrsordnung (StVO) ist eindeutig geregelt, welche Bedeutung die Lichtzeichen an Kreuzungen haben.
- *Regulierung von Straßenkapazitäten*
Die Aufteilung der Grünzeiten an Lichtsignalanlagen bestimmt die Kapazität des städtischen Netzwerks [z. B. 172, 181]. Signalisierungen können gezielt eingesetzt werden, um den Zufluss in Gebiete oder Straßenabschnitte eines Netzwerk zu regulieren.
- *Steuer- und Regelbarkeit*
Lichtsignalanlagen werden von Steuerungen bzw. Regelungen betrieben, die sich erweitern oder ersetzen lassen. Moderne Steuerungen arbeiten ferner mit Verkehrsdaten von Sensoren, die auf den Zufahrten der Kreuzungen eingebaut sind, und können sich auf diese Weise an unterschiedliche Verkehrssituationen anpassen.

In diesem Kapitel wird ein aktives, einfaches und effektives Störfallmanagement für städtische Netzwerke vorgestellt, dessen Ziel es ist, den Zufluss von Verkehrsströmen in Richtung der Ursache der Staubbildung zu beschränken und umfahrende Richtungen durch erhöhte Bedienungskapazitäten attraktiver zu machen.

5.1.1 Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen in städtischen Netzwerken

In der Vergangenheit wurden Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen in städtischen Netzwerken entwickelt, die zur Optimierung des Verkehrsablaufs beitragen und Überlastungen von einzelnen Netzelementen verhindern sollen. Wie sich herausstellen wird, sind diese modernen Steuerungsverfahren in der Regel jedoch nicht a priori im Rahmen eines Störfallmanagements anwendbar. Zu den bekanntesten Vertretern der Steuerungsverfahren zählen beispielsweise TRANSYT [168], SCOOT [99, 98, 43], SCATS [128, 72] und fortgeschrittenere Konzepte wie OPAC [84], PRODYN [94] und RHODES [140]. Eine zusammenfassende Übersicht der Funktionsweise dieser Steuerungsverfahren liefern die weiterführenden Referenzen [151, 97, 178]. Im Folgenden werden beispielhaft die Steuerungsverfahren MOTION, BALANCE, TUC und die Selbst-Steuerung vorgestellt.

MOTION - Method for the Optimization of Traffic Signals In On-line Controlled Networks

MOTION [114, 45] ist ein verkehrsadaptives Steuerungsverfahren, das von der Siemens AG entwickelt und vertrieben wird. Das Ziel von MOTION besteht darin, die Vorteile eines koordinierten Systems von Lichtsignalanlagen (Grüne Wellen) mit lokal flexiblen Signalplänen zur Berücksichtigung lokal fluktuierender Verkehrsbedingungen zu verbinden. Im Kern besteht MOTION aus einem Optimierungsverfahren, für das verschiedene Kriterien anwendbar sind. Aktuelle Verkehrsdaten (z. B. Verkehrsstärken) im Netzwerk werden kontinuierlich erfasst und finden Eingang in das Optimierungsverfahren. Zur Optimierung werden schließlich mehrere Schritte zur Berechnung der Umlaufzeiten und Grünzeiteaufteilungen an den Knoten durchlaufen. Anschließend wird die Koordinierung zusammenhängender Lichtsignalanlagen eingestellt und optimiert. Das in Abschnitt 4.2.4 beschriebene Störfallmanagement von Kruse [114] wurde in MOTION implementiert. Weiterführende Informationen lassen sich auch in Referenz [96] finden.

BALANCE - BALancing Adaptive Network Control mEthod

BALANCE ist ein adaptives Steuerungsverfahren, das im Rahmen einer Dissertation von Friedrich [83] entwickelt wurde und heute kommerziell vertrieben wird. Das Verfahren umfasst die Erhebung von lokalen Knotenströmen, die einerseits für eine Optimierung der lokalen Signalpläne verwendet werden und andererseits in aggregierter Form Eingang in eine *strategische Instanz* des Verfahrens finden. In dieser findet im Anschluss an eine Wirkungsanalyse auf der

netzweiten Ebene eine globale Optimierung der Signalpläne der Knoten statt. In der zugehörigen Zielfunktion werden allgemeine Kosten berücksichtigt, die im Konkreten z. B. durch Wartezeiten, Staulängen oder Anzahl der Stopps ersetzt werden können. Die globale Instanz von BALANCE legt schließlich einen *Rahmenplan* für jeden signalisierten Knotenpunkt fest; die Signalpläne der Lichtsignalanlagen können jedoch bei lokalen, möglicherweise unvorhergesehenen, Ereignissen angepasst werden. Durch die Berechnung von Versatzzeiten werden ebenso Koordinierungen der Lichtsignalanlagen ermöglicht. Weiterführende Informationen finden sich auch in Referenz [96].

TUC - Traffic Urban Control

Ein fortgeschritteneres Steuerungsverfahren, das im Ansatz auf einer *Kapazitätssteuerung* beruht und den Zufluss für überlastete Straßenabschnitte zu reduzieren versucht, ist TUC [66, 67]. Um das Risiko von übersättigten Straßenabschnitten zu senken, versucht TUC, die Grünzeiten so aufzuteilen, dass die Anzahl der Fahrzeuge auf den Straßenabschnitten im Netzwerk minimal ist. Für die auf einen Straßenabschnitt zufahrenden Verkehrsströme werden dabei gegebenenfalls die Grünzeiten vermindert. Gleichzeitig versucht TUC, die Grünzeiten an den Knotenpunkten so zu regeln, dass die Anzahl der Fahrzeuge ausgeglichen bezüglich *aller* Kanten des Netzwerk ist. Aus diesem zusammengefassten Optimierungsproblem leiten die Autoren unter der Verwendung des „store-and-forward“-Ansatzes¹ einen multivariablen Steuerungsansatz ab, der auf veränderte Verkehrsbedingungen reagiert und dabei nicht mit Zukunftsschätzungen der Verkehrslage arbeitet. Dinopoulou u. a. [71] haben die TUC-Strategie simulativ und in einem Feldtest² in der Stadt Chania (Griechenland) untersucht. Ihre Beobachtungen lassen die Autoren schlussfolgern, dass die TUC-Strategie eine signifikante Verbesserung der Verkehrsbedingungen, auch unter dem Einfluss von Störfällen, bewirkt hat.

Selbst-Steuerung

Die Selbst-Steuerung ist ein lokales, selbstorganisiertes Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen in städtischen Netzwerken und wurde kürzlich von Lämmer [117, 116] entwickelt. Mithilfe eines Optimierungsverfahrens werden die Freigabezeiten auf der Grundlage *lokal* prognostizierter Ankünfte an der Haltelinie jedem zufahrenden Verkehrsstrom am Knoten zugeteilt. Im Kern vereint die Selbst-Steuerung zwei Grundprinzipien:

1. *Mikroskopische Ankunftsprognose*

Aus den Zeitreihen eines Zu- und Abflussdetektors wird für jeden Fahrstreifen eine Zeitreihe $N(t)$ prognostiziert, die die Anzahl der Fahrzeuge angibt, die im Zeithorizont t die Haltelinie erreichen könnten. Die Ankunftsprognose wird mittels eines Modells für den Zufluss, die Warteschlange und den Abfluss dynamisch aktualisiert und korrigiert.

¹Im deutschen Sprachraum auch unter dem Begriff *Teilstreckenverfahren* bekannt.

²Vgl. auch Referenz [112]

2. Lokale Optimierung

Auf der Grundlage der mikroskopischen Ankunftsprognose findet in einem lokalen Optimierungsverfahren eine Bewertung möglicher Abfolgen der Signalisierung hinsichtlich von Wartezeiten und der Anzahl von Stopps statt. Die beste Lösung wird schließlich angewendet. Die Signalisierungsabfolge basiert nicht auf festen Umlaufzeiten, da verträgliche Verkehrsströme *flexibel* bedient werden, vgl. auch [121]. Da die lokale Optimierung einzelner Knotenpunkte unter gewissen Umständen zu einer nicht optimalen oder gar schlechteren Lösung für das Netzwerk führen kann (z. B. Aufschaukeln benachbarter Knotenpunkte), wird eine lokale Zustandsüberwachung durchgeführt, die, zur Verhinderung einer schlechten Lösung, bedarfsgerecht eingreift und dann jeden Verkehrsstrom mit ausreichenden Grünzeiten bedient.

In mehreren Simulationsstudien [116, 118, 119] hat sich die Selbst-Steuerung in Bezug auf die Verteilung der Rotzeiten und Anhäufung von Verlustzeiten an Knotenpunkten als eine signifikante Verbesserung gegenüber gewöhnlichen Festzeitsteuerungen und anderen verkehrsabhängigen Steuerungsverfahren dargestellt. Seit September 2014 wird die Selbst-Steuerung zudem in Dresden an zwei benachbarten Knotenpunkten praktisch angewendet. Eine Nacherhebung wurde anschließend zur Durchführung eines quantitativen Vergleichs der Selbst-Steuerung mit der ursprünglichen Steuerung durchgeführt. Die Praxistauglichkeit der Selbst-Steuerung „mit geringeren Wartezeiten für alle Verkehrsarten“ [117] konnte erfolgreich nachgewiesen werden.

5.1.2 Grenzen optimierender Steuerungsverfahren im Störfall

Lämmer und Helbing [118] und de Gier u. a. [89] stellten unabhängig voneinander fest, dass verkehrsabhängige Steuerungsverfahren in Stadtstraßennetzwerken bei beobachtbaren Verkehrskenngrößen zu besseren Mittelwerten und deutlich geringeren Streuungen führen. Optimierende Signalisierungsstrategien wirken sich demnach prinzipiell positiv auf das variable Verkehrsgeschehen in einem städtischen Straßennetzwerk aus.

Die meisten Steuerungsverfahren unterliegen jedoch der Annahme, dass Verkehrsströme an den Knotenpunkten stets abfließen können. Für störfallbedingte Staubildung (u. U. auch für wiederkehrende Staubildung) ist diese Annahme jedoch nicht gerechtfertigt, insbesondere wenn Fahrzeugschlangen über Kreuzungen hinaus anwachsen und schließlich kreuzende Verkehrsströme behindern. In diesem Fall verlieren viele Steuerungsverfahren ihre ursprüngliche Wirkung [178, 216, 137, 106], da deren Leistungsfähigkeit eingeschränkt ist. Auch die Koordinierung der Lichtsignalanlagen impliziert keinen Mehrwert, wenn Straßenkapazitäten auf dem koordinierten Straßenabschnitt durch Rückstaus gebunden sind. Ferner wird vielfach nicht berücksichtigt, dass die verkehrsabhängige Aufteilung der Grünzeiten einen Einfluss auf das Routenwahlverhalten der Autofahrer und umgekehrt hat [z. B. 184, 183, 57]. Die fehlende Berücksichtigung dieser Wechselwirkung stellt eine starke Vereinfachung dar [vgl. 181, 182].

5.2 Anforderungen an ein Steuerungskonzept im Störfall

Ein Störfall wird von Phänomenen wie Gridlocks begleitet, die in optimierenden Steuerungsverfahren oft nicht explizit vermieden werden können. Ein Steuerungskonzept, das im Rahmen eines Störfallmanagements zum Einsatz kommen soll, setzt daher eine über Kapazitätsoptimierungen hinausgehende lokale *Steuerung* der Kapazitäten voraus. Ein wichtiges Ziel besteht dabei einerseits in der Vermeidung von überlaufenden Fahrzeugschlangen auf Kreuzungen. Andererseits muss die Umverteilung betroffener Verkehrsströme auf nicht übersättigte Netzelemente gefördert werden. Diese Kapazitätssteuerung lässt sich dabei über ein aktives Eingreifen in die Grünzeitaufteilung der Lichtsignalanlage am betroffenen Knoten realisieren: Rot- und Grünzeiten lassen sich direkt in Straßenkapazitäten übersetzen, die durch eine Anpassung gezielt gesteuert werden können. Mithilfe eines entsprechend geeigneten Ansatzes kann die störfallbedingte Staubildung im Netzwerk unter Einbeziehung von Lichtsignalanlagen effizient bewältigt werden.

5.2.1 Steuerung von Lichtsignalanlagen im übersättigten Stadtverkehr

Die optimale Aufteilung von Grünzeiten ist im überlasteten Stadtverkehr von enormer Wichtigkeit. Gazis [86, S. 140] erläutert, dass das Optimalitätskriterium im Überlastfall nicht der Zeitverlust betroffener Autofahrer während *eines* Umlaufs als vielmehr der Gesamtzeitverlust aller Autofahrer aller zufahrenden Verkehrsströme des Knotenpunkts für die *gesamte* Dauer der Überlastung ist. Unter Verwendung von *Pontrjagins Maximumprinzip*³ [156] formuliert er eine optimale Lösung für die Steuerung, in der zunächst dem Verkehrsstrom mit der höchsten Auslastung die höchste Bedienungskapazität in Form von Grünzeiten zugewiesen wird. Nach einer bestimmten *Wechselzeit* werden schließlich die Verkehrsströme mit ursprünglich geringerer Auslastung priorisiert und deren Bedienungskapazitäten maximiert. Falls die Wechselzeit geeignet gewählt wird, sind die Fahrzeugschlangen zum Ende der Überlastsituation gleichzeitig abgearbeitet. Gazis [86] bemerkt, dass die optimale Lösung für Überlastsituationen weniger intuitiv ist, da nicht die Zeitverluste einzelner Autofahrer einer Phase, sondern die Gesamtzeitverluste *aller* Verkehrsteilnehmer minimiert werden müssen. Das Ziel besteht dabei darin, in der Anfangsperiode der Übersättigung so viele Fahrzeuge wie möglich aus dem

³Das Pontrjagin'sche Maximumprinzip lässt sich mithilfe der Hamilton-Funktion aus der Kontrolltheorie für eine Steuerung $u(t)$ formulieren:

$$H(x(t), \lambda, u(t), t) = \lambda^T(t)f(x(t), u(t), t) + L(x(t), u(t), t).$$

Dabei bezeichnen λ die Lagrange-Multiplikatoren, $x(t)$ den Zustandsvektor und t die Zeit. Die notwendige Bedingung für die Optimalität der Steuerung $u^*(t)$ ist, dass sie die Hamilton-Funktion für alle erlaubten Steuerungen $u \in \mathcal{U}$ minimiert, sodass gilt

$$H(x^*(t), \lambda^*, u^*(t), t) \leq H(x^*(t), \lambda^*, u(t), t) \quad \forall u \in \mathcal{U} \text{ und } t_0 \leq t \leq t_f.$$

Dabei bezeichnet $x^*(t)$ die optimale Trajektorie in einem Phasenraum, λ^* die optimalen Lagrange-Multiplikatoren, t_0 den initialen und t_f den endenden Zeitpunkt. Weiterführende Informationen zu diesem Prinzip finden sich beispielsweise in [156].

System⁴ abfließen zu lassen. Gleichwohl wird das Prinzip für ein System aus nicht-isolierten Knotenpunkt wesentlich komplexer. Eine starke Annahme dieser Lösung besteht jedoch darin, dass Fahrzeuge am Knotenpunkt stets abfließen können. Weiterführende Informationen lassen sich in Referenz [86, S. 150 ff.] finden.

5.2.2 Hemmung der Gridlock-Entstehung im übersättigten Netzwerk

Ohne die Regulierung der Rückstaulänge durch eine lokale Anpassung der Signalzeiten an der betroffenen Kreuzung ist die Entstehung einer Gridlock-Situation durch überlaufende Fahrzeugschlangen kaum zu vermeiden: Der Überlauf entsteht schließlich erst dadurch, dass Grünzeiten einer Richtung zugewiesen werden, die eigentlich gar keine weiteren Kapazitäten mehr bereitstellen kann. Zusätzlich werden in diesem Fall Grünzeiten, d. h. im Störfall dringend benötigte Kapazität, völlig nutzlos eingesetzt.

Eine lokale Kapazitätssteuerung mithilfe von Lichtsignalanlagen kann diese Problematik vermeiden. Zur Vermeidung von Gridlock-Situationen im Netzwerk schlägt Daganzo [64] vor, den Zufluss in das betroffene Gebiet des Netzwerks zu reduzieren und gleichzeitig den abfließenden Verkehrsströmen die maximal mögliche Kapazität zuzuweisen [vgl. auch 63]. Ein ähnliches, jedoch bedeutend fundamentaleres, Prinzip schlägt auch Olsson [145] vor, der fordert:

*„The fundamental principle for traffic control is;
don't let more traffic in than what can pass out.“ [145]*

Diese beiden Ansätze können zunächst auf einen einzelnen Straßenabschnitt übertragen werden. Daganzos erster Vorschlag und Olssons Prinzip lassen sich wie folgt übersetzen: Sobald ein Rückstau auf die Kreuzung überzulaufen droht, wird der Zufluss in das betreffende Straßensegment durch verlängerte Rotzeiten gedrosselt. Daraus resultiert erstens eine effektive Vermeidung eines lokalen Gridlocks durch überlaufende Rückstaus [178]; zweitens werden Grünzeiten „frei“, die nun in sinnvoller Weise alternativen Richtungen zugewiesen werden können (Analogon zweiter Vorschlag von Daganzo). Dieser zweite Aspekt wird im folgenden Abschnitt behandelt.

5.2.3 Ausnutzen verfügbarer Straßenkapazitäten

Falls ein Straßenabschnitt keine weiteren Fahrzeuge mehr aufnehmen kann, ist die weitere Bereitstellung von Grünzeiten für diese Richtung nicht erforderlich. Ein charakteristisches Merkmal störfallbedingter Staubildung ist die Verfügbarkeit von Straßenkapazitäten in peripheren Bereichen der Störstelle (Umleitungen) [73]. Diese sollten im Rahmen eines Störfallmanagements bestmöglich ausgenutzt werden. Dazu müssen die freigewordenen, zusätzlichen Grünzeiten umfahrenden Richtungen zugewiesen werden, um eine Umverteilung betroffener

⁴Ein System ist in diesem Kontext als ein einzelner Knotenpunkt oder ein zusammenhängendes Knotenpunktsystem zu sehen.

Verkehrsströme zu ermöglichen und auch zu unterstützen. Olsson [145] geht explizit davon aus, dass zumindest ein gewisser Anteil betroffener Autofahrer aufgrund längerer Rotzeiten für die gewünschte Richtung ungeduldig genug wird und schließlich eine alternative Abbiegerichtung wählt. Jeder Autofahrer, der die Staubildung umfährt, trägt schließlich zur Entlastung des verstauten Gebiets bei. Diesbezüglich stellt Shepherd [178] fest, dass die Kapazitätsminderung eines gestörten Netzwerks durch eine Umverteilung der Verkehrsströme verringert werden kann.

Kruse [114] hat ein Störfallmanagement in MOTION integriert, das die oben beschriebenen Prinzipien umsetzt. Konkret wird im Störfall der Zufluss in das Netzwerk beschränkt, während verstaute Kanten des Netzwerks erhöhte Bedienungskapazitäten zugewiesen werden; zusätzlich wird das Überlaufen von Fahrzeugschlangen verhindert. Innerhalb von MOTION werden dazu die Grünzeiten lokal angepasst. Gleichwohl ist für die Anwendung des Störfallmanagements eine Störfalldetektion notwendig. Auch TUC verfolgt den Ansatz, überlaufende Fahrzeuge zu vermeiden. Während dies kein explizites Störfallmanagement darstellt, haben Dinopoulou u. a. [71] in einem Feldtest dennoch feststellen können, dass TUC auch unter der Einwirkung von Störfällen eine Verbesserung der Verkehrsbedingungen bewirkt. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein einfacher und gleichzeitig effektiver Ansatz für ein Störfallmanagement vorgeschlagen, der mit vielen Steuerungsverfahren für Lichtsignalanlagen vereint werden kann und eine Detektion des Störfalls nicht voraussetzt.

5.2.4 Ein selbstorganisierter Ansatz eines lichtsignalgestützten Störfallmanagements

Die besprochenen Ansätze von Daganzo [64], Olsson [145] und Shepherd [178] werden in dieser Arbeit zu einem selbstorganisierten Ansatz eines aktiven Störfallmanagements vereint. Es kombiniert im Wesentlichen zwei vollständig lokale Wirkungsprinzipien, die *Zuflussdosierung* zur Regulierung von Fahrzeugschlangen auf Straßenabschnitten und die *Förderung der Umverteilung betroffener Verkehrsströme* zur Entlastung der Störstelle und Ausnutzung noch verfügbarer Straßenkapazitäten im Netzwerk. Die Wirkungen der Prinzipien stellen sich dabei *vollständig selbstorganisiert* ein und bedürfen weder einer konkreten Planung durch Verkehrsleitzentralen oder andere Einrichtungen noch eines optimierenden Steuerungsverfahrens. Das selbstorganisierte Störfallmanagement wirkt vielmehr bedarfsgerecht, d. h. die Prinzipien greifen ein, wenn sich Rückstaus im Netzwerk gebildet haben. Dabei besteht keine Abhängigkeit zu einem bestimmten Steuerungsverfahren; im einfachsten Fall können Festzeitsteuerungen verwendet werden. Es sind jedoch zuverlässige und effiziente Methoden für die Staulängenschätzung auf Straßenabschnitten erforderlich. Das Grundprinzip des selbstorganisierten Störfallmanagements ist in Abb. 5.1 anschaulich dargestellt.

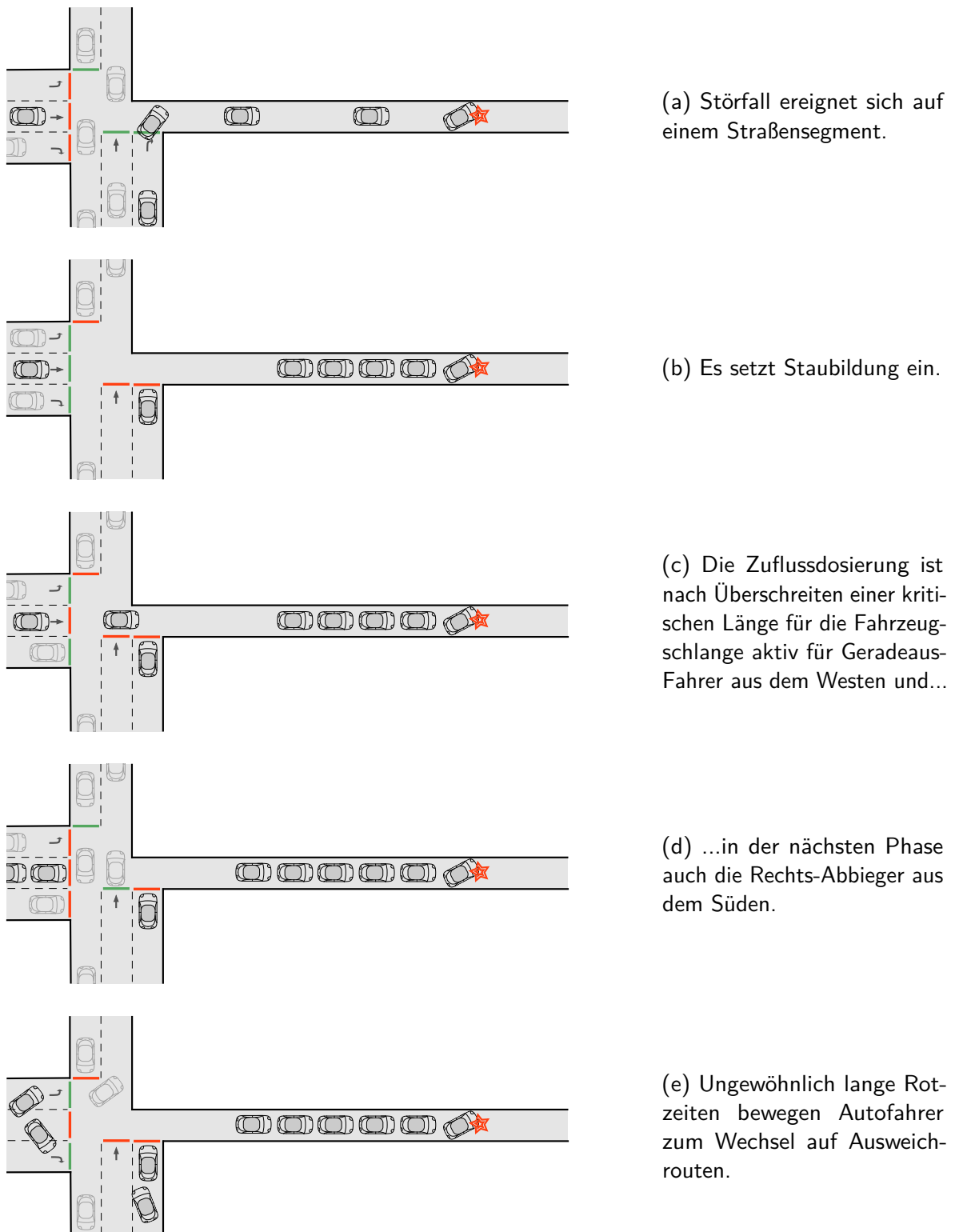


Abbildung 5.1: Die beiden Wirkungsprinzipien des selbstorganisierten Störfallmanagements veranschaulicht an einem einfachen Straßenabschnitt mit einer Kreuzung.

5.3 Erstes Wirkungsprinzip: Rückstauregulierung durch Zuflussdosierung

Das erste Wirkungsprinzip des selbstorganisierten Störfallmanagements ist die Zuflussdosierung. Sie nutzt die kapazitätsregulierende Eigenschaft von Lichtsignalanlagen aus und wird in bereits bestehende Steuerungen eines Netzwerks integriert. Die Zuflussdosierung wird auf einem Straßenabschnitt zwischen zwei Knotenpunkten eines städtischen Netzwerks angewendet. Ist aufgrund eines Störfalls oder einer erhöhten Nachfrage der Zufluss in den Straßenabschnitt größer als die aktuelle Abflusskapazität, bildet sich ein Rückstau, der sich entgegen der Fahrtrichtung zum stromaufwärtigen Knoten hin ausbreitet. Da die Abflusskapazität des Straßenabschnitts i. Allg. nicht erhöht werden kann, muss stattdessen der Zufluss beschränkt werden, um die Ausbreitung des Rückstaus über die nächste stromaufwärtige Kreuzung zu verhindern. Die Zuflussdosierung greift spätestens dann selbstständig ein, wenn die Fahrzeugschlange auf dem Straßenabschnitt eine kritische Länge erreicht hat. Konkret wird dabei der Zufluss in das betroffene Straßensegment durch erweiterte Rotzeiten beschränkt. Diese Beschränkung wird selbstständig wieder aufgehoben, sobald die Fahrzeugschlange zumindest teilweise abgebaut wurde.

Zur Anwendung der Zuflussdosierung müssen jeweils stromaufwärtig gelegene Lichtsignalanlagen des regulierten Straßenabschnitts mit Fähigkeiten zur Überwachung der Rückstaulänge komplementiert werden. Im Folgenden wird erläutert, wie sich die Zuflussdosierung in jede beliebige, bereits existente Steuerung theoretisch integrieren lässt. Dazu wird eine Regel für die Zuflussdosierung abgeleitet und ein analytisches Modell zur Bestimmung noch vorhandener Aufstellflächen auf einem Straßenabschnitt in einem hinreichend großen Zeithorizont entwickelt. Für einen praktischen Einsatz der Zuflussdosierung ist die *Schätzung von Staulängen* auf Straßenabschnitten eine wesentliche Anforderung; darüber hinaus werden Methoden aus der Literatur vorgestellt.

5.3.1 Die Zuflussdosierung als integraler Bestandteil einer Lichtsignalanlagen-Steuerung

Die Zuflussdosierung lässt sich als übergeordnete, *sekundäre*, Steuerung in eine bereits bestehende, *primäre*, Lichtsignalanlagen-Steuerung eines Knotenpunkts integrieren. Sie greift bedarfsgerecht und selbstständig in die Anweisungen der primären Steuerung ein, falls zum Zeitpunkt t die Länge des Rückstaus $x_i(t)$ auf einem ausgehenden Straßenabschnitt i eine kritische Länge R_i überschritten hat. Die Zuflussdosierung überschreibt dabei die für den betroffenen Straßenabschnitt vorgesehene Signalisierung der primären Steuerung mit einem roten Signalzustand. Diese Sperrung hält solange an, bis sich die Rückstaulänge reduziert hat und das Straßensegment wieder Fahrzeuge aufnehmen kann. Bezogen auf die Konfliktfreiheit der zusammenlaufenden Verkehrsströme, ist der Eingriff der sekundären Zuflussdosierung grundsätzlich unschädlich, da lediglich die Sperrzeiten für die betroffenen Straßenabschnitte

erhöht oder eingeschoben werden. Die Wirkungsweise der Zuflussdosierung wird mit den folgenden Punkten erläutert:

- *Kontinuierliche Überwachung ausgehender Straßenabschnitte*
Die Länge einer bestehenden Fahrzeugschlange auf der betrachteten Kante wird überwacht und der Eingriffslogik übermittelt.
- *Eingriffslogik*
Auf Grundlage der aktuellen Verkehrslage überprüft die Eingriffslogik kontinuierlich, ob die Bedingung $x_i(t) \leq R_i$ verletzt ist. Falls ja, greift die Zuflussdosierung selbstständig in die primäre Steuerung ein. Ist die Bedingung nicht (mehr) verletzt, wird der Eingriff nicht vollzogen oder selbstständig beendet. Nach einer möglichen Beendigung des Eingriffs der Zuflussdosierung erlangt die primäre Steuerung die Kontrolle über den ehemals betroffenen Straßenabschnitt vollständig zurück.
- *Eingriff der Zuflussdosierung*
Der Signalzustand der Signalgruppen, die dem betroffenen Straßensegment zugeordnet sind, wird unter Berücksichtigung von Zwischenzeiten mit „Rot“ überschrieben. Die zusätzlichen Rotzeiten werden dabei entweder verlängert oder eingeschoben.

Aus der Forderung, dass die Länge $x_i(t)$ der Fahrzeugschlange auf dem Straßenabschnitt einen kritischen Wert R_i nicht überschreiten darf, haben Lämmer u. a. [120] eine Regel als Nebenbedingung für die Steuerung einer zuflussdosierenden Lichtsignalanlage abgeleitet. Im Gegensatz zur hier gewählten Darstellung ist diese Regel *direkt* in der primären Steuerung verankert: Ist für einen hinreichend großen Zeithorizont h zu erwarten, dass die Staulänge auf einem ausgehenden Straßenabschnitt die kritische Länge überschreitet, falls also $x_i(t) \geq R_i$ für $t' \leq t \leq h$ mit $t' > 0$ zu erwarten ist, werden die Freigabezeiten für das betroffene Straßensegment in dem Maße *verringert*, dass stets $x_i(t) \leq R_i$ sichergestellt wird. Die Freigabezeiten werden dabei direkt aus der Anzahl der im Horizont h zur Einfahrt erlaubten Fahrzeuge $d_s(h)$ ermittelt. Der Index s bezeichnet dabei den jeweiligen, auf den Straßenabschnitt zufahrenden, Verkehrsstrom. Während diese von Lämmer u. a. [120] gewählte Darstellung äquivalent ist zu der hier gewählten, erlaubt sie die Herleitung eines analytischen Ausdrucks für $d_s(h)$. Dieser Ausdruck ist hauptsächlich von theoretischem Interesse und ist in dieser Form praktisch nicht direkt anwendbar. Im Folgenden wird ein analytischer Ausdruck für die obere Schranke der Anzahl der Fahrzeuge $d_s(h)$ entwickelt, die in den nächsten h Sekunden noch in den betreffenden Straßenabschnitt einfahren dürfen, um die Bedingung $x_i(t) \leq R_i$ einzuhalten. Dabei wird hier der Darstellung von Lämmer u. a. [120] gefolgt.

Modell für Warteschlangen auf einem Straßenabschnitt

Im Folgenden wird ein Straßenabschnitt i (Abb. 5.2) mit einer Länge L_i betrachtet. Sei ferner R_i die maximal erlaubte Aufstelllänge einer Fahrzeugschlange auf dem Straßenabschnitt.

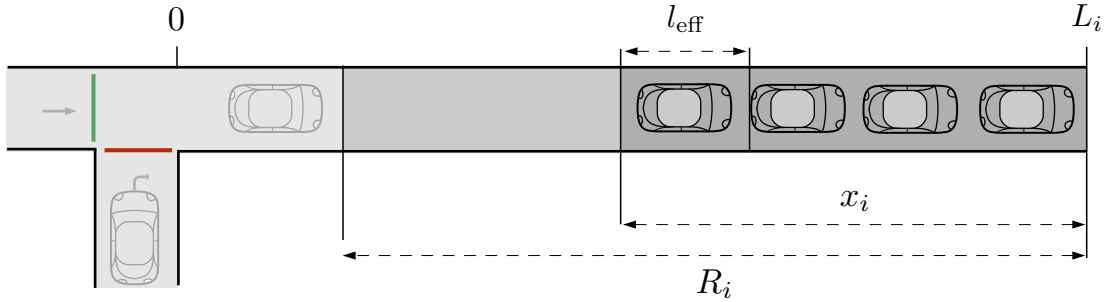


Abbildung 5.2: Vereinfachte Darstellung eines einfachen Straßenabschnitts mit einem Fahrstreifen zur Herleitung eines Modells für Warteschlangen. Die Länge der Warteschlange wird ab L_i im stromaufwärtiger Richtung gemessen.

Die Länge der Fahrzeugschlange $x_i(t)$ wird ab dem Ende des Straßenabschnitt i bei L_i in stromaufwärtiger Richtung gemessen. Die Anzahl der Fahrzeuge, die das Straßensegment schließlich aufnehmen darf, ergibt sich mit R_i/l_{eff} . Die effektive Länge eines Fahrzeugs l_{eff} entspricht dabei dem Inversen der maximalen Verkehrsdichte ρ_{max} auf dem Straßenabschnitt.

Bezeichne $A_i(t)$ bzw. $D_i(t)$ die kumulierte Anzahl der Ankünfte bzw. Abfahrten des Straßensegments i zur Zeit t . Dabei sollen die beiden Bedingungen (i) $A_i(t - L_i/v) - D_i(t) = 0$ im Falle freien Verkehrs und (ii) $A_i(t) - D_i(t) = 0$ im Falle eines leeren Straßenabschnitts gelten. Dabei ist L_i/v die Dauer zur Überwindung der Länge L_i von Straßenabschnitt i mit der Geschwindigkeit v im freien Verkehr. Es sei nun $x_i(t)$ die Position des stromaufwärtigen Endes der Warteschlange auf dem Straßenabschnitt i . Die Zufussdosierung überwacht schließlich die Einhaltung der Bedingung $x_i(t) \leq R_i$.

Unter gegebenem kumulierten Zu- und Abfluss des Straßenabschnitts kann die Dynamik der Staulänge $x_i(t)$ im Rahmen der makroskopischen Verkehrsflussdynamik analytisch hergeleitet werden. Im Section-Based-Modell [194, 93, 61] sind die Straßen eines Netzwerks in Abschnitte i mit konstanter Kapazität Q_{max}^i unterteilt. Hat sich eine Fahrzeugschlange auf dem Abschnitt i gebildet, stellt $x_i(t)$ den Ort einer Diskontinuität der Verkehrsdichte ρ dar. Dabei wird vorausgesetzt, dass Flussenerhaltung (Kontinuitätsgleichung der Verkehrsflussdynamik) und eine stückweise lineare Fluss-Dichte-Relation (dreieckiges Fundamentaldiagramm) gelten.

Schätzung der Aufstellkapazität

Auf Grundlage der vorhergehenden Betrachtungen wird eine Schätzung noch vorhandener Aufstellkapazitäten für noch zufahrende oder bereits zurückgehaltene Fahrzeuge eines Straßenabschnitts hergeleitet. Zur Zeit t habe sich eine Fahrzeugschlange mit der Länge $x_i(t)$ auf Straßenabschnitt i gebildet. Falls $x_i(t) < R_i$ gilt, können noch $(R_i - x_i(t))/l_{\text{eff}}$ Fahrzeuge bis zum Ausschöpfen der maximalen Aufstelllänge R_i in den Straßenabschnitt einfahren. Es können sich noch weitere Fahrzeuge auf dem Straßenabschnitt befinden, die noch nicht zur Fahrzeugschlange beitragen und bis spätestens zum Zeitpunkt $t - (L_i - x_i(t))/v$ eingefahren

sind. Unter dieser Berücksichtigung dürfen zum Zeitpunkt t folglich noch maximal

$$\frac{R_i - x_i(t)}{l_{\text{eff}}} - \left[A_i(t) - A_i \left(t - \frac{L_i - x_i(t)}{v} \right) \right] \quad (5.3.1)$$

zusätzliche Fahrzeuge in den Straßenabschnitt einfahren.

Ein aus der Fahrzeugschlange herausfahrendes Fahrzeug hinterlässt eine *Lücke*, die in stromaufwärtiger Richtung mit einer Geschwindigkeit $c \approx -5$ m/s propagiert, da nachfolgende Fahrzeuge aufrücken. Unter der Voraussetzung, dass die Ausfahrt des Fahrzeugs zum Zeitpunkt $t + x_i(t)/c$ stattgefunden hat, kann ein zurückgehaltenes Fahrzeug zum Zeitpunkt t in das Straßensegment einfahren und schließlich die bis zum stromaufwärtigen Ende der Schlange gewanderte Lücke kompensieren. Die Einhaltung dieses Zeitpunkts ist wichtig, falls $x_i(t) = R_i$ zum Zeitpunkt t bereits gilt. Allgemeiner haben Fahrzeuge, die in den letzten $-x_i(t)/c$ Sekunden die Warteschlange verließen, zum Zeitpunkt t

$$D_i(t) - D_i \left(t + \frac{x_i}{c} \right), \quad (5.3.2)$$

Lücken erzeugt, die von zurückgehaltenen Fahrzeugen kompensiert werden können.

Ein Fahrzeug, das in einem zeitlichen Horizont von h Sekunden in das Straßensegment i einfährt, wird eine Lücke in der Warteschlange finden, wenn ein wartendes Fahrzeug vor dem Zeitpunkt $t + h + (L_i - x_i)/v + x_i/c$ abgefahren ist. Allgemeiner schafft die Anzahl der Fahrzeuge, die bis zu diesem Zeitpunkt den Straßenabschnitt verlassen haben, weitere Kapazitäten für

$$D_i \left(t + h + \frac{L_i - x_i}{v} + \frac{x_i}{c} \right) - D_i(t) \quad (5.3.3)$$

Fahrzeuge. Schließlich ist die Anzahl der Fahrzeuge, die Straßensegment i innerhalb des Zeithorizonts h befahren dürfen, gegeben durch

$$\begin{aligned} a_i(h) &:= A_i(t+h) - A_i(t) \\ &= \frac{R_i - x_i}{l_{\text{eff}}} + A_i \left(t - \frac{L_i - x_i}{v} \right) - A_i(t) \\ &\quad + D_i \left(t + h + \frac{L_i - x_i}{v} + \frac{x_i}{c} \right) - D_i \left(t + \frac{x_i}{c} \right). \end{aligned} \quad (5.3.4)$$

Sie definiert eine obere Schranke an möglichen Fahrzeugankünften für Straßenabschnitt i unter der Einhaltung der Bedingung $x_i(t) \leq R_i(t)$.

Bemessung der Freigabezeiten

Aus der oberen Schranke $a_i(h)$ möglicher Fahrzeugankünfte (Gl. 5.3.4) im Zeithorizont h lässt sich eine Bemessung für die Freigabezeiten für das betroffene Straßensegment durchführen. Dazu werden alle Verkehrsströme $s \in \mathcal{S}_i$ betrachtet, die auf den Knotenpunkt zufließen. Im Allgemeinen wird nicht jedes Fahrzeug eines Stroms s in Straßenabschnitt i einfahren, sondern

lediglich ein gewisser Anteil $\alpha_{si} \leq 1$. Aus der Fahrzeugerhaltung am Knotenpunkt folgt außerdem, dass $\sum_j \alpha_{sj} = 1$ für alle zufließenden Verkehrsströme s , wobei über ausgehende Straßenabschnitte j summiert wird. Da die Anzahl der Fahrzeuge, die in Straßenabschnitt i einfahren dürfen, durch Gl. (5.3.4) beschränkt ist, ergibt sich die maximale Anzahl der Fahrzeuge, die aus *Verkehrstrom* s innerhalb des Zeithorizonts h abfahren dürfen gemäß

$$d_s(h) = \min_i \frac{a_i(h)}{\alpha_{si}}. \quad (5.3.5)$$

Die Freigabezeiten der Lichtsignalanlage sind demnach so zu bemessen, dass nicht mehr als $d_s(h)$ Fahrzeuge von Strom s in Straßenabschnitt i einfahren dürfen. Einen Anhaltspunkt für die Bemessung der entsprechenden Grünzeiten liefert dabei der Zeitbedarfswert $t_B \approx 2 \text{ s/Fzg.}$ [vgl. 172].

Diskussion

Die analytische Abschätzung für die Freigabezeiten zur Regulierung der Fahrzeugschlange auf einem Straßensegment basiert auf der Anzahl der zur Einfahrt erlaubten Fahrzeuge in diesen Abschnitt innerhalb der nächsten h Sekunden. Während die kumulierten An- und Abkünfte auf dem Straßenabschnitt mittels Detektoren direkt erfasst werden können, wird eine zuverlässige Methode zur Schätzung der aktuellen Staulänge $x_i(t)$ auf dem Straßenabschnitt benötigt. Ferner ist die Annahme statischer Abbiegeanteile α_{si} fraglich, da davon auszugehen ist, dass zumindest einige Autofahrer andere Richtungen wählen werden, wenn der Zufluss in den gewünschten Straßenabschnitt *beobachtbar* beschränkt wird. Insofern ist Gl. (5.3.5) als Näherung zu verstehen, die dennoch eine zuverlässige Zuflussdosierung ermöglicht: Da einige Autofahrer verstaute Straßenabschnitte vermeiden werden, ist der historische Abbiegeanteil höher als der tatsächliche im gestörten Knotenpunkt.

Abhängig vom Zeithorizont h kann der Zeitversatz $h + (L_i - x_i)/v + x_i/c$ aus Gl. (5.3.4) positive Werte annehmen. In diesem Fall bezieht sich $a_i(h)$ auf zukünftige Abfahrten $D(h + (L_i - x_i)/v + x_i/c)$ an der nächsten Kreuzung, für deren Abschätzung die Signalisierung im Voraus bekannt sein muss. Ist dies nicht der Fall, beispielsweise weil eine verkehrabhängige Steuerung verwendet wird, ist es im Sinne der Zuflussdosierung „sicher“, davon auszugehen, dass es keine zukünftigen Abfahrten gibt und demnach $D(t') = D(t)$ für $t' > t$ gilt. Allerdings führt diese Annahme zu einer Unterschätzung der Aufstellkapazitäten auf dem Straßenabschnitt. Für typische Werte für L_i , R_i , x_i , v und c kann der Horizont jedoch hinreichend groß mit $h \leq 20 \text{ s}$ gewählt werden.

Die Äquivalenz der von Lämmer u. a. [120] gewählten Darstellung der Zuflussdosierung, die über eine Anpassung von Grünzeiten für das betroffene Straßensegment realisiert wird, zu der hier gewählten Darstellung lässt sich leicht einsehen: Die effektiven Freigabezeiten, die sich aus der Anwendung der primären Steuerung und der sekundären Zuflussdosierung ergeben, resultieren in denselben Signalplänen, die auch durch Gl. (5.3.5) bestimmt werden.

Anstatt die Grünzeiten jedoch direkt zu modifizieren, werden Rotzeiten so eingeschoben, dass nur $d_s(h)$ Fahrzeuge in den nächsten h Sekunden einfahren dürfen. Mindestgrünzeiten wären für beide Formulierungen einzuhalten.

5.3.2 Methoden zur Schätzung von Staulängen

Eine Voraussetzung für die erfolgreiche Anwendung der Zuflussdosierung ist eine effiziente Methode zur Schätzung der aktuellen Länge $x_i(t)$ des Rückstaus auf einem Straßenabschnitt i . Der Steuerung der Zuflussdosierung müssen dabei kontinuierlich die aktuellen Staulängen auf den überwachten Straßenabschnitten des Knotenpunkts übermittelt werden, um im Bedarfsfall eingreifen zu können. Grundsätzlich ist die Staulängenschätzung für viele Anwendungen von hoher Bedeutung, vgl. [198]. In der Literatur wurden viele Ansätze entwickelt, wobei unterschiedliche Datenquellen als Ausgangspunkt verwendet oder miteinander kombiniert werden. Sämtliche der im Folgenden vorgestellten Ansätze beziehen sich auf die Zufahrten eines signalisierten Knotenpunkts.

Staulängenschätzung mittels Detektoren

Viele Methoden verwenden Detektoren auf Straßenabschnitten als Datenquelle. Sharma u. a. [174] stellen zwei Ansätze zur Schätzung der Schlangenlänge vor der Haltelinie einer signalisierten Kreuzung während eines Umlaufs vor. Der erste Ansatz kombiniert das Profil der kumulierten Ankünfte mit dem der Abfahrten bei Freigabezeiten der Lichtsignalanlage. Die Ankünfte werden dabei mit einem stromaufwärtigen Detektor erfasst, während die Abfahrten aus der Grünzeiteaufteilung im Rahmen der Verkehrsflusstheorie abgeleitet werden. Im zweiten Ansatz wird der stromaufwärtige Detektor durch einen Detektor an der Haltelinie ergänzt, aus dem sich die Abfahrten von Fahrzeugen zwischen dem Beginn und dem Ende der Freigabephase genauer erfassen lassen. Aus dem gebildeten Profil der An- und Abkünfte lässt sich schließlich eine *maximale* Länge des Rückstaus auf der Grundlage der bereits auf der Kante stehenden oder fahrenden Fahrzeuge ermitteln. Konnte eine Warteschlange während der Freigabezeit nicht vollständig geleert werden, wird in beiden Ansätzen die verbliebene Anzahl von Fahrzeugen der Staulängenschätzung für den nächsten Umlauf aufgeschlagen. Beide Ansätze wurden in der Stadt Noblesville (USA) einem Praxistest unterzogen und für die Schätzung der Warteschlangenlängen eine mittlere Abweichung⁵ von 0.15 Fzg. pro Umlauf berechnet. Beide Ansätze entsprechen dem klassischen Paradigma, den Zufluss mit dem Abfluss des Straßenabschnitts zu bilanzieren. Dieser Ansatz stößt jedoch schnell an seine Grenzen, wenn das Straßensegment bereits verstaut und der stromaufwärtige Detektor belegt ist. In diesem Fall ist die Fahrzeugschlange über den Detektor hinaus angewachsen, und damit aus der sog. *Detektionszone*, sodass keine Ankünfte von Fahrzeugen mehr gezählt

⁵Die Autoren haben die Quadratwurzel des mittleren quadratischen Fehlers betrachtet, der im angloamerikanischen Sprachraum als *Root square mean error* bekannt ist.

werden können. Einen ähnlichen Ansatz verfolgt Mück [142] unter der Verwendung gegebener, halteliniennaher Detektoren.

Liu u. a. [125] nehmen die Schwäche des Zufluss-Abfluss-Paradigmas als Ausgangspunkt eines alternativen Verfahrens, in dem die Zählraten bereits existierender Detektoren mit der Schockwellentheorie aus der makroskopischen Verkehrsflussdynamik kombiniert werden. Anstatt die kumulierten Ankünfte mit denen der Abfahrten zu bilanzieren, schlagen die Autoren vor, die Dynamik der stromaufwärtigen Staufront aus der Leerung der Warteschlange im unmittelbar letzten Umlauf abzuleiten. Für die Ableitung der Verkehrszustände sind jedoch hochaufgelöste Zählraten der Detektoren und Freigabezeiten der Lichtsignalanlage des Knotens vonnöten. Mithilfe des Lighthill-Whitham-Richards-Modells (LWR-Modell) [z. B. 194] wird die Position der Staufront schließlich zeitabhängig geschätzt, unabhängig davon, ob der zählende Detektor bereits belegt ist oder nicht. Eine Einschränkung des Modells ist, dass nur gewöhnlich lange Staulängen geschätzt werden können und für höhere Auslastungen die Schätzung schnell an Genauigkeit verliert.

Auch Sheu [179] stellt eine Methode vor, die den Überlauf von Fahrzeugschlangen über Detektionszonen explizit berücksichtigt. Die Dynamik der übergelaufenen Fahrzeugschlange wird mit einem stochastischen Modell abgebildet, das Spurwechsel berücksichtigt und die Schlängellänge für diskrete Zeitschritte schätzt. Für die Schätzung des aktuellen Zeitschritts werden historische Werte herangezogen.

Einen Ansatz für eine *direkte* Detektion von überlaufenden Fahrzeugschlangen stellen Geroliminis [88] vor. Dabei wird das Überlaufen der Fahrzeugschlange aus den Daten des Haltelinien-Detektors am *stromaufwärtigen* Knoten abgeleitet: Ist die Abflussrate am stromaufwärtigen Haltelinien-Detektor geringer als die Kapazität des *stromabwärtigen* Straßenabschnitts, so liegt eine Situation vor, in der die Fahrzeugschlange entweder bereits übergelaufen ist oder kurz davor steht. Im Gegensatz zu vielen anderen Methoden wird hier jedoch keine Echtzeitschätzung für die aktuelle Länge der Fahrzeugschlange angestrebt.

Floating-Car-Daten und Fahrzeugtrajektorien

Unabhängig von der Verfügbarkeit von Fahrzeugdetektoren auf einem Straßenabschnitt lassen sich auch die Daten von Floating-Cars oder allgemeiner Trajektorien Daten einzelner Fahrzeuge zur Schätzung von Staulängen heranziehen. Einige Ansätze kombinieren gar verschiedene Datenquellen, um eine effiziente und sichere Staulängenschätzung zu gewährleisten.

Comert und Cetin [59] verwenden die Daten von Floating-Cars zur Schätzung von Staulängen. Sie stellen dabei fest, dass für eine verlässliche Schätzung der Staulänge die Position des letzten Floating-Cars in der Warteschlange für das entwickelte Modell ausreichend ist. Die Annahme eines Fluss-Gleichgewichts des Verkehrsstroms und Poisson-verteilte Ankünfte stellen jedoch Einschränkungen des Modells dar.

Comert [58] schlägt die Verwendung von Haltelinien-Detektoren in Verbindung mit den Daten einzelner Floating-Cars vor. Dabei entwickelte er ein Modell für die Voraussage einer

erwarteten Staulänge nach dem Ende einer Rotphase für die betrachtete Zufahrt. Dabei wird angenommen, dass die Straße eine unendlich hohe Kapazität hat und die Fahrzeuge instantan auf die Wunschgeschwindigkeit des Autofahrers beschleunigen oder zum Stillstand bremsen können. Ferner werden Poisson-verteilte Ankünfte angenommen, die strenggenommen nur für isolierte Knotenpunkt anwendbar sind. Die Länge der Warteschlange ergibt sich schließlich aus der Distanz vom Detektor bis zum letzten Floating-Car und einer möglicherweise weiteren geschätzten Länge, für den Bereich nach dem Floating-Car. Das Modell berücksichtigt die Situation, falls nicht alle Fahrzeuge in der letzten Freigabephase bedient werden konnten. In numerischen Untersuchungen konnte Comert [58] zeigen, dass die Genauigkeit der Methode bereits bei einem Ausstattungsgrad von 5% zufriedenstellend ist.

Nicht nur die Positionen von Floating-Cars kann zur Schätzung von Staulängen herangezogen werden. Cheng u. a. [53] verwenden die Trajektorien- und Positionen von Floating-Cars und die Schockwellentheorie der makroskopischen Verkehrsflussdynamik. Aus den erhobenen Trajektorien- und Positionen werden dabei *kritische Punkte* extrahiert, die im Wesentlichen die Übergänge von grundlegenden Bewegungen des Fahrzeugs darstellen, z. B. den Bremsvorgang von der Wunschgeschwindigkeit zum Stillstand. Aus den kritischen Punkten lassen sich schließlich Übergänge von Verkehrszuständen mit entsprechenden Ausbreitungsgeschwindigkeiten im Rahmen der Schockwellentheorie der makroskopischen Verkehrsdynamik ableiten. Die Dynamik der Verkehrszustände geht schließlich in die Staulängenschätzung mit ein. Daneben wird die Schätzung der Staulänge mit den Annahmen einer konstanten (isolierter Knotenpunkt) oder einer stückweise linearen (eng benachbarte Knotenpunkte) Zuflussrate und mithilfe detektierter Grünzeiten durchgeführt, sofern verfügbar.

Ban u. a. [11] entwickelten einen Ansatz zur Schätzung der Rückstaulänge aus den Reisezeiten von Floating-Cars bezogen auf den aktuellen Knotenpunkt.⁶ Aus den Rohdaten der Reisezeiten wird ein spezifisches Muster für die Verlustzeiten der Autofahrer an dieser Kreuzung erzeugt, aus dem sich *kritische Punkte*, z. B. ein plötzlicher Anstieg, rekonstruieren lassen. Die aktuelle Länge des Rückstaus wird dabei mithilfe der maximalen und minimalen Staulänge für den aktuellen Umlauf unter Verwendung der Schockwellentheorie geschätzt. Die maximale bzw. minimale Staulänge wird wiederum aus dem Profil der Reisezeiten (*kritische Punkte*) abgeleitet.

Neumann [143] leitet aus der räumlichen Verteilung von Floating-Cars eine lokale Verkehrsnachfrage für die Knotenzufahrt ab, auf deren Basis mittlere Rückstaulängen geschätzt werden können. Während die Einbeziehung weiterer relevanter Daten in flexibler Weise möglich ist, bleibt der Aspekt überlaufener Fahrzeugschlangen im Schätzmodell unberücksichtigt.

⁶Die Reisezeit bezieht sich folglich nicht, wie es im Routenwahl-Kontext häufig der Fall ist, auf die Dauer eines geplanten Weges von einem Start zu einem Ziel. Stattdessen ist die Reisezeit auf den aktuell nächsten Knotenpunkt bezogen. Die Reisezeit am Knoten wird dabei ab dem Eintritt des Fahrzeugs auf der Zufahrt des Knotens (z. B. bei Überfahrt eines Detektors) bis zum Austritt an einer beliebigen Stelle der ausgehenden Kante erfasst.

Schätzung der Staulänge mit Video-Kameras

Neben Detektoren und Floating-Car-Daten lassen sich weitere Methoden zur Schätzung von Staulängen anwenden. Albiol u. a. [5] haben einen Ansatz unter der Verwendung von Video-Kameras entwickelt. Der entwickelte Algorithmus erkennt einzelne Fahrzeuge und klassifiziert sie als fahrend oder stehend. Nach Festlegen von Spurmasken für den betrachteten Straßenabschnitt (aus der Sicht der Kameras) können die Längen von Staus geschätzt werden. Der unterliegende Algorithmus wurde in einigen Städten unter mehreren Umgebungsbedingungen angewendet und als robust eingestuft, da die Fehler der Schätzmethode kleiner sind als durchschnittliche Fahrzeuglängen.

Diskussion der Verfahren zur Staulängenschätzung

Für einen praktischen Einsatz der Zuflussdosierung ist die konkret zu verwendende Methode der Staulängenschätzung abzuwägen. Eine Echtzeitschätzung der Staulänge $x_i(t)$ ist jedoch für eine ordnungsgemäße Funktion der Zuflussdosierung obligatorisch. In Abschnitt 5.3.1 wurde die Zuflussdosierung über die Bemessung angepasster Grünzeiten (Gln. (5.3.4) und (5.3.5)) realisiert, für die die aktuelle Staulänge $x_i(t)$ bekannt sein muss. Auch für die in dieser Arbeit gewählte Darstellung der Zuflussdosierung, die über verlängerte oder eingeschobene Rotzeiten realisiert wird, ist eine Schätzung der aktuellen Rückstaulänge notwendig. Unabhängig von der praktischen Anwendbarkeit im konkreten Fall ist die Verwendung von Video-Kameras für die Zuflussdosierung grundsätzlich vielversprechend. Durch die Einführung von Spurmasken für jeden verfügbaren Fahrstreifen auf dem betrachteten Straßenabschnitt lässt sich die Ausbreitung des Rückstaus sehr differenziert betrachten, d. h. es können beispielsweise Spurwechsel berücksichtigt werden. Verfahren, die hauptsächlich auf statistischen Methoden beruhen und erst nach längerer Zeit feststellen können, dass ein Rückstau mit einer gewissen Länge vorhanden ist, könnten hingegen weniger für die Zuflussdosierung geeignet sein.

5.4 Zweites Wirkungsprinzip: Umverteilung der Verkehrsströme zur Ausschöpfung verfügbarer Straßenkapazitäten

Wie bereits in Abschnitt 5.2.3 dargestellt wurde, kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund der Zuflussdosierung zurückgehaltene Autofahrer eine gewisse Ungeduld entwickeln und deshalb alternative Routen erwägen [145]. Im Sinne eines Störfallmanagements ist dies sehr günstig, da einerseits die übersättigte Störstelle von weiteren Zuflüssen entlastet wird und andererseits ohnehin noch freie Straßenkapazitäten in der Umgebung der Störstelle ausgenutzt werden können. Das zweite Wirkungsprinzip des selbstorganisierten Störfallmanagements geht somit Hand in Hand mit der Zuflussdosierung und ermutigt betroffene Autofahrer zum Wechsel ihrer aktuell gestörten Route. Ein wesentlicher Aspekt dabei ist, dass die Ermutigung zum Umfahren dadurch gefördert wird, dass umliegende Straßenkapazitäten explizit durch Grünzeiten verfügbar bleiben oder gemacht werden.

5.4.1 Grünzeiten für nicht vom Stau betroffene Richtungen

Die Zuflussdosierung greift als übergeordnete Instanz der Lichtsignalanlagen-Steuerung bedarfsgerecht in den Signalplan der primären Steuerung ein. Dabei werden Rotzeiten verlängert oder eingeschoben, sobald dies notwendig ist. Grünzeiten, die für zuflussdosierte Abbiegerichtungen nicht mehr benötigt werden, können den Grünzeiten umfahrender Richtungen aufgeschlagen werden. Im einfachsten Fall einer Festzeitsteuerung mit fester Umlaufzeit ergeben sich die Grünzeiten für umfahrende Richtungen durch das bereits bestehende Signalprogramm. Eine verkehrsabhängige Steuerung (z. B. der Selbst-Steuerung von Lämmer [116]) kann die Grünzeiten jedoch so umverteilen, dass umfahrende Richtungen länger bedient werden. Ob und in welcher Weise eine Umverteilung der Grünzeiten am Knotenpunkt möglich ist, hängt indes von der Konstellation zuflussdosierter Straßenabschnitte am Knotenpunkt ab. Ferner ist der Einsatz einer weiteren Steuerungsinstanz denkbar, die nach Eingreifen der Zuflussdosierung lokal einen angepassten Signalplan berechnet, siehe Kap. 7.

5.4.2 Förderung der Umverteilung der Verkehrsströme

Das zweite Wirkungsprinzip basiert auf der Annahme, dass betroffene Autofahrer Entscheidungsprozesse durchlaufen, während lokale Auswirkungen eines Störfalls beobachtbar sind. Unter dem Einsatz der Zuflussdosierung stehen außergewöhnlich lange oder häufige Rotzeiten für das gewünschte Straßensegment gewöhnlichen oder verlängerten Grünzeiten für die alternativen Richtungen gegenüber. Aus der Sicht des Autofahrers ergibt sich dabei ein schwieriges Entscheidungsproblem: Stehen relevante Informationen nicht zur Verfügung, ist weder die Ursache der Staubildung bekannt noch kann der Autofahrer die Verkehrsbedingungen auf alternativen Routen einschätzen. Dennoch wird davon ausgegangen, dass zumindest ein Anteil der betroffenen Autofahrer auf alternative Routen ausweichen wird. Olsson [145] führt dies zurück auf die zunehmende Ungeduld der Autofahrer, die von der Zuflussdosierung zurückgehalten werden. Grundsätzlich ist wenig darüber bekannt, wie individuelle Autofahrer auf veränderte oder verkehrsabhängige Signalisierungen hinsichtlich der Routenwahl reagieren. Sicher ist jedoch, dass es immer auch Verkehrsteilnehmer geben wird, die zwingend in den gestörten Straßenabschnitt fahren möchten oder müssen (z. B. Wohnung, Einkaufsmöglichkeiten, Rettungsdienste, Buslinien), sodass ein Umweg gar nicht in Frage kommt. Später wird gezeigt, dass auch diese Verkehrsteilnehmer vom selbstorganisierten Störfallmanagement profitieren können.

Das Ziel des zweiten Wirkungsprinzips ist demnach, Autofahrer zur Umfahrung des von Staubildung betroffenen Gebiets zu ermutigen. Während dabei noch verfügbare Straßenkapazitäten ausgenutzt werden, wird die Störstelle von weiteren Zuflüssen entlastet. Jeder *umfahrende* Autofahrer trägt auf diese Weise zur Reduzierung der Auswirkungen eines Störfalls bei. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass i. Allg. nicht jeder von einem Störfall betroffene Autofahrer eine umfahrende Richtung wählen wird oder kann.

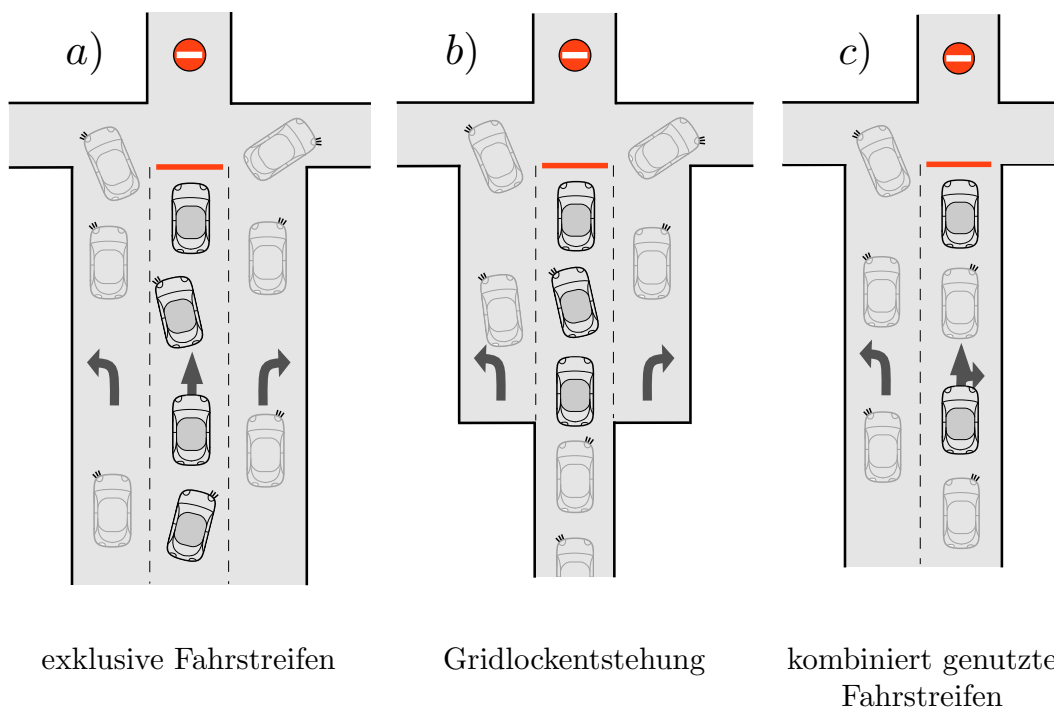


Abbildung 5.3: Die Anordnung der Fahrstreifen und Signalgeber hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirkung der Zuflussdosierung. (a) Ideale Situation: Für jede Abbiegebeziehung existiert ein separater Fahrstreifen; die Zuflussdosierung hält nur diejenigen Fahrzeuge (schwarz) zurück, die auch in das verstaute Straßensegment einfahren wollen. (b) und (c) Abbiegebeziehungen mit kombiniert genutzten Fahrstreifen: Es werden auch Fahrzeuge von der Zuflussdosierung erfasst, die *nicht* in den verstauten Straßenabschnitt einfahren wollen (graue Fahrzeuge).

5.5 Anordnung von Fahrstreifen auf der Knotenzufahrt

Das selbstorganisierte Störfallmanagement wirkt lokal an den Knotenpunkten des städtischen Netzwerks. Die Wirkung sowohl der Zuflussdosierung als auch der Förderung zur Umverteilung betroffener Verkehrsströme ist dabei jedoch entscheidend von der Anordnung der Fahrstreifen auf der Zufahrt des Knotens abhängig. Eine ideale Knotenzufahrt für das selbstorganisierte Störfallmanagement ist in Abb. 5.3a dargestellt. Für jede Abbiegebeziehung am Knoten existieren exklusive Fahrstreifen, die von der Lichtsignalanlage mit exklusiven Signalgebern bedient werden. In einer solchen Anordnung werden nur die Verkehrsströme von der Zuflussdosierung zurückgehalten, die tatsächlich in ein verstautes Straßensegment einfahren wollen. Gleichzeitig können betroffene Autofahrer prinzipiell auf die benachbarten Fahrstreifen wechseln, um eine alternative Route zur Umfahrung der Staubildung zu wählen. Die regelmäßige Bedienung der nicht von der Zuflussdosierung betroffenen Fahrstreifen mit Grünzeiten stellt darüber hinaus sicher, dass während der Rotphase eventuell entstehende Warteschlangen auf den Fahrstreifen regelmäßig abgebaut werden, sodass eine Einordnung von benachbarten Fahrstreifen auch regelmäßig möglich ist. Es kann jedoch zu einem weiteren Effekt kommen, der in Abb. 5.3b

dargestellt ist: Fahrzeugschlangen, die sich aufgrund der Zuflussdosierung auf der Zufahrt des Knotens bilden, können bis über die Spuraufweitung hinaus propagieren⁷ und dabei nachfolgende Autofahrer, die einer anderen Abbiegerichtung folgen möchten, behindern. Diese Behinderung stellt eine alternative Form eines *lokalen* Gridlocks dar (vgl. Abb. 1.1, rechts) und kann durch das selbstorganisierte Störfallmanagement *nicht* verhindert werden. Erst wenn sich einige Autofahrer in der Warteschlange für eine alternative Richtung entscheiden oder die Warteschlange zumindest teilweise abgebaut werden konnte, löst sich dieser Gridlock zunächst auf. Er kann sich jedoch neu bilden.

In realistischen Netzwerken ist eine ideale Anordnung von Fahrstreifen nicht immer gegeben. Bei kombiniert genutzten Fahrstreifen erfasst die Zuflussdosierung zwangsläufig auch Verkehrsströme, die gar nicht in ein verstautes Straßensegment einfahren möchten (Abb. 5.3c). Dies ist prinzipiell ungünstig, da Straßenkapazitäten auf den Ausweichstrecken nicht genutzt werden können und Autofahrer unnötig zurückgehalten werden. Die Ausstattung des Mischfahrstreifens mit einem weiteren Signalgeber (z. B. grüner Lichtpfeil) kann diese Problematik auch nicht vollständig lösen: Falls das erste Fahrzeug in der Warteschlange in einen verstautes, d. h. zuflussdosierten Straßenabschnitt, einfahren möchte, wird jedes folgende Fahrzeug behindert, obwohl Grünzeiten durch den Lichtpfeil bereitgestellt werden (Gridlock). Darüber hinaus sind bauliche Maßnahmen zur Anpassung der Anordnung der Fahrstreifen oft keine Option. Obwohl prinzipiell unerwünscht, ist die Behinderung nicht betroffener Verkehrsströme auf kombiniert genutzten Fahrstreifen *im Sinne des Störfallmanagements* jedoch vertretbar, wenn dadurch Blockade-Situationen auf den Kreuzungen verhindert werden können. Außerdem kann für praktische Störfälle angenommen werden, dass die Fahrzeugschlange auf dem zuflussdosierten Straßenabschnitt regelmäßig, zumindest teilweise, abgebaut wird, und somit ein gewisser Anteil nicht betroffener Autofahrer auf der Knotenzufahrt auch regelmäßig aufrücken kann.

5.6 Implikationen der Anwendung beider Wirkungsprinzipien auf das gesamte Netzwerk

Die Anwendung des selbstorganisierten Störfallmanagements wurde zunächst isoliert für einen Knotenpunkt und dessen ausgehenden Straßenabschnitten betrachtet. Gleichwohl lässt es sich auf mehrere signalisierte Knotenpunkte eines städtischen Netzwerks, d. h. *rekursiv*, anwenden. Die Prinzipien des vorgeschlagenen Störfallmanagements wirken an den ausgestatteten Knoten lokal und dabei unabhängig voneinander. In dieser Weise organisiert sich das vorgeschlagene Störfallmanagement selbst im Netzwerk, ohne dass es der Planung von Verkehrsleitzentralen oder ähnliche Einrichtungen bedarf. Der Einsatz ist dabei

- *quasi-instantan*, d. h. sobald Fahrzeugschlangen *lokal* kritische Längen überschreiten und

⁷Dies lässt sich auch auf kombiniert genutzte Fahrstreifen übertragen.

- *bedarfsgerecht*, d. h. falls und solange Fahrzeugschlangen eine kritische Länge haben.

In dieser Weise skaliert der Einsatz des selbstorganisierten Störfallmanagements direkt mit dem Ausmaß der Staubildung im Netzwerk.

5.6.1 Erhalt von Abflusskapazitäten des Netzwerks

Die rekursive Anwendung der Zuflussdosierung trägt zum Erhalt der Abflusskapazitäten des Netzwerks im Störfall bei. An ausgestatteten Knotenpunkten vermeidet sie das Überlaufen von Fahrzeugschlangen auf die Kreuzungen. Nicht vom Rückstau betroffene Verkehrsströme können die gestörten Kreuzungen ungehindert passieren und schließlich zu einem späteren Zeitpunkt das Netzwerk verlassen. Auf diese Weise wird der Gridlock-Prozess im Netzwerk gehemmt.

5.6.2 Segmentierte Staubildung

Unter einer rekursiven Anwendung der Zuflussdosierung propagieren Rückstaus *segmentiert*, d. h. unter Auslassung der Kreuzungen, durch das Netzwerk. Da sie sich lediglich auf Straßenabschnitten bilden, breiten sich segmentierte Fahrzeugschlangen „schneller“ in Richtung der Quellen des Verkehrs aus. Falls sich weniger Autofahrer an den zuflussdosierten Knotenpunkten für alternative Richtungen entscheiden, erreichen segmentierte Rückstaus also früher die Quellen des Verkehrs, sodass das von Olsson [145] formulierte Prinzip (siehe S. 86) auch auf einer größeren räumlichen Skala zur Wirkung kommt [vgl. auch 64]. Wo keine Straßenkapazitäten zur Verfügung stehen, können keine Fahrzeuge ins Netzwerk einfahren. Solange die Einfahrt ins Netzwerk nicht möglich ist, haben Autofahrer dennoch u. a. folgende Möglichkeiten:

- Zeitliche Verlegung der Fahrt,
- Wahl eines anderen Verkehrsmittels,
- *Parken und Reisen* (Park-and-Ride) oder
- ggfs. Änderung des Reiseziels.

5.6.3 Umverteilung betroffener Verkehrsströme

Das zweite Wirkungsprinzip des selbstorganisierten Störfallmanagements ermutigt betroffene Autofahrer zur Wahl einer umfahrenden Route an jedem zuflussdosierten Knoten zur Ausnutzung noch zur Verfügung stehender Kapazitäten. Die Ausbreitung von Rückstaus kann verlangsamt oder gestoppt werden, falls ein hinreichend großer Anteil der betroffenen Autofahrer auf jeweils verfügbare und noch freie Alternativrichtungen ausweicht. Selbst wenn nur ein kleiner Anteil betroffener Autofahrer auf eine umfahrende Route ausweicht, hat dies bereits einen *zusätzlichen* positiven Effekt auf das Verkehrsgeschehen im Netzwerk. Da die

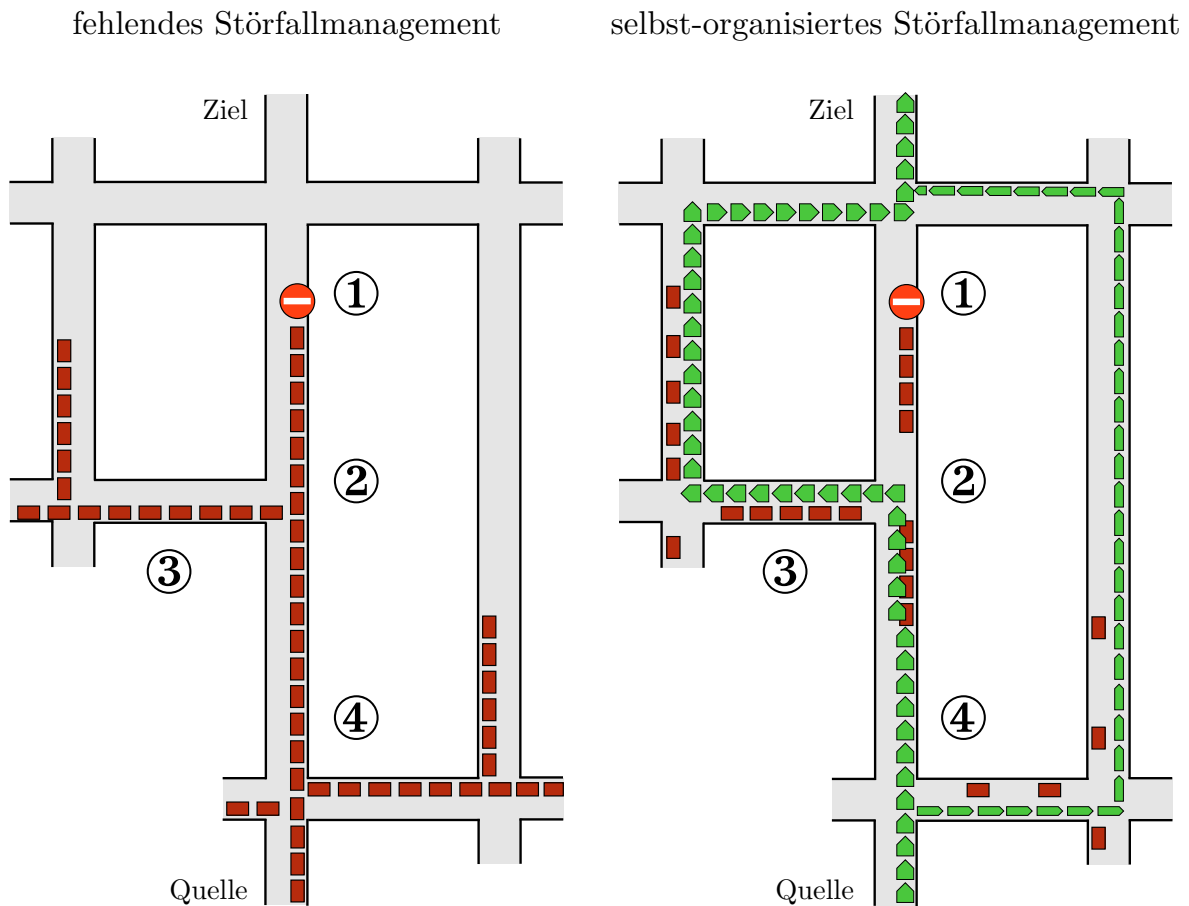


Abbildung 5.4: Vergleich eines gestörten Netzwerks ohne (links) und mit dem selbstorganisiertem Störfallmanagement (rechts). Die Ziffern werden in nachfolgender Tabelle erläutert. Nach [193, S. 10]

fehlendes Störfallmanagement	selbstorganisiertes Störfallmanagement
(1) Ausgehend von der Störstelle bildet sich ein Rückstau, der sich in stromaufwärtiger Richtung ausbreitet.	Die Zuflussdosierung reguliert die Länge des Rückstaus, sodass ein kritischer Wert nicht überschritten wird.
(2) Die regelmäßige Bedienung mit Grünzeiten leitet den Verkehr in Richtung der Störstelle. Der Rückstau läuft bis auf die stromaufwärtige Kreuzung über.	Durch die Regulierung der Rückstaulänge durch die Zuflussdosierung wird der gestörte Bereich einerseits entlastet; andererseits bleibt die Kreuzungsfläche frei.
(3) Das Überlaufen der Fahrzeugschlange blockiert die Abbiege- und Querströme, was weitere Ausgangspunkte für Rückstau bedeutet.	Nicht gestörte Richtungen werden weiterhin mit Grünzeiten bedient und so Autofahrer zum Umfahren ermutigt.
(4) Die Rückstaus haben einen großen Teil des Netzwerks erfasst, sodass der Verkehr zum Erliegen kommt.	Noch verfügbare Kapazitäten des umliegenden Teils des Netzwerks werden ausgenutzt. Prinzipiell können betroffene Autofahrer jederzeit ihre Route wechseln und die Störstelle (weiträumig) umfahren.

Zuflussdosierung infolge der segmentierten Stauausbreitung auch an Knotenpunkten aktiv wird, die nicht *unmittelbar* in der Nähe der Störstelle liegen, können noch nicht betroffene Autofahrer früh auf die zunehmende Staubildung aufmerksam gemacht werden. Dabei ergeben sich umso mehr Möglichkeiten zur Wahl einer alternativen Richtung, je weiter Autofahrer von der Ursache des Störfalls entfernt sind.

5.6.4 „Selbst-Heilung“ von gestörten Stadtstraßennetzwerken

Unter dem Einsatz des selbstorganisierten Störfallmanagements kann sich unter günstigen Bedingungen eine „Selbst-Heilung“ einstellen, die dadurch charakterisiert ist, dass alle Autofahrer im Netzwerk trotz des Störfalls in endlicher Zeit ihr Ziel erreichen können. Dies spielt eine wichtige Rolle für Rettungsdienste, die schnell zur Ursache des Störfall (z. B. Unfall) vordringen müssen, aber auch Buslinien, die festen Routen folgen. Da betroffene Autofahrer dafür in der Regel auf alternative Routen ausweichen müssen, können Umwege und Reisezeiterhöhungen dabei prinzipiell nicht vermieden werden. Wählen im verstaute Gebiet des Netzwerks mindestens genauso viele Autofahrer alternative Routen wie Fahrzeuge auf das stromaufwärtige Ende der Rückstau zufahren, kann ein Zustand erreicht werden, in dem die fortsetzende Stauausbreitung gestoppt wird und der Zu- und Abfluss der Fahrzeuge im Netzwerk ausgeglichen ist. Die Selbst-Heilung ist jedoch ein idealer Zustand, der, je nach Schwere und Ausmaß des Störfalls, nicht immer erreicht werden kann. Da die Abflusskapazitäten im gestörten Netzwerk aufgrund des selbstorganisierten Störfallmanagements zu einem großen Teil erhalten bleiben und freie Straßenkapazitäten zur Ausnutzen beworben werden, können die Auswirkungen des Störfalls auch ohne Einstellen einer Selbst-Heilung signifikant reduziert werden.

5.7 Zusammenfassung und Diskussion

Das selbstorganisierte Störfallmanagement ist ein einfacher und zugleich effektiver Ansatz zur Reduzierung der negativen Auswirkungen eines Störfalls im Stadtnetzwerk. Der Ausgangspunkt des Störfallmanagements sind städtische Lichtsignalanlagen, wobei im Kern zwei lokale Wirkungsprinzipien vereint werden, die selbstorganisiert und bedarfsgerecht angewendet werden:

- *Zuflussdosierung*
Lokale Kapazitätsregulierung für Straßenabschnitte mit dem Ziel, das Überlaufen von Fahrzeugschlangen auf die nächstgelegene stromaufwärtige Kreuzung zu verhindern. Der Zufluss in das betroffene Straßensegment wird mit verlängerten Rotzeiten reduziert, sobald die Länge der Fahrzeugschlange einen kritischen Wert erreicht hat.
- *Förderung der Umverteilung betroffener Verkehrsströme*
Alternative Richtungen, die (noch) nicht von einer Staubildung betroffen sind, werden weiterhin mit Grünzeiten, die womöglich noch verlängert werden, bedient. Unter

dem Kontrast außergewöhnlich langer Rotzeiten für die verstaute Zielrichtung und regelmäßiger Bedienung alternativer Richtungen werden betroffene Autofahrer dazu motiviert, die Störstelle oder die Staus zu umfahren. Während das verstaute Gebiet von weiteren Zuflüssen entlastet wird, können auf diese Weise noch verfügbare Kapazitäten im Netzwerk ausgenutzt werden.

Die lokalen Wirkungsprinzipien des selbstorganisierten Störfallmanagements können rekursiv auf ein städtisches Netzwerk angewendet werden. An ausgestatteten Knotenpunkten gewährleistet die Zuflussdosierung, dass Kreuzungen passierbar bleiben, sodass kreuzende Verkehrsströme ihre Ziele erreichen können. Gleichzeitig wird an jedem ausgestatteten Knotenpunkt eine Umverteilung betroffener Verkehrsströme entlang noch freier Straßenkapazitäten zur Entlastung des verstautes Gebiets gefördert. Der Einsatz des Störfallmanagements skaliert dabei direkt mit dem Ausmaß der Staubildung und stellt sich vollständig selbstorganisiert ein. Im Idealfall wird eine Selbst-Heilung des Netzwerks erreicht, sodass jeder Autofahrer sein Ziel trotz des Störfalls in endlicher Zeit erreichen kann.

Die Zuflussdosierung hindert betroffene Autofahrer „früher“ an der Einfahrt in das gewünschte Straßensegment, falls der Rückstau eine kritische Länge erreicht hat. Aber auch ohne Anwendung der Zuflussdosierung können Autofahrer früher oder später nicht mehr in den Straßenabschnitt einfahren. In diesem Fall hat sich der Rückstau des betreffenden Straßenabschnitts jedoch bereits über die Kreuzung hinaus ausgebreitet, sodass kreuzende Verkehrsströme behindert werden und neue Ausgangspunkte für Rückstaus entstehen. Das Problem überlaufender Fahrzeugschlangen wird dabei auch in der StVO unter § 11 *Besondere Verkehrslagen*, Absatz 1, berücksichtigt. Es heißt dort:

„Stockt der Verkehr, darf trotz Vorfahrt oder grünem Lichtzeichen nicht in die Kreuzung oder Einmündung eingefahren werden, wenn auf ihr gewartet werden müsste.“

In der Praxis kann diese Verkehrsregel das Überlaufen von Fahrzeugschlangen auf Kreuzungen jedoch *nicht* sicher verhindern. Darüber hinaus werden Grünzeiten, d. h. Kapazitäten, nutzlos eingesetzt, wenn sie dem verstautes Straßenabschnitt weiterhin zugewiesen werden.

Hinsichtlich der Zuflussdosierung muss berücksichtigt werden, dass Rotzeiten eine gewisse Länge nicht überschreiten sollten. Die Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA) [79, S. 28] schreiben zwar keinen genauen Wert vor, regen jedoch relevante Einflussfaktoren (z. B. Stauraum für Fahrzeuge) für dessen Abwägung vor. Zu lange Rotzeiten erhöhen die Ungeduld der Autofahrer und fördern somit aggressives Verhalten. Im Sinne der Umverteilung der Verkehrsströme ist es zwar günstig, wenn ungeduldige Autofahrer schnell alternative Routen wählen; Autofahrer, die trotz eines roten Signalzustands in die Kreuzung einfahren, beeinträchtigen jedoch die Verkehrssicherheit beträchtlich. Für diese Problematik könnten die folgenden Lösungsansätze geeignet sein:

- *Alternativer Signalzustand*

Durch einen alternativen Signalzustand (beispielsweise blinkendes Rot) könnte dem

Autofahrer die Information gegeben werden, dass es aufgrund einer Staubildung für diese Richtung mit längeren Rotzeiten zu rechnen ist. Gleichzeitig könnte dieser Ansatz die Umverteilung der Verkehrsströme beschleunigen.

- *Kurze Bedienung mit Grünzeiten*

Ein anderer Lösungsansatz könnte darin bestehen, die kritische Länge des Rückstaus kleiner zu wählen und damit eine regelmäßige, jedoch sehr kurze Bedienung mit Grünzeiten zu gewährleisten [178]. Mindestgrünzeiten sind dabei jedoch einzuhalten.

In *praktischen* Störfällen wird immerhin zumindest ein geringer Anteil betroffener Verkehrsströme regelmäßig abfließen können. Dadurch werden Kapazitäten auf den zuflussdosierten Straßensegmenten frei, sodass betroffene Autofahrer aufrücken können. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass in der Praxis die Maximaldauer für Rotzeiten nur selten ausgeschöpft werden muss.

Das zweite Wirkungsprinzip des selbstorganisierten Störfallmanagements setzt voraus, dass das umliegende und (noch) nicht von der Staubildung erfasste Netzwerk Straßenkapazitäten bereitstellen kann. Darüber hinaus können Umleitungsverkehre auch *unerwünscht* sein, beispielsweise weil Wohngebiete durchfahren werden müssen, die oft mit Tempo-30-Zonen oder verkehrsberuhigten Bereichen verkehrstechnisch erschlossen sind. Praktisch lässt sich jedoch kaum verhindern, dass Autofahrer umliegende Straßenkapazitäten im Störfall ausnutzen werden. Schließlich kann es jedoch auch auf den Ausweichstrecken zu Staubildungen kommen; auch dort können die Prinzipien des selbstorganisierten Störfallmanagements, Verfügbarkeit und Ausstattung von Lichtsignalanlagen vorausgesetzt, angewendet werden.

Das selbstorganisierte Störfallmanagement ist ein einfacher Lösungsansatz für die komplexe Problemstellung von störfallbedingter Staubildung im Stadtstraßennetzwerk. Weder das Eintreten von Störfällen noch die Entwicklung der störfallbedingten Staubildung kann vorausgesehen oder geplant werden. Während klassische Strategien des Störfallmanagements typischerweise zunächst eine Störfalldetektion voraussetzen, um Maßnahmen des Verkehrsmanagements einleiten zu können, wirkt das selbstorganisierte Störfallmanagement lokal genau dort, wo und wann es benötigt wird. Durch die Selbstorganisation skaliert der Einsatz der Zuflussdosierung bedarfsgerecht direkt mit dem Ausmaß der Staubildung im Netzwerk. Die Anwendung des Störfallmanagements kann ebenso wenig geplant werden wie die zeitliche Entwicklung der störfallbedingten Staubildung. Ein aktives Eingreifen von Verkehrsleitzentralen oder ähnlichen Einrichtungen ist für die Anwendung des selbstorganisierten Störfallmanagements somit weder notwendig noch sinnvoll.

Die Anwendung zusätzlicher Maßnahmen ist ausdrücklich *nicht* ausgeschlossen. Beispielsweise könnte eine zielgerichtete Informationsübermittlung für betroffene Autofahrer durchgeführt werden, sodass der Umverteilungsprozess beschleunigt wird. Um dabei Staubildung auf den Ausweichrouten zu hemmen, können unter Beachtung der Verkehrslage auf den Ausweichrouten direkt Routenempfehlungen an betroffene Autofahrer abgegeben werden. Diese und weitere Möglichkeiten werden im Ausblick (Kapitel 7) dieser Dissertation thematisiert.

Obwohl im Kontext von Störfällen betrachtet, wirkt das vorgeschlagene Störfallmanagement allgemein für jede Art der Staubildung, unabhängig von der auslösenden Ursache. Insbesondere im Kontext alltäglich wiederkehrender Staubildung ergibt sich eine interessante Fragestellung auf: Wird der Einsatz von *Pförtnerampeln* [172], die Kapazitäten auf wichtigen Zufahrtstraßen zur Entlastung der Innenstadt drosseln, dabei aber teils lange Rückstaus und hohe Wartezeiten außerhalb des Stadtzentrum bewirken, hinfällig? Diese Fragestellung kann in einer weiterführenden Studie beantwortet werden.

6 Simulationsstudien

Das selbstorganisierte Störfallmanagement wird einem gitterförmigen und komplexen Netzwerk unter Betrachtung gleichwertiger Störfallszenarien einer Untersuchung unterzogen. Das gitterförmige Netzwerk ist symmetrisch und besteht aus 25 lichtsignalisierten Knotenpunkten, die regelmäßig und in gleichen Abständen angeordnet sind. Das komplexe Netzwerk ist der französischen Stadt Avignon nachempfunden und besteht aus 72 lichtsignalisierten Knotenpunkten, die unregelmäßig angeordnet sind. Zunächst findet eine Besprechung der Simulationsdurchführung statt. Das Routenwahlverhalten von Autofahrern wird durch das ereignisorientierte Routenwahlmodell beschrieben; die Komplementierung des deterministischen Nutzens mit einem Beobachtungsmodell für Rotzeiten wird erläutert. Zur Bewertung des selbstorganisierten Störfallmanagements wird die Fahrzeugakkumulation im Netzwerk unter dem Einfluss des Störfalls als Zustandsgröße des Verkehrssystems herangezogen. Die Auswirkungen der Störfälle werden unter der Anwendung des vorgeschlagenen Störfallmanagements in beiden Netzwerken deutlich reduziert. Die Entwicklung von Gridlocks durch überlaufende Fahrzeugschlangen wird durch die Zuflussdosierung effektiv unterbunden, sodass die Ausflusskapazitäten des Netzwerks auch unter dem Einfluss des jeweilig betrachteten Störfalls zu einem großen Grad erhalten bleiben. Die Umverteilung betroffener Verkehrsströme, die durch das selbstorganisierte Störfallmanagement gefördert wird, bewirkt eine zusätzliche Reduktion der störfallbedingten Staubildung. Die Machbarkeit und Effektivität des selbstorganisierten Störfallmanagements kann somit nachgewiesen werden. Davon unberührt, konnte festgestellt werden, dass die Effektivität des Störfallmanagements maßgeblich von der Struktur des Netzwerks, der vorhandenen Steuerungsverfahren, der Anordnung der Knotenzufahrten und natürlich von der Schwere des Störfalls abhängt.

6.1 Simulationsdurchführung

6.1.1 Simulationsumgebung

Die Bewertung des selbstorganisierten Störfallmanagements wird im Rahmen dieser Simulationsstudie mit der mikroskopischen Verkehrsflusssimulation *Vissim*¹ [155] durchgeführt. Zur Modellierung der Routenwahl der Autofahrer wird das in dieser Arbeit entwickelte ereignisorientierte Routenwahlmodell verwendet. Der folgende Abschnitt erläutert (i) die Implementierung der Zuflussdosierung als erstes Wirkungsprinzip des selbstorganisierten Störfallmanagements

¹Version 5.40-008

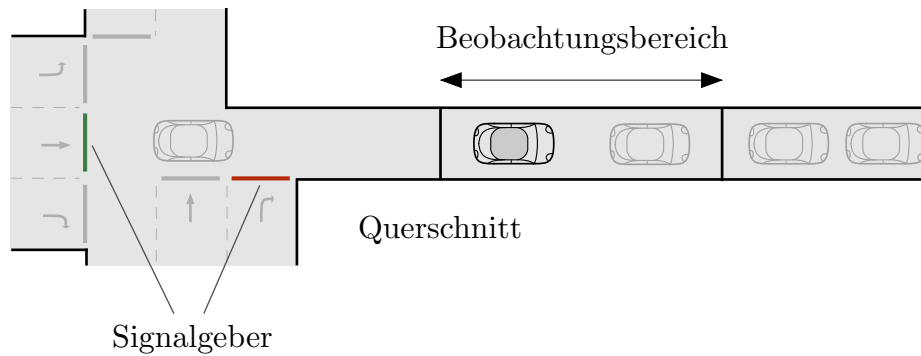


Abbildung 6.1: Die Implementierung der Zuflussdosierung in der Simulationsumgebung basiert auf der Überwachung von Fahrzeugen auf einem Straßenabschnitt in einem festgelegten Beobachtungsbereich zur Schätzung der Rückstaulänge. Erreicht die Rückstaulänge einen festgelegten Querschnitt, wird der Signalzustand der zum Straßenabschnitt korrespondierenden Signalgruppen auf „Rot“ gesetzt.

in die Simulationsumgebung Vissim und (ii) die konkrete Spezifizierung des deterministischen Nutzens im ereignisorientierten Routenwahlmodell mit einem Beobachtungsmodell.

Implementierung der Zuflussdosierung mit einer Heuristik

Die Implementierung der Zuflussdosierung auf Straßenabschnitten basiert auf einer Heuristik, im Rahmen derer eine maximal mögliche Rückstaulänge durch das Setzen eines festen Querschnitts festgelegt wird. Fahrzeuge, die den Querschnitt passieren, werden innerhalb eines Beobachtungszeitraums solange verfolgt, bis entweder der Beobachtungsbereich verlassen wurde oder ein weiteres Fahrzeug den Querschnitt überfahren hat. Die unterliegende Heuristik entscheidet durch die Überwachung des jeweiligen Fahrzeugs, ob der Rückstau den Querschnitt erreicht hat. Trifft dies zu, wird die Zuflussdosierung aktiviert, d. h. der Signalzustand jeder Signalgruppe (gezeigt vom Signalgeber), die die korrespondierenden Abbiegebeziehungen am stromaufwärtigen Knoten bedient, wird auf „Rot“ gesetzt. Die Zuflussdosierung wird wieder deaktiviert, sobald die Länge der Warteschlange hinreichend reduziert werden konnte. Dies impliziert *nicht* zwangsläufig, dass der betroffene Straßenabschnitt *sofort* Bedienungskapazitäten im Form von Grünzeiten zugewiesen bekommt. Eine grafische Veranschaulichung ist in Abb. 6.1 dargestellt. Im Zusammenspiel mit der Zuflussdosierung bedient eine Festzeitsteuerung alternative Richtungen mit unveränderten Grünzeiten, während ein verkehrsabhängiges Steuerungsverfahren die Grünzeiteaufteilung am Knotenpunkt so verändern kann, dass umfahrende Richtungen mehr Grünzeiten, d. h. Kapazitäten, erhalten. Es wird ferner angemerkt, dass die verwendete Heuristik nur in Simulationsumgebungen eingesetzt werden kann, da sie voraussetzt, dass die Daten beobachteter Fahrzeuge fehlerfrei detektiert werden können.

Implementierung des ereignisorientierten Routenwahlmodells

Das ereignisorientierte Routenwahlmodell wird zur Abbildung der Routenwahl der simulierten Autofahrer herangezogen. Das ereignisorientierte Verhalten der Autofahrer wird durch ein heuristisches Beobachtungsmodell² für Rotzeiten beschrieben, das im Ereignisanteil des deterministischen Nutzens eingefügt wird. Das Beobachtungsmodell unterliegt der Annahme, dass Autofahrer Rotzeiten für alle möglichen Abbiegerichtungen am Knoten beobachten und zunehmend ungeduldiger werden, je länger eine Rotphase andauert. Die von einem Autofahrer beobachtete Rotzeit T_{red}^{nr} für *jede* aktuell mögliche Abbiegerichtung am nächstfolgenden Knoten findet dabei Eingang in die Reisezeitschätzung $T_{\ell_{\text{cur}}}^{nr}$ für die aktuelle Kante ℓ_{cur} und Route r . Wie bereits vereinbart, korrespondiert jede Abbiegerichtung mit ihrer zugehörigen kürzesten Route r bis zum Ziel des Autofahrers. Der Autofahrer „zählt“ also die Rotsekunden jedes relevanten und sichtbaren³ Signalgebers am nächstfolgenden Knoten für die Dauer der Rotphase. Sobald eine Rotphase beendet ist, wird $T_{\text{red}}^{nr} = 0$ gesetzt, d. h. es findet kein Lernprozess des Autofahrers hinsichtlich historischer Rotzeiten statt. In Anlehnung an Abschnitt 3.4.3 wird für die folgenden Untersuchungen eine exponentielle Formulierung des Beobachtungsmodells gemäß

$$T_{\ell_{\text{cur}}}^{nr} = T_{\text{red}}^{nr} \cdot 2^\alpha \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{T_{\text{red}}^{nr}}{t_{\text{ref}}} \quad \text{und} \quad t_{\text{ref}} = \text{const.} \quad (6.1.1)$$

eingesetzt. Die Referenzzeit t_{ref} ist ein Parameter, der reflektiert, dass Autofahrer *gewöhnlich* lange Rotzeiten zunächst nicht überbewerten; längere Rotzeiten mit $T_{\text{red}}^{nr} > t_{\text{ref}}$ wirken sich stärker im Ereignisanteil Gl. (6.1.1) aus. Damit wird abgebildet, dass Autofahrer mit Anhalten der Rotphase zunehmend „ungeduldiger“ werden. Vgl. dazu die numerische Untersuchung in Abschnitt 3.4.3: Während betroffene Autofahrer unter der Annahme einer exponentiellen Heuristik zunächst zögerlich reagierten, wurden sie mit zunehmender Beobachtungsdauer der Staubbildung entsprechend entschlossener in Bezug auf das Wechselverhalten. Das Beobachtungsmodell und die Anwendung des ereignisorientierten Routenwahlmodells gewährleisten somit, dass zumindest Teile betroffener Autofahrer auf alternative Routen wechselt, dieser Vorgang jedoch eine gewisse Zeit in Anspruch nimmt.

Für die Antizipation der Reisezeit für die verbleibende Restroute wird im Rahmen dieser Studie angenommen, dass modellierte Autofahrer die Verkehrsbedingungen nicht sichtbarer Gebiete aus dem *ungestörten* Netzwerk ableiten. Für jede Kante ℓ des Netzwerks wird dazu eine mittlere Reisegeschwindigkeit $v = 10 \text{ m/s}$ angenommen, aus der sich unter Berücksichtigung der Kantenlänge L_ℓ eine mittlere antizipierte Reisezeit $T_\ell = L_\ell/v$ ergibt. Zur Bestimmung der antizipierten Reisezeit T_{rem}^{nr} für den verbleibenden Teil von Route r wird

²Es standen keine geeigneten Daten zur Schätzung eines Modells zur Verfügung.

³Im Rahmen des ereignisorientierten Routenwahlmodells wird davon ausgegangen, dass Autofahrer typischerweise bis zum nächstfolgenden Knotenpunkt sehen können. Um den Einfluss des Beobachtungsmodells für lange Straßenabschnitte nicht zu verzerren, wurde eine maximale Sichtweite von 100 m für alle Autofahrer angenommen.

Tabelle 6.1: Im Rahmen dieser Studie verwendete Parameter für das ereignisorientierte Routenwahlmodell. Die Parameter τ , T_0 und λ werden in Kap. 3, siehe Tab. 3.1 erläutert.

Parameter/Größe	Gewählter Wert
Revisionsrate der Entscheidungsprozesse τ	1/15 s
Antizipierte Reisegeschwindigkeit v	10 m/s
Bonus für aktuelle Route V_0	150 s
Varianzdichte λ	10 min ² /km
Referenzzeit für exponentielle Heuristik t_{ref}	90 s

schließlich die Summe $\sum_{\ell \in \mathcal{L}_n(r)} T_\ell = L_\ell/v$ gebildet. Die mittlere Reisegeschwindigkeit auf allen nicht sichtbaren Kanten des Netzwerks ist konstant, d. h. modellierte Autofahrer nehmen *statische* Verkehrsbedingungen im nicht sichtbaren Netzwerk an. Gleichzeitig wird mit der Annahme $v = 10 \text{ m/s} = 36 \text{ km/h} \leq 50 \text{ km/h}$ reflektiert, dass auf den Kanten des Netzwerks Verkehrsbelastungen vorherrschen und an den Knotenpunkten weitere Reisezeitverluste anfallen können. Der Erwerb von Kenntnissen über die Verkehrslage im Netzwerk durch die Autofahrer wird im Rahmen dieser Studie vernachlässigt. Zusammengefasst ergibt sich für die (Rest-)Reisezeitschätzung eines Autofahrers n für eine Route r :

$$T_{nr} = T_{\text{red}}^{nr} \cdot 2^\alpha + \sum_{\ell \in \mathcal{L}_n(r)} L_\ell/v + \delta_{qr} V_0 \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{T_{\text{red}}^{nr}}{t_{\text{ref}}} \quad \text{mit} \quad t_{\text{ref}} = \text{const.} \quad (6.1.2)$$

Dabei ist $\delta_{rq} = 1$, falls Route r die aktuelle Route q der Autofahrers ist, falls also $r = q$ ist, und 0 sonst. Die verwendeten Parameter für das ereignisorientierte Routenwahlmodell sind in Tab. 6.1 zusammengefasst.

6.1.2 Bemessung der Lichtsignalanlagen

Im Rahmen dieser Simulationsstudie werden zwei unterschiedliche Strategien für die Lichtsignalisierung der Knoten im Netzwerk verwendet: Eine gewöhnliche, nicht verkehrsabhängige *Festzeitsteuerung* und die verkehrsabhängige *Selbst-Steuerung* von Lämmer [116]. Die gewählte Signalisierungsstrategie wird jeweils auf *alle* lichtsignalisierten Knoten des Netzwerks angewendet. O. B. d. A. wird im Folgenden anstelle von lichtsignalisierten Knoten stets vereinfacht von signalisierten Knotenpunkten gesprochen. Die Bemessung von Umlauf- und Grünzeiten für die Festzeitsteuerung wird für jeden signalisierten Knoten auf der Grundlage vorherrschender Verkehrsstärken im ungestörten Netzwerk durchgeführt. Koordinierungen von Lichtsignalanlagen werden vernachlässigt. Für die verkehrsabhängige Selbst-Steuerung ist eine Bemessung der Signalpläne nicht erforderlich. Zwischenzeiten werden jedoch für beide Signalisierungsstrategien herangezogen; für jedes Paar in Konflikt stehender Verkehrsströme

werden sie gemäß

$$t_z = t_r + t_u - t_e, \quad (6.1.3)$$

berechnet und in einer Zwischenzeitmatrix gespeichert. Dabei ist t_r die *Räumzeit*, die ein Fahrzeug des räumenden Verkehrsstroms zum Verlassen der Konfliktfläche mit dem einfahrenden Verkehrsstrom benötigt. Ferner bezeichnet t_u die *Überfahrzeit*, mit der reflektiert wird, dass ein gewisser Anteil der Autofahrer auch noch bei einer gelben Signalisierung die Kreuzungsfläche befährt. Schließlich ist t_e die *Einfahrzeit* eines Fahrzeuges des einfahrenden Verkehrsstroms bis zum Beginn der Konfliktfläche mit dem räumenden Verkehrsstrom. Weiterführende Informationen zur Berechnung von Zwischenzeiten befinden sich beispielsweise in den Referenzen [172, 79]. Für beide Signalisierungsstrategien wird ferner einheitlich eine Gelbzeit⁴ von $t_G = 3$ s und eine Rotgelbzeit⁵ $t_r = 1$ s verwendet [vgl. 172].

- *Festzeit-gesteuerte Lichtsignalanlagen*

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird im Folgenden ein beliebiger signalisierter Knotenpunkt im Netzwerk betrachtet. Für die Bedienung zufließender Verkehrsströme wird für die Festzeitsteuerung ein Phasensystem gebildet, wobei in jeder Phase mehrere Signalgruppen zusammengefasst werden. Für jede Phase i werden die maßgebenden Verkehrsstärken q_i ermittelt. Die Umlaufzeit T_U wird mit der bekannten Formel von Webster [204] berechnet:

$$T_U = \frac{1,5 \cdot T_V + 5}{1 - B}, \quad (6.1.4)$$

wobei $T_V = \sum_{i=1}^p t_z^i$ die Summe der Zwischenzeitverluste t_z^i eines kompletten Umlaufs aller p Phasen und $B = \sum_{i=1}^p b_i = \sum_{i=1}^p q_i / q_S$ die Summe der Flussverhältnisse aus maßgebender Verkehrsstärke q_i und einer konstanten Sättigungsverkehrsstärke $q_S = 1800$ Fzg./h bezeichnet. Die *effektive*⁶ Freigabezeit der Phase i berechnet sich schließlich über [vgl. 172]

$$t_f^i = \frac{b_i}{B} \cdot (T_U - T_V).$$

- *Selbst-Steuerung*

Die Selbst-Steuerung bewertet mögliche Reihenfolgen der Bedienung am Knoten auf der Grundlage prognostizierter Ankünfte in einem lokalen Optimierungsverfahren hinsichtlich von Wartezeiten und Anzahl der Stopps. Die beste Lösung wird schließlich angewendet.⁷ Ein Phasensystem mit fester Abfolge stellt sich mit der Selbst-Steuerung *nicht* ein. Es ist dabei anzumerken, dass im Rahmen dieser Simulationsstudie Unsicherheiten in der Fahrzeugdetektion für die prognostizierten Ankünfte vernachlässigt werden.

⁴Die Gelbzeit ist die Übergangszeit von grüner Signalisierung auf eine rote Signalisierung.

⁵Die Rotgelbzeit wird die Zeit des Übergangs von einer Sperrung (rot) auf eine Freigabe (grün) bezeichnet. Sie reflektiert die Reaktionszeit des Autofahrers.

⁶In diesem Zusammenhang bedeutet „effektiv“, dass Anfahrzeitverluste der Fahrzeuge nicht berücksichtigt werden.

⁷Vgl. auch Abschnitt 5.1.1

6.1.3 Modellierung der Verkehrsnachfrage

Die im Rahmen dieser Untersuchung betrachteten Netzwerke verbinden mehrere Verkehrsbezirke D_i miteinander, die sowohl Quellen als auch Senken des Verkehrs sind. Es wird ausschließlich der motorisierte Individualverkehr (Personenkraftwagen) für die Simulationsstudie betrachtet; andere Verkehrsmodi werden vernachlässigt. Die Verkehrsbezirke werden durch Straßenabschnitte mit dem Netzwerk verbunden, haben selbst jedoch keine Ausdehnung. Die Verkehrsnachfrage $Q_{D_i \rightarrow D_j}$ von Verkehrsbezirk D_i nach Verkehrsbezirk D_j für alle $i \neq j$ wird für alle folgenden Untersuchungen als konstant bezüglich der Zeit (Stationarität) angenommen und besteht für einen Nachfragezeitraum T_Q . Die Zeitpunkte der Einfahrten von Fahrzeugen in das Netzwerk sind stochastisch verteilt. Da die Verkehrsbezirke lediglich als virtuelle Bezirke modelliert werden, in denen kein Binnenverkehr stattfindet, gilt stets $Q_{D_i \rightarrow D_i} = 0$. Die für diese Simulationsstudie herangezogenen Werte für die Verkehrsnachfrage in den untersuchten Netzwerken basieren auf Annahmen und wurden nicht im Rahmen einer Verkehrserzeugung geschätzt.

6.1.4 Modellierung der Störfälle

Es wird zwischen angebots- und nachfrageseitigen Störfällen unterschieden. Ein angebotsseitiger Störfall wird durch eine künstliche Begrenzung der Straßenkapazität modelliert. Dabei können sowohl Totalblockaden als auch partielle Blockaden (Kapazitätsreduktion) modelliert werden. Nachfrageseitige Störfälle werden mit einer *zusätzlichen* und zeitlich konstanten Verkehrsnachfrage $Q_{D_i \rightarrow D_j}^{\text{inc}}$ modelliert. Alle in den folgenden Untersuchungen betrachteten Störfälle werden nach einer Anlaufzeit T_a aktiviert und bestehen für einen Zeitraum T_{inc} . Der Zeitpunkt der Aufhebung des Störfalls wird für folgende Betrachtungen mit $t_{\text{inc, end}}$ bezeichnet.

6.1.5 Simulationslauf und Messgrößen

Ein Simulationslauf umfasst einen Zeitraum T , wobei die Verkehrsnachfrage ab $t = 0$ für den Zeitraum T_Q mit $T_Q < T$ besteht. Die Aktivierung der Störfälle erfolgt nach der Anlaufzeit T_a , bis zu der sich spätestens ein Gleichgewicht zwischen Zu- und Abfluss von Fahrzeugen im Netzwerk eingestellt hat. Für die Zeitschrittweite der mikroskopischen Simulationen wird ein Wert von $\Delta t = 0,2\text{s}$ gewählt. Zur Bewertung des selbstorganisierten Störfallmanagements werden zwei unterschiedliche Netzwerke betrachtet, in denen gleichwertige Störfallszenarien modelliert werden.

Eine geeignete Messgröße für die Evaluation des selbstorganisierten Störfallmanagements ist die Anzahl der Fahrzeuge im Netzwerk $N(t)$ (Fahrzeugakkumulation) in Abhängigkeit von der Simulationszeit t . Sie stellt eine Zustandsgröße des untersuchten Systems dar und lässt sich als Zeitreihe darstellen. Die Verläufe der Zeitreihen geben dabei die Zustandsänderungen des Systems unter dem Einfluss des Störfalls wieder. Die Zeitreihen der „rohen“ Daten der

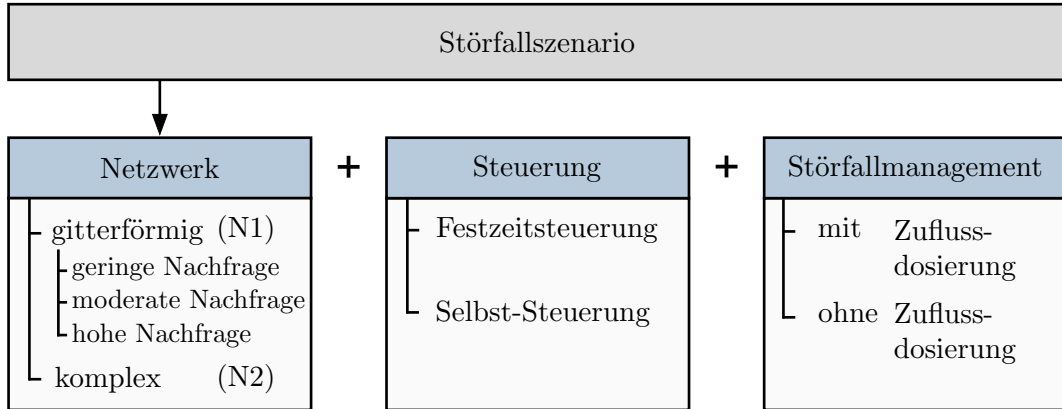


Abbildung 6.2: Übersicht über die möglichen Zusammensetzungen der durchzuführenden Untersuchungen bezüglich des Netzwerks, der Steuerungsstrategie und des Störfallmanagements. Die Selbst-Steuerung kommt nur *mit* Zuflussdosierung zum Einsatz.

Fahrzeugakkumulation $N_{\text{raw}}(t)$ werden für eine übersichtlichere Darstellung geglättet. Dazu wird ein gleitender Durchschnitt $N_m^{(n)}(t)$ der Ordnung n gemäß

$$N_m^{(n)}(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} N_{\text{raw}}(t - i)$$

gebildet. Im Rahmen dieser Studie werden $n = 1000$ Datenpunkte für die Berechnung des gleitenden Mittelwerts herangezogen. Da die Zeitschrittweite der Simulationen $\Delta t = 0,2\text{s}$ beträgt, wird somit ein Ausschnitt („Fenster“) von $1000 \cdot 0,2\text{s} = 200\text{s}$ für den gleitenden Durchschnitt betrachtet. Durch die Berechnung des gleitenden Mittels kommt es jedoch zu einer Verschiebung der geglätteten Daten um eine Zeit

$$\tau_f = \frac{n - 1}{2} \Delta t,$$

die über $N(t) = N_m^{(n)}(t - \tau)$ für alle $t < T - \tau_f$ korrigiert wird. Neben den Zeitreihen werden zusätzlich die jeweiligen Zahlenwerte der Fahrzeugakkumulationen $N(t_{\text{inc, end}})$ zum Zeitpunkt der Aufhebung des Störfalls miteinander verglichen. Zusätzlich wird die Dauer T_{rec} der Wiederherstellung normaler Verkehrsbedingungen nach dem Störfall angegeben.

6.1.6 Terminologie

In der folgenden Simulationsstudie werden Störfallszenarien in einem gitterförmigen (N1) und komplexen (N2) Netzwerk modelliert. Im gitterförmigen Netzwerk werden unterschiedliche Nachfrageszenarien betrachtet. Für jedes untersuchte Störfallszenario in einem Netzwerk werden die oben besprochenen Signalisierungsstrategien herangezogen: Eine gewöhnliche Festzeitsteuerung und die verkehrabhängige Selbst-Steuerung. Ferner wird bezüglich des ver-

Tabelle 6.2: Übersicht über die Störfallszenarien im gitterförmigen Netzwerk N1.

Störfallszenario	Nachfrage $Q_{D_i \rightarrow D_j}$ [Fzg./h]	Beschreibung
A	700	Blockade eines Straßenabschnitts
B 1.1	375	Totalblockade einer Kreuzung
B 1.2	500	Totalblockade einer Kreuzung
B 2	700	Totalblockade einer Kreuzung
B 3.1	500	wie B 1.2
B 3.2	500	part. Blockade e. Kreuzung (schwer)
B 3.3	500	part. Blockade e. Kreuzung (mittel)
B 3.4	500	part. Blockade e. Kreuzung (leicht)
B 1.2	500	Untersuchung des Zufalls (wie B 1.2)
C 1	375	Nachfrageerhöhung
C 2	500	Nachfrageerhöhung

wendeten Störfallmanagements unterschieden: Die Festzeitsteuerungen werden mit bzw. ohne Zuflussdosierung untersucht, während die Selbst-Steuerung nur unter Einsatz der Zuflussdosierung eingesetzt wird. Dies wird damit begründet, dass der Effekt des zweiten Wirkungsprinzips des selbstorganisierten Störfallmanagements untersucht werden kann. Da die Selbst-Steuerung Gridlocks nicht explizit vermeiden kann, ist mit ähnlichen Ergebnissen wie für Festzeitsteuerungen ohne Zuflussdosierung zu rechnen. Für den Fall Festzeitsteuerung ohne Zuflussdosierung wird berücksichtigt, dass zumindest ein Teil der Autofahrer im Sinne der StVO handelt und nur dann auf eine Kreuzung fährt, falls ein rechtzeitiges Verlassen ohne Behinderung kreuzender Verkehrsströme gewährleistet ist. Eine grafische Übersicht über die Zusammensetzung der Simulationsläufe ist in Abb. 6.2 dargestellt. Etwas abweichend davon sind mit „Netzwerk mit Zuflussdosierung“ beide Signalisierungsstrategien (Festzeit- und Selbststeuerung.) gemeint; im „Netzwerk ohne Zuflussdosierung“ werden lediglich Festzeitsteuerungen herangezogen.

6.2 Untersuchungen in einem gitterförmigen Netzwerk

Untersuchungen des selbstorganisierten Störfallmanagements werden zunächst im gitterförmigen Netzwerk N1 durchgeführt. Alle Abbiegebeziehungen am Knoten werden mit exklusiven Fahrstreifen realisiert. Für die Anwendung der Zuflussdosierung ist dies ideal. Ferner sind die Straßenabschnitte zwischen zwei Knotenpunkten verhältnismäßig kurz, sodass sich viele Ausweichmöglichkeiten für betroffene Fahrzeuge im Störfall ergeben. Es werden drei Arten von Störfällen mit verschiedenen Ausprägungen und unter variierenden Nachfragebedingungen untersucht.

6.2.1 Das gitterförmige Netzwerk N1

Das gitterförmige Netzwerk besteht aus 25 signalisierten, gitterförmig angeordneten Knotenpunkten und verbindet die virtuellen Bezirke D1, D2, D3 und D4 miteinander (siehe Abb. 6.3a). Die Kanten zwischen den Knotenpunkten sind als bidirektionale, einspurige Straßenabschnitte modelliert. An jedem Knoten des Netzwerks werden alle möglichen Abbiegebeziehungen (Kehrtwenden sind ausgeschlossen) bedient. Die Anordnung der Fahrstreifen auf allen Knotenzufahrten ist dabei ideal: Für jede Abbiegebeziehung ist jeweils ein exklusiver Fahrstreifen eingerichtet, der auch exklusiv bedient wird. Die Länge der Spuraufweitung auf der Knotenzufahrt beträgt 50 m. Die Längen der Zufahrtsstraßen des Netzwerks sind so dimensioniert, dass Fahrzeuge auch bei bereits vorhandener Staubildung in das Netzwerk einfahren können. Für Festzeitsteuerungen wird das Phasensystem in Abb. 6.3b verwendet. Linksabbieger werden somit stets gesichert geführt. Zwischen allen Bezirken besteht eine symmetrische und stationäre Nachfrage $Q_{D_i \rightarrow D_j}$ für alle $i \neq j$ und $i, j \in \{1, 2, 3, 4\}$. Für die Anlaufzeit wird im gitterförmigen Netzwerk ein Wert $T_a = 3600 \text{ s} = 1 \text{ h}$ gewählt. Ferner werden für das gitterförmige Netzwerk drei unterschiedliche Nachfrageszenarien betrachtet, in denen die Nachfrage jeweils für $T_Q = 3 \text{ h}$ mit folgenden Werten besteht:

$$\begin{aligned} \text{Geringe Nachfrage mit } & Q_{D_i \rightarrow D_j} = 375 \text{ Fzg./h,} \\ \text{moderate Nachfrage mit } & Q_{D_i \rightarrow D_j} = 500 \text{ Fzg./h und} \\ \text{hohe Nachfrage mit } & Q_{D_i \rightarrow D_j} = 700 \text{ Fzg./h.} \end{aligned}$$

Eine knappe Übersicht über alle simulierten Störfallszenarien im gitterförmigen Netzwerk befindet sich in Tab. 6.2.

6.2.2 Störfallszenario A – Blockade eines Straßenabschnitts

In Störfallszenario A wird für die Dauer von einer Stunde eine Richtungsfahrbahn (einspurig) zwischen zwei Knoten *vollständig* blockiert. Der Ort des Störfalls ist aus Abb. 6.3a ersichtlich. Die entgegengesetzte Fahrbahn ist ursprünglich nicht vom Störfall betroffen. Für dieses Störfallszenario wird im Rahmen dieser Simulationsstudie lediglich die hohe Nachfrage mit $Q_{D_i \rightarrow D_j} = 700 \text{ Fzg./h}$ betrachtet. Die Ergebnisse lassen sich auf geringe bzw. moderate Verkehrsnachfragen übertragen.

Die Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen sind in Abb. 6.4 dargestellt. Die Anzahl der Fahrzeuge im Netzwerk ohne Zuflussdosierung nimmt kurz nach dem Einsetzen des Störfalls stark zu: Der Rückstau auf dem gestörten Straßenabschnitt breitet sich schnell über die stromaufwärtige Kreuzung aus und blockiert kreuzende Verkehrsströme, wodurch neue Rückstaus entstehen. Unter der vorherrschenden hohen Nachfrage breiten sich die Rückstaus schnell aus und erfassen später das gesamte Netzwerk. Schlussendlich „frieren“ Verkehrsströme ein, sodass ein großer Anteil im Netzwerk befindlicher Fahrzeuge selbiges nicht mehr verlassen kann; demnach ist eine ausgeprägte Gridlock-Situation entstanden. Im

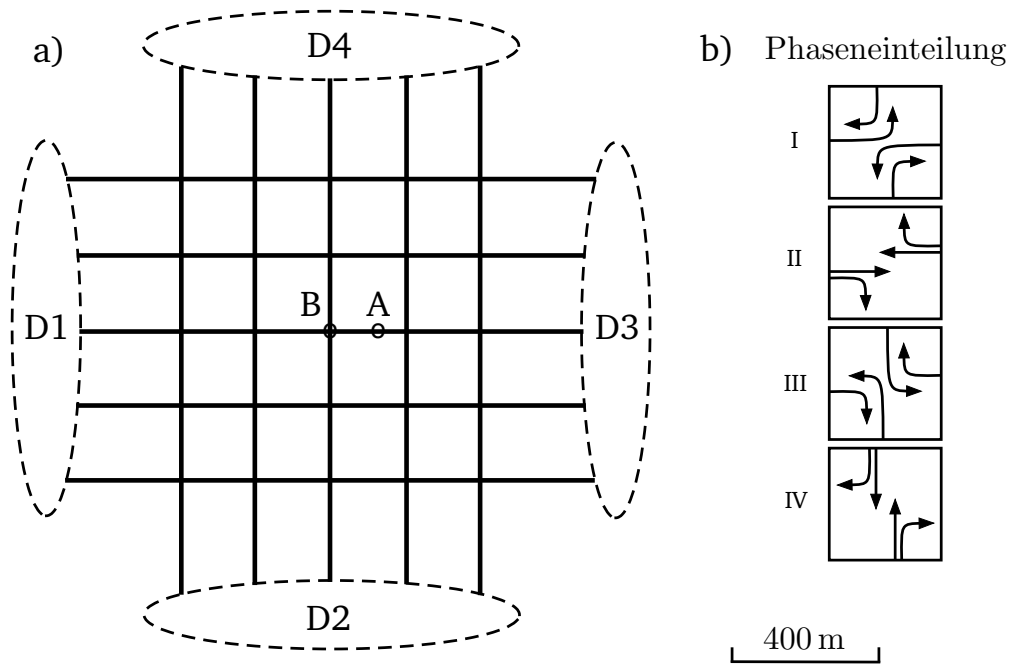


Abbildung 6.3: (a) Das Netzwerk N1 verbindet die virtuellen Verkehrsbezirke D1-D4 und besteht aus 25 signalisierten Knotenpunkten, die gitterförmig angeordnet sind. Alle Abbiegebeziehungen an den Knoten des Netzwerks werden mit exklusiven Fahrstreifen realisiert. Die Position der jeweiligen Störfallszenarien A (Kantenblockade) und B (Knotenblockade) ist eingezeichnet, Störfallszenario C ist eine spontane Nachfrageerhöhung, die von den Bezirken D1 und D4 ausgeht und gleichmäßig alle anderen Bezirke betrifft. (b) Die Phaseneinteilung eines Umlaufs wird auf jede Lichtsignalanlage im Falle der Festzeitsteuerung angewendet.

Netzwerk mit Zuflussdosierung bleibt die Fahrzeugakkumulation sowohl für die Festzeit- als auch für die verkehrabhängige Selbst-Steuerung unter dem Einfluss des Störfalls signifikant geringer. Da keine Blockaden auf Kreuzungen entstehen, bleiben die Abflusskapazitäten des Netzwerks größtenteils erhalten.

Das Netzwerk mit Zuflussdosierung kann die Blockade des Straßenabschnitts nahezu vollständig kompensieren. Neben der Zuflussdosierung ist die Routenwahl der Autofahrer ein wesentlicher Aspekt: Es entscheidet sich ein ausreichender Anteil betroffener Autofahrer für eine Umfahrung des Störfalls, sodass die weitere Propagation der Rückstaus gestoppt werden kann. Fahrzeuge im Stau können aufrücken und jeder Autofahrer kann das gewünschte Ziel in endlicher Zeit erreichen. Demnach hat sich eine Selbst-Heilung im Netzwerk eingestellt. In Tab. 6.3 sind die korrespondierenden Zahlenwerte zusammengefasst.

6.2.3 Störfallszenario B – Blockade einer Kreuzung

In Störfallszenario B wird ein Knotenpunkt des gitterförmigen Netzwerks vollständig bzw. partiell für die Dauer einer Stunde blockiert. Der Ort des Störfalls ist aus Abb. 6.3a ersichtlich. Die Untersuchungen werden unter der Betrachtung mehrerer Nachfrageszenarien durchgeführt.

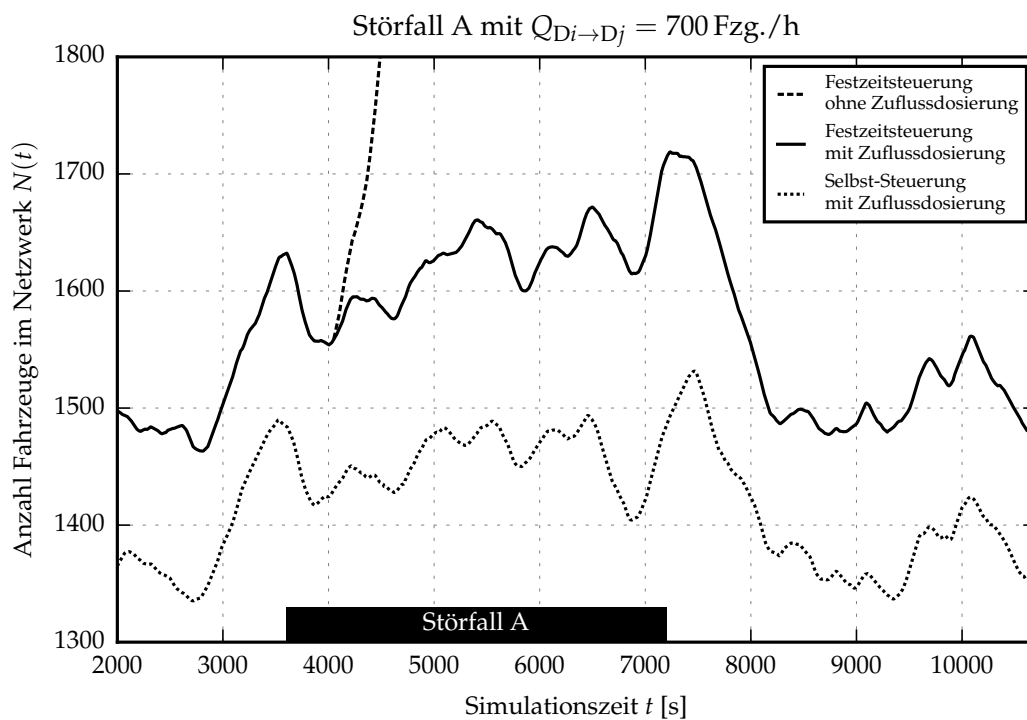


Abbildung 6.4: Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen im Störfallszenario A: Ohne Zuflussdosierung steigt die Fahrzeugakkumulation kurz nach Eintreten des Störfalls stark an, da sich zügig Rückstau im Netzwerk ausbreiten. Die Anwendung der Zuflussdosierung resultiert für die Festzeit- und Selbst-Steuerung in signifikant geringeren Werten für die Fahrzeugakkumulation im Netzwerk. Der Anstieg der Fahrzeugakkumulation noch vor dem Eintritt des Störfalls ist nicht auf den Störfall, sondern auf die stochastische Zufahrten von Fahrzeugen ins Netzwerk zurückzuführen. Die schwarze Markierung auf der Zeitachse des Diagramms gibt Beginn und Ende des Störfalls an.

Störfallszenarien B 1.1 und B 1.2 – Totalblockade und geringe bzw. moderate Verkehrsnachfrage

Für die Simulation der Totalblockade des Knotenpunkts im gitterförmigen Netzwerk werden zwei Nachfrageszenarien betrachtet: Geringe Nachfrage (B 1.1) und moderate Nachfrage (B 1.2). Die Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen sind in Abb. 6.5 dargestellt. Qualitativ ergibt sich für beide Nachfrageszenarien dasselbe Bild: Im Netzwerk ohne Zuflussdosierung ist kurz nach Beginn des Störfalls eine starke Zunahme von Fahrzeugen im Netzwerk erkennbar. Es breiten sich schnell Rückstau im Netzwerk aus, die andere, nicht betroffene Verkehrsströme blockieren und schließlich das gesamte Netzwerk erfassen. Im Netzwerk mit Zuflussdosierung fällt die Zunahme der Fahrzeuge für beide untersuchten Steuerungsstrategien geringer aus. Ferner bleibt unter der geringen Verkehrsnachfrage die Fahrzeugakkumulation im Netzwerk nach einer initialen Erhöhung während des Störfalls annähernd konstant. Unter der moderaten

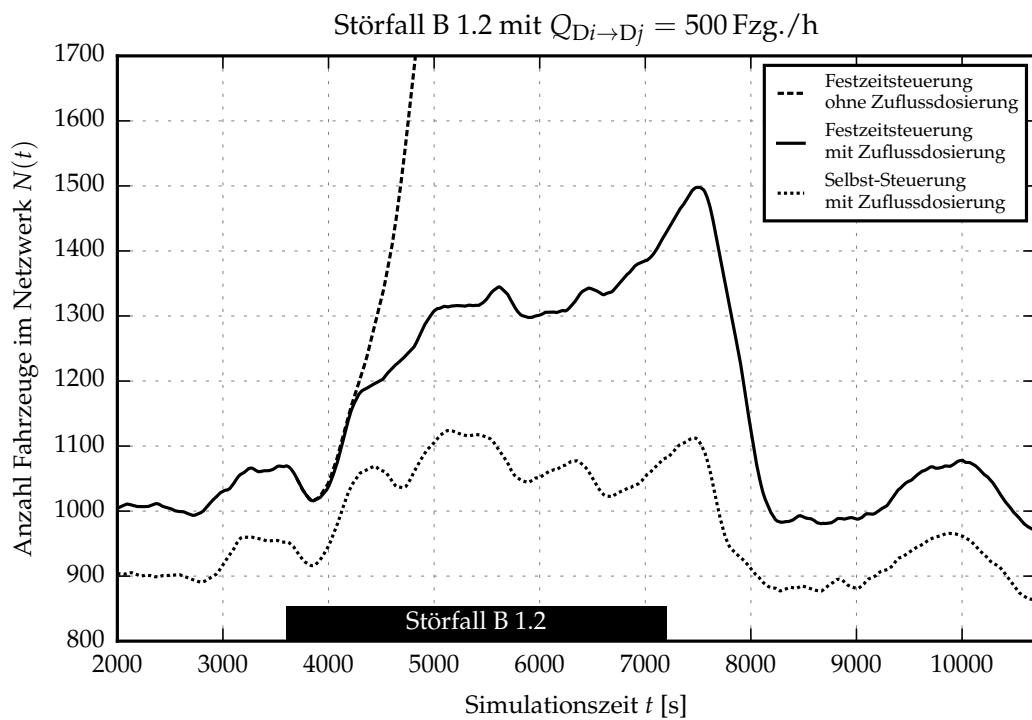
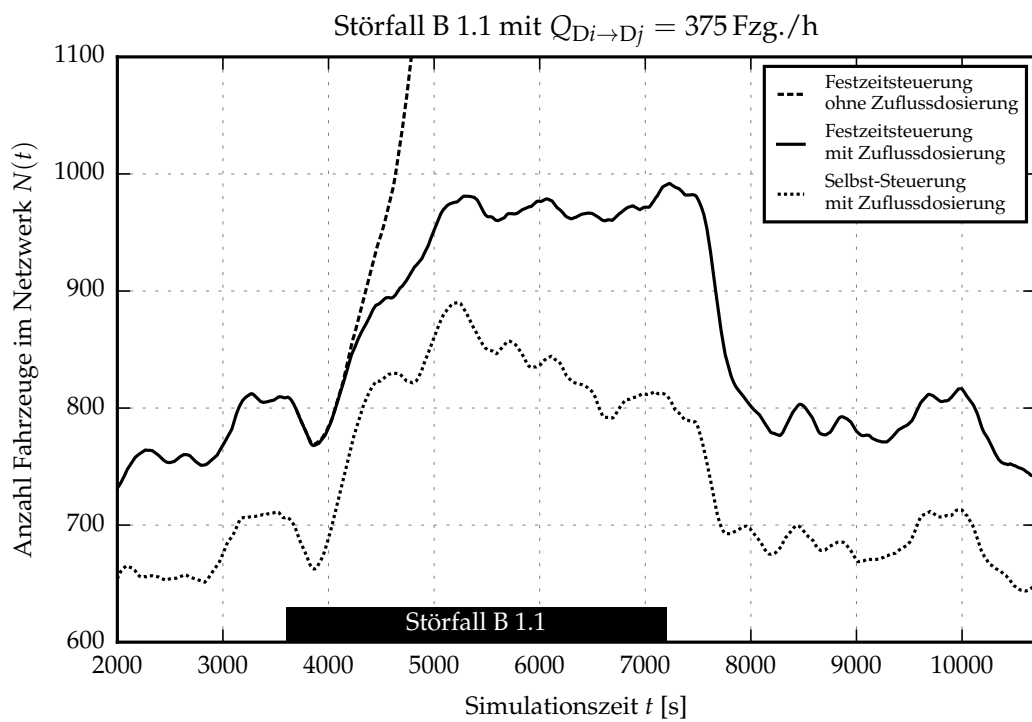


Abbildung 6.5: Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen in den Störfallszenarien B 1.1 und B 1.2. Totalsperrung eines Knotens unter geringer (oben) bzw. moderater (unten) Verkehrsnachfrage. Im Netzwerk mit Zuflussdosierung werden unter dem Einfluss des Störfalls signifikant weniger Fahrzeuge im Netzwerk akkumuliert.

Verkehrsnachfrage stellt sich dieser Fall zunächst auch ein. In der Endphase des Störfalls nimmt die Anzahl der Fahrzeuge im Netzwerk mit Festzeitsteuerungen jedoch wieder zu. Weil die Fahrzeugakkumulation zunächst annähernd konstant ist, könnte die erneute Zunahme auf eine kurzfristige Erhöhung der Zufahrten ins Netzwerk (stochastisch) zurückzuführen sein. Unabhängig davon kann sie nur dadurch zustande kommen, dass, bezogen auf das gesamte Netzwerk, weniger Autofahrer der Staubildung ausweichen als neue Fahrzeuge die stromaufwärtigen Enden der Rückstaus erreichen. Unter dem Einsatz der Selbst-Steuerung lässt sich in Szenario B 1.1 eine deutliche Abnahme der Fahrzeugakkumulation *während* des Störfalls beobachten. Dies lässt sich unter Anwendung von Festzeitsteuerungen nicht beobachten, sodass die verkehrsabhängige Anpassung der Grünzeiteaufteilung an betroffenen Knoten offenkundig wesentlich leistungsfähiger im Sinne des Störfallmanagements ist. Für jede untersuchte Signalisierungsstrategie im Netzwerk mit Zuflussdosierung lässt sich aus den Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen eine schnelle Wiederherstellung ursprünglicher Werte der Fahrzeugakkumulation nach dem Ende des Störfalls ableiten. In Tab. 6.3 sind die Zahlenwerte der untersuchten Messgrößen der beiden Störfallszenarien zusammengefasst.

Störfallszenario B 2 – Totalblockade und hohe Verkehrsnachfrage

Im Störfallszenario B 2 wird eine Totalsperrung eines Knotens unter der Annahme einer hohen Verkehrsnachfrage simuliert. Es stellt einen Grenzfall dar, der auch unter Anwendung des selbstorganisierten Störfallmanagements zu einer ausgeprägten Gridlock-Situation im Netzwerk führt. Ihre Entstehung ist auf den Umstand zurückzuführen, dass das gitterförmige Netzwerk eine vergleichsweise geringe Ausdehnung hat und unter dem Einfluss des Störfalls vollständig zustaut. In diesem Fall stehen keine Straßenkapazitäten mehr zur Verfügung und die Verkehrsströme können nicht mehr abfließen. Da reale Stadtnetzwerke keiner derart starken räumlichen Begrenzung unterliegen, ist die Untersuchung weniger bedeutend für die Praxis. Dennoch lässt sich aus den Zeitreihen der Fahrzeugakkumulation (Abb. 6.6) die Wirkungsweise des selbstorganisierten Störfallmanagements gut interpretieren.

Sowohl im Netzwerk ohne als auch mit Zuflussdosierung steigt die Fahrzeugakkumulation während des Störfalls stark an. In allen Fällen werden mehr als 8000 Fahrzeuge im Netzwerk akkumuliert. Es besteht jedoch ein signifikanter Unterschied bezüglich der beobachtbaren Zuwachsraten der Fahrzeuge in der Anfangsphase des Störfalls. Im Netzwerk ohne Zuflussdosierung setzt der Anstieg der Fahrzeugakkumulation früh ($t \approx 4400$ s) mit einer hohen Zuwachsrate ein, da schnell eine ausgeprägte Gridlock-Situation im Netzwerk durch überlaufende Fahrzeugschlangen entsteht. Unter Einsatz der Zuflussdosierung ist der Zuwachs der Fahrzeugakkumulation sowohl für die Festzeit- als auch die Selbst-Steuerung zunächst deutlich geringer. Dies ist auf die Wirkungsweise des selbstorganisierten Störfallmanagements zurückzuführen. Es fördert die Ausnutzung der Straßenkapazitäten im Netzwerk; zunächst können betroffene Autofahrer auf Umfahrungen ausweichen und anschließend das Netzwerk verlassen. Da jedoch weniger Autofahrer auf umfahrende Routen ausweichen als neu zur Staubildung

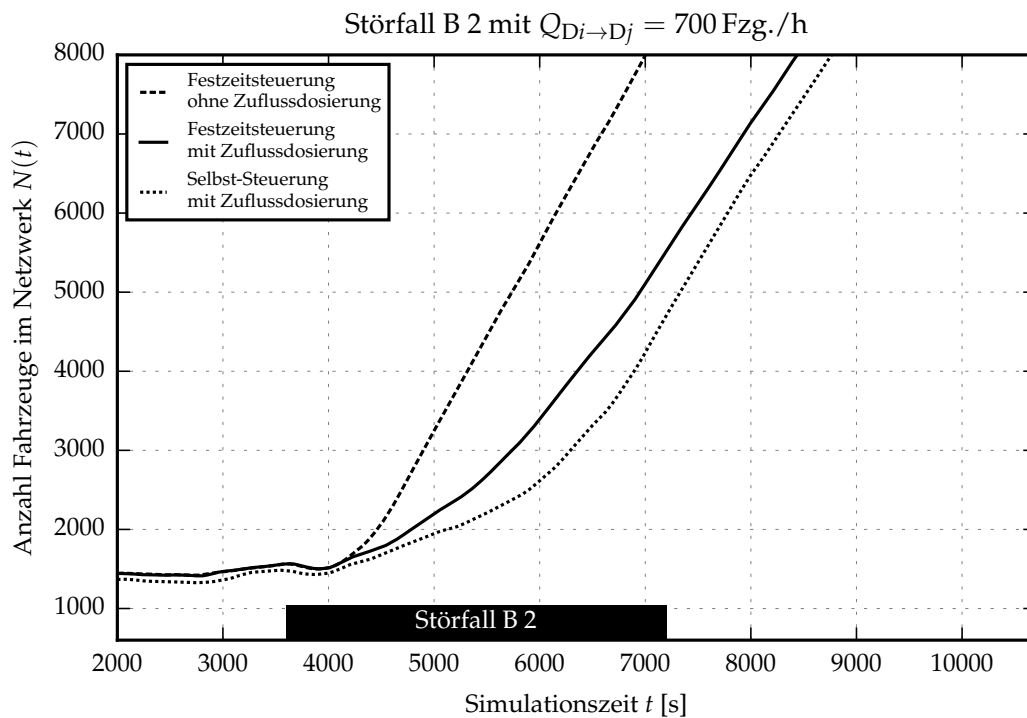


Abbildung 6.6: Zeitreihe der Fahrzeugakkumulationen im Störfallszenario B 2. Für die hohe Nachfrage sind dem selbstorganisierten Störfallmanagement im schweren Störfall einer Totalblockade eines Knotens im begrenzten gitterförmigen Netzwerk Grenzen gesetzt. Die Zuwachsraten der Fahrzeugakkumulation sind im Netzwerk mit Zuflussdosierung zwar reduziert, die Entstehung einer ausgeprägten Gridlock-Situation kann jedoch nicht abgewendet werden. Dies ist maßgeblich auf die räumliche Begrenzung des gitterförmigen Netzwerks zurückzuführen und für die Realität nicht zu erwarten.

beitragen (bedingt durch die hohe Nachfrage), erfasst der Rückstau immer größere Teile des Netzwerks und schließlich auch die Ausweichrouten. Die Ausbreitung des Rückstaus setzt sich weiter fort, sodass stetig mehr Verkehrsströme erfasst werden. Die Abflusskapazitäten sinken und die Zuwachsraten der Fahrzeuge steigen deutlich an. Für die Festzeitsteuerung wird dies ab $t \approx 5500$ s, für die Selbst-Steuerung ab $t \approx 6000$ s beobachtet. Schließlich stehen im begrenzten modellierten Netzwerk keine Straßenkapazitäten mehr zur Verfügung. Es entstehen Gridlocks auf den Knotenzufahrten, infolge derer die Verkehrsströme einfrieren.

Der Vergleich der Entwicklung im Netzwerk ohne und mit Zuflussdosierung zeigt deutlich erkennbar auf, dass das selbstorganisierte Störfallmanagement die Ausnutzung verfügbarer Straßenkapazitäten im Netzwerk fördert. Der störfallbedingte Anstieg der Fahrzeugakkumulation ist deutlich verlangsamt, wobei zu einem späteren Zeitpunkt dennoch das gesamte Netzwerk erfasst wird, da die Grundnachfrage hoch ist.

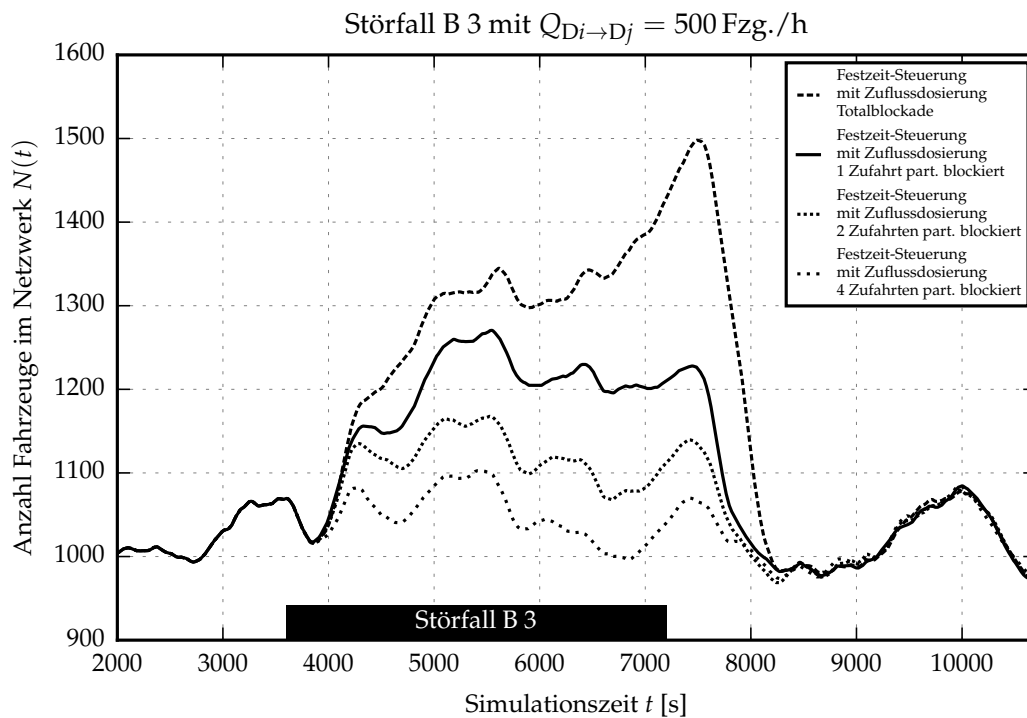


Abbildung 6.7: Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen im Störfallszenario B 3. Für das gitterförmige Netzwerk mit Festzeitsteuerungen und Zuflussdosierung werden vier unterschiedliche Ausprägungen der Schwere der Knotenblockade untersucht. Je geringer die Schwere des Störfalls ist, desto geringer wirkt sich der Störfall unter Anwendung des selbstorganisierten Störfallmanagements aus.

Störfallszenario B 3 – Partielle Sperrungen und moderate Verkehrsnachfrage

In der Realität auftretende Störfälle sind in der Regel keine Totalblockaden. Zumindest geringe Anteile betroffener Verkehrsströme werden regelmäßig abfließen können (z. B. durch Nutzung von Fahrstreifen der entgegengesetzten Richtungsfahrbahn), sodass stromaufwärtige Autofahrer nachrücken können. Dieser Aspekt wird in Störfallszenario B 3 betrachtet. Dazu werden unterschiedliche Ausprägungen der Blockade des zentralen Knotens im gitterförmigen Netzwerk unter der Annahme einer moderaten Nachfrage und unter Verwendung von Festzeitsteuerungen mit Zuflussdosierungen untersucht. Für die Modellierung der partiellen Blockade wird angenommen, dass die Autofahrer auf der Knotenzufahrt über eine Entfernung von 100 m Schrittgeschwindigkeit einhalten müssen. Folgende Szenarien werden betrachtet:

- B 3.1: Alle Zufahrten des Knotens sind blockiert (siehe Störfallszenario B 1.2).
- B 3.2: Eine Zufahrt ist partiell, drei Zufahrten sind total blockiert.
- B 3.3: Zwei Zufahrten sind partiell, zwei total blockiert.
- B 3.4: Alle vier Zufahrten sind partiell blockiert.

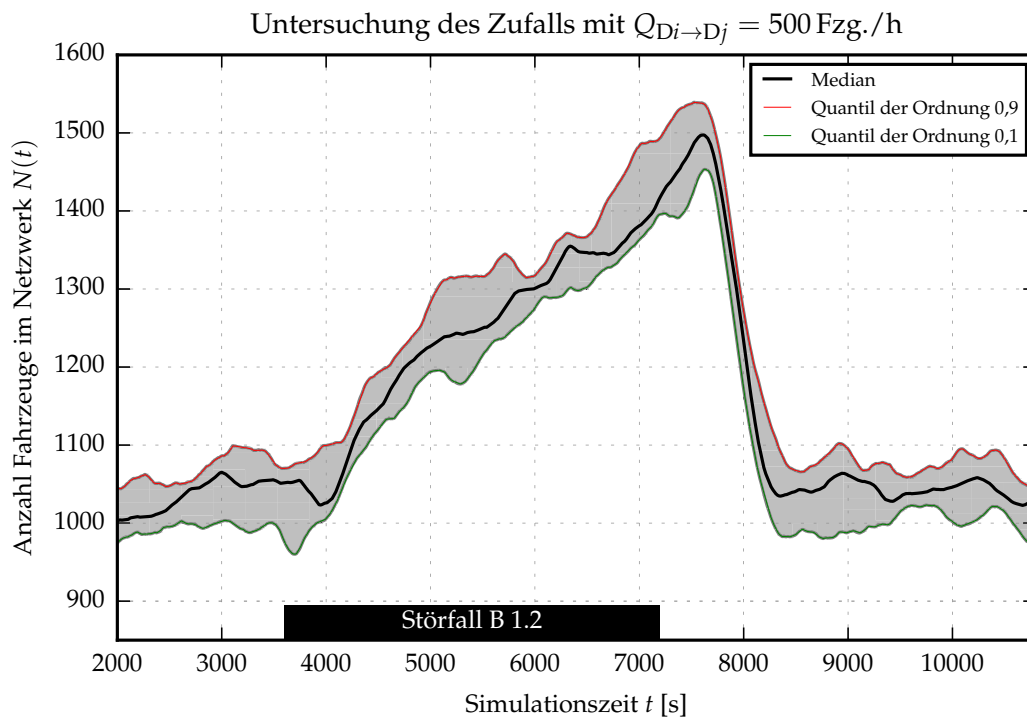


Abbildung 6.8: Die Mediankurve der Fahrzeugakkumulation von fünf Simulationsläufen mit fünf unterschiedlichen Startzufallszahlen im Störfallszenario B 4. Der graue Bereich wird vom 0,1- und 0,9-Quantil begrenzt. In 80 % der Simulationsläufe verläuft die zeitliche Entwicklung der Fahrzeugakkumulation im grauen Bereich.

Die Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen sind in Abb. 6.7 dargestellt. Störfall B 1.2 (Totalblockade des Knotens) dient als Referenz. Aus den Verläufen der Zeitreihen kann geschlossen werden, dass die Auswirkungen eines Störfalls hinsichtlich der Fahrzeugakkumulation im Netzwerk umso geringer ist, je leichter der Störfall im Sinne einer Kapazitätsreduktion ist. Während die Totalblockade (B 3.1) in hohen Werten für die Fahrzeugakkumulation resultiert, bewirkt die vollständige partielle Blockade des Knotens (B 3.4) nur eine geringfügige zusätzliche Fahrzeugakkumulation im Netzwerk. Davon unberührt bleibt jedoch die Tatsache, dass auch bei der vollständigen partiellen Blockade betroffene Autofahrer verzögert werden. Ferner lässt sich beobachten, dass in den Szenarien B 3.2 bis B 3.4 die Fahrzeugakkumulation während des Störfalls annähernd konstant bleibt, sodass die weitere Stauausbreitung nach einer initialen Zunahme gestoppt werden kann.

Untersuchung des Zufalls

Die Simulationen eines Störfallszenarios wurden stets unter der Annahme einer festen Startzufallszahl durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der verwendeten Steuerungsverfahren und dem selbstorganisierten Störfallmanagements zu wahren. Aus der Festlegung der Startzu-

fallszahl ergeben sich die stochastischen Zufahrten ins Netzwerk, Zeitpunkte der Routenwahl und die Zufallsnutzen der Autofahrer-Kante-Einheiten. Simulationsläufe mit identischen Startzufallszahlen laufen identisch ab; die Variation von Startzufallszahlen führt folglich zu unterschiedlichen Simulationsläufen. In dieser Studie soll die Streuung der Fahrzeugakkumulation unter dieser Variation anhand von fünf verschiedenen Startzufallszahlen untersucht werden. Dazu wird Störfallszenario B 1.2 herangezogen; es werden dabei Festzeitsteuerungen mit Zuflussdosierungen betrachtet. Für jeden Zeitschritt wird aus den fünf Werten für die Fahrzeugakkumulation der Median gebildet und über die Simulationszeit aufgetragen. Ferner wird als obere Grenze das 0,9-Quantil und als untere Grenze das 0,1-Quantil aus den fünf Werten für die Fahrzeugakkumulationen berechnet und ebenfalls über die Zeit aufgetragen. Die Zeitreihen sind in Abb. 6.8 dargestellt: In 80 % Prozent der durchgeführten Simulationsläufe verläuft die zeitliche Entwicklung der Fahrzeugakkumulation im grauen Bereich zwischen den beiden Quantilkurven. Unter Betrachtung des Referenzszenarios B 1.2 (Abb. 6.5 (unten), Festzeitsteuerung mit Zuflussdosierung) ist der *qualitative* Zeitverlauf der Quantilkurven vergleichbar. Charakteristisch für Störfallszenario B 1.2 (moderate Nachfrage, Festzeitsteuerung mit Zuflussdosierung) ist die Zunahme der Fahrzeugakkumulation in der Endphase des Störfalls und darüber hinaus.

6.2.4 Störfallszenario C – Nachfrageerhöhung

In Störfallszenario C werden nachfrageseitige Störfälle betrachtet, deren Modellierung mit einer *zusätzlichen* Verkehrsnachfrage realisiert wird, die für den Zeitraum von einer Stunde nach der Anlaufzeit $T_a = 3600$ s besteht. Für die zusätzliche Nachfrage sei Folgendes angenommen:

- $Q_{D1 \rightarrow Di}^{\text{inc}} = 750$ Fzg./h für alle $i \neq 1$ und
- $Q_{D4 \rightarrow Dj}^{\text{inc}} = 750$ Fzg./h für alle $j \neq 4$.

Die erhöhte Nachfrage geht demnach von den Bezirken 1 und 4 aus; sie trifft jeweils alle restlichen Verkehrsbezirke des Netzwerks gleichermaßen. Dabei wird eine geringe (C 1) und moderate (C 2) Grundnachfrage herangezogen.

Störfallszenario C 1 – Spontane Nachfragespitze

In diesem Störfallszenario wird von einer geringen Grundnachfrage ausgegangen; die Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen für dieses Störfallszenario sind in Abb. 6.9 dargestellt. Die initiale Nachfragerhöhung ist für alle untersuchten Fälle deutlich sichtbar zu erkennen. Im Netzwerk ohne Zuflussdosierung nimmt die Zuwachsrates der Fahrzeugakkumulation bei $t \approx 4300$ s zunächst leicht ab, steigt ab $t \approx 5300$ s jedoch wieder an. Es entstehen Gridlocks durch überlaufende Fahrzeugschlangen auf den Kreuzungen des Netzwerks; Rückstaus breiten sich zügig aus und der Verkehr kommt schnell zum Erliegen. Im Netzwerk mit Zuflussdosierung bleibt die Anzahl der Fahrzeuge im Netzwerk nach der initialen Zunahme sowohl für die Festzeit- als auch die Selbst-Steuerung annähernd konstant. Die weitere Ausbreitung der Staubildung

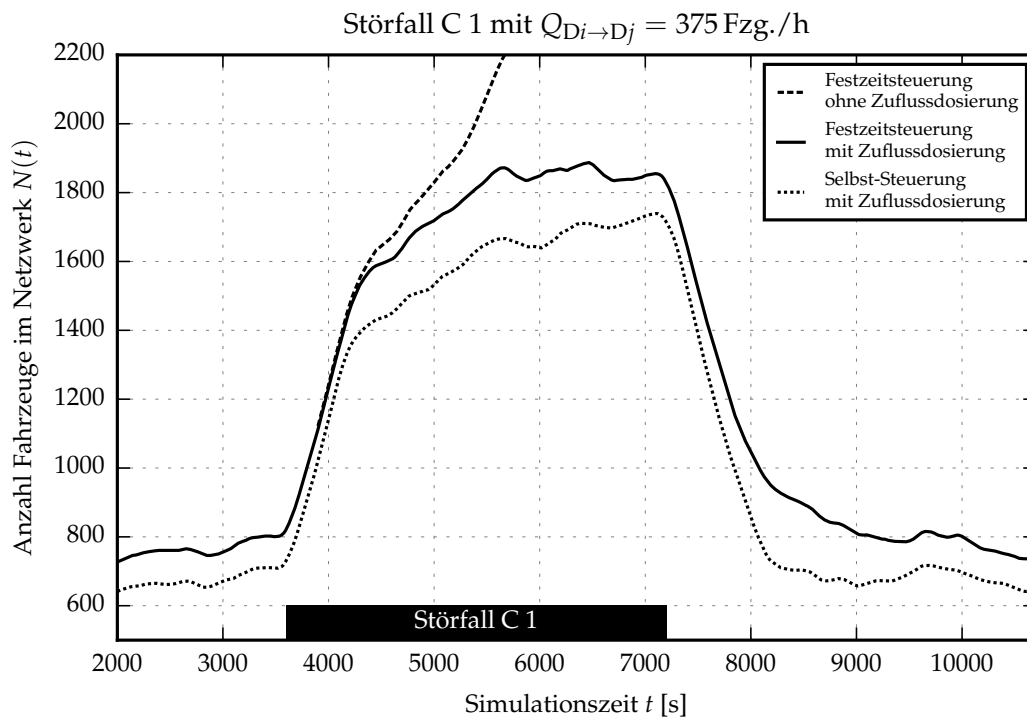


Abbildung 6.9: Zeitreihe der Fahrzeugakkumulationen im Störfallszenario C 1. Für alle untersuchten Signalisierungsstrategien steigt die Fahrzeugakkumulation initial aufgrund der Nachfragerhöhung. Im Netzwerk ohne Zuflussdosierung werden nach der initialen Zunahme jedoch weitere Fahrzeuge im Netzwerk durch die Bildung von Gridlocks akkumuliert. Im Netzwerk mit Zuflussdosierung bleibt die Anzahl der Fahrzeuge für beide untersuchten Signalisierungsstrategien nach der initialen Zunahme annähernd konstant; zusätzlich verläuft die Wiederherstellung normaler Werte der Fahrzeugakkumulation zügig.

im Netzwerk kann in beiden Fällen ab etwa $t \approx 5\,500$ s gestoppt werden. Nach Abklingen der zusätzlichen Nachfrage werden im Netzwerk mit Zuflussdosierung schnell die ursprünglichen Fahrzeugakkumulationen erreicht. Die Zahlenwerte sind in Tab. 6.3 zusammengefasst.

Prinzipiell lässt sich dieses Störfallszenario auch auf *wiederkehrende* Nachfragerhöhungen (z. B. Berufsverkehr) übertragen. Während im Rahmen dieser Untersuchung eine *spontane*⁸ Nachfragespitze modelliert wurde, ist für eine wiederkehrende Nachfragerhöhung davon auszugehen, dass die korrespondierende Verkehrsstromverteilung im Netzwerk die Kapazitäten des Netzwerks besser ausnutzen würde (siehe Abschnitt 2.5.1). Das Überlaufen von Fahrzeugschlangen, d. h. die Bildung von Gridlocks, ist jedoch auch bei wiederkehrender Staubbildung nicht ausgeschlossen. Die Zuflussdosierung hemmt auch diese Gridlock-Bildung, da sie grundsätzlich *unabhängig* von der Ursache der Staubbildung wirkt. Gleichzeitig werden lokal auch im

⁸Das heißt, die Autofahrer hatten bei Einfahrt ins Netzwerk *keine* Kenntnisse über den Eintritt der Nachfragerhöhung.

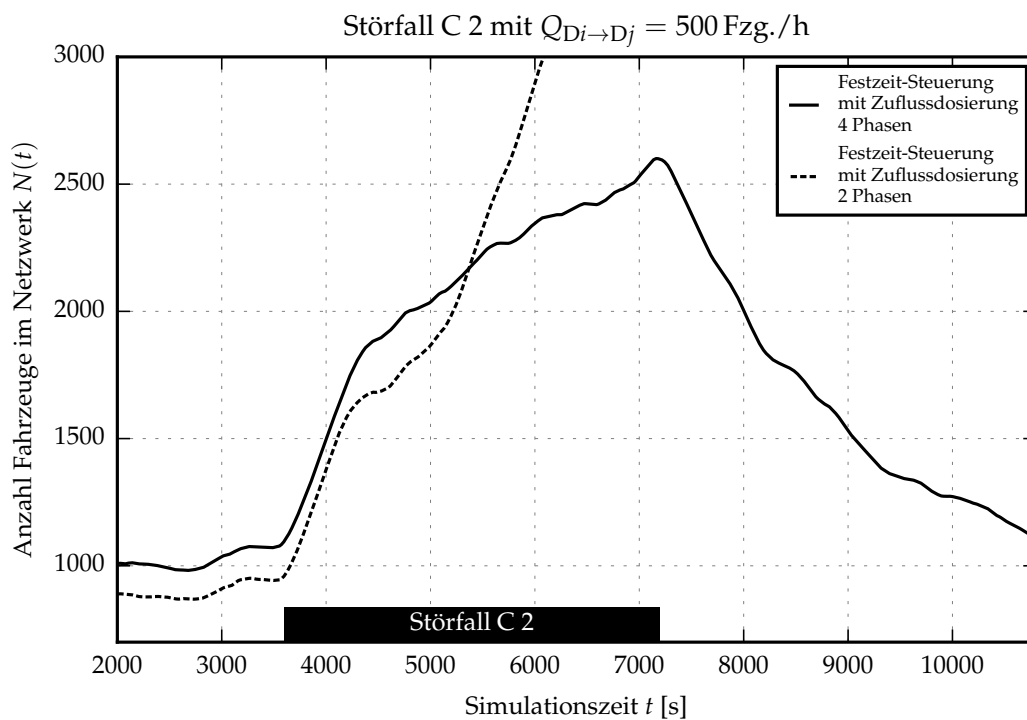


Abbildung 6.10: Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen im Störfallszenario C 2. Im Netzwerk mit 2-phasigen Festzeitsteuerungen ist die Fahrzeugakkumulation zunächst geringer. Da Linksabbieger bei der gemeinsamen Bedienung in der Phase untergeordnet sind, kommt es im Zuge der Übersättigung vieler Knotenpunkte zügig zur Bildung einer Gridlock-Situation. In der Simulation würde ein Rückkopplungsmechanismus der Staubildung (s. Abb. 6.11) beobachtet, der unter Verwendung von 4-Phasen-Systemen gehemmt werden konnte.

Falle einer wiederkehrenden Staubildung noch verfügbare Straßenkapazitäten beworben, was wiederkehrend verstaute Gebiete des Netzwerks von weiteren Zuflüssen entlasten kann.

Störfallszenario C 2 – Spontane Nachfragespitze unter Verwendung eines 2- bzw. 4-Phasen-Systems

In diesem Abschnitt wird die spontane Nachfragespitze aus Szenario C 1 unter Annahme einer moderaten Nachfrage untersucht. Dazu werden ausschließlich Festzeitsteuerungen mit Zuflussdosierungen betrachtet. Hinsichtlich der Phasensysteme der signalisierten Knoten wird dabei zwischen Systemen mit $p = 4$ Phasen (siehe Abb. 6.3b) und System mit $p = 2$ Phasen unterschieden, die im jeweils betrachteten Fall ausschließlich zur Anwendung kommen. Dabei stellen im 2-phasigen System Linksabbieger stets untergeordnete, d. h. nicht gesichert geführte, Abbiegeströme dar. Die korrespondierenden Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen sind in Abb. 6.10 dargestellt. Die Anzahl der Fahrzeuge im Netzwerk ist unter der Verwendung des 2-Phasen-Systems zunächst geringer; auch die initiale Zunahme der Fahrzeugakkumulation

Tabelle 6.3: Übersicht über die Anzahl $N(t_{\text{inc, end}} = 7\,200\text{ s})$ der Fahrzeuge im Netzwerk unmittelbar nach dem Ende des Störfalls und die Dauer T_{rec} der Wiederherstellung normaler Verkehrsbedingungen (Fahrzeugakkumulation vor dem Störfall) im Netzwerk. Steuerungsverfahren, die im jeweiligen Störfallszenario nicht untersucht wurden, sind mit einem Strich gekennzeichnet. Vorkommnisse, in denen die Wiederherstellung normaler Verkehrsbedingungen nicht erreicht werden konnte, sind mit „n. erfolgt“ (nicht erfolgt) gekennzeichnet. Die Zuflussdosierung wird mit ZD abgekürzt. Beachte, dass $N(t_{\text{inc, end}})$ i. Allg. *nicht* den maximalen Wert der Fahrzeugakkumulation widerspiegelt.

Störfall	Anzahl d. Fahrzeuge $N(t = 7200)$ [Fzg.]			Dauer Wiederherstellung T_{rec} [s]		
	Festzeitsteuerung ohne ZD		Selbst-Steuerung mit ZD	Festzeitsteuerung ohne ZD		Selbst-Steuerung mit ZD
A	7492	1728	1485	n. erfolgt	800	800
B 1.1	3939	986	803	n. erfolgt	800	600
B 1.2	5572	1425	1079	n. erfolgt	1000	800
B 2	8465	5521	4707	n. erfolgt	n. erfolgt	n. erfolgt
B 3.1	-	1425	-	-	800	-
B 3.2	-	1202	-	-	600	-
B 3.3	-	1105	-	-	600	-
B 3.4	-	1034	-	-	0	-
C 1	4594	1836	1736	n. erfolgt	1800	900
	Festzeitsteuerung mit ZD		Festzeitsteuerung mit ZD			
	2 Phasen		4 Phasen	2 Phasen		4 Phasen
C 2	4574		2625	n. erfolgt		> 3600

durch die Nachfragerhöhung fällt geringer aus. Im weiteren zeitlichen Verlauf ist jedoch eine starke Zunahme der Fahrzeuge im Netzwerk zu beobachten, die sich unter der Verwendung von 4-phasigen Lichtsignalanlagen nicht ergibt. Ab $t \approx 5\,300\text{ s}$ ist die Fahrzeugakkumulation im Netzwerk mit 2-Phasen-Systemen sogar höher; durch die hohe Zuwachsrate steigt sie weiterhin an, bis eine bestimmende Gridlock-Situation entsteht. Auch unter der Verwendung von 4-Phasen-Systemen steigt die Fahrzeugakkumulation nach der initialen Zunahme während des Störfalls stetig. Die Zuwachsrate ist jedoch signifikant geringer als unter Verwendung von 2-Phasen-Systemen. Ferner ist eine Wiederherstellung normaler Verkehrsbedingungen zu beobachten, während diese unter Verwendung von 2-Phasen-Systemen nicht erreicht wird. Verglichen mit Störfall C 1, benötigt diese Wiederherstellung jedoch mehr Zeit.

Störfallszenario C 2 zeigt, dass der Einsatz 2-phasiger Festzeitsteuerungen unter Vorherrschen von übersättigten Verkehrsbedingungen selbst mit dem selbstorganisierten Störfallmanagement zu einem Gridlock führt. Ein kritischer Aspekt der Verwendung von 2-Phasen-Systemen ist, dass Linksabbieger *untergeordnet* bedient werden: Sind vorrangige Ströme der aktuellen Phase übersättigt, können in einem Umlauf wenige bis gar keine Linksabbieger abfließen. Als Resultat

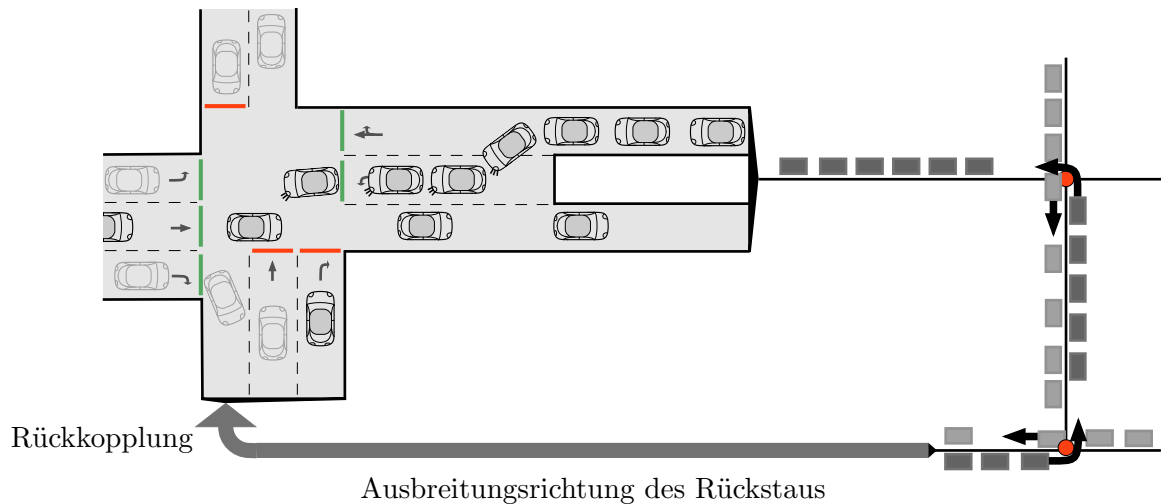


Abbildung 6.11: In einem zyklischen (Teil-)Graphen kann die Staubildung aufgrund nicht bedienter Linksabbieger an übersättigten Knotenpunkten auf deren Ursache rückkoppeln. Dies stellt einen schweren Gridlock dar, dessen Auftreten durch die gesicherte Bedienung von Linksabbiegern an den Knotenpunkten und der Verwendung der Zuflussdosierung gehemmt werden kann.

bildet sich auf dem Fahrstreifen der Linksabbieger eine Warteschlange, die früher oder später die Spuraufweitung erreicht und somit einen lokalen Gridlock auf der Knotenzufahrt hervorruft (vgl. Abb. 5.3b), da auch andere Abbiegeströme behindert werden. Unter gleichbleibenden Bedingungen setzt sich die Staubildung auf dem stromaufwärtigen Straßenabschnitt fort und erreicht später die kritische Rückstaulänge, was einen Einsatz der Zuflussdosierung am stromaufwärtigen Knoten impliziert. Diese betrifft u. a. die Linksabbieger, die in den verstaute Straßenabschnitt einfahren möchten. Selbst wenn Fahrzeuge auf dem verstaute Straßenabschnitt aufrücken können, werden zunächst die Geradeaus- und Rechtsfahrer am Knoten bedient. Wird die Zuflussdosierung erneut aktiv, bevor Linksabbieger bedient werden konnten, bildet sich auf dem Fahrstreifen dieser Linksabbieger ebenso ein Rückstau, der bei Erreichen der Spuraufweitung wiederum einen lokalen Gridlock bedingt. Dieser Prozess setzt sich in einem geschlossenen (Teil-)Graphen im Uhrzeigersinn fort. Im ungünstigsten Fall kann eine Rückkopplung der Staubildung zurück auf ihren Ursprung entstehen⁹. Abb. 6.11 veranschaulicht den Sachverhalt grafisch. Die Verwendung eines 4-Phasen-Systems kann diesen Rückkopplungsmechanismus im Störfallszenario C 2 stark hemmen. Dabei ist jedoch anzumerken, dass ein 4-Phasen-System *nicht* gewährleisten kann, dass nach Freiwerden von Kapazitäten auf einem zuflussdosierten Straßenabschnitts der zugehörige Linksabbiegerstrom am stromaufwärtigen Knoten *sofort* bedient wird. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Zuflussdosierung im Mittel jeden Abbiegestrom gleichmäßig betrifft, sodass die Linksabbieger

⁹Diese Rückkopplung wurde nur in Simulationen beobachtet. In der Realität ist ihr Auftreten aus u. a. zwei Gründen fraglich: (i) Das Stadtstraßennetz besteht nicht ausschließlich aus 2-phasig signalisierten Knotenpunkten und (ii) die Fahrzeuginteraktionen auf Knotenzufahrten und Kreuzungen können in der Simulation zwar realistisch, aber nicht wirklichkeitsgetreu abgebildet werden.

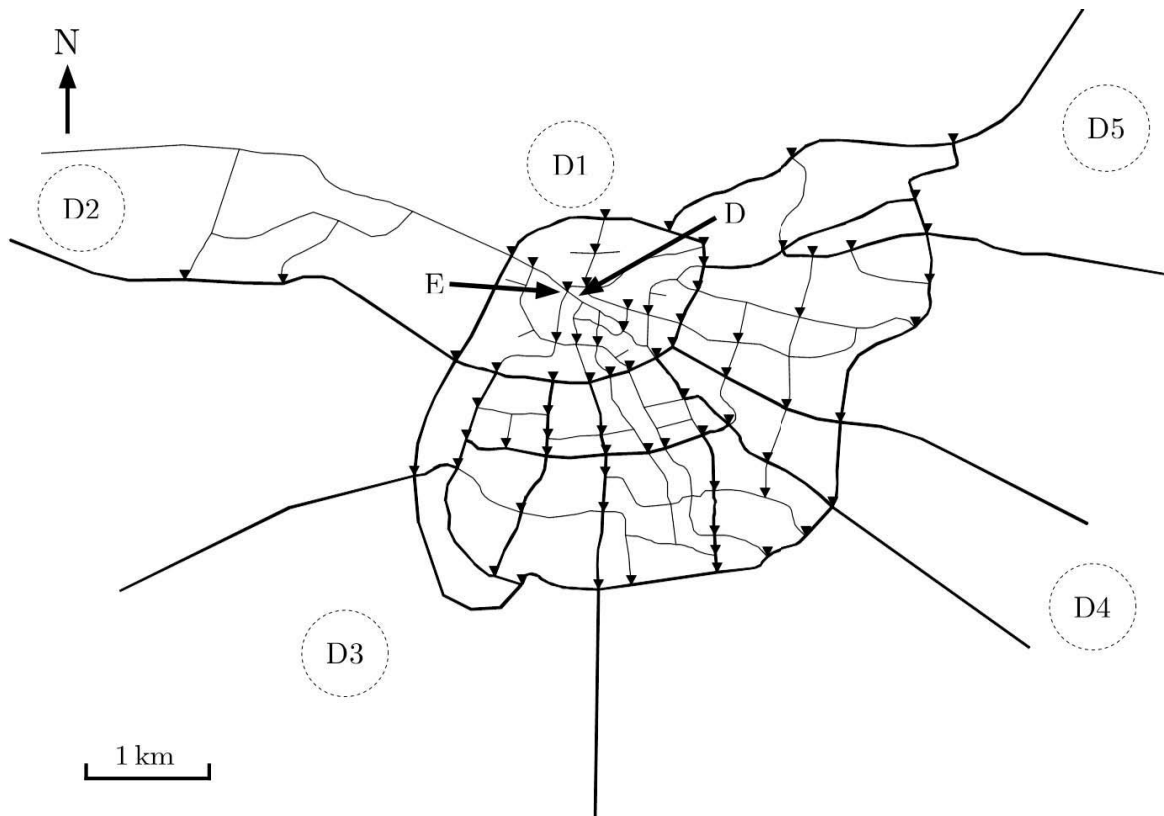


Abbildung 6.12: Das komplexe Netzwerk N2 besteht aus 72 signalisierten Knotenpunkten (gekennzeichnet durch Dreiecke), die von bidirektionalen Kanten (Straßenabschnitte) verbunden werden. Fett markierte Kanten sind zweispurige Straßenabschnitte, alle anderen sind einspurig. Die untersuchten Störfallszenarien D und E ereignen sich im Stadtzentrum, wo viele Verkehrsströme zusammenlaufen. In Störfallszenario F besteht eine hohe Nachfrage zwischen den Randbezirken und der Innenstadt.

regelmäßig abfließen können. Auf diese Weise wird die Behinderung durch den lokalen Gridlock an der Spuraufweitung der Knotenzufahrt regelmäßig gelöst.

Der skizzierte Rückkopplungsmechanismus wurde in den Verkehrsflusssimulationen beobachtet. Weiterführende Studien müssen jedoch zeigen, inwieweit und ob er für reale Stadtstraßennetze tatsächlich relevant ist.

6.3 Untersuchungen in einem komplexen Netzwerk

Die Wirkungsprinzipien des selbstorganisierten Störfallmanagements werden in diesem Abschnitt simulativ in einem komplexen Netzwerk untersucht. Dabei werden drei qualitativ äquivalente Störfallszenarien aus der Studie im gitterförmigen Netzwerk N1 betrachtet.

Tabelle 6.4: Übersicht der untersuchten Störfallszenarien im komplexen Netzwerk N2.

Störfallszenario	Nachfrage $Q_{D_i \rightarrow D_j}$ [Fzg./h]	Beschreibung
D 1	300	Totalblockade einer Kante
D 2	300	Stop-and-Go-Verkehr auf Kante
E 1	300	Totalblockade eines Knotens
E 2	300	part. Blockade Knoten
F	300	Nachfrageerhöhung

6.3.1 Das komplexe Netzwerk N2

Das komplexe Netzwerk N2 (Abb. 6.12) besteht aus 72 signalisierten Knotenpunkten und verbindet die virtuellen Verkehrsbezirke D1, D2, D3, D4 und D5 miteinander. Die Geometrie des Netzwerks ist an die französische Stadt *Avignon* angelehnt. Der Verkehrsbezirk D1 ist eine Quelle bzw. Senke, die im Stadtzentrum lokalisiert ist und mehrere Anbindungen an das Netzwerk hat (z. B. Parkhäuser, Einkaufszentren oder andere POIs). Die Kanten zwischen den Knotenpunkten sind als bidirektionale Straßenabschnitte modelliert: Fett markierte Kanten stellen zweispurige Straßenabschnitte dar, wohingegen dünne Kanten einspurige Straßenabschnitte sind. An den Knoten des Netzwerks werden stets alle lokal möglichen Abbiegebeziehungen (Kehrtwenden sind jedoch ausgeschlossen) realisiert. Die Anordnung der Fahrstreifen auf den Knotenzufahrten ist dabei nicht immer ideal: Es werden exklusiv und kombiniert genutzte Fahrstreifen eingesetzt. Die Länge der Spuraufweitungen an den Knoten liegen typischerweise bei 50 m. Linksabbieger werden stets gesichert geführt (eigene Phase oder Nachlaufzeiten). Wie im gitterförmigen Netzwerk N1 sind die Längen der Zufahrtsstraßen der Bezirke ins Netzwerk so dimensioniert, dass Fahrzeuge auch bei bereits vorhandener Staubildung in das Netzwerk einfahren können. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird von einer symmetrischen Nachfrage $Q_{D_i \rightarrow D_j} = 300$ Fzg./h für alle $i, j \in \{1, 2, 3, 4, 5\}$ mit $i \neq j$ ausgegangen. Der Nachfragezeitraum im Netzwerk N2 wird mit $T_Q = 4$ h festgelegt. Alle Störfälle treten dabei nach einer Anlaufzeitzeit von $T_a = 5400$ s = 1,5 h ein und bestehen für die Dauer einer Stunde. Eine knappe Übersicht der untersuchten Störfallszenarien im komplexen Netzwerk ist in Tab. 6.4 zu finden.

6.3.2 Störfallszenario D – Blockade eines Straßenabschnitts

Im Folgenden werden zwei unterschiedliche Störfälle auf einem Straßenabschnitt betrachtet: Szenario D 1 ist eine Totalblockade, wohingegen Störfallszenario D 2 eine partielle Blockade repräsentiert, die durch Stop-and-Go-Verkehr modelliert wird. Während der Störfalldauer von einer Stunde wird der Verkehr periodisch für jeweils 220 s total blockiert; anschließend wird die Totalblockade für 20 s aufgehoben. Die Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen finden sich in Abb. 6.13. Ein Vergleich der Werte der Fahrzeugakkumulationen ist in Tab. 6.5 zu finden.

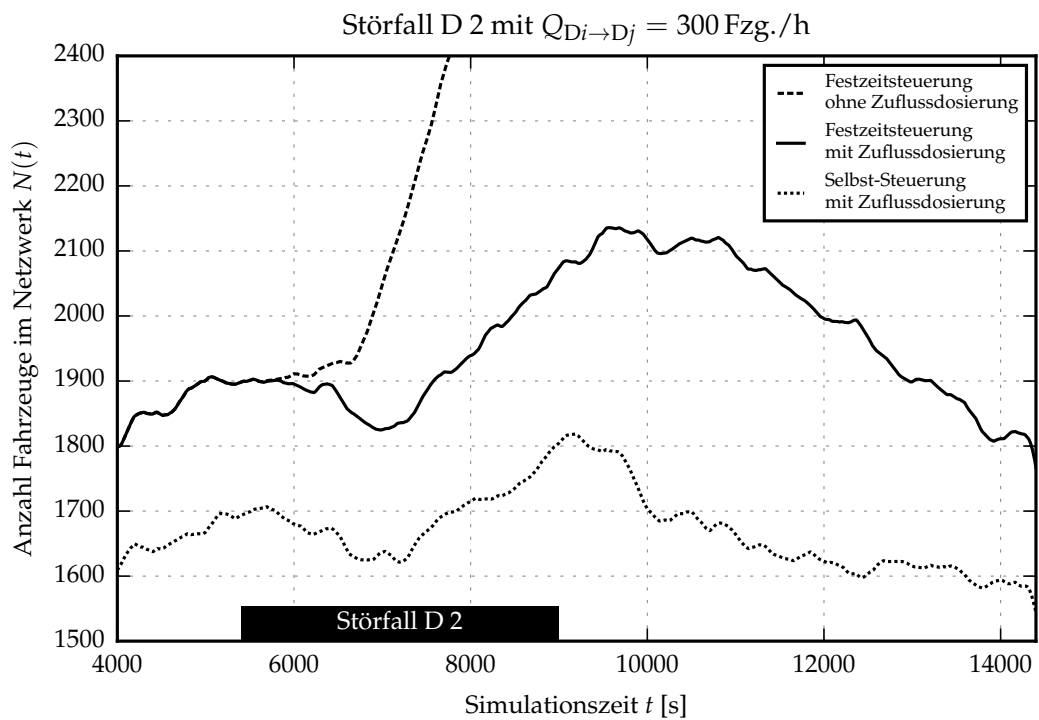
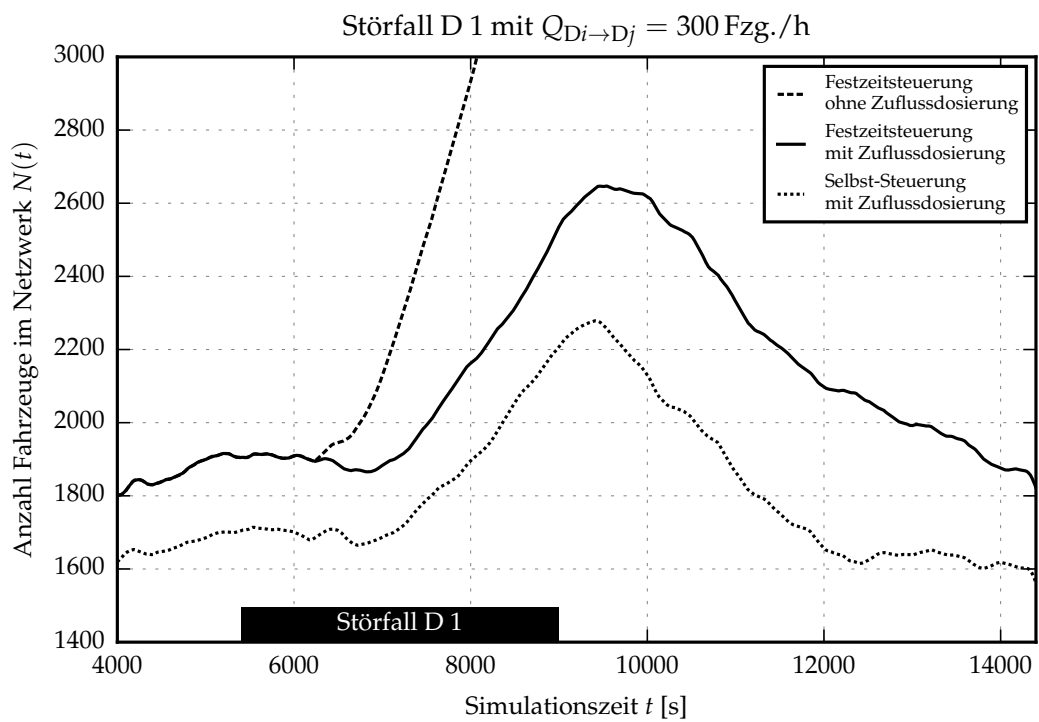


Abbildung 6.13: Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen in den Störfallszenarien D 1 und D 2. Die initiale Zunahme der Fahrzeugakkumulation aufgrund des Störfalls ist im komplexen Netzwerk verzögert; dies gilt jedoch auch für die Auflösung des Staus im Netzwerk nach Ende des Störfalls. Die Wiederherstellung normaler Verkehrsbedingungen vollzieht sich folglich signifikant langsamer als im gitterförmigen Netzwerk.

Störfallszenarien D 1 – Totalblockade eines Straßenabschnitts

Verglichen mit dem gitterförmigen Netzwerk fällt zunächst deutlich erkennbar auf, dass die Zunahme der Fahrzeugakkumulation aufgrund des Störfalls im komplexen Netzwerk später einsetzt. Ohne Zuflussdosierung ist eine Zunahme der Fahrzeugakkumulation erst ab $t \approx 6\,500\text{ s}$ in der Zeitreihe erkennbar. Im Netzwerk mit Zuflussdosierung ist unabhängig von der verwendeten Signalisierungsstrategie (Festzeit- und Selbst-Steuerung) eine Zunahme der Fahrzeugakkumulation erst nach circa 30 Minuten bei $t \approx 7\,200\text{ s}$ zu verzeichnen. Dies lässt sich auf die Größe und Unregelmäßigkeit des komplexen Netzwerk zurückführen: Auf langen Straßenabschnitten kann sich der Rückstau zunächst ausbreiten, ohne dass kreuzende Verkehrsströme behindert werden. Ohne Anwendung der Zuflussdosierung setzt die initiale Zunahme der Fahrzeuge im komplexen Netzwerk jedoch spätestens dann ein, wenn Rückstaus bis zu den stromaufwärtigen Kreuzungen propagiert sind und schließlich kreuzende Verkehrsströme behindern.

Im Netzwerk mit Zuflussdosierung ist einerseits der Erhalt der Abflusskapazitäten und die Ausnutzung verfügbarer Straßenkapazitäten für die Verzögerung der Zunahme von Fahrzeugen in der Anfangsphase des Störfalls verantwortlich. Offenkundig ist jedoch der Anteil umfahrender Autofahrer zu gering, um eine weitere Ausbreitung des Rückstaus zu verhindern. Dies ist auch dadurch begründet, dass durch die Verwendung kombiniert genutzter Fahrstreifen für mehrere Abbiegebeziehungen an einigen Knoten auch nicht betroffene Autofahrer von der Zuflussdosierung erfasst werden. Die Zuwachsraten der Fahrzeuge im Netzwerk während des Störfalls sind unter Verwendung des selbstorganisierten Störfallmanagements stets geringer. Die Wiederherstellung der ursprünglichen Fahrzeugakkumulation im komplexen Netzwerk nach dem Ende des Störfalls verläuft sowohl für die Festzeit- als auch für die Selbst-Steuerung deutlich langsamer als im gitterförmigen Netzwerk. Die störfallbedingten Rückstaus werden im komplexen Netzwerk demnach weniger zügig abgebaut. Im Falle der Festzeitsteuerung mit Zuflussdosierung gelingt die Wiederherstellung nicht mehr im Nachfragezeitraum T_Q .

Störfallszenario D 2 – Stop-and-Go-Verkehr auf einem Straßenabschnitt

Die zeitliche Entwicklung der Fahrzeugakkumulation im Netzwerk ohne Zuflussdosierung ist vergleichbar mit der von Störfallszenario D 1. Obwohl die Totalblockade alle 220 Sekunden vollständig aufgelöst wird, friert ein großer Teil der Verkehrsströme im Netzwerk ohne Zuflussdosierung ein. Unter Anwendung des selbstorganisierten Störfallmanagements sind die Auswirkungen des Stop-and-Go-Verkehrs deutlich geringer als die der Totalblockade in Störfallszenario D 1. Dies gilt sowohl für die Festzeit- als Selbst-Steuerung. Die Zuwachsraten sind geringer und es werden insgesamt weniger zusätzliche Fahrzeuge im Netzwerk akkumuliert. Die Wiederherstellung ursprünglicher Werte der Fahrzeugakkumulation vollzieht sich jedoch zumindest unter Verwendung von Festzeitsteuerungen ähnlich langsam wie in D 1. Die Schwere des Störfalls hat somit keinen maßgebenden Einfluss auf die Abflussrate während der Stauauflösung nach dem Ende des Störfalls im festzeitgesteuerten Netzwerk. Obwohl

Szenario D 2 ein leichterer Störfall ist und weniger zusätzliche Fahrzeuge akkumuliert werden, ist die Dauer der Wiederherstellung in beiden Störfallszenarien annähernd identisch. Unter Verwendung der Selbst-Steuerung im Netzwerk mit Zuflussdosierung werden die Auswirkungen des Stop-and-Go-Verkehrs signifikant reduziert. Es werden lediglich circa 200 Fahrzeuge zusätzlich im Netzwerk akkumuliert. Auch die Wiederherstellung normaler Verkehrsbedingungen verläuft deutlich schneller.

6.3.3 Störfallszenario E – Blockade einer Kreuzung

In diesem Störfallszenario werden Blockadesituationen eines Knotenpunkts im komplexen Netzwerk betrachtet (siehe Abb. 6.12). Ähnlich wie in Störfallszenario B 3 wird dabei zwischen einer totalen (E 1) und partiellen (E 2) Blockade unterschieden. Zur Modellierung der partiellen Blockade wird hier jedoch die erlaubte Höchstgeschwindigkeit auf den vier Knotenzufahrten über eine hinreichende Länge auf Schrittgeschwindigkeit für die Dauer des Störfalls (60 min) reduziert. Die Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen der Fahrzeuge sind in Abb. 6.14 dargestellt. Ein Vergleich der Werte der Fahrzeugakkumulationen ist in Tab. 6.5 zu finden.

Störfallszenario E 1 – Totalblockade einer Kreuzung

Die störfallbedingte initiale Zunahme der Fahrzeugakkumulation ist für alle betrachteten Steuerungen mit oder ohne Einsatz der Zuflussdosierung in den Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen deutlich erkennbar. Im Vergleich zum Störfallszenario D 1 setzt diese Zunahme jedoch früher ein, da die sich auf allen vier Knotenzufahrten ausbreitenden Rückstaus zügiger den kreuzenden Verkehr beeinträchtigen. Ohne Anwendung der Zuflussdosierung werden nicht betroffene Verkehrsströme schnell von der Staubildung erfasst, sodass sich Rückstaus im Netzwerk ausbreiten. Daraus resultiert eine starke Zunahme von Fahrzeugen im Netzwerk, woraus ein *bestimmender* Gridlock im Netzwerk erwächst, unter dem ein großer Teil der Verkehrsströme einfriert.

Unter dem Einsatz der Zuflussdosierung können kreuzende Verkehrsströme zwar weiterhin die Kreuzungen passieren. Die Rückstauausbreitung schreitet jedoch schnell voran, da insgesamt weniger Autofahrer umfahrende Richtungen wählen als an den stromaufwärtigen Enden der Rückstaus neue Fahrzeuge hinzukommen. Ferner werden durch den Einsatz der Zuflussdosierung auf kombiniert genutzten Fahrstreifen auch ursprünglich nicht vom Störfall betroffene Autofahrer zurückgehalten (siehe Abb. 5.3c). Über die gesamte Dauer des Störfalls bleibt die Zuwachsrate von Fahrzeugen im Netzwerk mit Zuflussdosierung sowohl für die Festzeit- als auch Selbst-Steuerung von null verschieden; sie ist dennoch stets geringer als im Netzwerk ohne Zuflussdosierung. Die Wiederherstellung normaler Verkehrsbedingungen vollzieht sich verzögert; unter Verwendung von Festzeitsteuerungen nimmt die Fahrzeugakkumulation sogar nach dem Ende des Verkehrsstörfalls deutlich zu. Erst circa 30 min nach Deaktivierung des Störfalls sinkt die Anzahl der Fahrzeuge im Netzwerk wieder. Innerhalb des Nachfragezeitraums T_Q kann eine vollständige Wiederherstellung normaler Verkehrsbe-

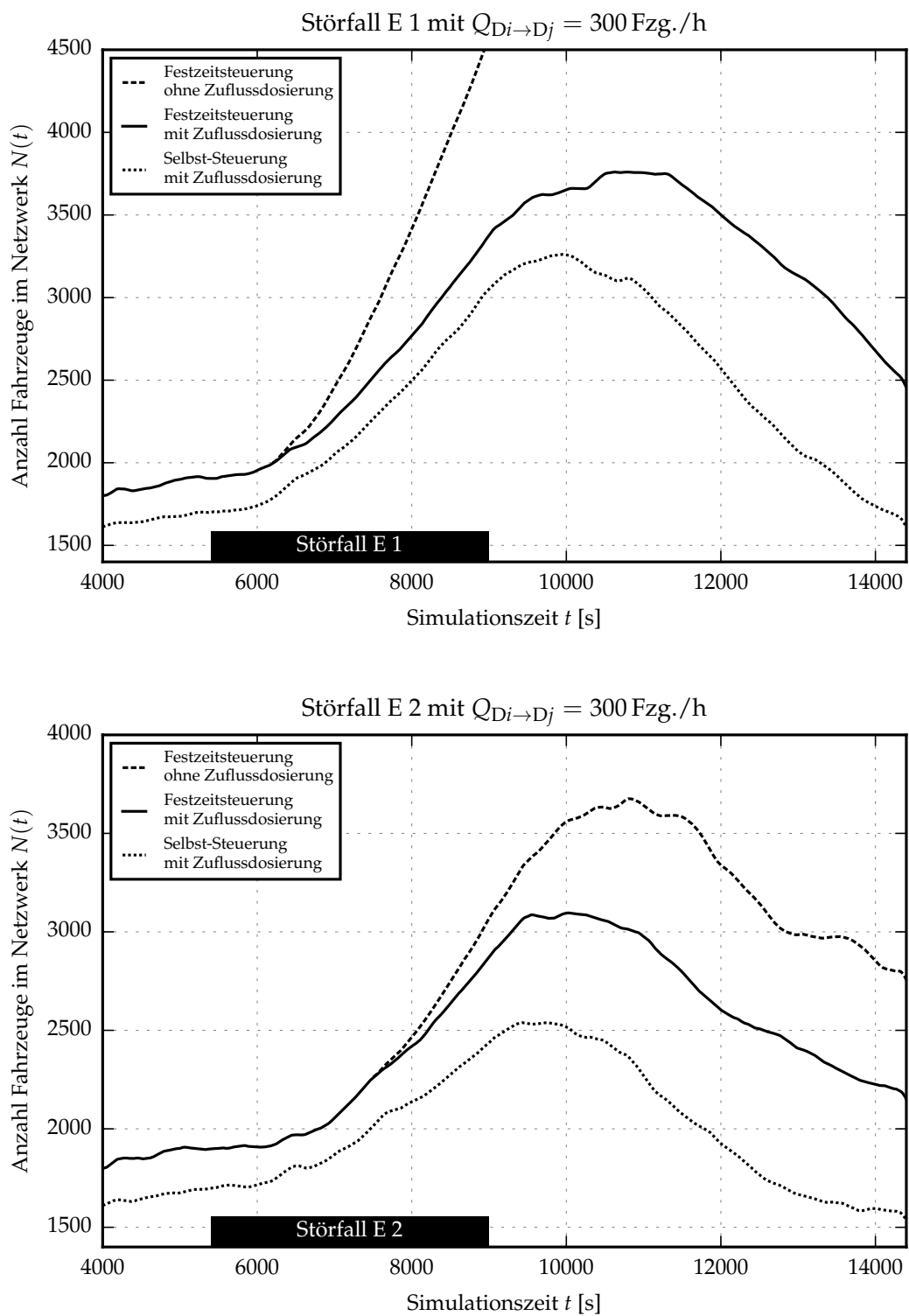


Abbildung 6.14: Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen der Störfallszenarien E 1 und E 2. Die Auswirkungen der Totalblockade eines Knotens im komplexen Netzwerk sind bedeutend höher als in den Störfallszenarien D. Auffällig ist, dass die Abnahme der zusätzlich akkumulierten Fahrzeuge im Netzwerk nach dem Störfall sehr viel Zeit in Anspruch nimmt. Auch die partielle Blockade wirkt sich negativ aus. Weil die Verkehrsströme stets fließen können, frieren sie auch im Netzwerk ohne Zuflussdosierung nicht ein.

Tabelle 6.5: Übersicht über die Anzahl $N(t_{\text{inc, end}} = 9\,000\text{ s})$ der Fahrzeuge im Netzwerk unmittelbar nach dem Ende des Störfalls und die Dauer der Wiederherstellung normaler Verkehrsbedingungen (Fahrzeugakkumulation vor dem Störfall) im Netzwerk. Fälle, in denen die Wiederherstellung normaler Verkehrsbedingungen nicht mehr erreicht werden kann, sind mit „n. erfolgt“ (nicht erfolgt) gekennzeichnet. Die Zuflussdosierung wird mit ZD abgekürzt. Beachte, dass $N(t_{\text{inc, end}})$ i. Allg. *nicht* den maximalen Wert der Fahrzeugakkumulation widerspiegelt; insbesondere im konventionellen Netzwerk werden noch weitere Fahrzeuge akkumuliert.

Störfall	Anzahl d. Fahrzeuge $N(t = 9\,000)$ [Fzg.]			Dauer Wiederherstellung T_{rec} [s]		
	Festzeitsteuerung ohne ZD	Festzeitsteuerung mit ZD	Selbst-Steuerung mit ZD	Festzeitsteuerung ohne ZD	Festzeitsteuerung mit ZD	Selbst-Steuerung mit ZD
D 1	3 945	2 552	2 212	n. erfolgt	5 000	3 000
D 2	3 109	1 956	1 804	n. erfolgt	4 500	1 000
E 1	4 585	3 397	3 056	n. erfolgt	> 5 000	5 000
E 2	3 086	2 880	2 439	> 5 000	> 5 000	4 000
F	3 724	3 642	2 773	n. erfolgt	> 5 000	4 000

dingungen nicht erreicht werden. Im Gegensatz dazu steht die Selbst-Steuerung, die zwar über die Dauer des Störfalls ähnliche Zuwachsraten von Fahrzeugen im Netzwerk aufweist, jedoch *insgesamt* weniger Fahrzeuge akkumuliert. Aus diesem Grund ist die Wiederherstellung normaler Verkehrsbedingungen nach dem Ende des Störfalls schneller und noch im Zeitraum der Verkehrsnachfrage T_Q erreicht.

Störfallszenario E 2 – Partielle Blockade einer Kreuzung

Unter dem Einfluss einer partiellen Blockade eines Knotens (Szenario E 2) werden insgesamt weniger zusätzliche Fahrzeuge im Netzwerk akkumuliert, die Verläufe der Kurven der Fahrzeugakkumulationen sind demnach insgesamt günstiger. Eine partielle Blockade ist ein weniger schwerer Störfall, da stets zumindest ein Teil der betroffenen Verkehrsströme abfließen oder aufrücken kann. Die Zunahme der Fahrzeugakkumulation setzt im Vergleich zu Störfallszenario E 1 später ein. Ferner ist die Zuwachsrate im Netzwerk ohne Zuflussdosierung während des Störfalls signifikant reduziert (im Vergleich zu E 1) und alle Autofahrer können das Netzwerk verlassen. Unter Verwendung der Zuflussdosierung lassen sich für die Festzeit- und Selbst-Steuerung qualitativ dieselben Aussagen ableiten wie aus Störfallszenario E 1. Quantitativ besteht jedoch ein Unterschied in den Werten der Fahrzeugakkumulation. Eine Wiederherstellung der ursprünglichen Fahrzeugakkumulation kann nur mit der Selbst-Steuerung noch innerhalb des Nachfragezeitraums T_Q erreicht werden.

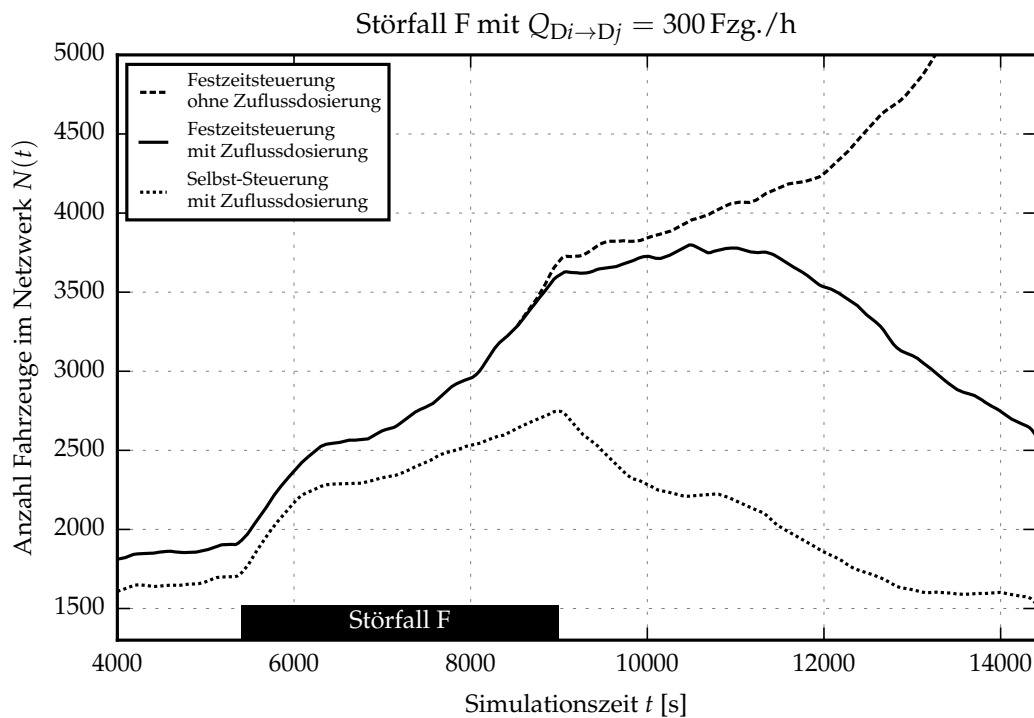


Abbildung 6.15: Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen im Störfallszenario F. Die Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen im Netzwerk mit und ohne Zuflussdosierung (Festzeitsteuerung) entwickeln sich anfänglich identisch. Ohne Einsatz der Zuflussdosierung ist jedoch in der Endphase des Störfalls eine Zunahme der Fahrzeuge im Netzwerk zu beobachten, die sich selbst nach dem Ende Störfalls verstärkt. Unter Einsatz der Zuflussdosierung bleibt die Fahrzeugakkumulation im Netzwerk nach einer initialen Zunahme konstant und eine Wiederherstellung normaler Verkehrsbedingungen ist möglich. Die Selbst-Steuerung mit Zuflussdosierung schneidet noch besser ab.

6.3.4 Störfallszenario F – Nachfrageerhöhung

Im Störfallszenario F wird eine spontane Nachfrageerhöhung im komplexen Netzwerk N2 betrachtet. Es bildet die typische Situation ab, dass eine hohe Verkehrsnachfrage zwischen den Randbezirken (D2, D3, D4, D5) und der Innenstadt (D1) besteht. Die zusätzliche Nachfrage ist gegeben durch

$$Q_{D_i \rightarrow D_1}^{\text{inc}} = 750 \text{ Fzg./h} \quad \text{für alle } i \in \{2, 3, 4, 5\}.$$

Die Nachfragespitze setzt nach der Anlaufzeit $T_a = 5400 \text{ s}$ ein und besteht für den Zeitraum einer Stunde. Die Zeitreihen der Fahrzeugakkumulationen sind in Abb. 6.15 dargestellt. Ferner lassen sich die Zahlenwerte in Tab. 6.5 finden.

Der Verlauf der Fahrzeugakkumulationen für die Festzeitsteuerung mit und ohne Zuflussdosierung ist anfänglich identisch; die Verkehrsnachfrage erfasst das Netzwerk unabhängig

vom Einsatz der Zuflussdosierung. Auch zum Zeitpunkt der Beendigung des Störfalls unterscheiden sich die Werte für die Fahrzeugakkumulation in beiden Netzwerken nur unwesentlich (3 642 zu 3 724 Fahrzeuge). Im weiteren Verlauf divergieren die beiden Kurven jedoch immer weiter, obwohl der Störfall bereits beendet ist. Dies ist ein charakteristisches Zeichen für die Reduktion der Abflusskapazitäten infolge einer Gridlock-Bildung. Unter gegebenem Zufluss der Grundnachfrage steigt die Fahrzeugakkumulation auch nach Ende des Störfalls weiter an. Offenkundig verstärkt sich diese Fahrzeugzunahme selbst.

Die Fahrzeugakkumulation im festzeitgesteuerten Netzwerk mit Zuflussdosierung nimmt hingegen einen günstigeren Verlauf: Nach dem Ende des Störfalls beträgt die Zuwachsrate der Fahrzeuge im Netzwerk schnell annähernd null. Die Abnahme der zusätzlichen Fahrzeuge setzt jedoch erst nach einer circa 40-minütigen Plateauphase nach dem Ende des Störfalls ein. Innerhalb des Zeitraums T_Q der Verkehrsnachfrage kann die ursprüngliche Fahrzeugakkumulation nicht mehr erreicht werden. Unter Verwendung der Selbst-Steuerung mit Zuflussdosierung zeichnet sich ein deutlich positiveres Bild: Verglichen zur Festzeitsteuerung ist die Zuwachsrate der Fahrzeuge im Netzwerk nach der initialen Zunahme der Fahrzeugakkumulation reduziert, sodass insgesamt weniger zusätzliche Fahrzeuge im Netzwerk akkumuliert werden. Nach dem Ende des Störfallszenarios ist direkt eine Abnahme der Fahrzeugakkumulation zu beobachten. Unterbrochen von einer kurzzeitigen Plateauphase zwischen circa 10 500 s und 11 000 s, sinkt die Fahrzeugakkumulation im Netzwerk unter Verwendung der Selbst-Steuerung mit Zuflussdosierung stetig; der ursprüngliche Wert vor dem Störfall kann noch innerhalb des Nachfragezeitraums erreicht werden. Der markante Knick im Verlauf der Fahrzeugakkumulation *genau* zum Zeitpunkt der Deaktivierung des Störfalls lässt sich mit der Bilanz der Fahrzeugzahlen erklären. Nach dem Ende des Störfalls sinkt die Nachfrage schlagartig, während zielnahe Verkehrsströme das Netzwerk verlassen. Offenkundig ist diese Bilanz negativ, sodass die Fahrzeugakkumulation im Netzwerk plötzlich sinkt. Dennoch verbleiben im Netzwerk Rückstaus, die sich langsamer auflösen, weshalb eine Plateauphase in der Zeitreihe zu erkennen ist. Für die Festzeitsteuerungen ist dieser Knick deutlich weniger markant.

6.4 Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse

Im Rahmen dieser Simulationsstudie konnte für alle betrachteten Störfallszenarien eine signifikante Verbesserung hinsichtlich der Fahrzeugakkumulation im Netzwerk unter dem Einsatz des selbstorganisierten Störfallmanagements beobachtet werden. Während dabei die verkehrsabhängige Selbststeuerung stets zu noch besseren Resultaten führte, war bereits die Anwendung gewöhnlicher Festzeitsteuerungen mit Zuflussdosierung für eine deutliche Reduzierung negativer Auswirkungen von Störfällen ausreichend. Im Folgenden werden die wesentlichen Erkenntnisse, die im Rahmen dieser Studie über den Einsatz des selbstorganisierten Störfallmanagements gewonnen werden konnten, zusammengefasst.

6.4.1 Hemmung lokaler Gridlocks und Erhalt von Abflusskapazitäten

Der Einsatz der Zuflussdosierung hat das Überlaufen von Fahrzeugschlangen in den Simulationen zuverlässig verhindert und auf diese Weise die Entstehung von lokalen Gridlocks gehemmt. Kreuzende Verkehrsströme, die nicht von der störfallbedingten Staubildung betroffen waren, konnten weiterhin die Kreuzungen passieren. Auf diese Weise sind die Abflusskapazitäten des Netzwerks größtenteils erhalten geblieben. Ohne Einsatz der Zuflussdosierung sind hingegen bereits kurz nach Eintreten der Störfälle Blockaden durch überlaufende Fahrzeugschlangen auf den Kreuzungen im Netzwerk entstanden, infolge derer die Abflusskapazitäten stark vermindert wurden. Diese Charakteristik wird durch die Zuwachsraten der Fahrzeuge im Netzwerk während des Störfalls reflektiert: In allen untersuchten Störfallszenarien waren die Zuwachsraten in den Netzwerken ohne Zuflussdosierung signifikant höher als unter der Anwendung des selbstorganisierten Störfallmanagements. Die Abflusskapazitäten in den Netzwerken ohne Zuflussdosierung wurden in den meisten der Störfallszenarien sogar soweit reduziert, dass Fahrzeuge, die von den Rückstaus erfasst wurden, auch nach Ende des Störfalls das Netzwerk nicht mehr verlassen konnten.

Einsatz der Zuflussdosierung ohne Routenwahl

Der alleinige Einsatz der Zuflussdosierung wurde in dieser Studie nicht untersucht. Lämmer u. a. [120] bzw. Richter [167] haben die Zuflussdosierung in einem einfachen bzw. komplexen gestörten Netzwerk angewendet und dabei *feste* Routen der Autofahrer angenommen, d. h. eine ereignisorientierte Routenwahl wurde vernachlässigt. Verglichen mit einem Netzwerk ohne Zuflussdosierung, konnte die Zunahme der Fahrzeuge sowohl im einfachen als auch im komplexen Netzwerk mit Zuflussdosierung deutlich reduziert werden. Diese Reduktion ist darauf zurückzuführen, dass die nicht betroffenen Verkehrsströme das Netzwerk auch unter Einwirkung des Störfalls stets verlassen konnte. Die Studien zeigen die Leistungsfähigkeit der Zuflussdosierung. Sie wird durch das zweite Wirkungsprinzip weiter verstärkt.

6.4.2 Ausnutzung verfügbarer Straßenkapazitäten im Störfall

Die Simulationsstudie hat gezeigt, dass das zweite Wirkungsprinzip des selbstorganisierten Störfallmanagements die Umverteilung betroffener Verkehrsströme auf noch verfügbare Straßenkapazitäten im Netzwerk fördert und beschleunigt. Zusätzlich zur Zuflussdosierung angewendet, hat dies zwei positive Implikationen für die Entwicklung der Fahrzeugakkumulation im gestörten Netzwerk: Die initiale Zunahme der Fahrzeugzahl setzt *später* ein als im Netzwerk ohne Zuflussdosierung. Diese Zeitverzögerung ist darauf zurückzuführen, dass unter Einsatz des zweiten Wirkungsprinzips noch verfügbare Straßenkapazitäten im Netzwerk im Störfall aktiv beworben und daraufhin zu einem gewissen Grad genutzt werden. Da jedoch nicht alle betroffenen Autofahrer eine Umfahrung wählen, breiten sich auch in diesem Fall Rückstaus im Netzwerk aus, sodass zusätzliche Fahrzeuge im Netzwerk akkumuliert werden.

Im Vergleich zum Netzwerk ohne Anwendung der Zuflussdosierung bleiben die Zuwachsraten der Fahrzeugakkumulationen dennoch geringer, da zumindest einige Autofahrer kontinuierlich die Staubildung umfahren. In den Zeitreihen der Fahrzeugakkumulation des Störfallszenarios B 2 (Abb. 6.6) ist der Effekt der Ausnutzung noch verfügbarer Straßenkapazitäten im Störfall besonders deutlich zu erkennen. Die Zunahme der Fahrzeugakkumulation im Netzwerk mit Zuflussdosierung setzt später und dann mit einer signifikant geringeren Zuwachsraten ein als im Netzwerk ohne Zuflussdosierung.

Selbst-Heilung im gestörten Netzwerk

Durch die Umfahrungen einzelner Autofahrer am stromabwärtigen Knoten des Straßenabschnitts können stromaufwärtig befindliche Autofahrer regelmäßig nachrücken. In dieser Art „füttert“ sich der Umverteilungsprozess im Störfall potenziell selbst, da auch wechselwillige Autofahrer nachrücken können. Auf das gesamte Netzwerk bezogen, kann er einen so großen Einfluss erreichen, dass die weitere Stauausbreitung gestoppt werden kann. Dies ist dann der Fall, wenn im gesamten Netzwerk mindestens so viele Autofahrer die störfallbedingte Staubildung umfahren wie an den stromaufwärtigen Enden der Rückstaus Fahrzeuge neu zur Staubildung beitragen. Nach einer initialen Zunahme der Fahrzeugakkumulation im Netzwerk bildet sich in diesem Fall ein Gleichgewicht zwischen Zu- und Abfluss im Netzwerk. Dieses Verhalten konnte für einige Störfallszenarien im gitterförmigen Netzwerk beobachtet werden. Nicht nur wechselwillige Autofahrer profitieren: Durch das regelmäßige Aufrücken im Stau ist es auch Autofahrern, die nicht umfahren wollen oder in die verstaute Richtung fahren müssen (z. B. Rettungskräfte, Buslinien), möglich noch während des Störfalls prinzipiell ihr Ziel zu erreichen.¹⁰

Der Prozess der Selbst-Heilung konnte nur im gitterförmigen, jedoch nicht im komplexen Netzwerk beobachtet werden. Die heterogene Struktur des komplexen Netzwerks mit deutlich längeren Straßenabschnitten und der oft nicht idealen Anordnung der Fahrstreifen auf Knotenzufahrten werden als maßgebende Faktoren ausgemacht. Ebenso lässt sich ein Einfluss des verwendeten Beobachtungsmodells für die Rotzeiten auf die Einstellung einer Selbstheilung im Netzwerk vermuten. Für Störfallszenario D 1 wurden ungeduldigere Autofahrer angenommen: Unter Annahme einer Referenzzeit $t_{\text{ref}} = 30\text{ s}$ und Festzeitsteuerungen mit Zuflussdosierung konnte jedoch ebenso *keine* Selbst-Heilung beobachtet werden (Zeitreihen sind nicht gezeigt). Dennoch war erkennbar, dass die maximale Fahrzeugakkumulation im Netzwerk geringer ausfiel. Ferner verlief die Wiederherstellung normaler Verkehrsbedingungen nach dem Ende des Störfalls geringfügig schneller. Unabhängig davon, ob eine Selbst-Heilung erreicht werden kann oder nicht, werden die Auswirkungen des Störfalls durch das selbstorga-

¹⁰ Autofahrer, die direkt stromaufwärtig von einer Totalblockade im Stau stehen, können ihr Ziel während des Störfalls nicht erreichen. Realistische Störfälle implizieren oft jedoch keine Totalblockaden; ein geringer Anteil betroffener Verkehrsströme kann beispielsweise durch die Nutzung der entgegengesetzten Richtungsfahrbahn abfließen. Dies kann in Verkehrsflusssimulationen jedoch nicht abgebildet werden.

nisierter Störfallmanagement im Vergleich zum Netzwerk ohne Zuflussdosierung teils signifikant reduziert.

6.4.3 Gitterförmiges vs. komplexes Netzwerk

Das selbstorganisierte Störfallmanagement wurde im Rahmen dieser Arbeit in einem gitterförmigen und komplexen Netzwerk untersucht. Zwischen den beiden Netzwerken bestehen mannigfache Unterschiede. Die Straßenabschnitte im komplexen Netzwerk sind größtenteils deutlich länger als im gitterförmigen Netzwerk. Auf längeren Straßenabschnitten bilden sich entsprechend längere Rückstaus, da nur der stromabwärtige Knoten Möglichkeiten zur Umfahrung bietet. Stromaufwärts befindliche Autofahrer können nur dann nachrücken und ggfs. später selbst wechseln, falls sich stromabwärtige Autofahrer am Knoten für eine Umfahrung entschieden haben. Typischerweise sind dies jedoch weniger Autofahrer als stromaufwärtig Fahrzeuge auf den Rückstau zufahren. Im gitterförmigen Netzwerk hingegen wird ein Straßenzug derselben Länge von mehreren Knoten unterbrochen, sodass sich mehr Umfahrungsmöglichkeiten bieten und der Verkehr sich besser auf noch verfügbare Straßenkapazitäten verteilen kann. Die langen Straßenabschnitte im komplexen Netzwerk wirken zweifach negativ auf das Verkehrsgeschehen: Während eines Störfalls (i) bilden sich lange Rückstaus, die sich nach dem Ende des Störfalls (ii) nur langsam wieder auflösen.

Zwischen den unterschiedlich komplexen Netzwerken ließen sich Unterschiede in Bezug auf die Wirkung des selbstorganisierten Störfallmanagements beobachten. Diese manifestierten sich vor allem in den folgenden Punkten:

- Die störfallbedingte, initiale Zunahme von Fahrzeugen setzte im komplexen Netzwerk wesentlich später ein als im gitterförmigen.
- Im komplexen Netzwerk war die Zuwachsrate der Fahrzeugakkumulationen über die Dauer des Störfalls stets signifikant verschieden von null. Im gitterförmigen Netzwerk konnte hingegen für einige Störfallszenarien ein Gleichgewicht zwischen Zu- und Abfluss nach der initialen Zunahme der Fahrzeugakkumulation beobachtet werden (Selbst-Heilung).
- Bezüglich der Fahrzeugakkumulation hielten die Auswirkungen untersuchter Störfälle im komplexen Netzwerk wesentlich länger an als im gitterförmigen Netzwerk. In einigen Szenarien nahm die Fahrzeugakkumulation im komplexen Netzwerk sogar weit nach Ende des Störfalls noch zu.
- Die Wiederherstellung ursprünglicher Werte der Fahrzeugakkumulationen nach dem Ende eines untersuchten Störfalls setzte im komplexen Netzwerk später ein und vollzog sich langsamer als im gitterförmigen Netzwerk. Die möglichen Abflussraten nach dem Ende eines Störfalls sind somit im Wesentlichen abhängig von der Geometrie des Netzwerks und der verwendeten Signalisierungsstrategie. Erwartungsgemäß hat die

Anzahl zusätzlich akkumulierter Fahrzeuge im Netzwerk aufgrund des Störfalls ebenso einen Einfluss.

Die Leistungsfähigkeit des selbstorganisierten Störfallmanagements wird im komplexen Netzwerk eingeschränkt, wenn ursprünglich nicht betroffene Autofahrer auf kombiniert genutzten Fahrstreifen aufgrund der Zuflussdosierung zurückgehalten werden. Obwohl prinzipiell Kapazitäten verfügbar sind, werden die eigentlich nicht betroffenen Verkehrsströme von den Auswirkungen des Störfalls erfasst. Ferner erleidet ein zurückgehaltener Autofahrer unnötige Zeitverluste. Zu Zwecken der Gridlock-Prävention ist das Zurückhalten dennoch vertretbar; gleichzeitig besteht Bedarf für sinnvolle Konzepte zur Lösung dieses Problems.

6.4.4 Festzeitsteuerung vs. Selbst-Steuerung

Die verwendete Signalisierungsstrategie in den untersuchten Netzwerken hatte einen bedeutenden Einfluss auf die Fahrzeugakkumulation im Netzwerk. Die Selbst-Steuerung von Lämmer [116] resultierte stets in geringeren Werten für die Anzahl der Fahrzeuge im Netzwerk. Verknüpft mit dem selbstorganisierten Störfallmanagement konnten die Auswirkungen der untersuchten Störfälle im Vergleich zu Festzeitsteuerungen nochmals deutlich reduziert werden. Ebenso war die Dauer der Wiederherstellung normaler Verkehrsbedingungen nach dem Ende des Störfalls stets kleiner als unter der Verwendung von Festzeitsteuerungen. Einen wesentlichen Beitrag dazu liefert die Tatsache, dass die Selbst-Steuerung im Gegensatz zur Festzeitsteuerung die Ausnutzung umliegender Straßenkapazitäten im Störfall *aktiv* fördert, indem die Grünzeiten, die für verstaute Straßensegmente nicht mehr benötigt werden, eben jenen freien Richtungen zugewiesen werden. Durch diese selbstorganisierte und lokale Umverteilung von Grünzeiten werden die verfügbaren Kapazitäten im Störfall bestmöglich ausgenutzt. Die Selbst-Steuerung ist prädestiniert für das selbstorganisierte Störfallmanagement. Grundsätzlich lassen sich jedoch auch andere verkehrabhängige Steuerungsverfahren mit dem selbstorganisierten Störfallmanagement verknüpfen.

Auch unter der Verwendung bereits bestehender Festzeitsteuerungen bewirkt der Einsatz des selbstorganisierten Störfallmanagements eine deutliche Verbesserung der störfallbedingten Fahrzeugakkumulation im Netzwerk. Interessanterweise ist diese Verbesserung dabei lediglich auf die eingeschobenen oder verlängerten Rotzeiten zurückzuführen, während die Grünzeiten am betroffenen Knoten nicht umverteilt werden. Somit stehen alternativen Richtungen keine erweiterten Kapazitäten zur Verfügung. Für das selbstorganisierte Störfallmanagement ist daher die Zuflussdosierung maßgeblich. Das zweite Wirkungsprinzip hat darüber hinaus einen zusätzlichen positiven Einfluss auf das Verkehrsgeschehen im gestörten Netzwerk.

6.5 Diskussion

Die im Rahmen dieser Arbeit angestellten Untersuchungen des selbstorganisierten Störfallmanagements haben den Charakter einer Machbarkeitsstudie, aus der sich qualitative Aussagen

ableiten lassen. Unter den getroffenen Annahmen für das ereignisorientierte Routenwahlmodell, den untersuchten Störfallszenarien und den herangezogenen Netzwerken konnte die Reduzierung der Auswirkungen von Störfällen mit dem selbstorganisierten Störfallmanagement nachgewiesen werden. Quantitative Aussagen lassen sich jedoch nicht verlässlich ableiten, da u. a.

- das Verhalten der Autofahrer unter der Beobachtung von lokalen Auswirkungen eines Störfalls auf einem Beobachtungsmodell basiert, das nicht alle Einflüsse der ereignisorientierten Routenwahl eines Autofahrers berücksichtigt,
- die Fahrzeuginteraktion bei übergelaufenen Kreuzungen simulationsbedingt nicht realistisch abgebildet werden konnte,
- die untersuchten Netzwerke artifiziell und begrenzt sind,
- andere Verkehrsmodi nicht berücksichtigt wurden und
- keine weiteren Gegenmaßnahmen (z. B. Informationsbereitstellung) zur Anwendung kamen.

Für qualitative Untersuchungen kann das verwendete Beobachtungsmodell für Rotzeiten im Routenwahlmodell als eine Näherung des Autofahrerverhaltens angesehen werden. Es ist insofern konsistent mit realen Entscheidungen, dass Autofahrer unter fortwährender Beobachtung eines roten Signalzustands zunehmend ungeduldiger werden. Die Entscheidung für einen Wechsel der Route setzt dabei einen gewissen Grad der Ungeduld voraus; außerdem wechseln nicht alle Autofahrer sofort auf eine alternative Route. Selbst für den Fall, dass das Beobachtungsmodell nicht sehr realistisch gewählt wurde, werden die Ergebnisse der Simulationsstudie nicht entkräftet: Die Leistungsfähigkeit des selbstorganisierten Störfallmanagements wird maßgeblich durch den Erhalt von Abflusskapazitäten durch die Zuflussdosierung bestimmt. Die mit dem zweiten Wirkungsprinzip geförderte Umverteilung betroffener Verkehrsströme hat einen zusätzlichen positiven Effekt und ist Voraussetzung für das Erreichen der Selbst-Heilung im Netzwerk. Schließlich kann davon ausgegangen werden, dass zumindest einige Autofahrer den Störfall umfahren werden. Die Anwendung des ereignisorientierten Routenwahlmodells war für diese Simulationsstudie entscheidend. Die Implementierung des Beobachtungsmodells für beobachtete Rotzeiten wäre mit klassischen Routenwahlmodellen oder Umlegungsverfahren nicht oder nur bedingt möglich gewesen.

Im Netzwerk ohne Zuflussdosierung (Festzeitsteuerungen) wurde dasselbe Beobachtungsmodell verwendet. Da die Rotzeiten ohne Zuflussdosierung im Störfall unverändert blieben und ferner kein Lernprozess der Autofahrer bezüglich historischer Rotzeiten stattgefunden hat, wirkte sich der Ereignisanteil des deterministischen Nutzens nicht so stark aus wie im Netzwerk mit Zuflussdosierung. Für die Realität ist zu erwarten, dass eine gewisse Anzahl an Autofahrern nur aufgrund beobachteter Staubildung die Route wechseln wollen wird ohne den Einfluss der Signalisierung. Dies wird im Beobachtungsmodell jedoch nicht berücksichtigt.

Deshalb ist davon auszugehen, dass der zeitliche Verlauf der Fahrzeugakkumulation im modellierten Netzwerk ohne Zuflussdosierung ungünstiger ist als er in der Realität zu erwarten wäre. Andererseits können wechselwillige Autofahrer im Netzwerk ohne Zuflussdosierung eine alternative Route am stromabwärtigen Knoten möglicherweise nicht realisieren, wenn sie durch Fahrzeugschlangen auf den Kreuzungen behindert werden.

Unter Betrachtung der Ergebnisse dieser Simulationsstudie lässt sich ein effektives Funktionieren des selbstorganisierten Störfallmanagements ableiten. Seine einfachen Prinzipien werden lokal genau dort angewendet, wo die Ausbreitung von Rückstaus die Bildung von Gridlocks provoziert. Verkehrsströme bleiben auch im gestörten Netzwerk in Bewegung, da Behinderungen der Verkehrsströme untereinander minimiert werden und die Verkehrsmenge soweit beschränkt wird, dass sie vom Netzwerk auch tatsächlich aufgenommen werden kann. Diese Anforderungen werden automatisch durch die einfachen Prinzipien des selbstorganisierten Störfallmanagements erfüllt. Der Aspekt der Selbstorganisation des vorgeschlagenen Störfallmanagements ist wie folgt zu verstehen: Der Eintritt des Störfalls und die Entwicklung der Rückstaus im Netzwerk lassen sich nicht voraussehen und planen. Die Anwendung der Maßnahmen des selbstorganisierten Störfallmanagements skaliert direkt mit dem Ausmaß der Staubildung im Netzwerk und stellt sich ohne Vorgabe eines Planers ein. Der Einsatz des selbstorganisierten Störfallmanagements ist somit bedarfsgerecht; ein aktives Vorgehen von Verkehrsleitzentralen oder ähnlichen Einrichtung ist nicht erforderlich, da sich das Störfallmanagement „von selbst“ einstellt. Die beiden Wirkungsprinzipien vereinen somit einen einfachen Ansatz, der im hochkomplexen System des Stadtverkehrs effektiv die Auswirkungen von Verkehrsstörfällen reduziert.

Aus der anhaltenden Verschärfung der Verkehrsprobleme in Städten, maßgeblich verursacht durch hohe bzw. steigende Fahrzeugzahlen in Industrie- bzw. Schwellenländern¹¹, resultiert eine hohe praktische Relevanz des selbstorganisierten Störfallmanagements. Die Verkehrsprobleme der Zukunft erfordern einfache und effektive Lösungsansätze, die auch praktisch anwendbar, mit geringen Kosten verbunden und auf viele Netzwerke übertragbar sind. Das selbstorganisierte Störfallmanagement trägt einen bedeutenden Anteil dazu bei. Ein praktischer Einsatz des selbstorganisierten Störfallmanagements wird weitere Grenzen und Einschränkungen für dessen Wirksamkeit aufzeigen, die in der Simulationsstudie nicht beobachtet oder abgebildet werden konnten. Über diese Machbarkeitsstudie hinausgehend wären die folgenden, weitergehenden Fragestellungen in der Zukunft zu betrachten:

- *Ereignisanteil des deterministischen Nutzens*

Die zusätzliche positive Auswirkung, die umfahrende Autofahrer im Störfall haben, ist in Hinblick auf ein zu schätzendes Beobachtungsmodell für Rotzeiten erneut zu bewerten. Dazu ist eine Erhebung und Auswertung von geeigneten Daten durchzuführen. Ferner könnten zusätzlich zur Rotzeit weitere, signifikante Faktoren für die ereignisorientierte

¹¹Siehe Kap. 1

Routenwahl in die Simulationen einbezogen werden (z. B. Informationsbereitstellung, Standzeit in der Warteschlange, Sicht der Autofahrer bis hinter die Kreuzung)

- *Kalibriertes Netzwerk*

Für quantitative Betrachtungen und in Vorbereitung eines praktischen Einsatzes des selbstorganisierten Störfallmanagements ist eine Kalibrierung eines modellierten, realistischen Netzwerks notwendig. Schätzungen der Verkehrsnachfrage und die Routenwahlanteile in den Simulationen sind dabei in Einklang mit gemessenen Flüssen an festen Querschnitten im Netzwerk zu bringen. Nicht minder wichtig ist die reale Abbildung der Lichtsignalanlagensteuerung; viele Simulationsumgebungen stellen mannigfache Möglichkeiten dazu bereit. Für den Betrieb der Zufussdosierung wäre zudem eine geeignete Methode für die Rückstaulängenschätzung zu implementieren. Idealerweise werden dabei Unsicherheiten in der Detektion von Fahrzeugen, falls relevant, berücksichtigt.

- *Steuerungsverfahren*

Zur Untersuchung des Wirkungsspektrums des selbstorganisierten Störfallmanagements könnten weitere, in der Realität gebräuchliche Steuerungsverfahren betrachtet werden. Dies ist insbesondere in Hinblick auf optimierende Verfahren zu sehen. Die verkehrsunabhängige Selbst-Steuerung von Lämmer [116] ist für das selbstorganisierte Störfallmanagement prädestiniert. Die Untersuchung von anderen optimierenden Verfahren, die insbesondere den Aspekt der Koordinierung betrachten, steht hingegen noch aus.

- *Weitere Maßnahmen aus der Verkehrstelematik*

Zusätzliche Maßnahmen aus dem Bereich der Verkehrstelematik könnten die Wirkung des selbstorganisierten Störfallmanagements weiter unterstützen. Geeignete Methoden wie Wechselwegweisung, allgemeine und individuelle Informations- und Leitsysteme und Navigationssysteme sind einzubeziehen und simulativ zu bewerten. Auch die Integration zukunftssträchtiger Ansätze aus dem Bereich der Car-to-X-Kommunikation (C2X)-Technologie ist denkbar.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung der Dissertation

Die vorliegende Dissertationsschrift widmete sich der Entwicklung eines ereignisorientierten Routenwahlmodells und eines selbstorganisierten Störfallmanagements. Mikroskopische Verkehrsflusssimulationen wurden zur Bewertung des vorgeschlagenen Störfallmanagements durchgeführt. Das Routenwahlverhalten der Autofahrer wurde mit dem ereignisorientierten Routenwahlmodell abgebildet. Die effektive Wirkung des selbstorganisierten Störfallmanagements konnte in einer umfassenden Machbarkeitsstudie in zwei unterschiedlich komplex modellierten Stadtstraßennetzwerken nachgewiesen werden. Entscheidend für die effektive Wirkung des selbstorganisierten Störfallmanagements ist die Aufrechterhaltung eines großen Teils der verfügbaren Abflusskapazitäten des Netzwerks für nicht betroffene Verkehrsströme. Ein zusätzlicher positiver Effekt auf das Verkehrsgeschehen im gestörten Netzwerk ergibt sich durch die Umverteilung betroffener Verkehrsströme auf umliegende, noch zur Verfügung stehende Straßenkapazitäten. Auf diese Weise werden signifikant weniger Fahrzeuge im gestörten Netzwerk akkumuliert.

Das vorgeschlagene Routenwahlmodell bildet die Entscheidungsprozesse der Autofahrer im ereignisreichen Stadtverkehr ab. Der Ausgangspunkt des Modells ist die diskrete Wahltheorie unter Annahme normalverteilter Zufallsnutzen. Die Entscheidungsprozesse individueller Autofahrer werden *direkt* simuliert: Für jede verfügbare Alternative eines Autofahrers wird der Nutzen über eine zu spezifizierende deterministische Nutzenfunktion explizit berechnet. In dieser Funktion können lokale Beobachtungen eines Autofahrers berücksichtigt werden. Die Zufallsnutzen werden als Zufallszahlen numerisch generiert und zu dem deterministischen Nutzen addiert. Der Autofahrer wählt anschließend die Alternative mit dem höchsten Nutzen. Die Entscheidungsprozesse werden bei Einfahrt ins Netzwerk erstmalig durchlaufen und anschließend *en route* unregelmäßig bis zur Ausfahrt des Autofahrers aus dem Netzwerk wiederholt. Folgende Merkmale zeichnen das ereignisorientierte Routenwahlmodell aus:

- *Realistisches Routenwahlverhalten in ereignisreichen Stadtstraßennetzen*

Spontan eintretende Verkehrsereignisse können die Autofahrer durch einen flexiblen Ereignisanteil im deterministischen Nutzen für jede Alternative separat berücksichtigen. Unabhängig davon impliziert die Spezifikation des Zufallsnutzens im Modell automatisch eine Korrelation überlappender Routen im Entscheidungsprozess des Autofahrers.

- *Effizienz der Alternativenwahl und Nutzenberechnung*

Das ereignisorientierte Routenwahlmodell ist in mehrfacher Hinsicht effizient: Die Alternativenmenge eines Autofahrers korrespondiert mit der Anzahl an möglichen Abbiegerichtungen am nächstfolgenden Knoten, an die sich jeweils ein schnellster Pfad anschließt, der noch vor Laufzeitbeginn auf der Grundlage eines gewichteten Graphs (z. B. Länge, Reisezeiten) berechnet wird. Auf diese Weise wird das Problem der Pfadsuche in städtischen Netzwerken effizient gelöst, während die Alternativenmenge dem Sachverhalt spontaner Ereignisse im Straßennetzwerk gerecht wird. Die Zufallsnutzen jeder Einheit aus Autofahrer und Kante werden numerisch mit einer effizienten Abbildung generiert und anschließend in jedem Entscheidungsprozess des Autofahrers herangezogen. Entscheidungsprozesse der Autofahrer werden nicht in jedem Zeitschritt wiederholt, sondern unregelmäßig, orts- oder ereignisgebunden durchlaufen.

- *Breites Anwendungsspektrum*

Das ereignisorientierte Routenwahlmodell ist für den Einsatz in mikroskopischen Verkehrsflusssimulationen konzipiert. Es verwendet eine generische Formulierung der deterministischen Nutzenfunktion, die an viele konkrete Anwendungsfälle angepasst werden kann. Insbesondere die Verkehrstelematik benötigt realistische Modelle für die Bewertung ihrer intelligenten Konzepte zur Optimierung des Verkehrsgeschehens in Städten. Das ereignisorientierte Routenwahlmodell verfolgt einen realistischen Ansatz und liefert dazu einen bedeutenden Beitrag. Neben der Bewertung existierender Konzepte kann das ereignisorientierte Routenwahlmodell auch zur Ableitung neuer Ansätze oder für Verkehrsprognosen verwendet werden. Ein primäres Anwendungsgebiet des ereignisorientierten Routenwahlmodells sind Verkehrsstörfälle.

Konzepte für das Verkehrsmanagement während eines Verkehrsstörfalls sind von hoher Bedeutung für den Erhalt der Leistungsfähigkeit eines Stadtstraßennetzwerks. In dieser Dissertation wurde ein effektives Störfallmanagement entwickelt, das auf zwei einfachen, lokal wirkenden Prinzipien beruht, die *selbstorganisiert* aktiv in das Verkehrsgeschehen eingreifen.

- *1. Wirkungsprinzip – Zuflussdosierung*

Die Zuflussdosierung reguliert lokal die Staulängen auf Straßenabschnitten: Nach Erreichen einer kritischen Staulänge wird der Zufluss in das betroffene Straßensegment durch verlängerte Rotzeiten dosiert. Das Ziel der Zuflussdosierung besteht darin, das Überlaufen von Rückstaus auf die stromaufwärtigen Kreuzungen, d. h. lokale Gridlocks, zu verhindern.

- *2. Wirkungsprinzip – Förderung der Umverteilung betroffener Verkehrsströme*

Es ist ein charakteristisches Merkmal eines Störfalls, dass trotz Staubildung noch Straßenkapazitäten im Netzwerk zur Verfügung stehen. Diese sollen im Rahmen des selbstorganisierten Störfallmanagements ausgenutzt werden. Dazu werden lokal jene Richtungen, die nicht von der Zuflussdosierung betroffen sind, weiterhin mit (erweiterten)

Grünzeiten bedient, um betroffene Autofahrer zur Umfahrung der Staubildung zu motivieren.

Der Aspekt der Selbstorganisation des vorgeschlagenen Störfallmanagements ist dabei im Sinne von „ohne Vorgabe eines Planers“ zu verstehen: Weder der Eintritt eines Störfalls noch die Entwicklung des resultierenden Verkehrsgeschehens im Straßennetzwerk lassen sich exakt voraussehen und planen. Das selbstorganisierte Störfallmanagement passt sich dem Ausmaß der Staubildung im Netzwerk bedarfsgerecht und flexibel an. Dazu muss weder bekannt sein, dass ein Störfall eingetreten ist (Detektion) noch müssen Verkehrsleitzentralen den Einsatz des selbstorganisierten Störfallmanagements in irgendeiner Form planen.

Die Prinzipien des selbstorganisierten Störfallmanagements wirken zunächst ausschließlich lokal. Sie können jedoch rekursiv auf ein größeres Gebiet des Netzwerks angewendet werden. Der Einsatz der lokalen Wirkungsprinzipien skaliert dann direkt mit dem Ausmaß der Staubildung im Netzwerk. Daraus ergeben sich zwei wichtige Implikationen: Verstaute Gebiete werden durch die lokal wirkenden Zuflussdosierungen von weiteren Zuflüssen entlastet, während die Ausnutzung noch freier Kapazitäten im Netzwerk durch (erweiterte) Grünzeiten gefördert wird. Die Verkehrsströme bleiben auch im Störfall mobil und es werden nicht mehr Fahrzeuge im Stadtstraßennetzwerk aufgenommen als Kapazitäten zur Verfügung stehen.

Die Simulationsstudie dieser Arbeit hat die Machbarkeit des selbstorganisierten Störfallmanagements nachgewiesen. Verglichen mit Steuerungsverfahren ohne Zuflussdosierung, wurden die Auswirkungen aller untersuchten Störfallszenarien unter Anwendung des selbstorganisierten Störfallmanagements sowohl mit Festzeitsteuerungen als auch mit der verkehrsabhängigen Selbst-Steuerung von Lämmer [117] teils signifikant reduziert.

7.2 Ausblick

Die generische Formulierung des ereignisorientierten Routenwahlmodells erlaubt ein breit gefächertes Anwendungsspektrum für den ereignisreichen Stadtverkehr. Es existieren viele Schnittstellen, an denen für Erweiterungen des Routenwahlmodells angesetzt werden kann. Auch das selbstorganisierte Störfallmanagement kann durch weitere Maßnahmen komplementiert werden, um dessen Wirksamkeit, insbesondere in Hinblick auf reale städtische Netzwerke, zu erhöhen. Eine Auswahl möglicher Anwendungen, Erweiterungen und zukünftiger Forschungsfragen wird im Folgenden skizziert.

7.2.1 Ereignisorientiertes Routenwahlmodell und Verkehrsumlegung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das ereignisorientierte Routenwahlmodell in Abwesenheit eines übergeordneten Verfahrens zur Suche eines Nutzergleichgewichts angewendet. Prinzipiell besteht jedoch die Möglichkeit, das ereignisorientierte Routenwahlmodell unter der Annahme eines Nutzergleichgewichts anzuwenden. Zwei Grundideen werden dazu anschließend skizzenhaft erläutert. Ob und inwieweit sich das ereignisorientierte Routenwahlmodell in ein

iteratives Verfahren zur Suche eines (stochastischen) Nutzergleichgewichts einbetten lässt, ist eine interessante Fragestellung, die direkt an diese Arbeit angeknüpft werden könnte. Ansatzpunkte könnten die Referenzen [206, 13, 126, 14] liefern.

One-Shot-Verfahren

Eine oft verwendete Methode für die Verkehrsumlegung in mikroskopischen Simulationen ist das sogenannte *One-Shot*-Verfahren [vgl. 54, S. 14 ff.]. Im Rahmen dieses Verfahrens kann, falls überhaupt, lediglich eine Näherung eines Nutzergleichgewichts berechnet werden. Der One-Shot-Ansatz ist somit von iterativen Verfahren zur Suche eines Nutzergleichgewichts abzugrenzen. Die Grundidee des Verfahrens ist es, die aktuellen Reisezeiten auf den Kanten des Netzwerks regelmäßig entsprechend vorherrschender Verkehrsbelastungen zu aktualisieren. Die Routenwahlentscheidungen einfahrender und im Netzwerk befindlicher Autofahrer basieren auf den dynamischen Reisezeiten im Netzwerk. Die Reisezeit T_ℓ auf einer Kante ℓ kann dabei durch eine CR-Funktion modelliert werden. Im Rahmen einer mikroskopischen Simulation können die Reisezeiten auf den Kanten innerhalb eines festen Zeitintervalls jedoch auch direkt gemessen werden. Die Reisezeiten für eine betrachtete Route ergibt sich direkt aus der Summe $\sum_{\mathcal{L}(r)} T_\ell$, wobei $\mathcal{L}(r)$ der Menge der konstituierenden Kanten von Route r ist. Das One-Shot-Verfahren lässt sich unproblematisch in das ereignisorientierte Routenwahlmodell eingliedern. Dazu wird ein Verfahren zur Aktualisierung der Reisezeiten im Netzwerk benötigt.

Im Gegensatz zum Einsatz des ereignisorientierten Routenwahlmodells in dieser Arbeit werden im Rahmen des One-Shot-Verfahrens Kenntnisse der Autofahrer über die mittleren Reisezeiten aller Kante im Netzwerk modelliert. Während dies im Kontext der Verkehrstelematik, insbesondere unter Einsatz von ATIS angemessen sein kann¹, muss jedoch grundsätzlich die Fragestellung aufgeworfen werden, ob die Berücksichtigung dynamischer Reisezeiten gegenüber der Annahme typischer, jedoch statischer, Reisezeiten für nicht sichtbare Kanten zu einer realistischeren Routenwahlmodellierung führt. Dies ist vor allem in Hinblick auf die Effizienz des ereignisorientierten Routenwahlmodells zu bewerten. Auch die Rolle der lokalen Beobachtungen der Autofahrer ist dabei geeignet zu definieren.

Nutzergleichgewicht als Startlösung

Unter der Annahme, dass sich die Verkehrsstromverteilung eines städtischen Netzwerks vor einem zu untersuchenden Verkehrsereignis (z. B. Störfall) in einem Nutzergleichgewicht befindet, könnte ein vorab berechnetes Nutzergleichgewichts als „Startlösung“ für die Routenwahl verwendet werden. Dazu könnte jeder einfahrende Autofahrer direkt eine zu wählende Route zugewiesen bekommen. Nach dem Eintreten des zu untersuchenden Verkehrsereignisses werden die Entscheidungsprozesse schließlich mit dem ereignisorientierten Routenwahlmodell simuliert. Da typische Verkehrsereignisse auf einer kurzen Zeitskala bestehen, ist ein erneutes Einstellen eines Nutzergleichgewichts während des Ereignisses jedoch nicht zu erwarten.

¹Auch dies wird von einigen Autoren in Frage gestellt [vgl. 101]

7.2.2 Anwendungen im aktiven Verkehrsmanagement

Die simulationsgestützte Untersuchung der Auswirkungen von Störfällen ist eine wichtige Anwendung des ereignisorientierten Routenwahlmodells. Sie ermöglicht es Verkehrsleitzentralen und ähnlichen Einrichtungen, das Ausmaß von Störfällen oder anderen nicht wiederkehrenden Ereignissen im Stadtverkehr abzuschätzen und geeignete Maßnahmen für ein optimales Verkehrsmanagement abzuleiten. Im Folgenden werden konkrete Anwendungsmöglichkeiten des ereignisorientierten Routenwahlmodells beschrieben.

Verkehrsprognosen

Eine wichtige Anwendung des ereignisorientierten Routenwahlmodells sind Kurzfristprognosen für den Verkehr in einem spezifischen Stadtgebiet innerhalb eines spezifischen Zeitraums. Dabei können schnelle und kurze Prognosen für einen bereits bestehenden realen Störfall im Netzwerk erstellt oder Verkehrsprognosen für einen weiter in der Zukunft liegenden Zeitraum mit einer geeigneten Störfallstatistik abgeleitet werden.

- *Kurzfristige Verkehrsprognosen für bereits bestehende, reale Verkehrsstörfälle*
Die schnelle und kurze Verkehrsprognose für einen bereits bestehenden realen Störfall kann das zu erwartende Ausmaß des Störfalls im Voraus aufdecken. In gewissen Grenzen erlaubt diese Kurzfristprognose die proaktive Ableitung und Anwendung von Gegenmaßnahmen zur Reduzierung der störfallbedingten Staubildung. Noch bevor die Auswirkungen eines Störfalls bestimmte Gebiete des Netzwerks überhaupt erreicht haben, können dann beispielsweise schon Informationen über die Existenz des Störfalls (gezielt) verbreitet, Umleitungen ausgewiesen oder andere Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen getroffen werden.
- *Verkehrsprognosen für einen weiter in der Zukunft liegenden Zeitraum*
Für die Verkehrsprognose eines spezifischen Zeitraums sind Annahmen über das Eintreten oder Ausbleiben typischer Störfälle zu treffen. Dies erfordert eine Störfallstatistik, die die Wahrscheinlichkeit des Eintretens von Störfällen an bestimmten Orten reflektiert und dabei für das Untersuchungsgebiet typische Störfälle an typischen Orten berücksichtigen sollte. In einem Simulationslauf, in dem Störfälle mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten, können schließlich relevante Qualitätsmerkmale des Verkehrs erfasst werden. Dazu zählen beispielsweise die Gesamtwartezeiten an Knotenpunkten, die mittlere Anzahl aller Stopps oder die Gesamtverspätung aller Autofahrer im Netzwerk. Werden viele Simulationsläufe mit unterschiedlichen Startzufallszahlen wiederholt, lassen sich anschließend statistische Aussagen über die erfassten Größen im Untersuchungsgebiet für das betrachtete Netzwerk und Zeitintervall machen.

Ableitung eines optimalen Verkehrsmanagements

Anstelle der Verwendung einer geeigneten Störfallstatistik können auch die Auswirkungen geplanter oder erwarteter Verkehrsstörungen (z. B. kurzfristige Baustellen, Demonstrationen oder andere Veranstaltungen) in Verkehrsprognosen simuliert werden. Obwohl vorher prinzipiell bekannt, wirken sich auch angekündigte Verkehrsstörungen in Staubbildung aus, da typischerweise nicht alle Autofahrer Kenntnis von der Ankündigung genommen haben. Die Verkehrsprognose kann schließlich hilfreich für die Ableitung eines konkreten und effektiven Verkehrsmanagements sein, das zum Erhalt der Mobilität des städtischen Verkehrs und zur Reduzierung weiterer negativer Konsequenzen beitragen kann. Die Untersuchungen können dabei vorab durchgeführt und ausgewertet werden. In einem weiteren Schritt kann das abgeleitete Verkehrsmanagement hinsichtlich seiner Wirksamkeit bewertet werden. Dies setzt jedoch voraus, dass die zu untersuchenden Maßnahmen geeignet in einer Simulationsumgebung abgebildet werden können.

Voraussichtliche Dauer eines Störfalls

Einen weiteren Aspekt, der eng mit der Verkehrsprognose verknüpft und hilfreich für viele Anwendungen der Verkehrstelematik ist, stellt die Schätzung der voraussichtlichen Dauer eines Störfalls und der verursachten Staubbildung dar. Sie ist sehr bedeutend für die Effizienz eines begleitenden Störfallmanagements und nimmt in der Literatur einen hohen Stellenwert ein [z. B. 191, 205, 148]. Simulationen eines realen Störfalls mit dem ereignisorientierten Routenwahlmodell können in einer schnellen Schätzung der voraussichtlichen Dauer des betreffenden Störfalls resultieren. Zusätzlich können die Wirkungen verschiedener Gegenmaßnahmen auf die zu erwartende Dauer quantifiziert und eine ideale Strategie zur Verkürzung der Störfalldauer ausgewählt werden.

7.2.3 Lernende Autofahrer und psychologische Aspekte

Ein wichtiger Aspekt der Routenwahlmodellierung, der im Rahmen dieser Arbeit jedoch vernachlässigt wurde, ist die Lernfähigkeit der Autofahrer durch Interaktionen mit dem Netzwerk. Neben der Bereitstellung von (Echtzeit-)Informationen können Autofahrer auch Kenntnisse aus der eigenen historischen Erfahrung ableiten. Ben-Elia und Shiftan [36] haben in einer empirischen Studie herausgefunden, dass die Bereitstellung von Informationen und das Lernverhalten von Autofahrern einen kombinierten Effekt auf die Routenwahl der Autofahrer haben. Informierte Autofahrer aus der Studie lernten schneller und trafen ihre Routenwahlentscheidungen abhängig von den Ausgängen vergangener Ereignisse.

Historische Erfahrungen bezüglich der Reisezeiten im Netzwerk spielen jedoch vorwiegend bei wiederkehrender Staubbildung oder bei häufig auftretenden Verkehrsstörungen eine Rolle. In Hinblick auf die Verwendung des ereignisorientierten Routenwahlmodells auf einer größeren Zeitskala (z. B. Beschreibung der tagtäglichen Entwicklung des Stadtverkehrs) könnte die

Integration eines Modells zur Beschreibung des Lernverhaltens von Autofahrern einen weiteren Beitrag zur realistischen Modellierung des Routenwahlverhaltens in Stadtstraßennetzen liefern. Ansatzpunkte könnten bereits bestehende Arbeiten liefern, siehe beispielsweise Referenzen [39, 38]. Einen weiteren Ansatz könnten Multi-Agenten-Systemen gefunden werden, für die die Lernfähigkeit der Agenten, insbesondere im Verkehrskontext, ein wichtiger Aspekt ist [vgl. 190, 18].

Lokale und kurzfristige Erfahrungen durch Beobachtungen am Knotenpunkt

Bei unvorhergesehenen Verkehrereignissen korrespondieren die historischen Erfahrungen des Autofahrers nicht notwendigerweise mit dem tatsächlichen Verkehrszustand im Netzwerk. Vielmehr stellen sie Annahmen dar, die zusätzlich durch weitere (Echtzeit-)Informationen ergänzt werden können. Dieser Sachverhalt wird durch das ereignisorientierte Routenwahl bereits modelliert.

Zusätzlich könnte ein Lernprozess auf der kurzfristigen Zeitskala lokaler Beobachtungen modelliert werden. Dies würde sich beispielsweise ganz natürlich für das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Beobachtungsmodell für Rotzeiten ergeben. Dazu müsste die rotzeitbasierte Reisezeitschätzung für die aktuelle Kante und der betrachteten Route (integriert im deterministischen Nutzen) in einen historischen und aktuellen Anteil aufgespalten werden. Die Entwicklung eines geeigneten Ansatzes kann sich direkt an diese Arbeit anschließen. Dabei müssen jedoch die folgenden Konsistenzbedingungen erfüllt sein: Die historischen, lokalen Beobachtungserfahrungen eines Autofahrers dürfen sich ausschließlich auf den nächstfolgenden Knoten und dessen Abbiegerichtungen (Routenalternativen) beziehen und lediglich bei Sichtbarkeit des Signalgebers, also innerhalb des möglichen, kurzfristigen Beobachtungszeitraums, erlernt und herangezogen werden. Der Lernprozess des Autofahrers muss somit räumlich und zeitlich beschränkt sein. Mit jedem Durchgang des nächstfolgenden Knotens muss der Autofahrer die historischen Beobachtungserfahrungen dann auch schnell wieder vergessen.

Verkehrspsychologische Aspekte der ereignisorientierten Routenwahl

Das Rahmenwerk für das ereignisorientierte Routenwahlmodell ist die diskrete Wahltheorie. Diskrete Wahlmodelle sind vielfach verwendete Werkzeuge zur Abbildung von Entscheidungsproblemen unter Berücksichtigung unsicherer Wahrnehmungen der Charakteristika betrachteter Alternativen. Grundsätzlich ist jedoch auch die Anwendung alternativer Ansätze zur Entscheidungsmodellierung denkbar. So könnte beispielsweise die *Cumulative Prospect Theory* (CPT) [196] als Rahmenwerk des ereignisorientierten Routenwahlmodells dienen. Sie modelliert Entscheidungsprozesse in risikobehafteten Kontexten und ist durch folgende Merkmale charakterisiert:

- Entscheidungsträger bewerten die möglichen Ausgänge einer Entscheidung relativ zu einem persönlichen „Referenzpunkt“.

- Entscheidungsträger weisen unterschiedliche Risikoeinstellungen hinsichtlich Gewinnen und Verlusten auf.
- Seltene Ereignisse werden über- und gewöhnliche Ereignisse unterbewertet.

Ausgangspunkte für eine Formulierung könnte das bereits auf der Basis der Cumulative Prospect Theory (CPT) entwickelte Routenwahlmodell von Xu u. a. [211] sein. Zusätzlich hilfreich könnte ebenso eine Studie von Avineri und Bovy [8] sein, in der die wichtigsten Herausforderungen der Routenwahlmodellierung mit der CPT identifiziert wurden.

Psychologische Aspekte (Wahrnehmung der Rotzeiten und Staubildung) unter der Anwendung des selbstorganisierten Störfallmanagements wurden größtenteils vernachlässigt. Das verwendete Beobachtungsmodell für Rotzeiten wurde konsistent formuliert, stützte sich jedoch nicht auf relevante Daten. Im Rahmen einer zukünftigen quantitativen Analyse des selbstorganisierten Störfallmanagements sollten psychologische Aspekte hinsichtlich der Signalisierung und, falls anwendbar, der Informationsbereitstellung berücksichtigt werden. Eine große Hilfestellung könnte eine Zusammenfassung humanpsychologischer Aspekte der Verkehrstelematik von Barfield und Dingus [16] sein.

7.2.4 Erweiterungen des selbstorganisierten Störfallmanagements

Eine sich direkt an diese Dissertation anschließende Fragestellung behandelt die Ableitung und Entwicklung von Maßnahmen und Strategien zur Verstärkung der Wirkung des selbstorganisierten Störfallmanagements. Eine Auswahl an potenziellen Möglichkeiten wird im Folgenden zusammengefasst.

Bereitstellung (gezielter) Autofahrerinformationen und dynamische Routenführung

Unter der zusätzlichen Bereitstellung von Echtzeitinformationen kann die Förderung der Umverteilung betroffener Verkehrsströme im Störfall durch das vorgeschlagene Störfallmanagement weiter unterstützt werden. Autofahrer, die bereits von Rückstaus erfasst wurden, benötigen dazu *zielgerichtete* Informationen für eine Unterstützung des Routenwahlprozesses. Bezüglich der Art und Weise, wie zielgerichtete Informationen übermittelt werden können, kommen mehrere Möglichkeiten in Frage, die kurz gegenübergestellt werden.

- *Kooperative Systeme*

Unter der Verwendung bordeigener Systeme kann ein vom Störfall betroffener Autofahrer weitreichende Kenntnisse über den Verkehrszustand im Netzwerk erwerben. Moderne Navigationssysteme, die heutzutage recht verbreitet sind, können die Verkehrslage im Netzwerk schätzen und schließlich sogar eine dynamische Routenführung anbieten. Die Berücksichtigung lokaler Informationen (z. B. Rotzeiten, Warteschlangenlänge) kann dabei beispielsweise für die Ableitung von Routenempfehlungen hilfreich sein. Für die Erfassung und Übermittlung dieser zusätzlichen Informationen ist die Entwicklung eines kooperativen Systems im Sinne eines C2X-Ansatzes denkbar. Beispielsweise könnten die

lokalen Steuerungsinstanzen der Zuflussdosierung die zu erwartenden Rotzeiten auf der Grundlage historischer (kurzfristig) Messungen für jede lokale Abbiegerichtung an die Autofahrer über geeignete Technologien übermitteln. Die Entwicklung anderer Ansätze sei hiermit angeregt.

- *Allgemeine Informations- und Leitsysteme*

Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass jedes Fahrzeug im Netzwerk über entsprechende bordeigene Informations- und Navigationssysteme verfügt. Informationssysteme können jedoch auch von Einrichtungen der Infrastruktur ausgehen (z. B. Wechselverkehrszeichen). Im Rahmen des selbstorganisierten Störfallmanagements ist die Erweiterung der Lichtsignalanlage durch zusätzliche dynamische Verkehrszeichen denkbar. Die Abgabe einer Routenempfehlung durch ein entsprechendes Lichtzeichen könnte ebenso wie die Anzeige einer zu erwartenden Wartedauer für jede Abbiegerichtung in Frage kommen. Die Entwicklung und Bewertung solcher allgemeinen Informationssysteme könnte sich direkt an diese Arbeit anschließen.

Die Informationsbereitstellung kann jedoch auch nachteilig sein, beispielsweise wenn alternative Routen zu einseitig oder stark mit weiteren Verkehren belastet werden [201, 210]. Um eine bestmögliche Wirkung der Informationsübermittlung zu erzielen, sollten diese negativen Effekte ausgeschlossen werden. Möglicherweise geeignete Ansätze können in den Referenzen [103, 124, 2, 12, 162] gefunden werden.

Umverteilung lokaler Grünzeiten

Die Grundidee des zweiten Wirkungsprinzips des selbstorganisierten Störfallmanagements besteht darin, die Grünzeiten an betroffenen Knotenpunkt so umzuverteilen, dass betroffene Autofahrer zum Umfahren der Störstelle motiviert werden. Der dadurch zusätzlich generierte Abbiegebedarf sollte auch entsprechend abgefertigt werden können. Während Festzeitsteuerungen diese Anforderung nur bedingt erfüllen können, hat die Simulationsstudie im letzten Kapitel gezeigt, dass die verkehrsabhängige Selbst-Steuerung von Lämmer [116] vor allem während des Störfalls besser abschneiden kann. Die Umverteilung lokaler Grünzeiten ist somit eine wichtige Maßnahme. Dabei müssen nicht zwingend vollverkehrsabhängige Steuerungen zum Einsatz kommen. Im Rahmen des selbstorganisierten Störfallmanagements könnte eine weitere Steuerungsinstantz der Lichtsignalanlage die Grünzeiten umverteilen, falls die Zuflussdosierung aktiv ist. Diese Steuerungsinstantz könnte als ganzheitlicher Ansatz konzipiert werden, der die Verkehrslage im Netzwerk, die Routendaten von Autofahrern (dynamische Routenführung) und möglicherweise die Existenz dynamisch eingerichteter Umleitungsrouten berücksichtigt. Ansätze zur Verwirklichung eines solchen Konzepts könnten die Referenzen [75, 104] bieten. Die Ausgestaltung und Bewertung eines konkreten Konzepts sei für die Zukunft angeregt.

Einrichtung von dynamischen Umleitungen

Das selbstorganisierte Störfallmanagement wirkt ausschließlich lokal und skaliert direkt mit dem Ausmaß der Staubildung. Dabei ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass nicht informierte Autofahrer, die lokal eine Umfahrung wählen und damit eine Verbesserung der Situation ersuchen, bald erneut im Stau stehen. Diese Problematik kann durch Informationsbereitstellung und dynamische Routenführung gemindert werden. Da es auf den Ausweichrouten jedoch auch schnell zu Staus kommen kann, die von Informations- oder Navigationssystemen nicht schnell genug erfasst werden können, ist die Wirkungsweise dieser Maßnahmen grundsätzlich begrenzt.

Die Einrichtung dynamischer Umleitungsrouten, die entlang noch nicht übersättigter (Haupt-)Straßenabschnitte führen, könnte diese Problematik mindern und eine *intelligente* Umverteilung der Verkehrsströme im Netzwerk weiter unterstützen. Dazu ist die aktuelle Verkehrslage im Netzwerk heranzuziehen und zusätzlich zu berücksichtigen, dass die Aufnahmekapazitäten von Umleitungsrouten prinzipiell begrenzt ist. Die Entwicklung übersättigter Netzelemente auf den Umleitungen sollte vermieden werden. Ein möglicherweise geeigneter Ansatz zur Lösung ist die Forschungsarbeit von Jiang u. a. [102]. Aufgrund der komplexen Dynamik des Stadtverkehrs kann Übersättigung auf den Umleitungen jedoch nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Falls die Umleitungsrouten dynamisch modifiziert oder gänzlich neue Umleitungen eingerichtet werden können, wirkt sich diese Problematik möglicherweise nicht sehr stark aus. In Anlehnung an das selbstorganisierte Störfallmanagement wäre zu validieren, ob der Versuch, die Einrichtungen der Umleitungen ebenso selbstorganisiert, d. h. ohne Vorgabe eines Planers, über lokale Verkehrszustanderfassungen zu realisieren, gelingen könnte.

Um die Verkehre auf den Umleitungen zu bündeln, könnten an jeder betroffenen Kreuzung auf die Umleitung führende Abbiegerichtungen durch ein zusätzliches Lichtzeichen (dynamisch) gekennzeichnet werden. Entsprechende Abbiegekapazitäten müssten im Rahmen des zweiten Wirkungsprinzips des selbstorganisierten Störfallmanagements bereitgestellt werden.

Routenplanung für Rettungs- und Evakuierungsverkehre

Unvorhergesehene Ereignisse können Rettungs- oder Evakuierungsmaßnahmen erfordern, die unter Anwendung des selbstorganisierten Störfallmanagements automatisch implizit begünstigt werden. Die Zuflussdosierung gewährleistet einerseits die schnelle Erreichbarkeit einer Störstelle für Rettungsverkehre; andererseits ist der Erhalt von Abflusskapazitäten bedeutend für Evakuierungsverkehre. Zur Erhöhung der Effektivität dieser Verkehre kann eine besondere Routenplanung in das vorgeschlagene Störfallmanagement integriert werden. Das Ziel dieser Maßnahme muss darin bestehen, die Rettungs- und Evakuierungsverkehre zu priorisieren, während andere Verkehrsströme diskriminiert werden. Dies könnte durch den Einsatz der C2X-Technologie gelingen.

A Weiterführende Ergänzungen

Für ein binäres Routenwahlproblem lassen sich mit dem ereignisorientierten Routenwahlmodell Auswahlwahrscheinlichkeiten berechnen. Dazu ist eine Formulierung als binäres Probit-Modell notwendig, die in diesem Kapitel hergeleitet wird. Anschließend werden die analytischen Auswahlwahrscheinlichkeiten, die sich mit der binären Modellformulierung ergeben, mit den Wahlhäufigkeiten einer numerischen Anwendung des ereignisorientierten Routenwahlmodells auf ein Netzwerk mit zwei Routen verglichen. Im letzten Teil dieser weiterführenden Ergänzungen wird das generische Schema eines Verkehrsumlegungsverfahrens beschrieben.

A.1 Formulierung des ereignisorientierten Routenwahlmodells als binäres Probit-Modell

Im Folgenden wird das ereignisorientierte Routenwahlmodell als binäres Probit-Modell (s. Gl. (2.1.8)) formuliert. Der Einfluss des Längenparameters d und der Varianzdichte λ auf die Auswahlwahrscheinlichkeiten zweier Routen soll analytisch untersucht werden. Dazu wird das einfache Netzwerk aus Kap. 3 verwendet, (siehe Abb. 3.4). Die Existenz von Route 3 wird für die analytische Herleitung der Auswahlwahrscheinlichkeiten P_1 und P_2 der Routen 1 und 2 vernachlässigt.

Für die Formulierung des ereignisorientierten Routenwahlmodells als binäres Probit-Modell muss der Ausdruck für das Argument $x = (V_1 - V_2)/\sigma_\varepsilon$ der Standardnormalverteilung $\Phi(x)$ berechnet werden. Die deterministischen Nutzen V_r für beide Routen $r = 1, 2$ seien gegeben durch

$$V_1 = -\frac{L_1}{v} \quad \text{und} \quad V_2 = -\frac{L_2}{v} = \frac{dL_1}{v} = -dV_1, \quad (\text{A.1.1})$$

mit $v = 15 \text{ m/s}$. Zur Vereinfachung wird im Folgenden $L_1 = L$ gesetzt. Folglich ergibt sich für die deterministische Nutzendifferenz beider Routen

$$\Delta V = V_1 - V_2 = -\frac{L}{v} + d\frac{L}{v} = \frac{L}{v} \cdot (d - 1). \quad (\text{A.1.2})$$

Zur Ermittlung der Standardabweichung σ_ε der Zufallsnutzendifferenz $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ wird deren Varianz $\sigma_\varepsilon^2 = \text{Var}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)$ betrachtet:

$$\begin{aligned} \sigma_\varepsilon^2 &= \text{Var}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) = \text{Var}(\varepsilon_1) + \text{Var}(\varepsilon_2) - 2 \text{Cov}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) \\ &= \lambda \cdot L + d\lambda \cdot L = \lambda L \cdot (d + 1). \end{aligned} \quad (\text{A.1.3})$$

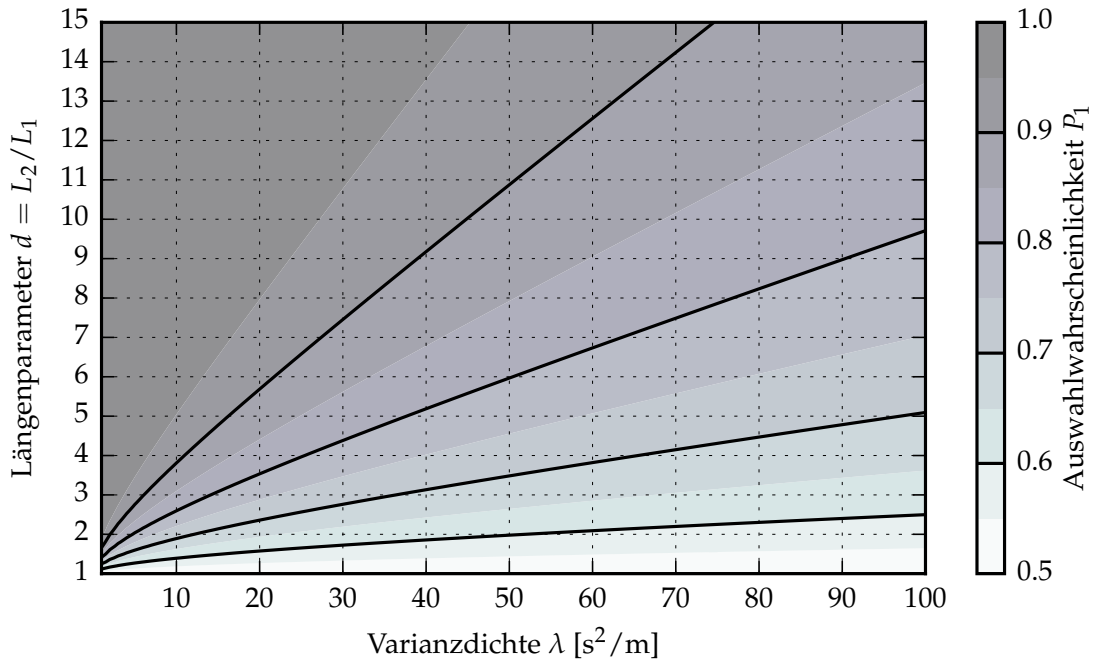


Abbildung A.1: Die Auswahlwahrscheinlichkeit P_1 für Route 1 des einfachen Netzwerks (Abb. 3.4) in Abhängigkeit des Längenparameters d und der Varianzdichte λ . Dabei wurde die Länge für Route 1 auf $L_1 = 1000$ m und die mittlere Reisegeschwindigkeit auf den Routen auf $v = 15$ m/s gesetzt. Die Auswahlwahrscheinlichkeit P_2 für Route 2 ergibt sich mit $1 - P_1$.

Da sich die beiden Routen nicht überlappen, gilt $\text{Cov}(\varepsilon_1, \varepsilon_2) = 0$ (keine Korrelation). Schließlich ergibt sich für das Argument $x = (V_1 - V_2)/\sigma_\varepsilon$ der tabellierten Standardnormalverteilung $\Phi(x)$ mit den Gln. (A.1.2) und (A.1.3), dass

$$\begin{aligned} x &= \frac{V_1 - V_2}{\sigma_\varepsilon} = \frac{L \cdot (d - 1)}{v \sqrt{\lambda L \cdot (1 + d)}} \\ &= \sqrt{\frac{L}{\lambda \cdot (d + 1)}} \cdot \left(\frac{d - 1}{v}\right). \end{aligned} \quad (\text{A.1.4})$$

Die Auswahlwahrscheinlichkeiten werden schließlich durch das Einsetzen von Gl. (A.1.4) in Gl. (2.1.8) unter Verwendung einer numerischen Implementierung der Standardnormalverteilung berechnet. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird $L = 1000$ m gesetzt. In Abb. A.1 ist eine Höhenliniendarstellung von P_1 in Abhängigkeit der Parameter λ und d gezeigt. Die Auswahlwahrscheinlichkeit P_2 ist nicht explizit angegeben, lässt sich mit $P_2 = 1 - P_1$ jedoch leicht ableiten.

Die Routenwahl wird bei fester Länge L und fester Geschwindigkeit v von den beiden untersuchten Parametern d und λ bestimmt. Je größer der Längenparameter d gewählt wird, desto höher ist die Auswahlwahrscheinlichkeit für Route 1 bei konstanter Varianzdichte λ .

Dies ist konsistent mit real zu erwartenden Routenaufteilungen, da eine längere Route unter normalen Verkehrsbedingungen mit mehr Reisekosten verbunden ist. Es ist außerdem zu erkennen, dass die Größe der Varianzdichte die Auswahlwahrscheinlichkeiten für Route 1 „aufweicht“: Auch für große Längenparameter d ergeben sich für hohe Varianzdichten noch deutlich von null verschiedene Auswahlwahrscheinlichkeiten für Route 2, obwohl diese mitunter deutlich länger ist. In jeder Interpretation des Zufallsnutzens bedeutet die Erhöhung der Varianz gleichzeitig eine Erhöhung der Unsicherheit bezüglich des wahren Nutzens, die in den Auswahlwahrscheinlichkeiten reflektiert wird. Je höher die Unsicherheit bezüglich des wahren Nutzens ist, desto größer wird die Auswahlwahrscheinlichkeit für die objektiv schlechtere Route 2. Für den vorgeschlagenen Wert der Varianzdichte von $\lambda = 10 \text{ min}^2/\text{km} = 36 \text{ s}^2/\text{m}$ ergibt sich beispielsweise, dass bei einer 8-mal längeren Route 2 ($d = 8$) circa 80% der Autofahrer die kürzere Route 1 wählen würden.¹ Im Grenzfall $\lambda \rightarrow \infty$ sind für beliebige endliche Parameter d , L und v die Auswahlwahrscheinlichkeiten $P_1 = P_2 \approx 50\%$ zu erwarten.

A.1.1 Vergleich der analytischen und numerischen Routenwahl

Die Wahlhäufigkeiten der Routen 1 und 2 werden mit deren Auswahlwahrscheinlichkeiten verglichen. Für die Wahlhäufigkeiten werden die Entscheidungen von 1 000 bzw. 10^6 Autofahrer mit dem ereignisorientierten Routenwahlmodell ermittelt. Die Auswahlwahrscheinlichkeiten werden mit dem binären Probit-Modell berechnet. Sowohl die Häufigkeiten als auch die Wahrscheinlichkeiten werden für die Werte des Längenparameters $d = 1, 5; 2; 5$ ermittelt und über einen Bereich $0 \leq \lambda \leq 100 \text{ s}^2/\text{m}$ aufgetragen. Die Länge von Route 1 wird, wie oben, auf $L = 1\,000 \text{ m}$ gesetzt. Die Verläufe der Auswahlwahrscheinlichkeiten und Wahlhäufigkeiten sind in Abb. A.2 dargestellt.

Beim qualitativen Vergleich fällt deutlich erkennbar auf, dass die Verläufe der Häufigkeiten und Auswahlwahrscheinlichkeiten für alle untersuchten Parameter sehr ähnlich sind. Die Häufigkeiten von 1 000 Autofahrern im Verlauf der untersuchten Varianzdichte schwanken stärker um die analytisch vorausgesagten Auswahlwahrscheinlichkeiten. Unter Betrachtung von 10^6 Autofahrern sind diese Schwankungen hingegen kaum bis gar nicht mehr sichtbar. Bezüglich der Variation des Längenparameters d und der Varianzdichte λ lassen sich die Aussagen aus der vorangegangenen Studie im letzten Abschnitt auf die Beobachtungen dieser Untersuchung übertragen. Dazu könnte beispielsweise $P_1 \approx 0,7$ für $d = 5$ und $\lambda = 100 \text{ s}^2/\text{m}$ aus Abb. A.1 mit der Häufigkeit/Auswahlwahrscheinlichkeit, die in dieser Studie für diese Parameter ermittelt wurden, verglichen werden. Die Werte sind nahezu identisch; dies lässt sich auch für andere Werte für d feststellen.

¹Bezüglich einer verhaltenshomogenen Autofahrergruppe lässt sich die Auswahlwahrscheinlichkeit einer Alternative als relativer Wahlanteil der Alternative interpretieren (siehe auch Abschnitt 2.1.1).

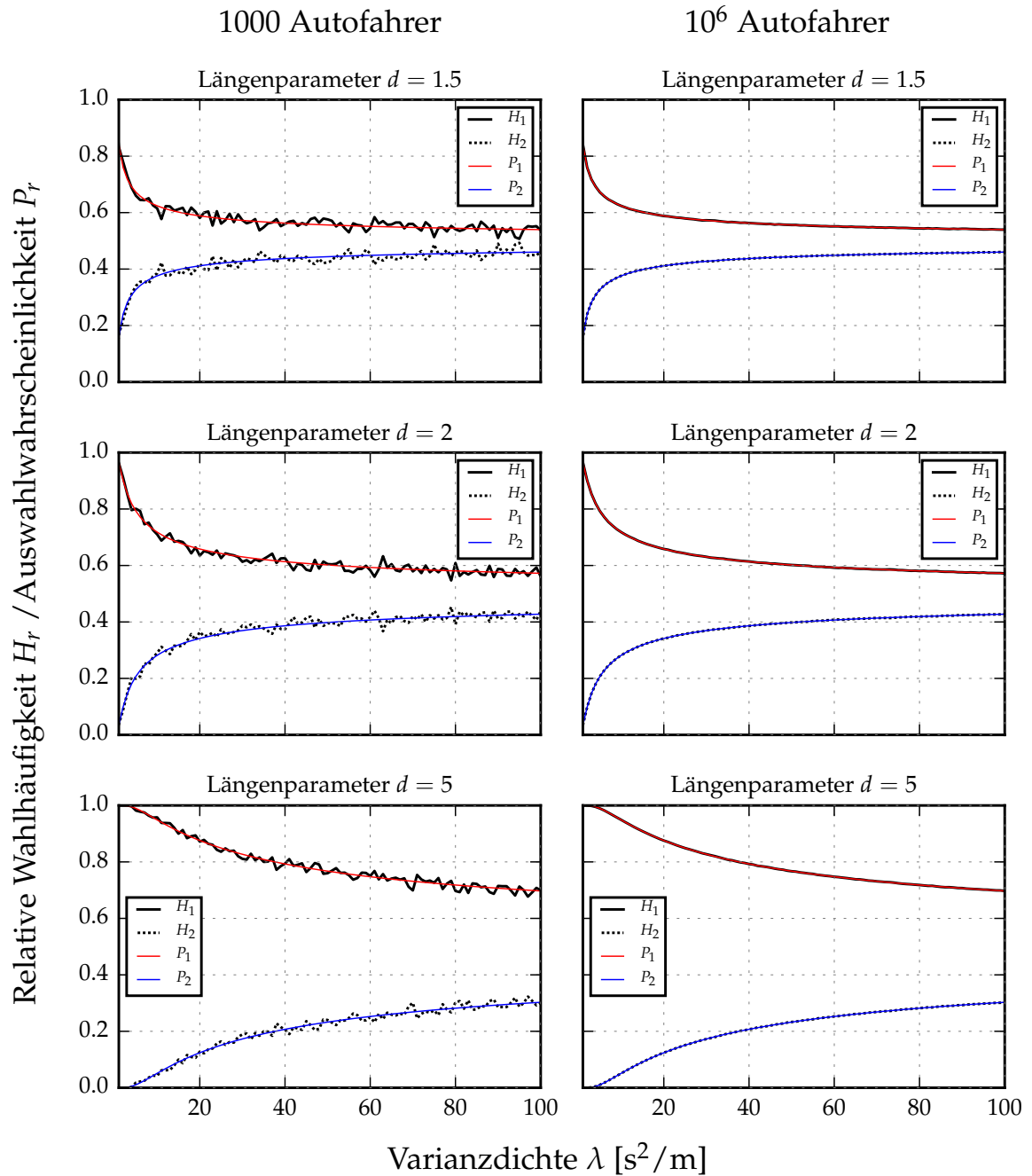


Abbildung A.2: Routenwahlhäufigkeiten und Auswahlwahrscheinlichkeiten im einfachen Netzwerk unter Vernachlässigung von Route 3. Die Häufigkeiten wurden für $d = 1,5; 2; 5$ und für 1000 bzw. 10^6 Autofahrer numerisch ermittelt. Unter Verwendung des binären Probit-Modells Gl. (2.1.8) mit Gl. (A.1.4) wurden die Auswahlwahrscheinlichkeiten mit der Standardnormalverteilung berechnet und aufgetragen.

A.2 Generisches Schema eines Umlegungsverfahrens

Ein generisches Verkehrsumlegungsverfahren besteht im Wesentlichen aus drei Schritten, die i. Allg. in mehreren Iterationen wiederholt werden, bis sich ein stabiles Nutzergleichgewicht oder ein Systemoptimum eingestellt hat. In beiden Fällen wird dabei das entsprechende Optimierungsproblem (Gl. (2.2.2) bzw. Gl. (2.2.3)) gelöst, wozu numerische Verfahren [z. B. 81] angewendet werden müssen. Unabhängig vom expliziten Verfahren werden hier die wesentlichen Teilschritte eines Umlegungsverfahrens dargestellt. Ausführliche Abhandlungen finden sich in der weiterführenden Literatur [z. B. 127, 48, 175].

- *Suche von Routen*

In diesem Schritt wird eine geeignete Routenmenge für die OD-Relation konstituiert. Da in der Regel nicht alle möglichen Routen zwischen einer Verkehrsquelle und einem -ziel im Entscheidungsprozess betrachtet werden können, müssen geeignete Techniken angewendet werden, die kleinere Routenteilmengen für das untersuchte Gebiet extrahieren.

- *Routenaufteilung – Aufteilung der Verkehrsströme auf die Routen*

In diesem Schritt wird ein Routenwahlmodell auf die konstituierte Routenmenge angewendet, wobei die Reisezeiten auf den Routen in diesem Schritt *temporär* fixiert werden. Die Anwendung resultiert in einer Aufteilung der Autofahrer auf die verfügbaren Routen der OD-Relation.

- *Aktualisierung der Reisezeiten auf den Routen*

Aus der realisierten Routenwahl der Autofahrer, d. h. der neuen Verkehrsstromaufteilung, ergeben sich mit CR-Funktionen neue Reisezeiten auf den Routen, die in der nächsten Iteration herangezogen werden.

- *Abbruchkriterium*

Befindet sich die Verkehrsstromverteilung (näherungsweise) im Zustand des Nutzergleichgewichts oder Systemoptimums, wird das Umlegungsverfahren beendet. Die zugehörigen Abbruchkriterien variieren bezüglich konkret verwendeter Verfahren.

In deterministischen Verfahren werden mit der All-or-Nothing-Methode die Suche von Routen und die Aufteilung typischerweise simultan ausgeführt: In jeder Iteration ergeben sich neue kürzeste Routen der OD-Relation aufgrund der Aktualisierung der Reisezeiten auf den Routen, auf die sich die Verkehrsströme verteilen. In stochastischen Verfahren ergibt die Routenaufteilung mit einem Routenwahlmodell eine temporäre Verkehrsstromverteilung, die zunächst nicht im Nutzergleichgewicht ist. Das unterliegende numerische Verfahren nähert sich der Lösung schrittweise an.

In der Literatur wird ferner zwischen *statischen* und *dynamischen* (z. B. [54, 154]) sowie zwischen *makroskopischen* und *mikroskopischen* (z. B. [48, 13, 175]) Verfahren der Verkehrsumlegung unterschieden. Diese werden hier jedoch nicht weiter verfolgt.

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Seite(n)
Diskrete Wahltheorie und Routenwahlmodellierung		
A_n	Alternativenmenge eines Entscheidungsträgers n in der diskreten Wahltheorie	12
U_{nr}	Nutzen, den Entscheidungsträger n für Alternative r wahrnimmt. Siehe Gl. (2.1.1) und (3.2.1).	13, 45
C_{nr}	Charakteristika (z. B. Zeit, Kosten), die ein Entscheidungsträger n für Alternative r beobachten kann (Gl. (3.2.1)).	13
V_{nr}	Deterministischer Nutzen, den Entscheidungsträger n für Alternative r wahrnimmt. Siehe Gl. (3.2.7) für die Formulierung des deterministischen Nutzens im ereignisorientierten Routenwahlmodells.	13, 50
ε_{nr}	Zufallsnutzen des Entscheidungsträgers n für Alternative r . Siehe Gl. (3.2.2) für die Spezifizierung des Zufallsnutzens im ereignisorientierten Routenwahlmodell.	13,45
P_{ε_n}	Wahrscheinlichkeitsverteilung des Zufallsnutzenvektor $\vec{\varepsilon}_n$. Die Wahl dieser Wahrscheinlichkeitsverteilung bestimmt den Typ des diskreten Wahlmodells.	13
P_{nr}	Auswahlwahrscheinlichkeit des Entscheidungsträgers n für Alternative r . Siehe Gl. (2.1.3) für eine allgemeine Herleitung.	14
$\Phi(x)$	Funktion der Standardnormalverteilung. Sie wird zur Herleitung des binären Probit-Modells Gl. (2.1.8) verwendet. Analytisch nur durch Tabellen bestimmbar; darüber hinaus gibt es numerische Implementierungen.	18
ij	OD-Relation von Quelle i nach Senke j .	22
R_{ij}	Die Routenmenge der OD-Relation ij . Für die Routenwahlmodellierung werden typischerweise nur Teilmengen der Menge aller möglichen Routen betrachtet.	22
$\mathcal{L}(r)$	Menge aller Kanten ℓ von Route r .	29

Symbol	Beschreibung	Seite(n)
f_ℓ	Verkehrsbelastung auf Kante ℓ . Sie ergibt sich aus der Routenaufteilung des Routenwahlmodells auf die Routen R_{ij} der OD-Relation.	22
T_ℓ	Reisezeit auf Kante ℓ . Sie ergibt sich über CR-Funktionen in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung f_ℓ auf der Kante.	22
T_r	Reisezeit auf Route r , die sich über $\sum_{\ell \in \mathcal{L}(r)} T_\ell$ ergibt.	22
\vec{f}	Verkehrstromverteilung im Netzwerk, d. h. der Vektor der Kantenbelastungen f_ℓ .	24
CF_{nr}	Gemeinsamkeitswert (Commonality-Factor, C-Wert) des CL-Modells. Siehe Gl. (2.4.1) für die Berechnungsvorschrift.	28
S_{nr}	Path-Size-Wert (PS-Wert) von Entscheidungsträger n für Alternative r des PSL-Modells. Die Berechnungsvorschrift findet sich in Gl. (2.4.3).	29
μ_ℓ	Nestkoeffizient für das LNL-Modell. Vgl. dazu die Gln. (2.4.6) und (3.4.2).	31, 58

Ereignisorientiertes Routenwahlmodell

\mathcal{R}_n^k	Routenmenge eines modellierten Autofahrers n bezogen auf Knotenpunkt k . Im Sinne einer Alternativenmenge der diskreten Wahltheorie zu verstehen.	44
ℓ_{cur}	Aktuelle Kante des modellierten Autofahrers n .	47
$\mathcal{L}_n^+(r)$	Menge aller Kanten ℓ von Route r , die Autofahrer n noch nicht vollständig überfahren hat. Diese Menge schließt die aktuelle Kante ℓ_{cur} ein.	46
$\mathcal{L}_n(r)$	Menge aller Kanten ℓ von Route r , die Autofahrer noch gar nicht befahren hat.	47
T_{nr}	Reisezeitschätzung des Autofahrers n für Route r . Siehe Gln. (3.2.7) und (6.1.2).	47, 50, 110
$T_{\ell_{\text{cur}}}^{nr}$	Reisezeitschätzung des Autofahrers n für Abbiegerichtung (Route) r auf der aktuellen Kante ℓ_{cur} . Wird als Ereignisanteil bezeichnet, weil Beobachtungen der modellierten Autofahrer in ihm berücksichtigt werden. Vgl. dazu die Gln. (3.2.5) und (6.1.1).	48, 109
$x_{\ell_{\text{cur}}}^{nr}$	Aktuelle Position des Autofahrers n auf der aktuellen Kante ℓ_{cur} in Abhängigkeit von der Abbiegerichtung (Route) r .	48
d_{que}^{nr}	Länge einer Fahrzeugschlange, die Autofahrer n für Abbiegerichtung (Route) r auf der aktuellen Kante ℓ_{cur} schätzt.	48

Symbol	Beschreibung	Seite(n)
S^{nr}	Signalzustand, den Autofahrer n für Abbiegerichtung (Route) r auf der aktuellen Kante ℓ_{cur} beobachtet. Die Existenz eines Signalgebers einer Lichtsignalanlage in der Sichtweite des Autofahrers sei hier vorausgesetzt.	48
T_{rem}^{nr}	Rest-Reisezeit, die Autofahrer n für den restlichen Weg von Route r bis zum Ziel schätzt. Siehe Gl. (3.2.6).	49
ε_{ℓ}^n	Zufallsnutzen, den Autofahrer n für Kante ℓ empfindet. Er wird durch Gl. (3.2.8) beschrieben. Der Zufallsnutzen einer Route ergibt sich über die Summe aller Kanten-Zufallsnutzen der Route.	50
τ	Modellparameter des ereignisorientierten Routenwahlmodells; gibt die mittlere Dauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Entscheidungsprozessen an. Siehe Gl. (3.2.4).	47, 110
V_0	Modellparameter des ereignisorientierten Routenwahlmodells: Globaler Zeitbonus, den ein Autofahrer seiner aktuell gewählten Route gegenüber allen anderen Alternativrouten gewährt. Die Werte dieses Zeitbonus können beispielsweise im Bereich zwischen 1-5 min liegen.	49, 110
λ	Modellparameter des ereignisorientierten Routenwahlmodells: Varianzdichte des Zufallsnutzens einer Kante; sie reflektiert die Dichte von Tankstellen, Bäckereien oder anderen POIs auf der Kante. Siehe Gl. (3.2.8).	50, 110
H_r	Routenwahlhäufigkeit einer Autofahrgesamtheit für Route r .	55
t_{ref}	Referenzzeit für das exponentielle Beobachtungsmodell für Rotzeiten. Vgl. dazu Gln. (3.4.3) und (6.1.2).	60, 110

Selbstorganisiertes Störfallmanagement

R_i	Vorgesehener Rückstaubereich auf einem Straßenabschnitt i . Wird der Rückstaubereich ausgeschöpft, greift die Zuflussdosierung in die Steuerung der Lichtsignalanlage ein.	89
$x_i(t)$	Aktuelle Länge des Rückstaus auf Straßenabschnitt i zum Zeitpunkt t .	90
$A_i(t)$	Kumulierte Anzahl der Fahrzeugankünfte auf Straßenabschnitt i bis zum Zeitpunkt t .	91
$D_i(t)$	Kumulierte Anzahl der Fahrzeuge, die bis zum Zeitpunkt t den Straßenabschnitt i verlassen haben.	91
l_{eff}	Effektive Länge eines Fahrzeugs.	91

Symbol	Beschreibung	Seite(n)
$a_i(h)$	Anzahl der Fahrzeuge, die innerhalb der nächsten h Sekunden in das Straßensegment i einfahren dürfen, ohne dass der Rückstaubereich R_i ausgeschöpft werden muss. Siehe Gl. (5.3.4).	92
$d_s(h)$	Maximale Anzahl der Fahrzeuge, die aus Verkehrsstrom s innerhalb des Zeithorizonts h von der Knotenzufahrt abfahren dürfen. Siehe Gl. (5.3.5).	93
Simulationstudie		
T_{red}^{nr}	Beobachtete Rotzeit eines Autofahrers n für Abbiegerichtung (Route) r . Sie findet Eingang in ein Beobachtungsmodell, das für den Ereignisanteil des deterministischen Nutzens verwendet wird (siehe Gl. (6.1.1)).	109
T	Dauer eines Simulationslaufs.	112
T_Q	Zeitraum der Verkehrsnachfrage im Netzwerk. Im gitterförmigen Netzwerk beträgt $T_Q = 3$ h, im komplexen Netzwerk ist $T_Q = 4$ h.	112
$Q_{Di \rightarrow Dj}$	Verkehrsnachfrage von Bezirk Di nach Bezirk Dj . Wird in Einheiten von Fzg./h angegeben.	112
$Q_{Di \rightarrow Dj}^{\text{inc}}$	<i>Zusätzliche</i> Verkehrsnachfrage von Bezirk Di nach Bezirk Dj zur Modellierung eines nachfrageseitigen Störfalls.	112
T_a	Anlaufzeit zu Beginn einer Simulation, nach der der jeweilig untersuchte Störfall beginnt. Im gitterförmigen Netzwerk beträgt $t_a = 1$ h, im komplexen Netzwerk ist $t_a = 1,5$ h.	112
T_{inc}	Dauer eines Störfalls. Für alle Störfallszenarien beträgt $T_{\text{inc}} = 1$ h.	112
$t_{\text{inc, end}}$	Zeitpunkt der Aufhebung des untersuchten Störfalls. Es ist $t_{\text{inc, end}} = t_a + T_{\text{inc}}$.	112
T_{rec}	Geschätzte Dauer zur Wiederherstellung der ursprünglichen Fahrzeugakkumulation im Netzwerk nach Aufhebung des Störfalls.	113
$N(t)$	Zeitreihe der Fahrzeugakkumulation im Netzwerk (geglättet). Sie ist die Messgröße, anhand derer das selbstorganisierte Störfallmanagement bewertet wird.	113

Abkürzungsverzeichnis

ITS	Intelligent Transportation Systems
ATIS	Advanced Traveller Information System
ATMS	Advanced Traffic Management System
MNL-Modell	Multinomiales Logit-Modell
IIA-Eigenschaft	Independence from Irrelevant Alternatives-Eigenschaft
MNP-Modell	Multinomiales Probit-Modell
GEV-Modelle	Generalized-Extreme-Value-Modelle
NL-Modell	Nested-Logit-Modell
OD-Relation	Origin-Destination-Relation
CR-Funktion	Capacity-Restraint-Funktion
POI	Point of Interest
CL-Modell	Commonality-Logit-Modell
C-Wert	Commonality Factor
PSL-Modell	Path-Size-Logit-Modell
PS-Wert	Path-Size-Wert
CNL-Modell	Cross-Nested-Logit-Modell
LNL-Modell	Link-Nested-Logit-Modell
PCL-Modell	Paired-Combinatorial-Logit-Modell
LB-JNG-Modell	Link-Based Joint Network GEV-Modellklasse
MNW-Modell	Multinomiales Weibit-Modell
PSW-Modell	Path-Size-Weibit-Modell
RL-Modell	Recursive-Logit-Modell

MAS	Multi-Agenten-System
TMC	Traffic Message Channel
StVO	Straßenverkehrsordnung
TRANSYT	TRAffic Network StudY Tool
SCOOT	Split Cycle Offset Optimisation Technique
SCATS	Sydney Coordinated Adaptive Traffic System
OPAC	Optimized Policies for Adaptive Control
PRODYN	PROgramming DYNamic
RHODES	Real-time Hierarchical Optimizing Distributed Effective System
MOTION	Method for the Optimization of Traffic Signals In On-line Controlled Networks
BALANCE	BALancing Adaptive Network Control mEthod
TUC	Traffic-responsive Urban Control
LWR-Modell	Lighthill-Whitham-Richards-Modell
C2X	Car-to-X-Kommunikation
C2C	Car-to-Car-Kommunikation
C2I	Car-to-Infrastructure-Kommunikation
CPT	Cumulative Prospect Theory

Literaturverzeichnis

- [1] ABDEL-ATY, M. A.: Modeling incident-related routing decisions by using a nested logit structure. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1645 (1998), Nr. 1, S. 103–110
- [2] ADACHER, L. ; OLIVA, G. ; PASCUCCI, F.: Decentralized route guidance architectures with user preferences in urban transportation networks. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 111 (2014), S. 1054–1062
- [3] AERDE, M. W. van ; HELLINGA, B. ; BAKER, M. ; RAKHA, H.: INTEGRATION: An overview of traffic simulation features. In: *Transportation Research Records Annual Meeting Washington, D.C*, 1996, S. 1–14
- [4] AL-DEEK, H. ; KANAFANI, A.: Modeling the benefits of advanced traveler information systems in corridors with incidents. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 1 (1993), Nr. 4, S. 303–324
- [5] ALBIOL, An. ; ALBIOL, Al. ; MOSSI, J. M.: Video-based traffic queue length estimation. In: *2011 IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*, IEEE, 2011, S. 1928–1932
- [6] AMMOSER, H. ; HOPPE, M.: Glossar Verkehrswesen und Verkehrswissenschaften: Definitionen und Erläuterungen zu Begriffen des Transport- und Nachrichtenwesens. In: *Diskussionsbeiträge aus dem Institut für Wirtschaft und Verkehr, Technische Universität Dresden* 2/2006 (2006)
- [7] ARENS, T. ; HETTLICH, F. ; KARPFINGER, C. ; KOCKELKORN, U. ; LICHTENEGGER, K. ; STACHEL, H.: *Mathematik*. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 2012
- [8] AVINERI, E. ; BOVY, P. H. L.: Identification of parameters for a prospect theory model for travel choice analysis. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2082 (2008), S. 141–147
- [9] AVINERI, E. ; PRASHKER, J. N.: Sensitivity to travel time variability: Travelers' learning perspective. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 13 (2005), Nr. 2, S. 157–183

- [10] AZEVEDO, J. A. ; SANTOS COSTA, M. O. ; SILVESTRE MADEIRA, J. J. E. R. ; VIEIRA MARTINS, E. Q.: An algorithm for the ranking of shortest paths. In: *European Journal of Operational Research* 69 (1993), Nr. 1, S. 97–106
- [11] BAN, X. ; HAO, P. ; SUN, Z.: Real time queue length estimation for signalized intersections using travel times from mobile sensors. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 19 (2011), Nr. 6, S. 1133–1156
- [12] BARBA, C. T. ; MATEOS, M. A. ; SOTO, P. R. ; MEZHER, A. M. ; IGARTUA, M. A.: Smart city for VANETs using warning messages, traffic statistics and intelligent traffic lights. In: *2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, IEEE, jun 2012, S. 902–907
- [13] BARCELÓ, J.: *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer-Verlag, 2011. – 449 S
- [14] BARCELÓ, J. ; CASAS, J.: Heuristic dynamic assignment based on microscopic traffic simulation. In: *Proceedings of the 9th Meeting of the Euro Working Group on Transportation* (2002), S. 1–16
- [15] BARCELÓ, J. ; CASAS, J.: Dynamic network simulation with AIMSUN. In: *Simulation Approaches in Transportation Analysis*. Springer-Verlag, 2005, S. 57–98
- [16] BARFIELD, W. ; DINGUS, T. A.: *Human factors in Intelligent Transportation Systems*. Psychology Press, 2014
- [17] BARRA, T. de la ; PEREZ, B. ; ANEZ, J.: Multidimensional path search and assignment. In: *PTRC Summer Annual Meeting, 21st, 1993, University of Manchester, United Kingdom* Bd. P 366, 1993, S. 307–320
- [18] BAZZAN, A. L. C.: Opportunities for multiagent systems and multiagent reinforcement learning in traffic control. In: *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 18 (2008), Nr. 3, S. 342–375
- [19] BAZZAN, A. L. C. ; KLÜGL, F.: Re-routing agents in an abstract traffic scenario. In: *Advances in Artificial Intelligence - SBIA 2008*. 2008, S. 63–72
- [20] BAZZAN, A. L. C. ; OLIVEIRA, D. de ; KLÜGL, F. ; NAGEL, K.: To adapt or not to adapt – consequences of adapting driver and traffic light agents. In: *Adaptive Agents and Multi-Agent Systems III: Adaptation and Multi-Agent-Learning*. 2008, S. 1–14
- [21] BEHRISCH, M. ; BIEKER, L. ; ERDMANN, J. ; KRAJZEWICZ, D.: Sumo - Simulation of urban mobility - An Overview. In: *SIMUL 2011 : The Third International Conference on Advances in System Simulation*, 2011, S. 55–60
- [22] BEKHOR, S. ; BEN-AKIVA, M. E. ; RAMMING, M. S.: Evaluation of choice set generation algorithms for route choice models. In: *Annals of Operations Research* 144 (2006), Nr. 1, S. 235–247

- [23] BEKHOR, S. ; PRASHKER, J. N.: Formulations of extended logit stochastic user equilibrium assignments. In: *14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 1999, S. 351–373
- [24] BEKHOR, S. ; PRASHKER, J. N.: Stochastic user equilibrium formulation for generalized nested logit model. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1752 (2001), S. 84–90
- [25] BEKHOR, S. ; PRATO, C.: Methodological transferability in route choice modeling. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 43 (2009), Nr. 4, S. 422–437
- [26] BEKHOR, S. ; REZNIKOVA, L. ; TOLEDO, T.: Application of cross-nested logit route choice model in stochastic user equilibrium traffic assignment. In: *Transportation Research Record* 2003 (2007), jan, Nr. 1, S. 41–49
- [27] BELL, M. G. H. ; IIDA, Y.: *Transportation Network Analysis*. John Wiley & Sons, 1997
- [28] BELLEI, G. ; GENTILE, G. ; PAPOLA, N.: A within-day dynamic traffic assignment model for urban road networks. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 39 (2005), Nr. 1, S. 1–29
- [29] BEN-AKIVA, M. E. ; BERGMAN, M. J. ; DALY, A. J. ; RAMASWAMY, R.: Modelling inter urban route choice behavior. In: *Papers presented during the Ninth International Symposium on Transportation and Traffic Theory held in Delft the Netherlands, 11-13 July 1984.*, 1984, S. 299–330
- [30] BEN-AKIVA, M. E. ; BIERLAIRE, M.: Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions. In: *Handbook of Transportation Science*. Springer-Verlag, 1999, S. 5–33
- [31] BEN-AKIVA, M. E. ; BIERLAIRE, M. ; KOUTSOPOULOS, H. N. ; MISHALANI, R.: DynaMIT: a simulation-based system for traffic prediction. In: *DACCORS Short Term Forecasting Workshop*, 1998
- [32] BEN-AKIVA, M. E. ; DE PALMA, A. ; ISAM, K.: Dynamic network models and driver information systems. In: *Transportation Research Part A: General* 25 (1991), Nr. 5, S. 251–266
- [33] BEN-AKIVA, M. E. ; GAO, S. ; WEI, Z. ; WEN, Y.: A dynamic traffic assignment model for highly congested urban networks. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 24 (2012), S. 62–82
- [34] BEN-AKIVA, M. E. ; KOUTSOPOULOS, H. N. ; TOLEDO, T. ; YANG, Q. I. ; CHOUDHURY, C. F. ; ANTONIOU, C. ; BALAKRISHNA, R.: Traffic simulation with MITSIMLab. In: *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer-Verlag, 2010, S. 233–268

- [35] BEN-AKIVA, M. E. ; LERMAN, S. R.: *Discrete Choice Analysis: Theory and Applications to Travel Demand*. Bd. 6. MIT Press, 1985. – 286 S
- [36] BEN-ELIA, E. ; SHIFTAN, Y.: Which road do I take? A learning-based model of route-choice behavior with real-time information. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 44 (2010), Nr. 4, S. 249–264
- [37] BODEN, M. ; TREIBER, M.: Nutzergleichgewicht oder Systemoptimum - Die systemoptimale Verkehrsumlegung in makroskopischen Verkehrsnetzen. In: *22. Verkehrswissenschaftlichen Tage, Technische Universität Dresden, 2009*, S. 1–15
- [38] BOGERS, E. I. A. ; BIERLAIRE, M. ; HOOGENDORN, S. P.: Modeling learning in route choice. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2014 (2007), S. 1–8
- [39] BOGERS, E. I. A. ; VITI, F. ; HOOGENDORN, S. P.: Joint modeling of advanced travel information service, habit, and learning impacts on route choice by laboratory simulator experiments. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1926 (2005), S. 189–197
- [40] BOLTZE, M. ; WOLFERMANN, A. ; SCHÄFER, P.: Leitfaden Verkehrstelematik – Hinweise zur Planung und Nutzung in Kommunen und Kreisen / Zentrum für integrierte Verkehrssysteme an der TU Darmstadt. 2005. – Forschungsbericht. – 188 S
- [41] BOVY, P. H. L.: On modelling route choice sets in transportation networks: A synthesis. In: *Transport Reviews* 29 (2009), Nr. 1, S. 43–68
- [42] BOVY, P. H. L. ; FIORENZO-CATALANO, S.: Stochastic route choice set generation: behavioral and probabilistic foundations. In: *Transportmetrica* 3 (2007), Nr. 3, S. 173–189
- [43] BRETHERTON, R. D. ; BODGER, M. ; BABER, N.: SCOOT - The future. In: *12th IEE International Conference on Road Transport Information and Control, 2004. RTIC 2004.*, 2004, S. 301–306
- [44] BURGHOUT, W.: *Hybrid microscopic-mesosopic traffic simulation*, Royal Institute of Technology Stockholm, Dissertation, 2004
- [45] BUSCH, F. ; KRUSE, G.: MOTION - Ein neues Verfahren für die städtische Lichtsignalsteuerung und seine Erprobung im Rahmen des EG-Programms ATT. In: *Heureka '93 - Optimierung in Verkehr und Transport*, 1993, S. 79–94
- [46] CAMERON, G. D. B. ; DUNCAN, G. I. D.: PARAMICS – Parallel microscopic simulation of road traffic. In: *The Journal of Supercomputing* 10 (1996), Nr. 1, S. 25–53

- [47] CASAS, J. ; FERRER, J. L. ; GARCIA, D. ; PERARNAU, J. ; TORDAY, A.: Traffic simulation with AIMSUN. In: *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer-Verlag, 2011, S. 173–232
- [48] CASCETTA, E.: *Transportation Systems Analysis: Models and Applications*. Springer-Verlag, 2012. – 760 S
- [49] CASCETTA, E. ; NUZZOLO, A. ; RUSSO, F. ; VITETTA, A.: A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems: Specification and some calibration results for interurban networks. In: *Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 1996, S. 697–711
- [50] CASTILLO, E. ; MENÉNDEZ, J. M. ; JIMÉNEZ, P. ; RIVAS, A.: Closed form expressions for choice probabilities in the Weibull case. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 42 (2008), Nr. 4, S. 373–380
- [51] CHEN, A. ; KASIKITWIWAT, P. ; JI, Z.: Solving the Overlapping Problem in Route Choice Using Paired Combinatorial Logit Model. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1857 (2003), S. 65–73
- [52] CHEN, B. ; CHENG, H. H.: A review of the applications of agent technology in traffic and transportation systems. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 11 (2010), Nr. 2, S. 485–497
- [53] CHENG, Y. ; QIN, X. ; JIN, J. ; RAN, B. ; ANDERSON, J.: Cycle-by-cycle queue length estimation for signalized intersections using sampled trajectory data. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2257 (2011), Nr. 1, S. 87–94
- [54] CHIU, Y. C. ; BOTTOM, J. ; MAHUT, M. ; PAZ, A. ; BALAKRISHNA, R. ; WALLER, T. ; HICKS, J.: Dynamic Traffic Assignment – A Primer. In: *Transportation Research Circular* E-C153 (2011)
- [55] CHORUS, C. G. ; MOLIN, E. J. E. ; VAN WEE, B.: Use and effects of advanced traveller information services (ATIS): A review of the literature. In: *Transport Reviews* 26 (2006), Nr. 2, S. 127–149
- [56] CHU, C.: A paired combinatorial logit model for travel demand analysis. In: *Transport Policy, Management & Technology Towards 2001: Selected Proceedings of The Fifth World Conference on Transport Research* Bd. 4, 1989, S. 295–309
- [57] CIPRIANI, E. ; FUSCO, G.: Combined signal setting design and traffic assignment problem. In: *European Journal of Operational Research* 155 (2004), Nr. 3, S. 569–583

- [58] COMERT, G.: Effect of stop line detection in queue length estimation at traffic signals from probe vehicles data. In: *European Journal of Operational Research* 226 (2013), Nr. 1, S. 67–76
- [59] COMERT, G. ; CETIN, M.: Queue length estimation from probe vehicle location and the impacts of sample size. In: *European Journal of Operational Research* 197 (2009), Nr. 1, S. 196–202
- [60] DAGANZO, C. F.: *Multinomial probit: The theory and its application to demand forecasting*. Academic Press New York, 1979
- [61] DAGANZO, C. F.: The cell transmission model: A dynamic representation of highway traffic consistent with the hydrodynamic theory. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 28 (1994), Nr. 4, S. 269–287
- [62] DAGANZO, C. F.: Queue spillovers in transportation networks with a route choice. In: *Transportation Science* 32 (1998), Nr. 1, S. 3–11
- [63] DAGANZO, C. F.: *Improving city mobility through gridlock control: an approach and some ideas*. 2005
- [64] DAGANZO, C. F.: Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 41 (2007), Nr. 1, S. 49–62
- [65] DIA, H. ; THOMAS, K.: Development and evaluation of arterial incident detection models using fusion of simulated probe vehicle and loop detector data. In: *Information Fusion* 12 (2011), Nr. 1, S. 20–27
- [66] DIAKAKI, C. ; DINOPOULOU, V. ; ABOUDOLAS, K. ; PAPAGEORGIU, M. ; BEN-SHABAT, E. ; SEIDER, E. ; LEIBOV, A.: Extensions and new applications of the traffic-responsive urban control strategy: Coordinated signal control for urban networks. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1856 (2003), Nr. 1, S. 202–211
- [67] DIAKAKI, C. ; PAPAGEORGIU, M. ; ABOUDOLAS, K.: A multivariable regulator approach to traffic-responsive wide signal control. In: *Control Engineering Practice* 10 (2002), Nr. 2, S. 183–195
- [68] DIAL, R. B.: A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration. In: *Transportation Research* 5 (1971), Nr. 2, S. 83–111
- [69] DIESTEL, R.: *Graphentheorie*. Springer-Verlag, 2006. – 344 S
- [70] DIJKSTRA, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs. In: *Numerische Mathematik* Bd. 1. Springer-Verlag, 1959, S. 269–271

- [71] DINOPOULOU, V. ; DIAKAKI, C. ; PAPAGEORGIOU, M.: Applications of the urban traffic control strategy TUC. In: *European Journal of Operational Research* 175 (2006), Nr. 3, S. 1652–1665
- [72] DION, F. ; YAGAR, S.: Real-time control of signalised networks - different approaches for different needs. In: *Eighth International Conference on Road Traffic Monitoring and Control* Bd. 1996, IEE, 1996, S. 56–60
- [73] DUDEK, C. L.: Better management of traffic incidents: Scope of the problem. In: *Transportation Research Board Special Report* (1975), Nr. 153, S. 116–122
- [74] DUDEK, C. L.: *Changeable message sign operation and messaging handbook*. 2004
- [75] EIJK, E. van: *Design of an urban traffic controller that incorporates route advice given by in-vehicle navigation systems*. Delft University of Technology, 2014
- [76] FELLENDORF, M. ; VORTISCH, P.: Microscopic traffic flow simulator VISSIM. In: *Fundamentals of Traffic Simulation* Bd. 145. 2010, S. 63–93
- [77] FLOYD, R. W.: Algorithm 97: Shortest Path. In: *Communications of the ACM* 5 (1962), Nr. 6, S. 345
- [78] FOLLMER, R. ; GRUSCHWITZ, D. ; JESKE, B. ; QUANDT, S. ; LENZ, B. ; NOBIS, C. ; KÖHLER, K. ; MEHLIN, M.: MiD 2008, Mobilität in Deutschland 2008 / infas, DLR. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2008. – Forschungsbericht
- [79] FORSCHUNGSGESELLSCHAFT FÜR STRASSEN- UND VERKEHRSWESEN: *Richtlinien für Lichtsignalanlagen (RiLSA)*. 2010
- [80] FOSGERAU, M. ; FREJINGER, E. ; KARLSTROM, A.: A link based network route choice model with unrestricted choice set. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 56 (2013), S. 70–80
- [81] FRANK, M. ; WOLFE, P.: An algorithm for quadratic programming. In: *Naval Research Logistics Quarterly* 3 (1956), Nr. 1-2, S. 95–110
- [82] FREJINGER, E. ; BIERLAIRE, M. ; BEN-AKIVA, M. E.: Sampling of alternatives for route choice modeling. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 43 (2009), Nr. 10, S. 984–994
- [83] FRIEDRICH, B.: *Ein verkehrsadaptives Verfahren zur Steuerung von Lichtsignalanlagen*, Technische Universität München, Dissertation, 1999. – 165 S
- [84] GARTNER, N. H.: OPAC: A demand-responsive strategy for traffic signal control. In: *Transportation Research Record* (1983), Nr. 906

- [85] GAWRON, C.: *Simulation-based traffic assignment: computing user equilibria in large street networks*, Universität Köln, Dissertation, 1999
- [86] GAZIS, D.: *Traffic Theory*. Kluwer Academic Publishers, 2002
- [87] GENTILE, G. ; MESCHINI, L. ; PAPOLA, N.: Spillback congestion in dynamic traffic assignment: A macroscopic flow model with time-varying bottlenecks. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 41 (2007), S. 1114–1138
- [88] GEROLIMINIS, N.: Queue spillovers in city street networks with signal-controlled intersections. In: *Transportation Research Board (TRB) 89th Annual Meeting, Washington, D. C.*, 2009, S. 10–34
- [89] GIER, J. de ; GARONI, T. M. ; ROJAS, O.: Traffic flow on realistic road networks with adaptive traffic lights. In: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2011 (2011), Nr. 04, S. P04008
- [90] GUIN, A.: *An incident detection algorithm based on a discrete propagation model of traffic flow*, Georgia Institute of Technology, Dissertation, 2004
- [91] HAWAS, Y. E.: A fuzzy-based system for incident detection in urban street networks. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 15 (2007), S. 69–95
- [92] HE, X. ; GUO, X. ; LIU, H. X.: A link-based day-to-day traffic assignment model. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 44 (2010), Nr. 4, S. 597–608
- [93] HELBING, D.: A section-based queueing-theoretical traffic model for congestion and travel time analysis in networks. In: *Journal of Physics A: Mathematical and General* 36 (2003), Nr. 46, S. L593–L598
- [94] HENRY, J. J. ; FARGES, J. L. ; TUFALL, J.: The PRODYN real time traffic algorithm. In: *Conference on Control in Transportation Systems*, 1984, S. 305–310
- [95] HERMAN, R. ; ARDEKANI, S.: Characterizing traffic conditions in urban areas. In: *Transportation Science* 18 (1984), Nr. 2, S. 101–140
- [96] HOHMANN, S. ; GIULIANI, S. ; WIETHOLT, T.: Verkehrsadaptive Netzsteuerungen – Untersuchung ihrer Einflussmöglichkeiten auf die Emissions- und Immissionsbelastung städtischer Straßennetze. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen Heft V 230* (2013), S. 1–78
- [97] HOUNSELL, N. B. ; McDONALD, M.: Urban network traffic control. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering* 215 (2001), Nr. 4, S. 325–335

- [98] HUNT, P. B. ; ROBERTSON, D. I. ; BRETHERTON, R. D. ; ROYLE, M. C.: The SCOOT on-line traffic signal optimisation technique. In: *Traffic Engineering and Control* 23 (1982), S. 190–192
- [99] HUNT, P. B. ; ROBERTSON, D. I. ; BRETHERTON, R. D. ; WINTON, R. I.: SCOOT - A traffic responsive method of coordinating signals. In: *Publication of: Transport and Road Research Laboratory* (1981)
- [100] JANSON, B. N.: Dynamic traffic assignment for urban road networks. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 25 (1991), S. 143–161
- [101] JAYAKRISHNAN, R. ; MAHMASSANI, H. S. ; HU, T.-Y.: An evaluation tool for advanced traffic information and management systems in urban networks. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 2 (1994), Nr. 3, S. 129–147
- [102] JIANG, B. ; XU, X. ; YANG, C. ; LI, R. ; TERANO, T.: Vehicles congestion control in transport networks using an adaptive weight model. In: *Internet of Vehicles – Technologies and Services*. Springer-Verlag, 2014 (1), S. 99–109
- [103] KAMMOUN, H. M. ; KALLEL, I. ; CASILLAS, J. ; ABRAHAM, A. ; ALIM, A. M.: Adapt-Traf: An adaptive multiagent road traffic management system based on hybrid ant-hierarchical fuzzy model. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 42 (2014), S. 147–167
- [104] KAMPEN, J. V.: *Route guidance and signal control based on the back-pressure algorithm*. Delft University of Technology, 2015
- [105] KATTAN, L. ; KHANDKER, M. ; NADEEM, S. ; ISLAM, T.: Modeling travelers' responses to incident information provided by variable message signs in Calgary, Canada. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2185 (2011), S. 71–80
- [106] KERNER, B. S.: Physics of traffic gridlock in a city. In: *Phys. Rev. E* 84 (2011), S. 45102
- [107] KERNER, B. S. ; DEMIR, C. ; HERRTWICH, R. G. ; KLENOV, S. L. ; REHBORN, H. ; ALEKSI, M. ; HAUG, A.: Traffic state detection with floating car data in road networks. In: *Proceedings of the 8th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Vienna, Austria 2005* (2005), S. 700–705
- [108] KHATTAK, A. J. ; SCHOFER, J. L. ; WANG, M.-H.: A simple time sequential procedure for predicting freeway incident duration. 1994. – Forschungsbericht. – 36 S
- [109] KITTHAMKESORN, S. ; CHEN, A.: A path-size weibit stochastic user equilibrium model. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 57 (2013), S. 378–397

- [110] KOO, R. ; YIM, Y.: Commuter response to traffic information on an incident. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1621 (1998), S. 36–42
- [111] KOPPELMAN, F. S. ; WEN, C. H.: The paired combinatorial logit model: Properties, estimation and application. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 34 (2000), Nr. 2, S. 75–89
- [112] KOSMATOPOULOS, E. ; PAPAGEORGIOU, M. ; BIELEFELDT, C. ; DINOPOULOU, V. ; MORRIS, R. ; MÜCK, J. ; RICHARDS, A. ; WEICHENMEIER, F.: International comparative field evaluation of a traffic-responsive signal control strategy in three cities. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 40 (2006), Nr. 5, S. 399–413
- [113] KRAJZEWICZ, D.: Traffic simulation with SUMO—simulation of urban mobility. In: *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer-Verlag, 2010, S. 269–293
- [114] KRUSE, G.: COSMOS - Results of the MOTION demonstrator for congestion and incident management strategies in Piraeus. In: *Trafikdage, Aalborg, Dänemark, 1999*, S. 1–10
- [115] LA-INCHUA, J. ; CHIVAPREECHA, S. ; THAJCHAYAPONG, S.: Fuzzy logic-based traffic incident detection system with discrete wavelet transform. In: *2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, IEEE, 2014, S. 1–6
- [116] LÄMMER, S.: *Reglerentwurf zur dezentralen Online-Steuerung von Lichtsignalanlagen in Straßennetzwerken*, Technische Universität Dresden, Dissertation, 2007
- [117] LÄMMER, S.: Die Selbst-Steuerung im Praxistest (eingereicht). In: *Straßenverkehrstechnik* (2015)
- [118] LÄMMER, S. ; HELBING, D.: Self-control of traffic lights and vehicle flows in urban road networks. In: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2008 (2008), Nr. 04, S. P04019
- [119] LÄMMER, S. ; KRIMMLING, J. ; HOPPE, A.: Selbst-Steuerung von Lichtsignalanlagen - Regelungstechnischer Ansatz und Simulation. In: *Straßenverkehrstechnik* 11 (2009), S. 714–721
- [120] LÄMMER, S. ; TREIBER, M. ; RAUSCH, M.: Inflow-regulating traffic light control to avoid queue-spillovers in urban road networks. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems 2013*, 2013, S. 23–34

- [121] LEFEBER, E. ; LÄMMER, S. ; ROODA, J. E.: *Optimal control of a deterministic multiclass queuing system by serving several queues simultaneously*. 2008
- [122] LEVINSON, D: The value of advanced traveler information systems for route choice. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 11 (2003), S. 75–87
- [123] LI, M.: *Robustness Analysis for Road Networks*, Delft University of Technology, Dissertation, 2008
- [124] LIANG, Z. ; WAKAHARA, Y.: Real-time urban traffic amount prediction models for dynamic route guidance systems. In: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2014 (2014), S. 85
- [125] LIU, H. X. ; WU, X. ; MA, W. ; HU, H.: Real-time queue length estimation for congested signalized intersections. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 17 (2009), Nr. 4, S. 412–427
- [126] LIU, H.X. ; BAN, J.X. ; MIRCHANDANI, P.: Dynamic equilibrium assignment with microscopic traffic simulation. In: *Proceedings. 2005 IEEE Intelligent Transportation Systems, 2005*. (2005), S. 676–681
- [127] LOHSE, D. ; SCHNABEL, W.: *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Band 2 - Verkehrsplanung*. Beuth Studium, 2011
- [128] LOWRIE, P. R.: The Sydney coordinated adaptive traffic system - principles, methodology, algorithms. In: *International Conference on Road Traffic Signalling, 1982, London, United Kingdom, 1982*, S. 67–70
- [129] LUCE, R.: *Individual Choice Behavior: A Theoretical Analysis*. 1959
- [130] MAHMASSANI, H. S. ; STEPHAN, D. G.: Experimental Investigation of Route and Departure Time Choice Dynamics of Urban Commuters. In: *Transportation Research Record* (1988), Nr. 1203
- [131] MAIER, G. ; WEISS, P.: *Modelle diskreter Entscheidungen - Theorie und Anwendung in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften*. Springer-Verlag Wien New York, 1990
- [132] MANDIR, E.: *Potential of traffic information to optimize route and departure time choice*, Universität Stuttgart, Dissertation, 2012
- [133] MARTINS, E. Q. V.: An algorithm for ranking paths that may contain cycles. In: *European Journal of Operational Research* 18 (1984), oct, Nr. 1, S. 123–130
- [134] MCFADDEN, D.: Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. In: *Frontiers in econometrics, Academic Press, New York, (1974)*, S. 105–142

- [135] MCFADDEN, D.: *Modelling the choice of residential location*. Institute of Transportation Studies, University of California, 1978
- [136] MCFADDEN, D.: Econometric models for probabilistic choice among products. In: *Journal of Business* 53 (1980), Nr. 3, S. S13–S29
- [137] MENDES, G. A. ; SILVA, L. R. da ; HERRMANN, H. J.: Traffic gridlock on complex networks. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 391 (2012), Nr. 1–2, S. 362–370
- [138] MICHALOPOULOS, P. G.: Vehicle detection video through image processing: the Autoscope system. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 40 (1991), Nr. 1, S. 21–29
- [139] MICHALOPOULOS, P. G. ; JACOBSON, R. D. ; ANDERSON, C. A. ; DEBRUYCKER, T. B.: Automatic incident detection through video image processing. In: *Traffic Engineering & Control* 34 (1993), S. 66–75
- [140] MIRCHANDANI, P. ; WANG, F. Y.: RHODES to Intelligent Transportation Systems. In: *IEEE Intelligent Systems* 20 (2005), Nr. 1, S. 10–15
- [141] MOORE, E. F.: The shortest path through a maze. In: *Proceedings of an International Symposium on the Theory of Switching, Cambridge, USA, 1957*, S. 285–292
- [142] MÜCK, J.: Schätzverfahren für den Verkehrszustand an Lichtsignalanlagen unter Verwendung halteliniennaher Detektoren. In: *Straßenverkehrstechnik* 46 (2002), Nr. 11, S. 613–618
- [143] NEUMANN, T.: *Rückstaulängenschätzung an Lichtsignalanlagen mit Floating-Car-Daten*, Technische Universität Braunschweig, Dissertation, 2011
- [144] NOLAND, R. B. ; POLAK, J. W.: Travel time variability: A review of theoretical and empirical issues. In: *Transport Reviews* 22 (2002), Nr. 1, S. 39–54
- [145] OLSSON, K.: *Method and means for network control of traffic*. 2002
- [146] OWENS, N. ; ARMSTRONG, A. ; SULLIVAN, P. ; MITCHELL, C. ; NEWTON, D. ; BREWSTER, R. ; TREGO, T.: Traffic incident management handbook. In: *Public Roads* 172 (2010), S. 116
- [147] OZBAY, K. M. A. ; KACHROO, P.: Incident management in intelligent transportation systems. (1999)
- [148] OZBAY, K. M. A. ; NOYAN, N.: Estimation of incident clearance times using Bayesian Networks approach. In: *Accident; analysis and prevention* 38 (2006), Nr. 3, S. 542–55

- [149] PALMA, A. de ; MARCHAL, F. ; NESTEROV, Y.: METROPOLIS: Modular system for dynamic traffic simulation. In: *Transportation Research Record* 1607 (1997), Nr. 1, S. 178–184
- [150] PALMA, A. de ; PICARD, N.: Route choice decision under travel time uncertainty. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 39 (2005), Nr. 4, S. 295–324
- [151] PAPAGEORGIOU, M. ; DIAKAKI, C. ; DINOPOULOU, V. ; KOTSIALOS, A. ; WANG, Y. W. Y.: Review of road traffic control strategies. In: *Proceedings of the IEEE* 91 (2003)
- [152] PAPOLA, A. ; MARZANO, V.: A network generalized extreme value model for route choice allowing implicit route enumeration. In: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 28 (2013), Nr. 8, S. 560–580
- [153] PARKANY, E. ; XIE, C.: A complete review of incident detection algorithms and their deployment : What works and what doesn't. 2005 (00-7). – Forschungsbericht
- [154] PEETA, S. ; ZILIASKOPOULOS, A. K.: Foundations of dynamic traffic assignment: The past, the present and the future. In: *Networks and Spatial Economics* (2001), S. 233–265
- [155] PLANUNG TRANSPORT VERKEHR AG: *Vissim 5.40 - Benutzerhandbuch*. 2011
- [156] PONTRJAGIN, L. S.: *Mathematical theory of optimal processes*. Gordon and Breach Science Publishers, 1987. – 360 S
- [157] PRASHKER, J. N. ; BEKHOR, S.: Investigation of stochastic network loading procedures. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1645 (1998), Nr. 1, S. 94–102
- [158] PRASHKER, J. N. ; BEKHOR, S.: Route choice models used in the stochastic user equilibrium problem: A review. In: *Transport Reviews* 24 (2004), Nr. 4, S. 437–463
- [159] PRATO, C.: Route choice modeling: past, present and future research directions. In: *Journal of Choice Modelling* 2 (2009), Nr. 1, S. 65–100
- [160] PRATO, C. ; BEKHOR, S.: Modeling route choice behavior: How relevant is the composition of choice set? In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2003 (2007), Nr. 2007, S. 64–73
- [161] PRESS, W. H. ; TEUKOLSKY, S. A. ; VETTERLING, W. T. ; FLANNERY, B. P.: *Numerical recipes: The art of scientific computing*. Bd. 29. 2007. – 1235 S
- [162] PROTHMANN, H. ; SCHMECK, H. ; TOMFORDE, S. ; LYDA, J. ; HAHNER, J. ; MULLER-SCHLOER, C. ; BRANKE, J.: Decentralised route guidance in organic traffic control. In: *2011 IEEE Fifth International Conference on Self-Adaptive and Self-Organizing Systems*, IEEE, 2011, S. 219–220

- [163] QIAN, Z. ; ZHANG, H. M.: A hybrid route choice model for dynamic traffic assignment. In: *Networks and Spatial Economics* 13 (2012), Nr. 2, S. 183–203
- [164] RAMMING, M. S.: *Network knowledge and route choice*, Massachusetts Institute of Technology, Dissertation, 2001
- [165] RAN, B. ; BOYCE, D. E.: *Modeling dynamic transportation networks*. Springer-Verlag, 1996. – 356 S
- [166] RAUSCH, M. ; LÄMMER, S. ; TREIBER, M.: Reducing the impact of traffic incidents using capacity-regulating traffic lights. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems 2013*, 2013, S. 89–98
- [167] RICHTER, C.: *Rückstauregulierung als erstes Wirkungsprinzip selbstheilender Straßennetzwerke*. Technische Universität Dresden, 2013. – 36 S
- [168] ROBERTSON, D. I.: TRANSYT: A Traffic Network Study Tool / Ministry of Transport. 1969. – Forschungsbericht. – 37 S
- [169] SAIFUZZAMAN, M. ; PALMA, A. de ; MOTAMEDI, K.: *Calibration of METROPOLIS for Ile-de-France*. 2012
- [170] SAMANT, A. ; ADELI, H.: Feature extraction for traffic incident detection using wavelet transform and linear discriminant analysis. In: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 15 (2000), Nr. 4, S. 241–250
- [171] SAMANT, A. ; ADELI, H.: Enhancing Neural Network Traffic Incident-Detection Algorithms Using Wavelets. In: *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 16 (2001), jul, Nr. 4, S. 239–245
- [172] SCHNABEL, W. ; LOHSE, D.: *Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung: Band 1 - Verkehrstechnik*. Beuth Studium, 2011
- [173] SCHRANK, D. L. ; EISELE, B. ; LOMAX, T. J.: *TTI's 2012 Urban Mobility Report*. Texas Transportation Institute, The Texas AM University System, 2012
- [174] SHARMA, A. ; BULLOCK, D. ; BONNESON, J.: Input-output and hybrid techniques for real-time prediction of delay and maximum queue length at signalized intersections. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 2035 (2007), S. 69–80
- [175] SHEFFI, Y.: *Urban transportation networks*. Prentice Hall International, 1985
- [176] SHEFFI, Y. ; POWELL, W. B.: An algorithm for the equilibrium assignment problem with random link times. In: *Networks* 12 (1982), Nr. 2, S. 191–207

- [177] SHEHATA, M. S. ; CAI, J. ; BADAWY, W. M. ; BURR, T. W. ; PERVEZ, M. S. ; JOHANNESSEN, R. J. ; RADMANESH, A.: Video-based automatic incident detection for smart roads: The outdoor environmental challenges regarding false alarms. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 9 (2008), Nr. 2, S. 349–360
- [178] SHEPHERD, S.: Traffic control in over-saturated conditions. In: *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary Journal* 14 (1994), jan, Nr. 1, S. 13–43
- [179] SHEU, J.-B.: Erratum: A stochastic modeling approach to real-time prediction of queue overflows. In: *Transportation Science* 37 (2003), Nr. 2, S. 230–252
- [180] SIKKA, N.: *Understanding travelers' route choice behavior under uncertainty*, University of Iowa, Dissertation, 2012. – 166 S
- [181] SMITH, M. J.: The existence, uniqueness and stability of traffic equilibria. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 13 (1979), Nr. 4, S. 295–304
- [182] SMITH, M. J.: Traffic control and route-choice; a simple example. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 13 (1979), Nr. 4, S. 289–294
- [183] SMITH, M. J.: Dynamics of route choice and signal control in capacitated networks. In: *Journal of Choice Modelling* 4 (2011), Nr. 3, S. 30–51
- [184] SMITH, M. J. ; MOUNCE, R.: A splitting rate model of traffic re-routeing and traffic control. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 45 (2011), Nr. 9, S. 1389–1409
- [185] SMITS, E. S. ; BLIEMER, M. ; PEL, A. ; AREM, B. van: On route choice models with closed-form probability expressions. In: *Annual Meeting of Transportation Research Board, At Washington DC, United States*, 2013, S. 1–22
- [186] SNELDER, M.: *Designing robust road networks*, Delft University of Technology, Dissertation, 2010
- [187] SYKES, P. ; BARCELÓ, J.: Traffic simulation with paramics. In: *Fundamentals of Traffic Simulation* Bd. 145. 2011, S. 131–171
- [188] TANG, S. ; GAO, H.: Traffic-incident detection-algorithm based on nonparametric regression. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 6 (2005), Nr. 1, S. 38–42
- [189] TATOMIR, B. ; ROTHKRANTZ, L. J. M. ; SUSON, A. C.: Travel time prediction for dynamic routing using Ant Based Control. In: *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC)* (2009), S. 1069–1078

- [190] TAVARES, A. R. ; BAZZAN, A. L. C.: Reinforcement learning for route choice in an abstract traffic scenario. In: *VI Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e aplicaçoes (WESAAC)*, 2012, S. 141–153
- [191] TAVASSOLI HOJATI, A. ; FERREIRA, L. ; WASHINGTON, S. ; CHARLES, P. ; SHOBEIRINE-JAD, A.: Modelling total duration of traffic incidents including incident detection and recovery time. In: *Accident; analysis and prevention* 71 (2014), S. 296–305
- [192] TRAIN, K.: *Discrete choice methods with simulation*. 2009. – 1–388 S
- [193] TREIBER, M.: *Lichtsignalgestütztes selbstorganisiertes Störfallmanagement auf Basis mesoskopischer nichtgleichgewichtiger Verkehrsmodelle - Antrag auf Sachbeihilfe an die Deutsche Forschungsgemeinschaft*. 2011
- [194] TREIBER, M. ; KESTING, A.: *Verkehrsdynamik und -simulation*. Springer-Verlag, 2012
- [195] TRIVEDI, M. M. ; MIKIC, I. ; KOGUT, G.: Distributed video networks for incident detection and management. In: *Intelligent Transportation Systems, 2000. Proceedings. 2000 IEEE*, 2000, S. 155–160
- [196] TVERSKY, A. ; KAHNEMAN, D.: Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty. In: *Journal of Risk and Uncertainty* 5 (1992), S. 297–323
- [197] UNITED STATES OF AMERICA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION: *Traffic Incident Management Handbook*. 2000
- [198] VITI, F. ; ZUYLEN, H. J. van: Probabilistic models for queues at fixed control signals. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 44 (2010), Nr. 1, S. 120–135
- [199] VOVSHA, P.: Application of cross-nested logit model to mode choice in Tel Aviv, Israel, Metropolitan area. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1607 (1997), Nr. 1, S. 6–15
- [200] VOVSHA, P. ; BEKHOR, S.: Link-nested logit model of route choice: Overcoming route overlapping problem. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1645 (1998), Nr. 1, S. 133–142
- [201] WAHLE, J. ; BAZZAN, A. L. C.: Decision dynamics in a traffic scenario. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 287 (2000), Nr. 3-4, S. 669–681
- [202] WARDROP, J. G.: Road paper. Some theoretical aspects of road traffic research. In: *ICE Proceedings: Engineering Divisions* 2 (1952), Nr. 1, S. 325–378
- [203] WARSHALL, S.: A theorem on boolean matrices. In: *Journal of the ACM* 9 (1962), jan, Nr. 1, S. 11–12

- [204] WEBSTER, F. V.: Traffic signal settings. In: *Road Research Lab Tech Papers UK* (1958)
- [205] WEI, C.-H. ; LEE, Y.: Sequential forecast of incident duration using Artificial Neural Network models. In: *Accident; analysis and prevention* 39 (2007), Nr. 5, S. 944–54
- [206] WEI, F. ; MA, S. ; JIA, N.: A day-to-day route choice model based on reinforcement learning. In: *Mathematical Problems in Engineering* 2014 (2014), S. 19
- [207] WEN, C. H. ; KOPPELMAN, F. S.: The generalized nested logit model. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 35 (2001), Nr. 7, S. 627–641
- [208] WIRTZ, J. J. ; SCHOFER, J. L. ; SCHULZ, D. F.: Using simulation to test traffic incident management strategies: The benefits of preplanning. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1923 (2005), Nr. 1, S. 82–90
- [209] WOOLDRIDGE, M.: *An Introduction to MultiAgent Systems*. John Wiley & Sons, 2002. – 343 S
- [210] WUNDERLICH, K.: A simulation-based assessment of route guidance benefits under variable network congestion conditions. In: *Mathematical and Computer Modelling* 27 (1998), S. 87–101
- [211] XU, H. ; ZHOU, J. ; XU, W.: A decision-making rule for modeling travelers' route choice behavior based on cumulative prospect theory. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 19 (2011), apr, Nr. 2, S. 218–228
- [212] YAI, T. ; IWAKURA, S. ; MORICHI, S.: Multinomial Probit with structured covariance for route choice behavior. In: *Transportation Research Part B: Methodological* 31 (1997), Nr. 3, S. 195–207
- [213] YANG, Q. I. ; KOUTSOPOULOS, H. N.: A Microscopic Traffic Simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 4 (1996), Nr. 3, S. 113–129
- [214] YANG, Q. I. ; KOUTSOPOULOS, H. N. ; BEN-AKIVA, M. E.: Simulation laboratory for evaluating dynamic traffic management systems. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1710 (2000), Nr. 1, S. 122–130
- [215] YING, J.: Highway traffic automatic detection system based on video and image processing. In: DU, Zhenyu (Hrsg.): *Intelligence Computation and Evolutionary Computation* Bd. 180. Springer-Verlag, 2013, S. 521–526
- [216] ZHENG, J.-F. ; GAO, Z.-Y. ; ZHAO, X.-M.: Modeling cascading failures in congested complex networks. In: *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 385 (2007), Nr. 2, S. 700–706

Stichwortverzeichnis

- Überlapp-Netzwerk, 55
- Übersättigung, 81

- Abbiegerichtung, 44
- Abflusskapazität, 89, 101
- Akkumulation, *siehe* Fahrzeugakkumulation
- All-or-Nothing-Methode, 22
- Alternativenmenge, 14
 - mehrdimensionale, 19
- alternativenspezifische Konstante, 49
- Ankunftsprognose, 83
- ATIS, 4, 74, 79
- ATMS, 4, 5, 79
- Auswahlwahrscheinlichkeit, 13, 15, 18, 58, 154

- BALANCE, 82
- Beobachtungen
 - lokale, 6, 47
- Beobachtungsmodell, 60, 108, 141
 - Lernprozess, 150
- Binäres Probit-Modell, 18, 154

- Charakteristika, 13
- Commonality Factor, 28
- Commonality-Logit-Modell, 28, 57
- Cross-Nested-Logit-Modell, 30
- Cumulative Prospect Theory, 150

- Dijkstra-Algorithmus, 26
- Diskrete Wahltheorie, 12
- Echtzeitinformationen, 39

- effektive Grünzeit, 111
- Effiziente Pfade, 27
- en route, 22
- Entscheidungsereignis, 47
- Entscheidungsprozess, 6, 13, 20, 57, 61
- Entscheidungspunkte, 47
- Entscheidungsträger, 12
- Entscheidungsträgergesamtheit, 15
- Ereignisanteil, 48, 60, 108
- Ereignisorientiertes Routenwahlmodell, 6, 108
 - Alternativenmenge, 44
 - Anforderungen, 43
 - Deterministische Nutzenfunktion, 47
 - Effizienz, 68
 - Entscheidungsprozess, 45
 - Ereignisanteil, 47
 - Knotendurchgang, 45
 - Modellparameter, 51
 - Routenüberlappung, 52
 - Routenrevision, 47
 - Zeitbonus, 49
 - Zufallsnutzen, 46, 50
- Evakuierungsverkehr, 153

- Fahrstreifen, 99
- Fahrzeugakkumulation, 112
- Festzeitsteuerung, 87, 110, 111, 140

- Gegenmaßnahmen, 4, 71, 73, 78, 81
- Gelbzeit, 110
- Generalized-Extreme-Value-Modelle, 18
- Generatorfunktion, 18

- Gesamtverkehrsleistung, 1
- Gesamtzeitverlust, 85
- Grünzeit, 86
- Grünzeiteaufteilung, 81
- Grünzeitenumverteilung, 152
- Gridlock, 3, 5, 35, 70, 100, 127, 136
 - lokaler, 3
- Gumbelverteilung, 15
- Hauptverkehrszeit, 1, 34
- homo oeconomicus, 12
- IIA-Eigenschaft, 16, 18
- Informationsbereitstellung, 4, 39, 81, 151
- Intelligent Transportation Systems, 3
- Kürzeste-Pfade-Algorithmen, 26
- Kantengewicht, 44
- Kapazitätssteuerung, 85
- Kooperative Systeme, 151
- Koordinierung, 84
- Korrelationskoeffizient, 53
- Lernprozess, 34, 149
- Lichtsignalanlage, 5, 79, 81
- Lichtzeichen, 81
- Link-Based Joint Network GEV-Modell, 32
- Link-Elimination-Methode, 26
- Link-Labeling-Ansatz, 26
- Link-Nested-Logit-Modell, 30, 57
- Link-Penalty-Methode, 26
- Logit-Modell, 57
- Markttransparenz, 39
- Messgrößen, 112
- Mobilität, 1
- Modellierer, 13
- MOTION, 82, 87
- Multi-Agenten-Paradigma, 66
- Multinomiales Logit-Modell, 15
- Multinomiales Probit-Modell, 6, 17
 - Routenwahlmodell, 29
- Navigationsanwendungen, 4
- Nest, 19
- Nested-Logit-Modell, 19
 - Routenwahlmodell, 30
- Nestkoeffizient, 20
- Netzwerk, 21
 - gitterförmig, 114, 138
 - komplex, 128, 138
- Nichtgleichgewicht, 39, 68
- Normalverteilung, 17
- Nutzen, 12, 13, 45
 - deterministischer, 13, 108
 - stochastischer, 13
- Nutzendifferenz, 15, 55, 61
- Nutzenfunktion, 13, 20
- Nutzenmaximierung, 46
- Nutzenniveau, 16
- Nutzergleichgewicht, 38, 42, 68
 - deterministisches, 23
 - stochastisches, 24
- One-Shot-Verfahren, 147
- Paired-Combinatorial-Logit-Modell, 31
- Path-Size-Logit-Modell, 29, 57
- Path-Size-Weibit-Modell, 32
- Path-Size-Wert, 29
- Pendler, 34
- Pförtnerrampen, 106
- Pfad, 21
- Pfadaufzählung, 27
 - explizit, 25
 - implizit, 25
- Phasensystem, 111
- Präferenzen, 44
- pre-trip, 22
- Rückstaus, 71, 81, 84
- Referenzzeit, 60
- Reisezeit, 109
- Rekursives Logit-Modell, 33

- Rettungsverkehr, 153
- Revisionsrate, 47
- Rotgelbzeit, 110
- Rotzeit, 86, 108
- Route, 21
- Routenüberlappung, 27, 43, 55, 57
- Routenaufteilung, 21, 22, 158
 - deterministische, 22
 - stochastische, 23
- Routenempfehlung, 4
- Routenführung, 151
- Routengenerierung, 25
 - simulativer Ansatz, 27
- Routenmenge, 22, 158
- Routensuche, 25, 158
- Routenwahl
 - deterministische, 38
- Routenwahlanteil, 59–61
- Routenwahldynamik, 61
- Routenwahlmenge, 43, 45
- Routenwahlverhalten, 6, 71
- Routenwahlverlauf, 64
- Routenwechsel, 61
- Routenwechselverhalten, 65

- Schätzproblem, 20
- Selbst-Heilung, 8, 100, 103, 138
- Selbst-Steuerung, 83, 110, 111, 140
- Selbstorganisation, 87
- Selbstorganisiertes Störfallmanagement, 7
 - Erstes Wirkungsprinzip, 89
 - Zweites Wirkungsprinzip, 97
- Simulationslauf, 112
- Simulationsumgebung, 43, 67, 73, 143
- Störfall, *siehe* Verkehrsstörfall
- Störfallmanagement, 74, 81
- Störung, *siehe* Verkehrsstörung
- Stadtstraßennetzwerk, 1
- Stadtstraßenverkehr, 3, 39
- Staubildung, 34
 - nicht wiederkehrende, 2, 70
 - segmentierte, 101
 - störfallbedingte, 81
 - wiederkehrende, 1, 70
- Staulängenschätzung, 94
- Steuerungsverfahren, 5, 82, 143
- Straßenkapazität, 85
- StVO, 104
- Systemoptimum, 24

- Traffic Message Channel, 74
- TUC, 83, 87

- Umlaufzeit, 111
- Umleitung, 40, 81
 - dynamische, 153
- Umleitungsverkehr, 105
- Umverteilung, 87, 98, 101, 137

- Varianzdichte, 50, 55
- Verkehr, 1
- Verkehrsbeeinflussung, 81
- Verkehrsbezirk, 111
- Verkehrereignis, 2, 33, 42, 45
- Verkehrsfunk, 74
- Verkehrsleitzentrale, 73
- Verkehrsmanagement, 5, 149
- Verkehrsnachfrage, 111
- Verkehrsprognose, 148
- Verkehrspsychologie, 150
- Verkehrsqualität, 5
- Verkehrssicherheit, 5
- Verkehrsstörfall, 6, 35, 70
 - Auswirkungen, 73
 - Dauer, 149
 - Detektion, 75
 - Informationsbereitstellung, 76
 - Management, 74
 - Modellierung, 112
 - Routenführung, 78
 - Verkehrsbeeinflussung, 78

- Wechselverkehrszeichen, 78
- Verkehrsstörung, 33
 - nicht wiederkehrend, 34
 - wiederkehrend, 33
- Verkehrsstromaufteilung, 54, 55
- Verkehrsstromverteilung, 22, 23
- Verkehrstelematik, 3, 42, 143
- Verkehrsumlegung, 21, 38
 - generisches Schema, 158
- Verschiebungssatz, 53
- Vissim, 107, 108

- Wahlhäufigkeit, 58
- Warteschlangenmodell, 90
- Wechseldauer, 60
- Wechselrate, 64
- Wechselverkehrszeichen, 4
- Wechselwegweiser, 4

- zentraler Grenzwertsatz, 17
- Zufallsnutzen, 7, 13, 14
- Zufallsnutzenvektor, 17
- Zufussdosierung, 7, 87, 89, 108, 136, 137
 - Eingriffslogik, 90
 - Knotenzufahrt, 99
- Zufussregelung, 4
- Zwischenzeit, 110, 111