



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

INSTITUT FÜR
MECHANIK UND
MECHATRONIK
Mechanics & Mechatronics



Diplomarbeit

Adaptives, makroskopisches Verkehrsmodell mit Parameteridentifikation

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs
unter der Leitung von

Univ.Prof. Dr. Stefan Jakubek
Institut für Mechanik und Mechatronik
E325 A5

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Elisabeth LUCHINI
Matr.Nr.: 0801304
Liechtensteinstraße 121/21
1090 Wien

Wien, am 17.12.2014

Name der Diplomandin

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt und alle aus ungedruckten Quellen, gedruckter Literatur oder aus dem Internet im Wortlaut oder im wesentlichen Inhalt übernommenen Formulierungen und Konzepte gemäß den Richtlinien wissenschaftlicher Arbeiten zitiert, durch Fußnoten gekennzeichnet bzw. mit genauer Quellenangabe kenntlich gemacht habe.

Wien, am 17.12.2014

Name der Diplomandin

Kurzfassung

Überfüllte städtische Verkehrsnetze sind, vor allem zu den Hauptverkehrszeiten, zu einer alltäglichen Gegebenheit geworden. Durch Steigerung der Reisezeit und Luftverschmutzung werden ökonomische Verluste verursacht. Um den Verkehrsfluss zu optimieren, sind bereits mehrere Verkehrsmodelle entwickelt worden. Das Kernelement zur Charakterisierung des Verkehrs ist das sogenannte Fundamentaldiagramm. Hierbei handelt es sich um den Zusammenhang zwischen der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Fahrzeugdichte. In den bisherigen Ansätzen wurde ein lineares Fundamentaldiagramm, welches zu einem konvexen Verkehrsfluss führt, angenommen. Der Nachteil dieser Vereinfachung ist, dass nicht alle Verkehrsphänomene reproduziert werden können.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines numerischen Löser für die nichtlineare hyperbolische Transportgleichung. Es sollen Fundamentaldiagramme beliebiger Form und diskontinuierliche Situationen, wie das Losfahren bei einer Ampel und das Auflösen einer Staufront, realisiert werden können. Geeignete Randbedingungen für den Straßeneintritt und -austritt werden definiert. Ein weiterer wichtiger Teil dieser Arbeit ist das Fundamentaldiagramm bzw. die beschreibenden Parameter des Fundamentaldiagramms durch eine begrenzte Anzahl von verfügbaren Messdaten reproduzieren zu können. Das Fundamentaldiagramm kann dadurch online und in Echtzeit angepasst werden. Dadurch wird es ermöglicht, Stausituationen frühzeitig zu erkennen und mit bestimmten Maßnahmen dagegen zu wirken. Es wird gezeigt, wie die Parameter identifiziert werden können und welchen Einfluss sie auf den Modellausgang haben.

Der numerische Löser beruht auf einem Angebot- und Nachfrageprinzip. Der betrachtete Straßenabschnitt wird in Zellen unterteilt. Anhand der momentanen Zellendichte wird die mögliche Geschwindigkeit berechnet. Der daraus resultierende Fluss wird, abhängig von der Nachfrage der darauffolgenden Zelle, komplett oder nur zum Teil in die nächste Zelle transportiert. Mit einem zusätzlichen Parameter fließt die Dichte der nachfolgenden Zelle bei der Geschwindigkeitsberechnung mit ein, wodurch das Vorausschauen der Fahrer mitberücksichtigt wird. Um geeignete Messpositionen finden zu können, wird die Fisher Informationsmatrix verwendet. Nach der Festlegung einer Messstelle, an welcher alle Parameter identifiziert werden können, schätzt ein genetischer Algorithmus die optimalen Werte dieser Parameter.

Bei der Validierung werden verschiedene verkehrsübliche Szenarien nachgebildet und die Ergebnisse mit der mikroskopischen Verkehrsfluss-Simulationssoftware VISSIM, welche auf einem Fahrzeugfolgmodell basiert, gegenübergestellt.

Abstract

Congested urban traffic networks have become a common condition during rush hours causing economic losses by increasing travel time and air pollution. In order to optimize traffic flow several traffic models have been developed. Macroscopic models are based on a fundamental diagram. It describes the relationship between driving speed and traffic density. For simplicity, a linear fundamental diagram resulting in a convex flux function is often used. The main drawback of this simplification is that not all observed traffic phenomena can be reproduced.

The aim of this work is to develop a numerical solver for the nonlinear hyperbolic transport equation, which works with a fundamental diagram of arbitrary shape and discontinuous conditions, like driving into a jam or driving off at traffic lights. Suitable boundary conditions at road inlets and outlets are defined. A further important part of the work is to identify the parameters of the fundamental diagram based either only on one single or on multiple spatial traffic density observations. The fundamental diagram can be adapted online. This allows real-time traffic forecasting and to counteract with specific measures. In addition, we propose a measure to assess in how far parameters of the fundamental diagram are identifiable from given observations.

The numerical solver is based on the supply and demand principle. The street is discretized into cells. Based on the current traffic density in the vicinity of the driver, the speed and the flow is determined. Under consideration of the demand the resulting density allocation is calculated. With an auxiliary parameter the density of the subsequent cell is used to calculate the speed and consequently the anticipation of the driver is taken into consideration.

Subsequently, with the help of the Fisher information matrix a statement about the information content of the measurement position is made. If it's possible to identify all parameters with the given observations a genetic algorithm estimates the parameters of the fundamental diagram.

The developed algorithm is evaluated on different scenarios and compared with the results of the microscopic traffic simulation software VISSIM, based on a car-following model.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Problembeschreibung	2
1.3	Stand der Technik	5
1.4	Überblick	6
2	Makroskopisches Verkehrsmodell	7
2.1	Einleitung	7
2.2	Berücksichtigung des humanen Fahrverhaltens	8
2.3	Numerische Lösung der Transportgleichung	9
2.3.1	Diskretisierung der Transportgleichung	9
2.3.2	Lösung unter Berücksichtigung von Randbedingungen	11
2.4	Erweiterungen der Transportgleichung für Auf- und Abfahrten	15
3	Identifikation	17
3.1	Modellparameter	17
3.2	Parametersensibilität	19
3.3	Identifizierbarkeit und Design of Experiments	23
3.4	Parameteridentifikation	24
3.4.1	Optimierungsproblem	25
4	Modellvalidierung	28
4.1	Überblick der Beispiele	28
4.2	Einspurige Straße mit Ampelregelung	30
4.3	Straßenverengung mit Geschwindigkeitsreduktion	35
4.4	Straße mit einer Ab- und Auffahrt	42
4.5	Straße mit einer Auffahrt und mehreren Fundamentaldiagrammen	49
4.6	Identifizierbarkeit der Parameter	57

5	Fazit	61
5.1	Zusammenfassung	61
5.2	Ausblick	62

Abbildungsverzeichnis

1.1	Beschreibung der Fahrzeugdichte in einem Straßenzug	2
1.2	Zusammenhang zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und Fahrzeugdichte, sog. Fundamentaldiagramm	3
1.3	Zusammenhang zwischen Verkehrsfluss und Fahrzeugdichte	3
1.4	Fundamentaldiagramm aus Messdaten	4
2.1	Ampelsituation	9
2.2	Diskretisierung eines Straßenelements	10
2.3	drei Punkte Schema	11
2.4	Stauausbreitung und -auflösung bei einer Ampel	13
2.5	Berechnungsschema für drei benachbarte Zellen	14
2.6	Korrekturschritt bei einer Auffahrt	15
2.7	Aufteilung bei einer Abfahrt	16
3.1	Parametrierung eines FD	18
3.2	Parameteränderung bei einer Geschwindigkeits- bzw. Spurreduktion	19
3.3	Aktive Bereiche des Fundamentaldiagramms	20
3.4	Einflussbereich von ${}^k\theta_i$ bei einem drei Punkte Schema	22
3.5	Einflussbereich von ${}^k\theta_i$	23
3.6	Einfluss der Platzierung einer Messstelle	25
3.7	Optimierungsschema	26
4.1	Straße mit einer Ampel	30
4.2	Fundamentaldiagramm	31
4.3	VISSIM Werte Q mit eingezeichneten Messpositionen	32
4.4	Simulation \hat{Q} mit eingezeichneten Zeitschnitten	33
4.5	Dichteverlauf zu bestimmten Zeitpunkten	34
4.6	Kurzzeitige Straßenverengung	35
4.7	Fundamentaldiagramm	37
4.8	VISSIM Werte Q mit eingezeichneten Zeitschnitten	38
4.9	Simulation \hat{Q} mit eingezeichneten Zeitschnitten	39
4.10	Dichteverlauf zu bestimmten Zeitpunkten	40

4.11	Geschwindigkeitsverlauf zu bestimmten Zeitpunkten	41
4.12	Straße mit einer Ab- und Auffahrt	42
4.13	Fundamentaldiagramm	44
4.14	Hauptstraße, VISSIM Werte Q mit eingezeichneten Messpositionen	45
4.15	Hauptstraße, Simulation \hat{Q} mit eingezeichneten Zeitschnitten	45
4.16	Nebenstraße, VISSIM Werte Q mit eingezeichneten Messpositionen	46
4.17	Nebenstraße, Simulation \hat{Q} mit eingezeichneten Zeitschnitten	46
4.18	Dichteverlauf der Hauptstraße zu bestimmten Zeitpunkten	47
4.19	Dichteverlauf der Nebenstraße zu bestimmten Zeitpunkten	48
4.20	Straßenkonfiguration mit verschiedenen Fundamentaldiagrammen	49
4.21	Fundamentaldiagramme	51
4.22	1Q und 3Q der VISSIM Werte	53
4.23	${}^1\hat{Q}$ und ${}^3\hat{Q}$ der Simulation	53
4.24	2Q der VISSIM Werte	54
4.25	${}^2\hat{Q}$ der Simulation	54
4.26	Dichteverlauf der Hauptstraße zu bestimmten Zeitpunkten	55
4.27	Dichteverlauf der Nebenstraße zu bestimmten Zeitpunkten	56
4.28	Straße mit einer Ampel am Straßenende	57
4.29	VISSIM Werte Q mit eingezeichneten Messpositionen	57
4.30	Dichte-Farbverlauf mit FD	58

Kapitel 1

Einleitung

In diesem Kapitel wird das Verbesserungspotential der Verkehrssteuerung- und -regelung durch neue Verkehrsmodelle deutlich, siehe Kapitel 1.1. Die Grundlagen des Verkehrs, siehe Kapitel 1.2, sowie der Stand der Technik, siehe Kapitel 1.3, werden behandelt. In Kapitel 1.4 wird ein Überblick über die einzelnen Kapitel der Arbeit gegeben.

1.1 Motivation

Mobilität und Verkehr spielen eine wichtige Rolle in unserer Gesellschaft und sind eine wesentliche Grundlage der Zivilisation und Wirtschaft. Aufgrund der rapiden Zunahme des Straßenverkehrsaufkommens reichen bauliche Maßnahmen nicht mehr aus, um auftretende Verkehrsüberlastungen effektiv zu lösen. Dies verursacht weltweit erheblichen volkswirtschaftlichen Schaden. Dazu kommt noch die zunehmende Umweltbelastung durch Emissionen. Seit vielen Jahren versucht man den Verkehrsablauf mit betrieblichen Maßnahmen sowohl auf dem innerstädtischen als auch auf dem außerstädtischen Straßennetz zu optimieren. Die Verbesserungsmöglichkeiten, welche sich durch „intelligente“ Verkehrsregelungsverfahren ergeben könnten, sind dabei enorm. Die größte wissenschaftliche Herausforderung dabei sind die Verkehrsmodelle, welche sich selbstständig an neue Verkehrssituationen und spezifische lokale Verhältnisse anpassen können müssen. Die Verkehrsmodelle müssen echtzeitfähig sein und durch Messungen online adaptiert werden können. Sie sollen die Möglichkeit bieten, aus der Modellstruktur die optimale Platzierung von Sensoren abzuleiten, um ein Verkehrsflussmodell möglichst sicher parametrieren zu können. Ein wichtiger Punkt ist, dass der Einsatz moderner modellbasierter Regelungsverfahren zur Optimierung von Verkehrsflüssen in zusammenhängenden Netzen ermöglicht wird, welcher Rückkopplungseffekte durch die Verhaltensänderungen der Verkehrsteilnehmer berücksichtigt. Technologisch geht es somit im Prinzip darum, ein Verkehrsmodell mit reduzierter Komplexität zu entwickeln, welches echtzeitfähig ist und damit für moderne Regelungsverfahren eingesetzt werden kann.

1.2 Problembeschreibung

Um das Verkehrsverhalten simulieren zu können, muss eine passende Modellierungstiefe gewählt werden. Bei der Optimierung von Verkehrsflüssen ist nicht die Dynamik einzelner Verkehrsteilnehmer relevant, sondern die gemittelten Größen für

- die Fahrzeugdichte q ,
- die Geschwindigkeit $v(q)$ und
- den Verkehrsfluss $\Phi(q)$.

Diese Tatsache führt auf die Verwendung einer makroskopischen Beschreibung des Verkehrs. Das Verkehrsaufkommen einer Straße wird durch die örtlich und zeitlich variierende Fahrzeugdichte $q(x, t)$ in $[Fzg./m]$ beschrieben, vgl. Abb. 1.1. Die Geschwindigkeit $v(q)$ in $[m/s]$ und der Fluss $\Phi(q)$ in $[Fzg./s]$ sind Funktionen der Fahrzeugdichte. Als Randbedingungen dienen der Zustrom $\Phi_{in}(t)$ und der Abstrom $\Phi_{out}(t)$.

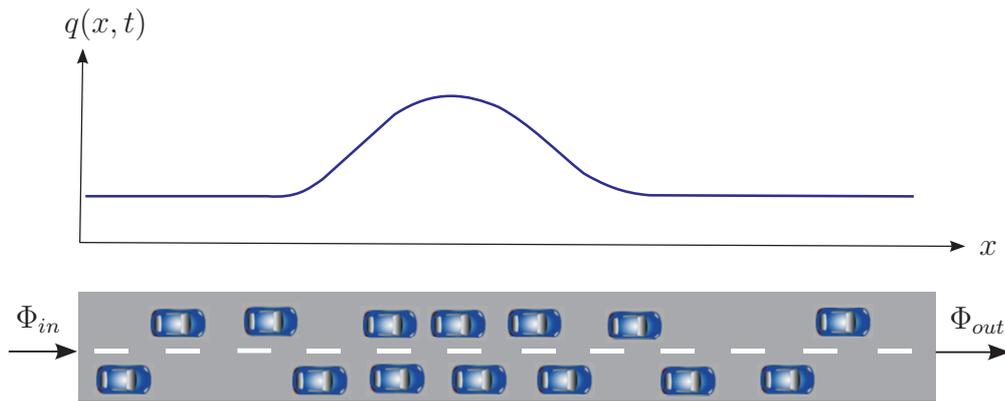


Abbildung 1.1: Beschreibung der Fahrzeugdichte in einem Straßenzug

Der Zusammenhang zwischen der lokalen Fahrzeugdichte $q(x, t)$ und der mittleren Geschwindigkeit $v = v(q)$ der Fahrzeuge wird durch das sogenannte *Fundamentaldiagramm* (FD) hergestellt, vgl. Abb. 1.2. Mit zunehmender Fahrzeugdichte nimmt die Geschwindigkeit ab, bis letztendlich bei einer maximalen Dichte $q = q_{max}$ der Verkehr zum Erliegen kommt.

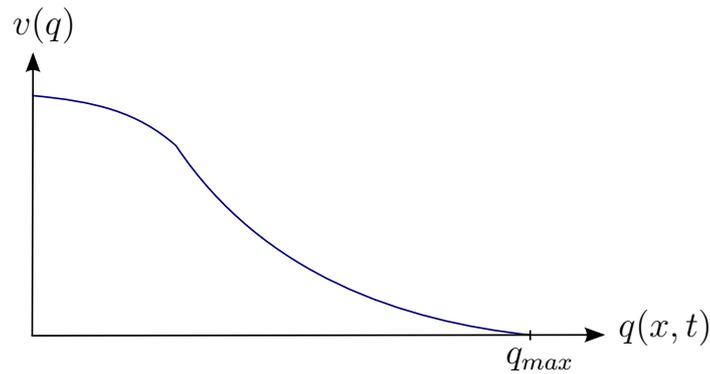


Abbildung 1.2: Zusammenhang zwischen Fahrzeuggeschwindigkeit und Fahrzeugdichte, sog. Fundamentaldiagramm

Das Fundamentaldiagramm beeinflusst das Verkehrsgeschehen wesentlich. Es hängt stark von der betrachteten Straße (z.B. Autobahn, Landstraße, Nebenstraße), aber auch von anderen Faktoren wie z.B. Tageszeit oder Wetter ab. Dem Bestimmen des Fundamentaldiagramms kommt eine essentielle Bedeutung zu. Aus zeitlich und örtlich begrenzten Verkehrsdaten muss das Fundamentaldiagramm möglichst sicher reproduziert werden können. Um das Fundamentaldiagramm online adaptiv anpassen zu können, muss das Fundamentaldiagramm parametrisiert werden können, siehe Kapitel 3.

Der Verkehrsfluss Φ an einer bestimmten Stelle wird schließlich durch das Produkt aus Dichte und Geschwindigkeit ($\Phi = q \cdot v$) berechnet, vgl. Abb. 1.3. Nimmt bei höheren Geschwindigkeiten der Verkehrsfluss vorerst zu, nimmt er durch entsprechende Beeinträchtigungen, wie gegenseitige Behinderungen durch größere Geschwindigkeitsunterschiede, wieder ab.

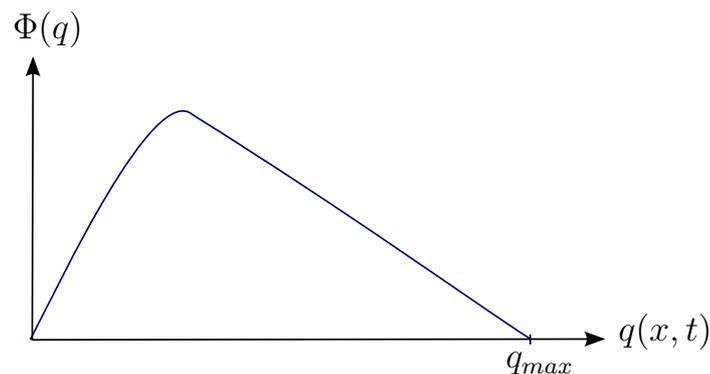


Abbildung 1.3: Zusammenhang zwischen Verkehrsfluss und Fahrzeugdichte

Um ein Fundamentaldiagramm erzeugen zu können, wird über eine bestimmte Zeit eine Verkehrsmessung durchgeführt. Aus den gemittelten Werten der Verkehrszählung und Geschwindigkeitsmessung entsteht eine Punktwolke, welche das FD repräsentiert. Um das FD in der Simulation effektiv nützen zu können, wird es abschnittsweise mit linearen Funktionen approximiert, vgl. Abb. 1.4.

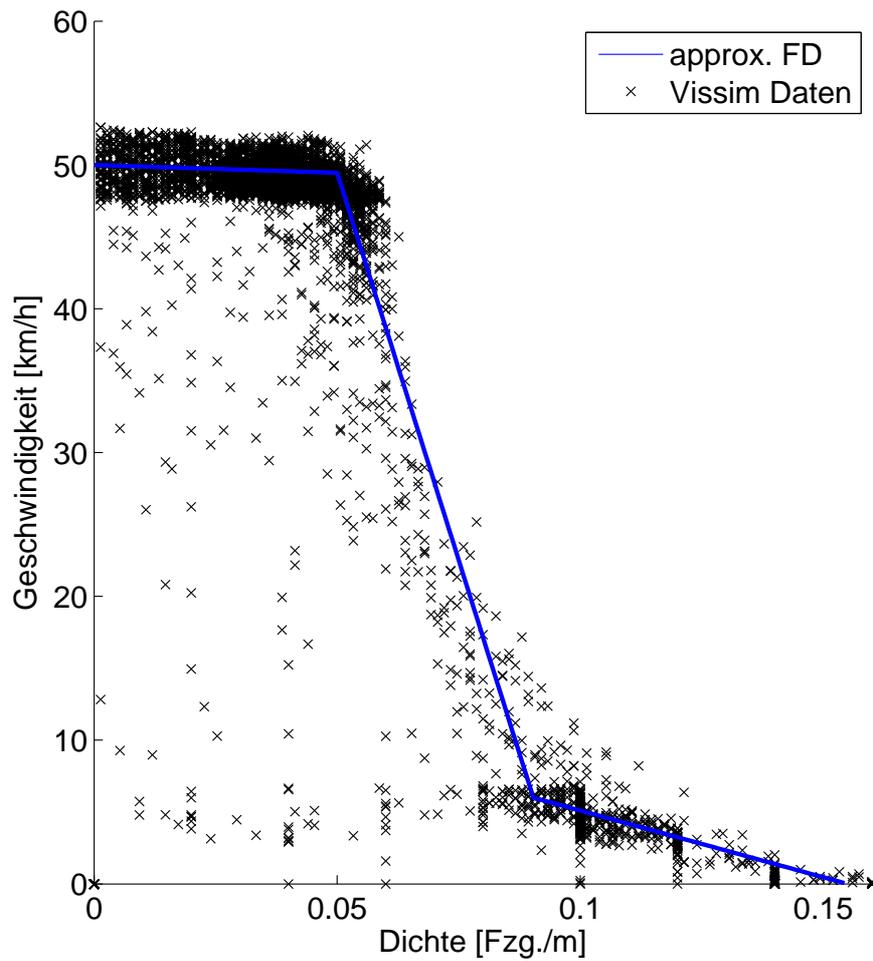


Abbildung 1.4: Fundamentaldiagramm aus Messdaten

Für die anschließende Validierung der Simulation werden Referenzwerte benötigt. Diese Referenzwerte können entweder durch Messungen an realen Verkehrswegen oder durch Simulation mit genauen aber zeitaufwendigeren Softwareprogrammen gewonnen werden.

1.3 Stand der Technik

Die Modellierung und Regelung von Verkehrsströmen ist ein Forschungsthema, welches schon seit vielen Jahren bearbeitet wird. Grundlage für die meisten Ansätze zur Verkehrssimulation ist das Modell von *Lighthill, Whitham and Richards (LWR)*, [1]. Es ist ein makroskopischer Ansatz mit der Dichte als einziger Zustandsvariable und wird durch die zwei Gleichungen

$$\frac{\partial q(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial \Phi(x, t)}{\partial x} = 0 \quad (1.1)$$

$$\Phi(x, t) = f(q(x, t)) \quad (1.2)$$

beschrieben. Gleichung (1.1) ist die, als partielle Differentialgleichung formulierte Kontinuitätsgleichung. Gleichung (1.2) koppelt den Verkehrsfluss $\Phi(x, t)$ an die Fahrzeugdichte $q(x, t)$. Letzterer Zusammenhang kann aus dem Fundamentaldiagramm abgeleitet werden, vgl. Abb. 1.3. Bei den bisherigen Ansätzen wird eine linear abfallende Funktion als beschreibende Gleichung für den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Dichte angenommen. Das LWR Modell wurde laufend erweitert und modifiziert. In [2] wird die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit selbst dynamisch modelliert, sodass insgesamt ein Modell zweiter Ordnung entsteht. In den Arbeiten [3, 4, 5] wird ausführlich auf das Phänomen der Stoßwellen und Stop-and-Go Wellen eingegangen. Für ein Modell dritter Ordnung (mit den Zustandsvariablen Dichte, Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsänderung) wird auf die Arbeit von Helbing verwiesen, [6].

Die Gruppe um Daganzo führte schließlich das bekannte *Cell Transmission Model (CTM)* ein, [7]. Ein Straßenzug wird dabei durch Aufteilung in finite Elemente, sog. Cells einer örtlichen und zeitlichen Diskretisierung unterworfen. Für eine flexible Zellenlänge wurde das *MCTM (modified CTM)* erzeugt, [8]. Eine weitere Variante ist das *Switching Mode Model (SMM)*, [9, 10].

Eine Finite Volumen Methode zur Lösung der hyperbolischen Differentialgleichung findet sich im Buch von J. Leveque, [11]. Das zugrunde liegende FD muss jedoch stückweise, einfach differenzierbar sein und monoton fallen. Diese für den Verkehr nicht zufriedenstellende Einschränkung wird mit der, in dieser Arbeit, vorgestellten Methodik behoben.

1.4 Überblick

In Kapitel 2 wird auf die makroskopische Betrachtungsweise, welche auf der Transportgleichung beruht, näher eingegangen. Die numerische Lösung der Transportgleichung, unter Berücksichtigung von Rand- und Anfangsbedingungen, wird in Kapitel 2.3 gezeigt. Um das humane Fahrverhalten zu simulieren, wird ein Vorausschau-Faktor eingeführt, siehe Kapitel 2.2. Die Erweiterung der Transportgleichung durch Auf- und Abfahrten wird in Kapitel 2.4 behandelt.

In Kapitel 3 wird zuerst auf die Parametrierung des Fundamentaldiagramms eingegangen, siehe Kap. 3.1. Im weiteren wird die Parametersensibilität erläutert, siehe Kap. 3.2. Messpositionen müssen genügend Information liefern, um das Fundamentaldiagramm vollständig reproduzieren zu können, um dies überprüfen zu können wird in Kap. 3.3 eine Beurteilung der Identifizierbarkeit von Parametern durchgeführt. Anschließend wird ein Optimierungsproblem beschrieben, welches die optimalen Parameterwerte schätzt, siehe Kapitel 3.4.

In Kapitel 4 wird das Simulationsmodell validiert. Dafür werden bestimmte Testsituationen erstellt und mit den Ergebnissen aus der mikroskopischen Verkehrsfluss-Simulationssoftware VISSIM gegenübergestellt.

In Kapitel 5 wird eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick für die nächsten Schritte gegeben.

Kapitel 2

Makroskopisches Verkehrsmodell

Für die Optimierung von Verkehrsflüssen wird die makroskopische Betrachtungsweise, welche auf der Transportgleichung beruht, verwendet, siehe Kapitel 2.1. Die Transportgleichung wird, unter Berücksichtigung von Rand- und Anfangsbedingungen, numerisch gelöst, siehe Kapitel 2.3. In Kapitel 2.2 wird ein Vorausschau-Faktor, welcher das humane Fahrverhalten berücksichtigt, eingeführt. Die Erweiterung der Transportgleichung für Auf- und Abfahrten wird in Kapitel 2.4 behandelt.

2.1 Einleitung

Makroskopische Verkehrsmodelle lassen sich aus der Analogie zwischen Verkehrsfluss und Fluidströmungen ableiten. Die für das Verkehrsmodell notwendigen Terme der Transportgleichung führen auf die Gleichung

$$\frac{\partial q(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial \Phi(q(x, t))}{\partial x} = 0, \quad x \in \mathbb{R}, t \in \mathbb{N}. \quad (2.1)$$

Gleichung (2.1) beschreibt die Massenerhaltung der Fahrzeuge im Verkehr, wobei $q(x, t)$ die Verkehrsdichte in Fahrzeuge pro Längeneinheit [$Fzg./m$] am Ort x zur Zeit t darstellt. Sie ist die Erhaltungsgröße, welche während der Simulationszeit und abhängig von den Rand- und Anfangsbedingungen erhalten und korrekt verändert wird. Der Verkehrsfluss $\Phi(q(x, t))$ in Fahrzeuge pro Sekunde [$Fzg./s$] am Ort x zur Zeit t wird durch Gleichung (2.2) definiert.

$$\Phi(q(x, t)) = f(q) = q(x, t) \cdot v(q) \quad (2.2)$$

Anhand dieser Gleichung wird die *Nichtlinearität* zwischen Verkehrsdichte, Geschwindigkeit und Verkehrsfluss deutlich. Die Form des Verkehrsflusses $\Phi(q(x, t))$ ist durch den Zusammenhang zwischen der Verkehrsdichte und der dazugehörigen Geschwindigkeit, welche sich aus dem Fundamentaldiagramm ergibt, festgelegt, vgl. Abb. 1.2 und 1.3.

Um den Verkehr realitätsnahe wiedergeben zu können, wird ein *Angebot- und Nachfrageprinzip* mit nachfolgender Überlegung umgesetzt. Der zu simulierende Straßenabschnitt wird in sogenannte Zellen unterteilt, siehe Abb. 2.2. Für jede Zelle i wird anhand der momentanen Dichten $q(x_i, n)$ der Zelle i und $q(x_{i+1}, n)$ der Zelle $i + 1$ zum Zeitpunkt n die gefahrene Geschwindigkeit $v(x_i, n)$ berechnet. Der Einfluss der Zelle $i + 1$ auf die Geschwindigkeit wird durch das humane Fahrverhalten bestimmt, siehe Kapitel 2.2. Daraus ergibt sich der Fluss $\Phi(x_i, n)$, Gl. (2.2), welcher in die angrenzende Zelle $i + 1$ transportiert werden soll. Jede Zelle verfügt über eine *maximale Kapazität* $q_{max}(x_i, n)$. Um die maximale Kapazität der darauffolgenden Zelle nicht zu überschreiten, bleibt bei kleinerer Nachfrage eine Teilmenge des angebotenen Flusses in der eigenen Zelle x_i . Bei längerem Anhalten dieser Situation kommt es zu einer *Staubildung*. Am Ende jedes Zeitschrittes wird die neue Dichteverteilung anhand des tatsächlich transportierten Flusses berechnet.

Die *maximale Kapazität* $q_{max}(x_i, n)$ kann sowohl örtlich, durch unterschiedliche Spurenanzahl, als auch zeitlich, durch kurzzeitiges Ausfallen einer oder mehrerer Spuren, variieren. Bei der entwickelten Methodik können Fundamentaldiagramme und dazugehörige Fluss-Dichte Diagramme konvexer oder nicht-konvexer Form sein. Durch den direkten Transport der Masse ist Massenerhaltung sichergestellt.

2.2 Berücksichtigung des humanen Fahrverhaltens

Extremsituationen, wie beispielsweise das Wegfahren vor einer, auf grün umschaltenden Ampel oder das Auflösen einer Staufront, werden vom Fundamentaldiagramm nicht beschrieben. Um auch diese Situation bewerkstelligen zu können wird bei der Berechnung der Geschwindigkeit ein *Vorausschau-Faktor* α eingeführt.

$$\alpha = \alpha(q, x, t, \dots) \quad \alpha \in [0, 1) \quad (2.3)$$

Dieser Faktor berücksichtigt das humane Fahrverhalten. Die Verkehrslage in der darauffolgenden Zelle beeinflusst die Wahl der eigenen Geschwindigkeit. Die Geschwindigkeit v_i^n ergibt sich aus einer Kombination der Geschwindigkeit der eigenen Zelle i und der nachfolgenden Zelle $i + 1$,

$$v_i^n = (1 - \alpha)v(q_i^n) + \alpha v(q_{i+1}^n) \quad (2.4)$$

mit $v(q_i^n)$, der aus dem Fundamentaldiagramm ermittelten Geschwindigkeit, basierend auf der momentanen Dichte q_i der Zelle i .

Die Stärke der Gewichtung auf die Zelle $i + 1$ hängt von verschiedenen Faktoren, wie Sichtwei-

te oder Fahrercharakter, ab. Der α -Wert begrenzt den austretenden Fluss Φ_i^n und verhindert dadurch ein zu schnelles Hinausfahren.

Der Einfluss von α soll anhand eines Beispiels demonstriert werden. Die Ausgangssituation ist ein, durch die rote Ampel, entstandener Rückstau, vgl. Abb. 2.1.

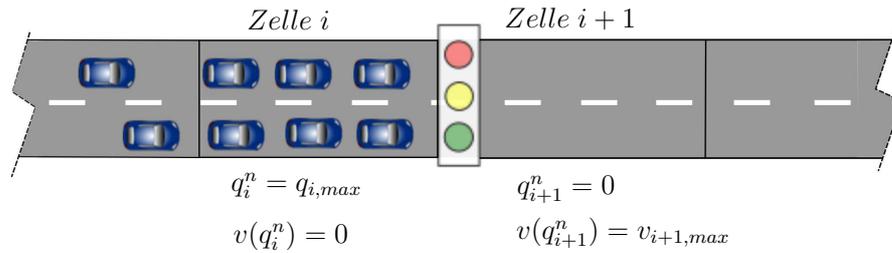


Abbildung 2.1: Ampelsituation

Die Zelle i vor der Ampel ist voll besetzt, aus dem FD ergibt sich die Geschwindigkeit $v(q_i^n) = 0$. Bei der nachfolgenden leeren Zelle $i + 1$ kann laut FD die maximale Geschwindigkeit $v(q_{i+1}^n) = v_{i+1,max}$ gefahren werden. Ohne einem Vorausschau-Faktor ($\alpha = 0$) wird das Losfahren der Fahrzeuge jedoch verhindert. Mit einem $\alpha > 0$ führt Gleichung (2.4) auf eine Geschwindigkeit $v_i^n > 0$ wodurch sich die Fahrzeugkolonne in Bewegung setzt. Die Geschwindigkeit der Staufrontauflösung kann demnach mit dem Vorausschau-Faktor beeinflusst werden.

2.3 Numerische Lösung der Transportgleichung

2.3.1 Diskretisierung der Transportgleichung

Um Gleichung (2.1) zu lösen, wird der Straßenabschnitt einer örtlichen und einer zeitlichen Diskretisierung unterworfen, siehe Abb. 2.2. Die Zellenlänge Δx und die Zeitschritte Δt können variabel gewählt werden, die *Courant-Friedrichs-Lewy Bedingung*, Gl. (2.5), muss jedoch erfüllt werden, [12].

$$v \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq 1 \quad (2.5)$$

Die Diskretisierung der Massenbilanz, Gl. (2.1), mit dem *Upwind-Verfahren erster Ordnung*

führt auf

$$q_i^{n+1} = q_i^n + (\Phi_{i-1}^n - \Phi_i^n) \frac{\Delta t^n}{\Delta x_i}, \quad i \in \mathcal{D}, n \in \mathbb{N} \quad (2.6)$$

mit q_i^n , der Dichte der i -ten Zelle zum Zeitschritt n , dem in die Zelle i eintretenden Fluss Φ_{i-1}^n und dem aus der Zelle i austretenden Fluss Φ_i^n , im örtlichen Definitionsbereich \mathcal{D} . Der Ausdruck $\frac{\Delta t}{\Delta x}$ definiert die örtliche und zeitliche Schrittweite. Der Algorithmus kann mit variablen Zellenlängen und Zeitschritten umgehen, im weiteren werden jedoch konstante Werte angenommen.

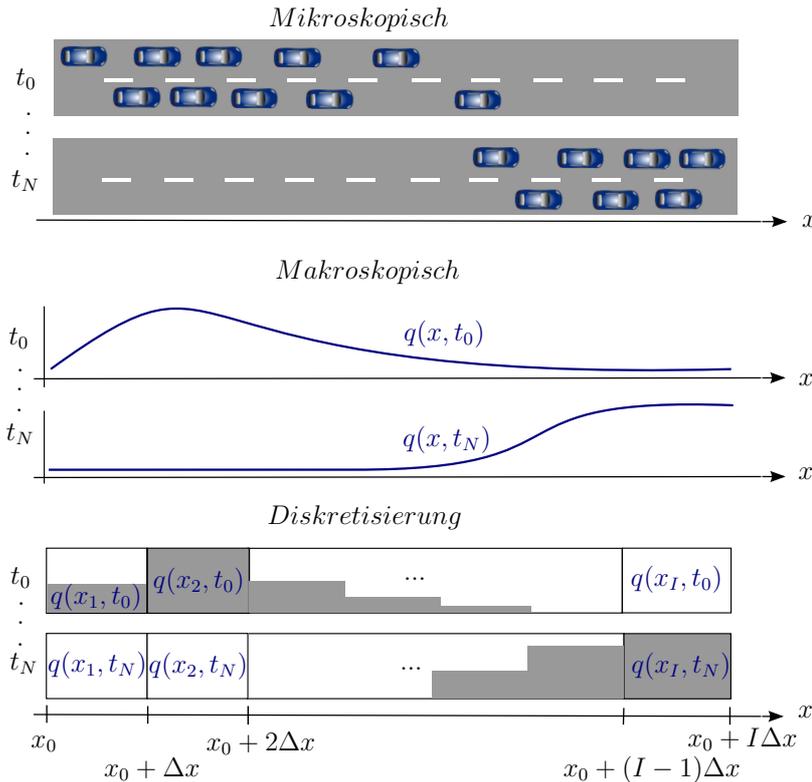


Abbildung 2.2: Diskretisierung eines Straßenelements

Aus der Tatsache, dass die Straße einerseits keine negative Dichte aufweisen kann, andererseits die maximale Dichte nicht überschritten werden kann, gilt folgende *Nebenbedingung*

$$0 \leq q_i^n \leq q_{i,max}^n. \quad (2.7)$$

Um Gleichung (2.7) einhalten zu können, muss gewährleistet werden, dass weder die Anfangsbelegung q_x^0 , noch das Fundamentaldiagramm negative Werte aufweisen. Des weiteren muss sichergestellt werden, dass es zu keinen überfüllten Zellen kommt. Dies wird mit einem *Korrekturschritt*, für dessen Erläuterung auf Seite 14 verwiesen wird, sichergestellt. Ein maximal erlaubter Fluss $\Phi_i^n \leq \Phi_{max}$ kann ebenfalls realisiert werden, siehe [13].

Der Zu- und Abfluss der Zellen ergibt sich zu

$$\Phi_{i-1}^n = q_{i-1}^n v_{i-1}^n = q_{i-1}^n ((1 - \alpha)v(q_{i-1}^n) + \alpha v(q_i^n)) \quad (2.8)$$

$$\Phi_i^n = q_i^n v_i^n = q_i^n ((1 - \alpha)v(q_i^n) + \alpha v(q_{i+1}^n)). \quad (2.9)$$

Einsetzen von Gl. (2.8) und (2.9) in Gl. (2.6) ergibt, dass sich die Dichte im neuen Zeitschritt aus den, in Abb. 2.3 dargestellten, drei vorherigen Zellen ergibt.

$$q_i^{n+1} = f(q_{i-1}^n, q_i^n, q_{i+1}^n, \alpha) \quad (2.10)$$

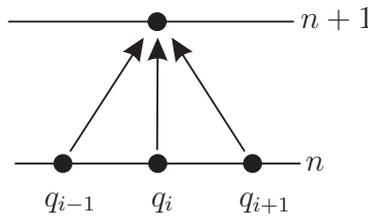


Abbildung 2.3: drei Punkte Schema

2.3.2 Lösung unter Berücksichtigung von Randbedingungen

Um Gleichung (2.6) zu lösen, werden *Randbedingungen* und eine *Anfangsbedingung* benötigt. Die *Anfangsbedingung* q^0 beschreibt die Dichteverteilung im Definitionsbereich \mathcal{D} zum Zeitpunkt t_0 . *Randbedingungen* werden mit zusätzlichen Zellen an den Enden des Definitionsbereichs realisiert. Durch das, in Abb. 2.3 dargestellte, drei Punkte Schema reicht es aus, für jedes Ende eine zusätzliche Zelle zu implementieren, siehe [11]. Diese Zellen werden mit ${}^k q_{RB,in}^n$ und ${}^k q_{RB,out}^n$ bezeichnet. Der Index k bezeichnet die jeweilige Straße eines aus mehreren Straßen gekoppelten Straßennetzes. Die Zellen am Rand unterliegen nicht dem Lösungsalgorithmus und werden am Anfang jedes Zeitschrittes gesetzt. Im Nachfolgenden werden Randbedingungen erläutert, welche für verschiedene Verkehrssituationen benötigt werden.

Abfluss Randbedingungen

- *Absorbierende Randbedingungen* sind notwendig, um sicherzustellen, dass der Fluss den Definitionsbereich ohne Rückwirkungen durch reflektierende Information verlässt. Die Zelle am Ausgang bekommt den Wert der letzten Zelle $i = I$ zugewiesen.

$${}^k q_{RB,out}^n = {}^k q_I^n \quad (2.11)$$

- Um am Ende der Straße eine *rote Ampel* zu realisieren, wird die Zelle am Ausgang auf die maximale Dichte der letzten Zelle $i = I$ gesetzt. Dadurch wird ein hinaus transportieren des Flusses unterbunden.

$${}^k q_{RB,out}^n = {}^k q_{I,max}^n \quad (2.12)$$

- Eine *grüne Ampel* basiert auf den absorbierenden Randbedingungen, Gl. (2.11).

Zufluss Randbedingungen

- Um Messdaten von Verkehrssensoren als Zufluss zu definieren, wird die Zelle am Eingang auf die gemessenen Dichtewerte ${}^k q_{data}^n$ gesetzt.

$${}^k q_{RB,in}^n = {}^k q_{data}^n \quad (2.13)$$

- Bei einer *roten Ampel* wird der Zufluss aus der vorherigen Straße verhindert.

$${}^k q_{RB,in}^n = 0 \quad (2.14)$$

- Bei einer *grünen Ampel* ergibt sich die Dichte der Zelle ${}^k q_{RB,in}^{n+1}$ der nachfolgenden Straße zum neuen Zeitschritt aus Gl. (2.6) zu

$${}^k q_{RB,in}^{n+1} = {}^k q_{RB,in}^n + (\Phi({}^{k-1} q_{RB,out}^n) - \Phi({}^k q_{RB,in}^n)) \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (2.15)$$

mit $\Phi({}^{k-1} q_{RB,out}^n)$ dem, aus Gl. (2.9), ermittelten Fluss der Zelle ${}^{k-1} q_{RB,out}^n$ am Ausgang der vorherigen Straße.

Um eine Ampel zu simulieren, werden zwei Straßen miteinander gekoppelt. Die rechte Randbedingung der ersten Straße ${}^1 q_{RB,out}^n$ und die linke Randbedingung der zweiten Straße ${}^2 q_{RB,in}^n$ werden während der Simulationszeit beliebig oft, anhand einer Kombination der Gleichungen (2.12) und (2.14) für die Rotphasen und einer Kombination der Gleichungen (2.11) und (2.15) für die Grünphasen, verändert. Während der Rotphasen wird der Informationsfluss zwischen den Straßen unterbrochen.

In Abb. 2.4 wird eine Ampelsituation dargestellt. Während der Rotphase breitet sich vor der Ampel ein Stau aus, die Straße nach der Ampel leert sich. Dadurch wird die Entkopplung der beiden Straßen ersichtlich. Schaltet die Ampel auf die Grünphase um, werden die zwei Straßen miteinander gekoppelt und die zuvor gebildete Kolonne löst sich auf.

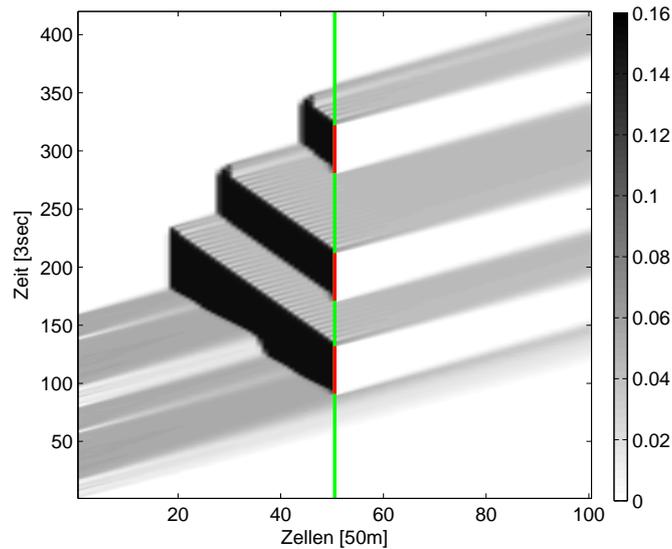


Abbildung 2.4: Stauausbreitung und -auflösung bei einer Ampel

Nachdem die *Anfangsbedingung* q^0 festgelegt wurde, werden folgende Schritte durchgeführt:

1. Randbedingungen für den Zeitschritt $t = n$ definieren
2. α Wert festlegen
3. Geschwindigkeit, Gl. (2.4), und möglichen Fluss, Gl. (2.9), berechnen
4. Vorläufige Dichte, Gl. (2.6), ermitteln
5. Überprüfen ob eine oder mehrere Zellen die Nebenbedingung, Gl. (2.7), verletzen
6. Falls Punkt 5 zutrifft, Korrekturschritt, Seite 14, iterativ durchführen, bis keine Verletzung der Nebenbedingung mehr vorliegt
7. Punkte 1 bis 7 für den nächsten Zeitschritt wiederholen

Das Berechnungsschema wird in Abb. 2.5 verdeutlicht. Die grauen Blöcke entsprechen der Fahrzeugmenge, multipliziert mit der Zellenlänge Δx ergibt dies die Fahrzeugdichte der jeweiligen Zelle. Das oberste Bild zeigt die Ausgangssituation zum Zeitpunkt n . Die blauen Pfeile repräsentieren die Geschwindigkeiten (Punkt 3), basierend auf Gl. (2.4). Die daraus resultierenden Flüsse werden in die nächste Zelle transportiert. Im zweiten Bild wird dies durch die Verschiebung der Blöcke zum Zeitschritt $t = n + \frac{1}{3}$ verdeutlicht. Nach der Aktualisierung der Dichten (Punkt 4) kann es zu übervollen Zellen kommen, dargestellt im dritten Bild. Die Verletzung der Nebenbedingung (Punkt 5) führt zu einem notwendigen (*iterativen*) *Korrekturschritt*. In Abb. 2.5 wird durch den roten Pfeil im dritten Bild verdeutlicht, dass

der Fahrzeuganteil, welcher nicht in die Zelle $j + 1$ passt, in die Zelle j zurücktransportiert wird.

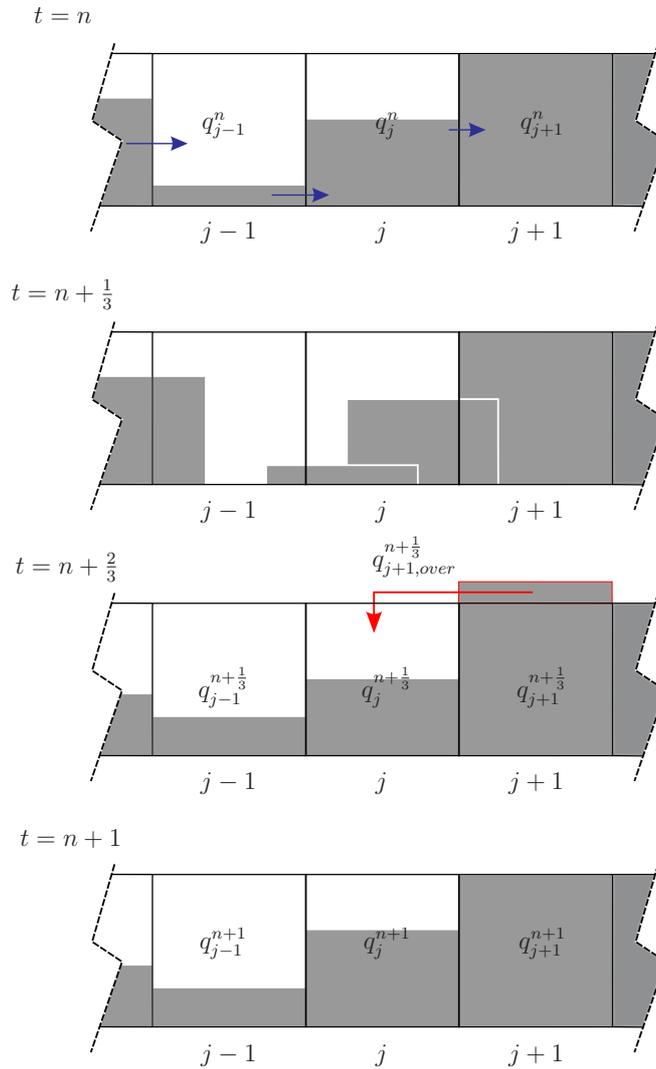


Abbildung 2.5: Berechnungsschema für drei benachbarte Zellen

Beim *Korrekturschritt* werden alle Zellen, beginnend von der letzten Zelle des Definitionsbereichs, auf Verletzung der Nebenbedingung überprüft. Da ein Korrekturschritt in den davorliegenden Zellen weitere Verletzungen der Nebenbedingung bewirken kann, wird dieser iterativ durchgeführt.

$$q_i^{n+\frac{2}{3}} = q_{i,max}^n + q_{i,over}^{n+\frac{2}{3}} \quad (2.16)$$

$$q_i^{n+\frac{2}{3},corr} = q_i^{n+\frac{2}{3}} - q_{i,over}^{n+\frac{2}{3}} = q_{i,max}^n \quad (2.17)$$

$$q_{i-1}^{n+\frac{2}{3},corr} = q_{i-1}^{n+\frac{2}{3}} + q_{i,over}^{n+\frac{2}{3}} \quad (2.18)$$

Die Dichteverteilung, bei der keine Nebenbedingung mehr verletzt wird, ist die Ausgangssituation für den nachfolgenden Zeitschritt $n + 1$. In Abb. 2.5 ist ein Korrekturschritt ausreichend, um die Nebenbedingung zu erfüllen, dargestellt im vierten Bild.

2.4 Erweiterungen der Transportgleichung für Auf- und Abfahrten

Auffahrt

Bei einer Auffahrt wird das Ende einer Straße mit einer beliebigen Position der Hauptstraße zusammengeführt. Diese Einmündungszelle wird im nachfolgenden mit dem tiefgestellten Kürzel *intersec* bezeichnet. Die Geschwindigkeit der auffahrenden Dichte in die Einmündungszelle ergibt sich, aus Gl. (2.4), mit den Dichten ${}^{\text{on}}q_I^n$ und $q_{intersec}^n$. Bei der Einmündungszelle erweitert sich die diskretisierte Massenbilanz, Gl. (2.6), um den Term ${}^{\text{on}}\Phi_I^n \frac{\Delta t^n}{\Delta x_i}$, welcher den Zufluss der Auffahrt darstellt.

Im Falle eines Staus, welcher sich über die Einmündungszelle ausbreitet, muss sichergestellt werden, dass auch die Auffahrt von dieser Überlastung betroffen ist. Dafür wird der Parameter $\beta(x, t)$ eingeführt, welcher sich proportional zu dem übertragenen Fluss der jeweiligen Zelle ergibt.

$${}^k\beta_{intersec}^n = \frac{{}^k\Phi_{intersec-1}^n}{\sum_{k=1}^s {}^k\Phi_{intersec-1}^n} \quad \beta \in [0, 1] \quad (2.19)$$

Die Dichte, welche die Kapazität der Einmündungszelle überschreitet $q_{intersec,over}^{n+\frac{2}{3}}$ wird durch β anteilmäßig auf die beteiligten Straßen zurücktransportiert, vgl. Abb. 2.6. Es ist zu beachten, dass durch die flussabhängige Aufteilung β für jeden Zeitschritt und einmündende Zelle berechnet werden muss.

$${}^kq_{intersec-1}^{n+\frac{2}{3}} = {}^k\beta_{intersec}^n \cdot q_{intersec,over}^{n+\frac{2}{3}} \quad (2.20)$$

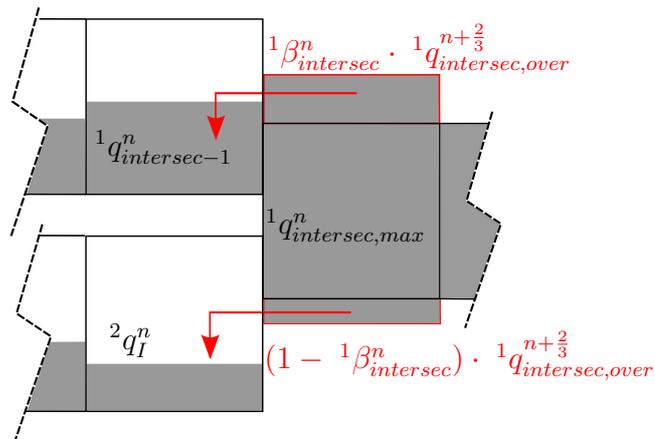


Abbildung 2.6: Korrekturschritt bei einer Auffahrt

Abfahrt

Für die Realisierung einer Abfahrt wird bei einer beliebigen Position der Hauptstraße der Parameter γ als *Abfahrwahrscheinlichkeit* eingeführt. Der Wert des Parameters ist zeitvariabel und definiert den prozentualen Anteil der Fahrzeuge, welche an dieser Position die Straße verlassen. Analog zur Auffahrt wird die Position der Abfahrt ebenfalls mit dem tiefgestellten Kürzel *intersec* gekennzeichnet.

$$\gamma = {}^k\gamma_{intersec}^n \quad \gamma \in [0, 1) \quad (2.21)$$

Die Geschwindigkeit der abfahrenden Fahrzeuge wird, anhand Gl. (2.4), mit den Dichten ${}^{off}q_1^n$ und $q_{intersec}^n$ berechnet. Gleichung (2.6) erweitert sich bei der Position der Abfahrt um den Term $-{}^{off}\Phi_1^n \frac{\Delta t^n}{\Delta x_i}$, welcher den Abfluss aus der Hauptstraße definiert.

Wird die Abfahrt ebenfalls simuliert, dient der abfahrende Anteil als Zufluss Randbedingung für diese Straße, vgl. Abb. 2.7. Dieser Anteil wird der Zelle am Eingang ${}^{off}q_{RB,in}$, zu jedem Zeitschritt, übergeben.

$${}^{off}q_{RB,in}^n = {}^k\gamma_{intersec}^n \cdot {}^kq_{intersec}^n \quad (2.22)$$

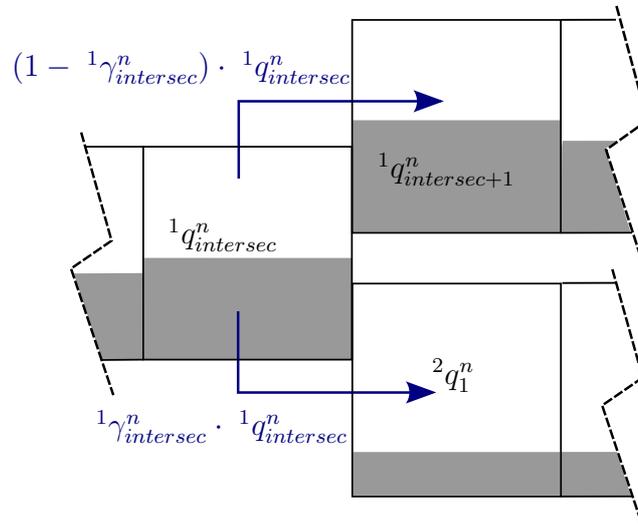


Abbildung 2.7: Aufteilung bei einer Abfahrt

Kapitel 3

Identifikation

Um eine Echtzeitsimulation durchführen zu können, wird das Fundamentaldiagramm parametrisiert, siehe Kapitel 3.1, und die Parameter mit den Messdaten von einem oder mehreren Sensoren ermittelt, siehe Kapitel 3.4. Die Fähigkeit das Fundamentaldiagramm vollständig reproduzieren zu können, wird von der Platzierung der Sensoren beeinflusst. Ungünstig platzierte Sensoren erlauben eventuell nicht die Beobachtung aller beschreibenden Parameter oder erfassen diese nur teilweise und mit unzureichender Genauigkeit. Ausreichend genau bestimmte Parameter stellen sicher, dass das Verkehrsmodell die Wirklichkeit zu jedem Zeitpunkt zufriedenstellend abbildet. Die *Identifizierbarkeit* eines Parameters beschreibt, ob er eindeutig aus den vorhandenen Messinformationen bestimmt werden kann. Durch verschiedene Testsituationen wird erkannt, ob das Ergebnis nicht-sensitiv auf bestimmte Parameter ist. Parameter, welche keinen Einfluss auf das Ergebnis haben, können durch diese Testsituation nicht identifiziert werden. Mathematisch wird dies durch die *Parametersensibilität* beschrieben, siehe Kapitel 3.2. Um beurteilen zu können, ob eine Sensorposition ausreichend Information für die Ermittlung aller Parameter liefert, wird die *Fisher Informationsmatrix* (FIM) verwendet, siehe Kapitel 3.3.

3.1 Modellparameter

Die Approximation des Fundamentaldiagramms wurde mit verschiedenen Funktionen getestet. Eine Näherung bestehend aus *drei linearen Bereichen*, vgl. Abb. 3.1, liefert sehr gute Ergebnisse und ermöglicht eine einfache Parametrierung bei verschiedenen Verkehrssituationen.

Die Parameter des Fundamentaldiagramms können, solange sie das FD vollständig beschreiben, willkürlich gewählt werden. In Abb.3.1 sind die gewählten Parameter ersichtlich.

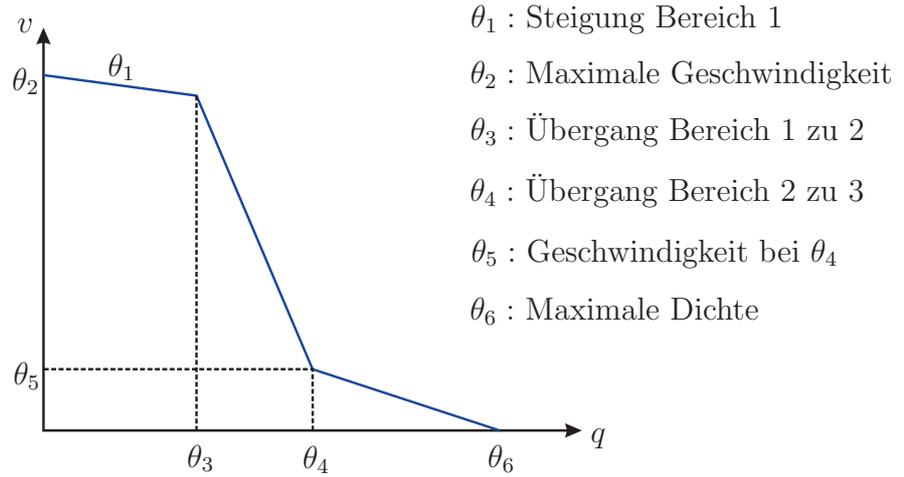


Abbildung 3.1: Parametrierung eines FD

Um den optimalen Vorrasschau-Faktor α , Gl. (2.3), ebenfalls schätzen zu können, wird für diesen Faktor ein weiterer Parameter θ_7 eingeführt. Die beschreibenden Parameter werden in einem $\boldsymbol{\theta}$ Vektor zusammengefasst.

$$\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4 \quad \theta_5 \quad \theta_6 \quad \theta_7]^T \quad (3.1)$$

Die dichteabhängige Geschwindigkeit ergibt sich anhand den drei linearen Bereichen zu:

$$v(q_i) = \begin{cases} \theta_1 q_i + \theta_2 & 0 \leq q_i \leq \theta_3 \\ \frac{(\theta_1 \theta_3 + \theta_2) - \theta_5}{\theta_3 - \theta_4} q_i + \theta_5 - \frac{(\theta_1 \theta_3 + \theta_2) - \theta_5}{\theta_3 - \theta_4} \theta_4 & \theta_3 \leq q_i \leq \theta_4 \\ \frac{\theta_5}{\theta_4 - \theta_6} q_i + \theta_5 - \frac{\theta_5}{\theta_4 - \theta_6} \theta_4 & \theta_4 \leq q_i \leq \theta_6 \\ 0 & \theta_6 \leq q_i \end{cases} \quad \text{für} \quad (3.2)$$

Bei leichtem Verkehr wird das Fahrverhalten von den Parametern des ersten Bereiches bestimmt, im Vergleich dazu werden bei einem Stau die Parameter des dritten Bereiches relevant.

Durch das Modifizieren der Parameterwerte lässt sich eine kurzfristige Änderung des Fundamentaldiagramms abhängig von der Verkehrslage, Wetter und weiteren Einflussfaktoren leicht realisieren. In Abb. 3.2 wird die Auswirkung einer Verringerung der Maximalgeschwindigkeit bzw. eine Spurreduktion im Fundamentaldiagramm dargestellt. Die Parameter des momentan gültigen $\tilde{\boldsymbol{\theta}}$ Vektors sind in rot dargestellt.

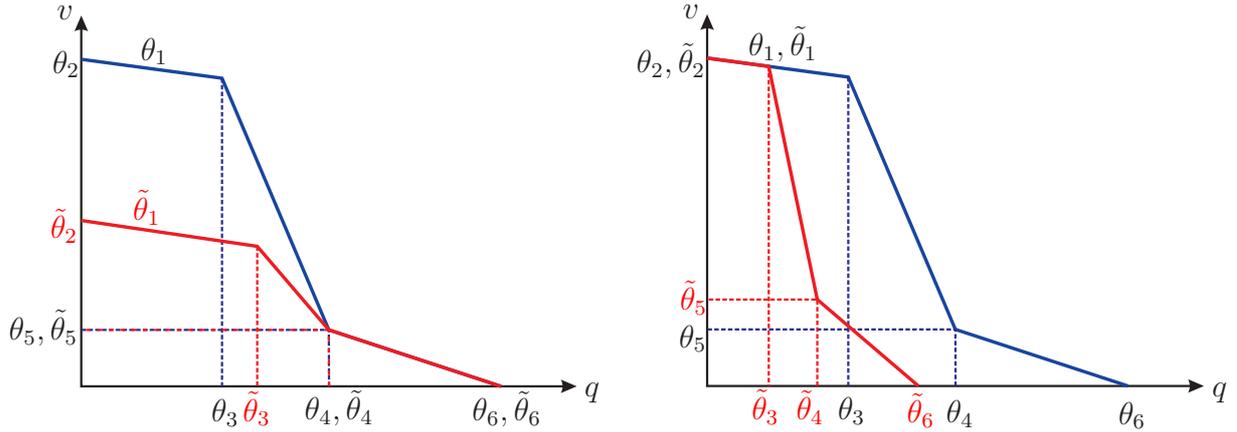


Abbildung 3.2: Parameteränderung bei einer Geschwindigkeits- bzw. Spurreduktion

Jede Zelle ${}^k i$ besitzt einen Parametervektor ${}^k \boldsymbol{\theta}_i$. Für ein effizientes Rechnen, werden Zellen mit gleicher Spurenanzahl und maximal erlaubter Geschwindigkeit zu Straßenabschnitten mit einem Parametervektor zusammengefasst.

3.2 Parametersensibilität

Die Grundidee der Parametersensibilität wird anhand der sogenannten *one-step-ahead prediction* gezeigt. Für die *Parametersensibilität* ${}^k \boldsymbol{\psi}_{i,AR}^n$ wird ein *auto regressives (AR)* Modell verwendet.

$${}^k \boldsymbol{\psi}_{i,AR}^n = \frac{\partial {}^k \hat{q}_i^n(\boldsymbol{\Theta}_i)}{\partial \boldsymbol{\Theta}_i} \quad (3.3)$$

Bei dem AR Modell wird der prädizierte Ausgang ${}^k \hat{q}_i^n$ durch eine begrenzte Anzahl von vorherigen, *gemessenen* Ausgängen ${}^k q^{n-1}$ definiert. Mit dem verwendeten drei Punkte Schema, vgl. Abb. 2.3, ergibt sich der prädizierte Ausgang ${}^k \hat{q}_i^n$ zu

$${}^k \hat{q}_i^n = f({}^k q_{i-1}^{n-1}, {}^k q_i^{n-1}, {}^k q_{i+1}^{n-1}, \boldsymbol{\Theta}_i) \quad (3.4)$$

mit $\boldsymbol{\Theta}_i$, den Parametervektoren aller beteiligten Zellen

$$\boldsymbol{\Theta}_i = \begin{bmatrix} {}^k \boldsymbol{\theta}_{i-1} & {}^k \boldsymbol{\theta}_i & {}^k \boldsymbol{\theta}_{i+1} \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

Bei komplexeren Strukturen mit mehreren ein- bzw. austretenden Flüssen, Gl. (2.8) und (2.9), erweitert sich Gleichung (3.4) mit dem entsprechenden, vorherigen Ausgängen und Gleichung (3.5) enthält die zusätzlichen Parametervektoren.

Für eine Straße mit nur einem Parametervektor ($\boldsymbol{\Theta}_i = {}^k \boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}$) führt die Parametersensibi-

lität $\psi_{i,AR}^n$, in Bezug auf Gl. (2.6), auf

$$\psi_{i,AR}^n = \frac{\partial \hat{q}_i^n(\boldsymbol{\theta})}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \frac{\partial q_i^{n-1}}{\partial \boldsymbol{\theta}} + \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\frac{\partial \Phi_{i-1}^{n-1}}{\partial \boldsymbol{\theta}} - \frac{\partial \Phi_i^{n-1}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right) = \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(q_{i-1}^{n-1} \frac{\partial v_{i-1}^{n-1}}{\partial \boldsymbol{\theta}} - q_i^{n-1} \frac{\partial v_i^{n-1}}{\partial \boldsymbol{\theta}} \right). \quad (3.6)$$

Wie aus Gl. (3.6) erkennbar ist, ergeben sich die partiellen Ableitungen der Geschwindigkeiten als einzige von $\boldsymbol{\theta}$ abhängige Variable. Parametriert ergibt sich die Geschwindigkeit v_i^n , Gl. (2.4), zu

$$v_i^n = \underbrace{(1 - \theta_7) v(\hat{q}_i^n, \boldsymbol{\theta})}_{v(i,1)} + \underbrace{\theta_7 v(\hat{q}_{i+1}^n, \boldsymbol{\theta})}_{v(i,2)}. \quad (3.7)$$

Die partiellen Ableitungen führen auf

$$\frac{\partial v_i^n}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial v(i,1)}{\partial \theta_1} \Big|_{\hat{q}_i^n} + \frac{\partial v(i,2)}{\partial \theta_1} \Big|_{\hat{q}_{i+1}^n} \right) \\ \vdots \\ \left(\frac{\partial v(i,1)}{\partial \theta_7} \Big|_{\hat{q}_i^n} + \frac{\partial v(i,2)}{\partial \theta_7} \Big|_{\hat{q}_{i+1}^n} \right) \end{bmatrix}. \quad (3.8)$$

Die partiellen Ableitungen ergeben sich, abhängig von den momentanen Dichten \hat{q}_i^n und \hat{q}_{i+1}^n , aus dem entsprechenden linearen Bereich des Fundamentaldiagramms, Gl. (3.2). In Abb. 3.3 ist die Dichte q über der Geschwindigkeit v und die Dichte q dreier benachbarter Zellen aufgetragen. Dadurch kann der aktive lineare Bereich des Fundamentaldiagramms für die einzelnen Zellen abgelesen werden. Für die Zelle $i - 1$ und die Zelle i die Ableitungen des zweiten linearen Bereiches relevant, für die Zelle $i + 1$ die Ableitungen des dritten linearen Bereiches.

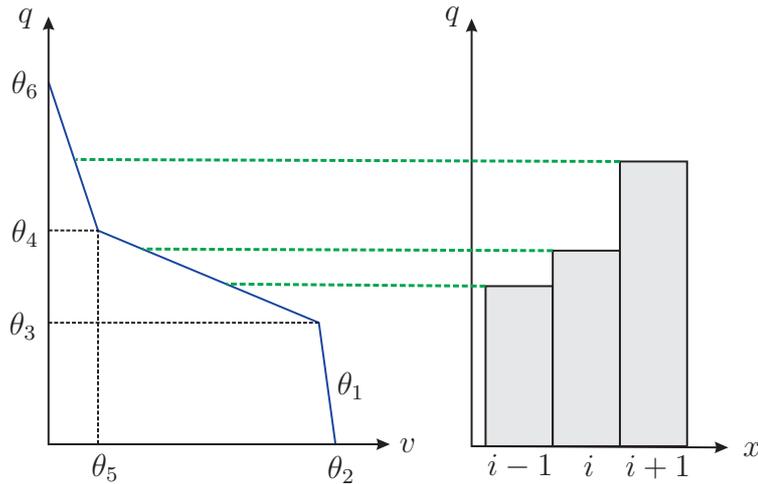


Abbildung 3.3: Aktive Bereiche des Fundamentaldiagramms

Die Verwendung des AR Modells setzt voraus, dass jeder neue Prädiktionsschritt mit einer exakten Lösung startet. Dynamische Auswirkungen von Θ_i , welche durch vorherige Modelausgänge verursacht werden, werden nicht berücksichtigt.

Verkehrsdaten werden jedoch nur an bestimmten Positionen gemessen, wodurch eine exakte Lösung des vorherigen Schrittes nicht verfügbar ist. Diese Tatsache führt auf die sogenannte *output error (OE)* Konfiguration, [14], welche die *totalen Ableitungen* des Modellausgangs nach den Modellparametern beinhaltet.

Gleichung (3.4) ergibt sich mit den bekannten Modellausgängen zu

$${}^k \hat{q}_i^n = f({}^k \hat{q}_{i-1}^{n-1}, {}^k \hat{q}_i^{n-1}, {}^k \hat{q}_{i+1}^{n-1}, \Theta), \quad (3.9)$$

wobei Θ die Parametervektoren aller Straßen K beinhaltet

$$\Theta = \left[{}^1 \theta_1 \quad \dots \quad {}^1 \theta_I \quad \dots \quad {}^K \theta_1 \quad \dots \quad {}^K \theta_I \right]. \quad (3.10)$$

Mit dem Regressor-Vektor ${}^k \mathbf{x}_i^n(\Theta)$

$${}^k \mathbf{x}_i^n(\Theta) = \left[{}^k \hat{q}_{i-1}^{n-1} \quad {}^k \hat{q}_i^{n-1} \quad {}^k \hat{q}_{i+1}^{n-1} \right]^T \quad (3.11)$$

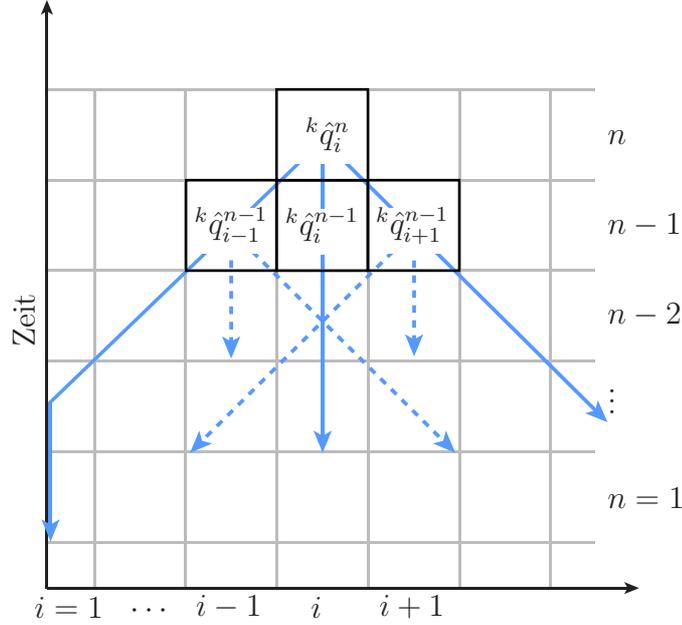
und ${}^k \hat{\psi}_i^n$, dem in Bezug auf Gl. (2.6), definierten Term

$${}^k \hat{\psi}_i^n = \frac{\partial {}^k \hat{q}_i^n(\Theta)}{\partial \Theta} = \frac{\partial \hat{q}_i^n(\Theta)}{\partial \Theta} = \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(\hat{q}_{i-1}^{n-1} \frac{\partial v_{i-1}^{n-1}}{\partial \Theta} - \hat{q}_i^{n-1} \frac{\partial v_i^{n-1}}{\partial \Theta} \right) \quad (3.12)$$

ergibt sich der Sensibilitätsparameter ${}^k \psi_{i,OE}^n$ zu

$$\begin{aligned} {}^k \psi_{i,OE}^n &= \frac{d {}^k \hat{q}_i^n(\Theta)}{d \Theta} = \underbrace{\frac{\partial {}^k \hat{q}_i^n(\Theta)}{\partial \Theta}}_{{}^k \hat{\psi}_i^n} + \frac{\partial {}^k \hat{q}_i^n(\Theta)}{\partial {}^k \mathbf{x}_i^n(\Theta)} \left(\frac{d {}^k \mathbf{x}_i^n(\Theta)}{d \Theta} \right)^T \\ &= {}^k \hat{\psi}_i^n + \frac{\partial {}^k \hat{q}_i^n(\Theta)}{\partial {}^k \mathbf{x}_i^n(\Theta)} \left(\frac{d \left[{}^k \hat{q}_{i-1}^{n-1} \quad {}^k \hat{q}_i^{n-1} \quad {}^k \hat{q}_{i+1}^{n-1} \right]^T}{d \Theta} \right)^T \\ &= {}^k \hat{\psi}_i^n + \frac{\partial {}^k \hat{q}_i^n(\Theta)}{\partial {}^k \mathbf{x}_i^n(\Theta)} \left[{}^k \psi_{i-1,OE}^{n-1} \quad {}^k \psi_{i,OE}^{n-1} \quad {}^k \psi_{i+1,OE}^{n-1} \right]^T. \end{aligned} \quad (3.13)$$

Durch die Rekursivität der OE Konfiguration, ersichtlich in Gl. (3.13), werden die Modellausgänge \hat{q} der vorherigen Zeitschritte mitberücksichtigt. Abb. 3.4 zeigt das rekursive Verhalten. Die Dichte ${}^k \hat{q}_i^n$ ergibt sich aus den Dichten der benachbarten Zellen zum Zeitschritt $n - 1$, welche sich wiederum aus dem vorherigen Zeitschritt $n - 2$ ergeben. Diese Fortpflanzung wird anhand der blauen Pfeile verdeutlicht.

Abbildung 3.4: Einflussbereich von ${}^k\theta_i$ bei einem drei Punkte Schema

Bei der Initialisierung ($n = 0$) wird eine, von Θ unabhängige, Lösung vorgegeben. Die totale Ableitung der Initialisierung ist definiert durch

$$\frac{d {}^k\hat{q}_i^n(\Theta)}{d\Theta} \stackrel{!}{=} 0, \quad \text{für } n = 1 \quad \forall i \in \mathcal{D} \quad (3.14)$$

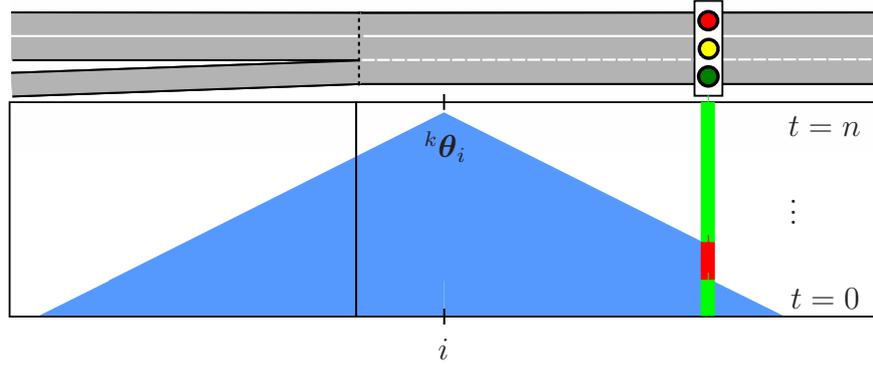
und bewirkt eine Unterbrechung des Informationsflusses. Der Informationsfluss wird, durch die vordefinierte Zuflussbedingung, am linken Rand ebenfalls unterbrochen. In Abb. 3.4 wird dies durch den senkrechten blauen Pfeil dargestellt. Die totale Ableitung der Zelle mit Zufluss Randbedingungen ergeben sich zu

$$\frac{d {}^k\hat{q}_{RB,in}^n(\Theta)}{d\Theta} \stackrel{!}{=} 0, \quad \text{falls } {}^k\hat{q}_{RB,in}^n = {}^kq_{data}^n. \quad (3.15)$$

Durch die Kopplung zweier Straßen verbreitet sich der Informationsfluss über die Straßenecken. Im Falle einer Ampel wird während der roten Phasen der Zufluss gestoppt, Gl. (2.14), wodurch auch der Informationsfluss unterbrochen wird.

$$\frac{d {}^k\hat{q}_{RB,out}^n(\Theta)}{d\Theta} \stackrel{!}{=} 0, \quad \text{falls } {}^k\hat{q}_{RB,out}^n = {}^kq_{I,max}^n \quad (3.16)$$

In Abb. 3.5 wird eine komplexe Straßensituation dargestellt. Der Bereich, welcher den Parametervektor ${}^k\theta_i$ der Zelle i beeinflusst, ist in blau dargestellt. Während der Rotphase der Ampel, wird der Einfluss unterbrochen, Gl. (3.16). Beim Erreichen des Startzeitpunktes ($t = 0$) wird der Einfluss gestoppt, Gl. (3.14).

Abbildung 3.5: Einflussbereich von ${}^k\theta_i$

3.3 Identifizierbarkeit und Design of Experiments

Die Fisher Informationsmatrix beschreibt den Informationsgehalt der Messdaten, wodurch eine Aussage über die Qualität der Messposition gemacht werden kann. *Design of Experiments* (DoE) hat zum Ziel, die Platzierung von Sensoren derart zu optimieren, dass aus den gewonnenen Daten ein Verkehrsmodell möglichst sicher parametrisiert werden kann.

In der Literatur wird die FIM \mathcal{I} basierend auf ${}^k\psi_{i,AR}^n$ verwendet, [15]. Wie bereits in Kapitel 3.2 beschrieben wird, berücksichtigt diese Definition keine dynamischen Einflüsse, welche durch die vorherigen Modellausgänge verursacht werden, weshalb in dieser Arbeit die FIM in der OE Konfiguration \mathcal{I}_{OE} basierend auf ${}^k\psi_{i,OE}^n$ verwendet wird.

Die Fisher Informationsmatrix ergibt sich zu

$$\mathcal{I}_{OE} = \frac{1}{\sigma_X^2} \sum_{k,i,n} \left(\underbrace{\frac{d {}^k\hat{q}_i^n(\Theta)}{d\Theta}}_{{}^k\psi_{i,OE}^n} \right)^T \left(\frac{d {}^k\hat{q}_i^n(\Theta)}{d\Theta} \right) \quad (3.17)$$

mit σ_X^2 , als die Varianz der Parameter. Die FIM ist eine quadratische Matrix, deren Dimension der Anzahl der Parameter entspricht.

Für die Optimierung der FIM wird ein skalares Kriterium, welches den kleinsten Singulärwert maximiert, verwendet.

$$J_S = \sigma_{\min}(\mathcal{I}_{OE}) \quad (3.18)$$

Eine *Singulärwertzerlegung* von \mathcal{I}_{OE} ermöglicht eine Beurteilung der Sensibilität des Modellausgangs auf die einzelnen Parameter. Die Singulärwertzerlegung ist definiert als

$$\mathcal{I}_{OE} = U\Sigma V^* \quad (3.19)$$

mit der orthogonalen Matrix \mathbf{U} und der zur orthogonalen Matrix \mathbf{V} adjungierten Matrix \mathbf{V}^* . Die Matrix $\mathbf{\Sigma}$ ist eine Diagonalmatrix mit folgender Struktur

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \sigma_r \end{pmatrix}, \text{ wobei } \sigma_1 \geq \dots \geq \sigma_r \geq 0. \quad (3.20)$$

Die Zahlen σ_i ($i = 1, \dots, r$) nennt man die Singulärwerte von \mathcal{I}_{OE} . Die Spalten von \mathbf{U} bzw. \mathbf{V}^* sind die linken bzw. rechten Singulärvektoren des zugehörigen Singulärwertes.

Die Singulärwerte σ_i in $\mathbf{\Sigma}$ können als Maß für die Identifizierbarkeit der Parameter interpretiert werden. Der dazugehörige rechte Singulärvektor \mathbf{v}_i bringt eine durch den Vektor dargestellte Richtung im Parameterraum in Beziehung mit dem zugehörigen Singulärwert und definiert damit die Sensibilität des Modells gegenüber dieser parametrisierten Richtung. Ein Singulärwert $\sigma_i = 0$ weist auf einen nicht-identifizierbaren Parameter hin. Durch den dazugehörigen rechten Singulärvektor \mathbf{v}_i wird erkennbar, welcher Parameter nicht identifizierbar ist und dadurch auch keinen Einfluss auf das Simulationsergebnis hat. Desweiteren kann aus dem rechten Singulärvektor des größten Singulärwertes abgelesen werden, welcher Parameter das Simulationsergebnis am stärksten beeinflusst. Durch die Singulärwertzerlegung wird erkennbar, welche Messstellen genügend Information liefern um ein Fundamentaldiagramm zufriedenstellend parametrieren zu können. Im Kapitel 4.6 wird dies anhand eines Beispiels näher erläutert.

Es ist anzumerken, dass das Ergebnis der FIM von der jeweiligen Simulation abhängt. Unter Kenntnis des Verkehrsaufkommens und der gegebenen Randbedingungen wird ein Auffinden der optimalen Sensorposition ermöglicht. In der Realität wird dies nur selten der Fall sein, eine intelligente Platzierung der Sensoren beruht auf Vermutungen von vermeintlich kritischen Stellen, welche genügend relevante Daten liefert, um alle Parameter sicher identifizieren zu können.

3.4 Parameteridentifikation

Um die Parameter zu identifizieren, wird ein Optimierungsproblem definiert. Mit einem festgelegten *Optimierungsziel*, einer *Fitnessfunktion*, einem definierten *System (Modell)*, *Entscheidungsvariablen* und einzuhaltende *Beschränkungen* und *Bedingungen* wird eine optimale Lösung des Optimierungsproblems gesucht.

Die Aufgabe des implementierten Optimierungsproblems liegt darin, die Parameter des Verkehrsmodells adaptiv zu schätzen. Die Fähigkeit Optimierungen dieser Art durchführen zu

können ermöglicht das aktuelle Verkehrsgeschehen zu beobachten und das vorübergehend gültige Fundamentaldiagramm zu bestimmen. Als Referenzwert werden Verkehrsdaten aus VISSIM verwendet. Ein *genetischer Algorithmus* (GA) variiert in einer Reihe von Einzelsimulationen den Parametervektor θ und versucht im Laufe mehrerer Generationen eine Fitnessfunktion zu optimieren. Die Fitnessfunktion, Gl. (3.21), hat zum Ziel, den Fehler zwischen den Referenzwerten und der Modellsimulation zu minimieren.

Wie bereits in Kapitel 3.3 erwähnt, spielt die korrekte Platzierung der Messsensoren eine wichtige Rolle. Werden Messdaten in einem Abschnitt erfasst, an welchem der Verkehr immer frei fließt haben nur die Parameter, welche den betreffenden Teil des Fundamentaldiagramms beschreiben einen Einfluss auf die Fehlerfunktion. Im Fundamentaldiagramm, Abb. 3.1, entspricht dies dem ersten linearen Bereich, welcher durch die Parameter θ_1 und θ_2 definiert ist. Umgekehrt, wird ausschließlich vor einer roten Ampel gemessen, wird primär der dritte lineare Bereich des Fundamentaldiagramms, und damit θ_4 , θ_5 und θ_6 Auswirkungen auf die Fehlerfunktion haben. Wie aus diesen Beispielen hervorgeht, können nur jene Parameter beobachtet und damit bestimmt werden, welche an dem Messpunkt vorkommen.

In Abb. 3.6 sind die Dichten q zweier Messpositionen über die Zeit t aufgetragen. Um den dazugehörigen linearen Bereich einfach bestimmen zu können, ist noch zusätzlich die Dichte q über die Geschwindigkeit v aufgetragen. Durch den freien Verkehr an der Messstelle 1 können nur die Parameter des ersten Bereiches identifiziert werden, das Fundamentaldiagramm kann daher nicht vollständig reproduziert werden. Im Gegensatz dazu weist die zweite Messstelle im Laufe der Zeit einen Dichteverlauf auf, mit dem alle Bereiche des Fundamentaldiagramms bestimmt werden können.

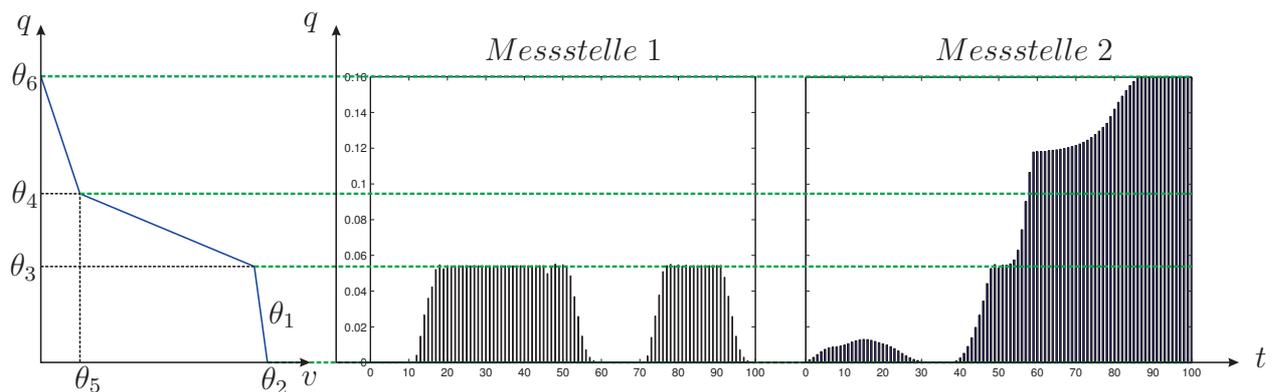


Abbildung 3.6: Einfluss der Platzierung einer Messstelle

3.4.1 Optimierungsproblem

Im Straßenverkehr sind nur eine begrenzte Anzahl von Sensoren, welche die aktuelle Situation an einem bestimmten Ort wiedergeben, verfügbar. Aus diesem Grund werden bei der

Optimierung die Referenzwerte von nur einer Position pro Straßenabschnitt verwendet, um das Fundamentaldiagramm zu ermittelt.

Als *Fitnessfunktion* für den genetischen Alogrithmus wird eine *Fehlerfunktion* definiert, welche die Differenz über alle Zeiten zwischen den Referenzwerten ${}^k\mathbf{q}_{j,s}$ aus VISSIM und den Simulationenwerten ${}^k\hat{\mathbf{q}}_{j,s}$ minimiert.

$$J_{OE} = \sum_{s,k,n} \left\| \frac{({}^k\hat{q}_{j,s}^n - {}^kq_{j,s}^n)}{\max({}^k\mathbf{q}_{j,s})} \right\|_2^2 \quad (3.21)$$

Die Sensorposition wird mit j und der Sensorindex mit s bezeichnet. Bei mehreren Sensoren, führt die Normierung des Fehlers J_{OE} zu einer gleichwertigen Priorität der Sensoren. Somit wird sichergestellt, dass Sensoren mit niedrigen Messwerten, die Fehlerfunktion in äquivalenter Weise beeinflussen wie Sensoren mit sehr hohen Messwerten.

Das *Optimierungsziel* ist den Fehler J_{OE} , Gl. (3.21), zu minimieren. Durch Variieren des Entscheidungsvektors $\boldsymbol{\theta}$, unter Berücksichtigung einzuhaltender Beschränkungen, Gl. (3.22), und Bedingungen, Gl. (3.23), wird $\boldsymbol{\theta}$ an den optimalen Wert $\boldsymbol{\theta}^*$ angenähert.

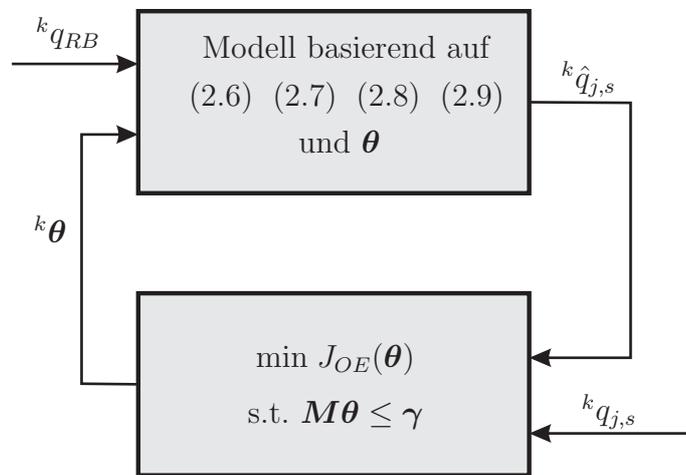


Abbildung 3.7: Optimierungsschema

Der generelle Ablauf ist in Abb. 3.7 dargestellt. Das Lösungsmodell aus Kapitel 2 repräsentiert das System, welches mit den Randbedingungen ${}^kq_{RB}$ und dem ${}^k\boldsymbol{\theta}$ Vektor den Dichteverlauf ${}^k\hat{\mathbf{Q}}$ des gesamten Lösungsbereiches über alle Zeitschritte ermittelt und die Simulationenwerte an den definierten Messstellen ${}^k\hat{\mathbf{q}}_{j,s}$ der Optimierung übergibt. Mit Hilfe der Fehlerfunktion J_{OE} , Gl. (3.21), wird der ${}^k\boldsymbol{\theta}$ Vektor bewertet und ein veränderter ${}^k\boldsymbol{\theta}$ Vektor für den nächsten Durchlauf an das System zurückgegeben. Dieser Zyklus wird iterativ wiederholt, bis eine Abbruchbedingung erfüllt ist.

Als *Abbruchbedingung* bietet sich das Erreichen der Zielfunktion, bzw. ein Erreichen in hinreichender Nähe der Zielfunktion an, ausserdem soll der GA die Optimierung, falls er sich dem Optimum nicht schnell genug nähert, nach einer maximalen Anzahl von Generationen stoppen.

Der *Entscheidungsvektor* θ ist die einzige Möglichkeit das Simulationsergebnis zu beeinflussen. Er unterliegt einigen Beschränkungen und Bedingungen, welche durch den GA nicht verletzt werden dürfen. Die *Beschränkungen* definieren den möglichen Wertebereich der einzelnen θ Werte und werden als Unter- (UG) und Obergrenze (OG) von dem GA berücksichtigt.

$$UG \leq \theta \leq OG \quad (3.22)$$

Um sicherzustellen, dass die Dichte am Ende des ersten Bereiches θ_3 einen kleineren Wert aufweist, als die Dichte am Ende des zweiten Bereiches θ_4 und dieser Wert wiederum kleiner als $q_{max} = \theta_6$ ist, müssen zusätzlich noch folgende *Bedingungen* erfüllt werden

$$\theta_3 < \theta_4 < \theta_6. \quad (3.23)$$

Als Startwert für den GA dient ein willkürlich initialisierter θ Vektor, welcher die Beschränkungen und Bedingungen nicht verletzt.

Kapitel 4

Modellvalidierung

Um die Funktionalität des entwickelten Lölers zu testen, werden verschiedene Verkehrssituationen simuliert. Es werden Beispiele präsentiert, welche kritische Szenarien mit Unstetigkeiten aufweisen, bei denen die Komplexität der Modellsimulation deutlich wird. Für die Simulation werden die notwendigen Anfangs- und Randbedingungen gesetzt. Bei einer Auffahrt bzw. Abfahrt werden die Beispiele dementsprechend erweitert. Anschließend wird mit einem genetischen Algorithmus der optimale θ Vektor generiert. Die Ergebnisse werden mit der mikroskopischen *Verkehrsfluss-Simulationssoftware VISSIM* verglichen.

4.1 Überblick der Beispiele

Zu Beginn wird die korrekte Rückstauung und Auflösung bei einer Ampel dargestellt, siehe Beispiel 4.2. Daraufhin wird ein zeitvariables Fundamentaldiagramm präsentiert, bei dem ersichtlich wird, dass die Simulation auf kurzfristige Änderungen, wie beispielsweise einer Spurverringung und/oder einer Geschwindigkeitsminimierung reagieren kann, Beispiel 4.3. Straßennetzwerke verlangen das korrekte Vereinen unterschiedlicher Fundamentaldiagramme. In Beispiel 4.4 und 4.5 werden dafür zwei komplexe Straßenkonfigurationen präsentiert.

Die Beispiele werden in folgende Unterpunkte gegliedert

1. Demonstration
2. Anfangs- und Randbedingungen
3. Parameteridentifikation
4. Ergebnisse

Unter dem Punkt Demonstration wird die Straßenkonfiguration beschrieben und anhand einer Grafik erläutert. Die Straßelängen, die maximalen Geschwindigkeiten, als auch die

Messpositionen (magenta farbige Linien) sind darin eingezeichnet. Beim Vorhandensein einer Ampel wird auch diese dargestellt. Anschließend werden die gewählten Anfangs- und Randbedingungen festgelegt. Bei dem Punkt Parameteridentifikation wird zuerst auf die Konfigurationen des genetischen Algorithmus eingegangen und anschließend der optimierte θ Vektor ersichtlich. Das daraus resultierende Fundamentaldiagramm wird in einer Abbildung dargestellt. Bei den Ergebnissen wird ein Überblick über den kompletten Straßenverlauf dargestellt. Dafür wird ein farbiger Dichteverlauf über alle Zellen und Zeiten sowohl für die VISSIM Werte Q als auch für das Simulationsergebnis \hat{Q} verwendet. Die für den GA zur Verfügung stehenden Sensorpositionen werden in den VISSIM Darstellungen anhand vertikaler magenta farbiger Linien abgebildet. Bei dem Simulationsergebnis dienen rote horizontale Linien als definierende Zeitpunkte, welche in einem weiteren Plot dargestellt werden. Dieser zusätzliche Plot zeigt den Dichteverlauf der gesamten Straße. Der Dichteverlauf der Simulation wird in dunkelblau abgebildet. Zum direkten Vergleich wird der Verlauf von VISSIM, in hellblau, ebenfalls dargestellt. Dadurch ist eine mögliche Abweichung der beiden Lösungen, zu den bestimmten Zeitpunkten, sehr gut erkennbar.

In den nachfolgenden Beispielen wird deutlich, dass die Parameterschätzung durch den GA den Verkehr sehr gut wiedergeben kann. Jedoch muss angemerkt werden, dass die Kenntnis über den kompletten Dichteverlauf Q durch VISSIM gegeben und notwendig war um eine optimale Messposition für das jeweilige Szenario wählen zu können.

4.2 Einspurige Straße mit Ampelregelung

1) Demonstration

Bei diesem Beispiel wird eine Ampelsituation nachgebildet. Es werden zwei Straßen mit jeweils einer Länge von $2500m$ dargestellt. Die maximale Geschwindigkeit auf den beiden Straßen beträgt $50km/h$. Um einen Rückstau zu generieren, ist die Ampel im Zeitintervall $0sec < t < 300sec$ auf rot gestellt. Für $300sec < t < 500sec$ wechselt die Ampel auf grün, wodurch auch die Kolonnenauflösung simuliert wird.

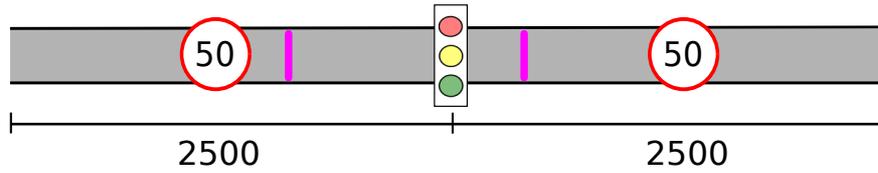


Abbildung 4.1: Straße mit einer Ampel

2) Anfangs- und Randbedingungen

Als Anfangsbedingung wird eine leere Straße angenommen. Um die Ergebnisse von VISSIM und der Simulation vergleichen zu können muss die Simulation die gleichen Eingangsdichten wie VISSIM verwenden. Deshalb wird als linke Randbedingung die Zufluss Randbedingung, Gl. (2.13), verwendet. Am rechten Rand werden die absorbierenden Randbedingungen, Gl. (2.11), benötigt. Die Verknüpfung zwischen den beiden Straßen wird je nach Ampelschaltung definiert. Bei rot werden die Gleichungen (2.12) und (2.14) verwendet, bei grün die Gleichungen (2.11) und (2.15).

3) Parameteridentifikation

Für die Identifikation der Parameter wird ein genetischer Algorithmus, beschrieben in Kapitel 3.4.1, mit nachfolgenden Merkmalen verwendet. Der GA erhält die Messdaten von zwei Positionen. Die erste Messstelle (bei $1750m$) wurde vor die Ampel platziert, die zweite Messstelle (bei $3000m$) nach der Ampel, siehe Abb. 4.3.

Mit der Unter- und Obergrenze der Beschränkungen für die θ Werte, Gleichung (3.22),

$$UG = [-20 \quad 8 \quad 0.02 \quad 0.06 \quad 0 \quad 0.07 \quad 0]^T \quad (4.1)$$

$$OG = [0 \quad 15 \quad 0.06 \quad 0.14 \quad 5 \quad 0.17 \quad 0.99]^T \quad (4.2)$$

und den weiteren Bedingungen, Gleichung (3.23),

$$\theta_3 \leq 0.9\theta_4 \quad (4.3)$$

$$\theta_4 \leq 0.9\theta_6 \quad (4.4)$$

ergibt sich mit 40 Populationen und 40 Generationen der θ Vektor für das Fundamentaldiagramm zu

$$\theta = \left[-5.2874 \quad 14.1224 \quad 0.0490 \quad 0.0720 \quad 2.7739 \quad 0.1450 \quad 0.477 \right]^T. \quad (4.5)$$

Das Fundamentaldiagramm ist in Abb. 4.2 ersichtlich. Die verfügbaren VISSIM Werte der Messstellen sind als Kreuze in Abb. 4.2 eingetragen. Nach der Ampel herrscht durchgehend freier Verkehr, siehe Abb. 4.3, wodurch alle Werte der zweiten Messstelle (cyan farbige Daten) im ersten linearen Bereich liegen, die Messstelle vor der Ampel (rote Werte) deckt den kompletten Dichtebereich ab.

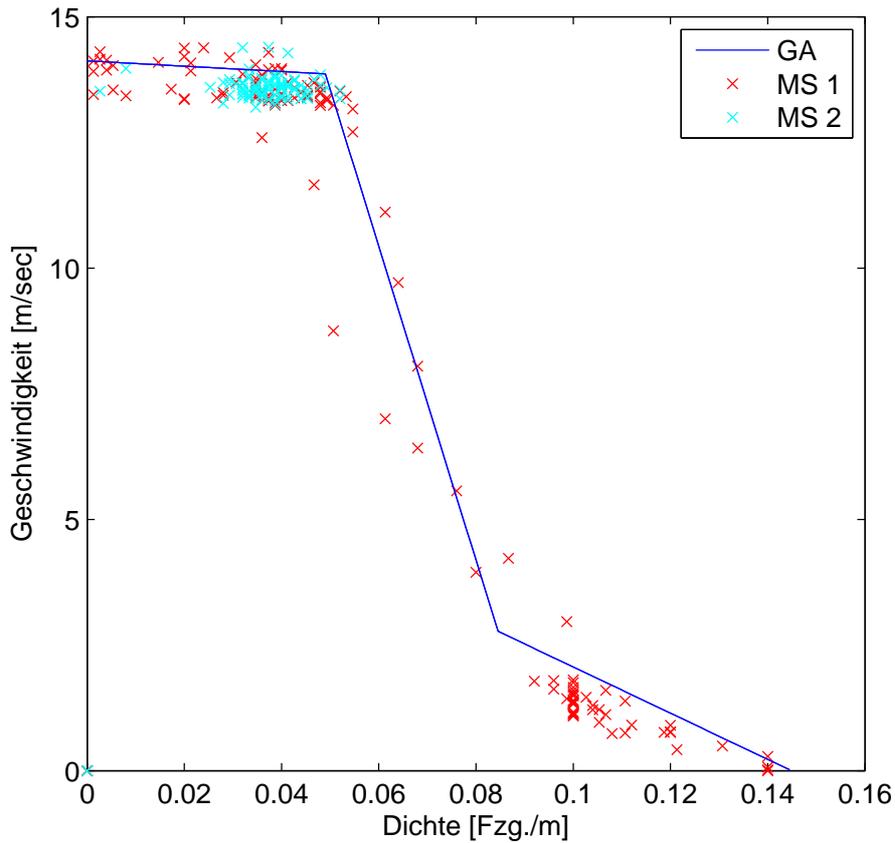


Abbildung 4.2: Fundamentaldiagramm

4) Ergebnisse

Der Dichteverlauf von den VISSIM Daten wird in Abb. 4.3 und der Dichteverlauf der Simulation in Abb. 4.4 dargestellt. In Abb. 4.5 wird der Vergleich der Dichte zu bestimmten Zeitpunkten abgebildet.

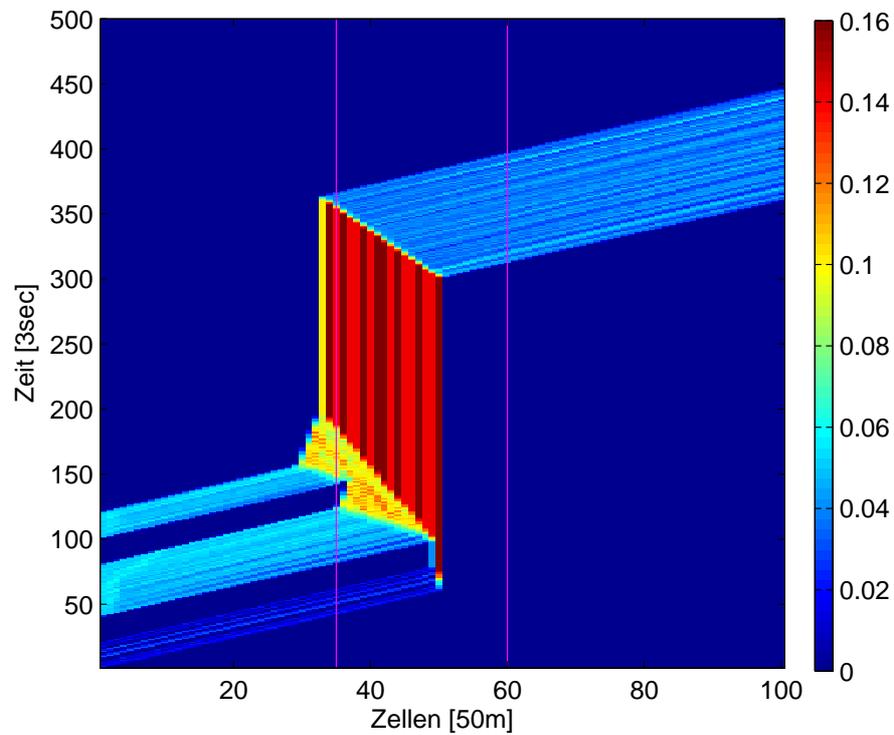


Abbildung 4.3: VISSIM Werte Q mit eingezeichneten Messpositionen

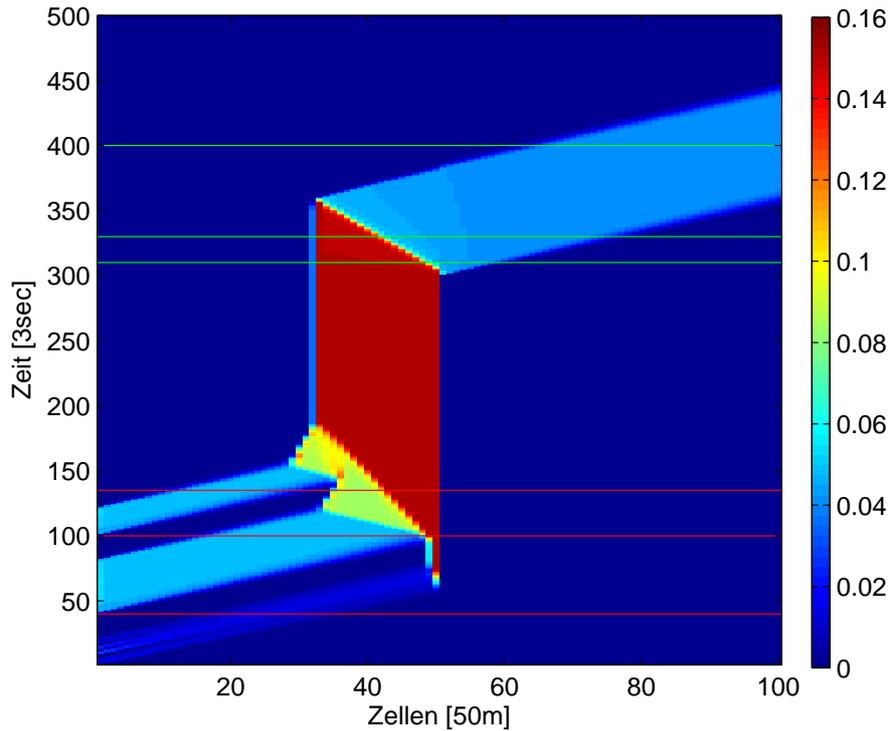


Abbildung 4.4: Simulation \hat{Q} mit eingezeichneten Zeitschnitten

Anhand der Abszisse erkennt man die korrekte Rückstauung über die Zellen, die Ordinate verdeutlicht den zeitlich Verlauf der Staubildung und Auflösung der Fahrzeuge. In Abb. 4.3 variiert die maximale Dichte von Q zwischen zwei Werten. Die erste Messstelle, welche für die Identifikation der maximalen Dichte maßgeblich ist, liegt in einer Zelle mit dem niedrigeren Wert, wodurch der GA diesen Wert als θ_6 Wert findet.

In Abb. 4.5 wird das Aufstauen vor der roten Ampel und das Auflösen der Kolonne bei einem grünen Ampelsignal ersichtlich.

Zum Zeitpunkt $t = 135sec$ erkennt man die geringere Dichte der Simulation gegenüber VISSIM. Dies liegt an der Übergangsposition vom zweiten zum dritten linearen Bereich, Parameter θ_4 , des Fundamentaldiagramms. Die Simulation weist hier eine geringere Geschwindigkeit als VISSIM auf, wodurch weniger Fahrzeuge über die Zellgrenzen transportiert werden. In Abb. 4.4 wird dies, in der Nähe der Zelle 40 zum Zeitpunkt $t = 135sec$ erkennbar. Der Dichtewert von der Simulation ist etwas geringer als der Dichtewert von VISSIM.

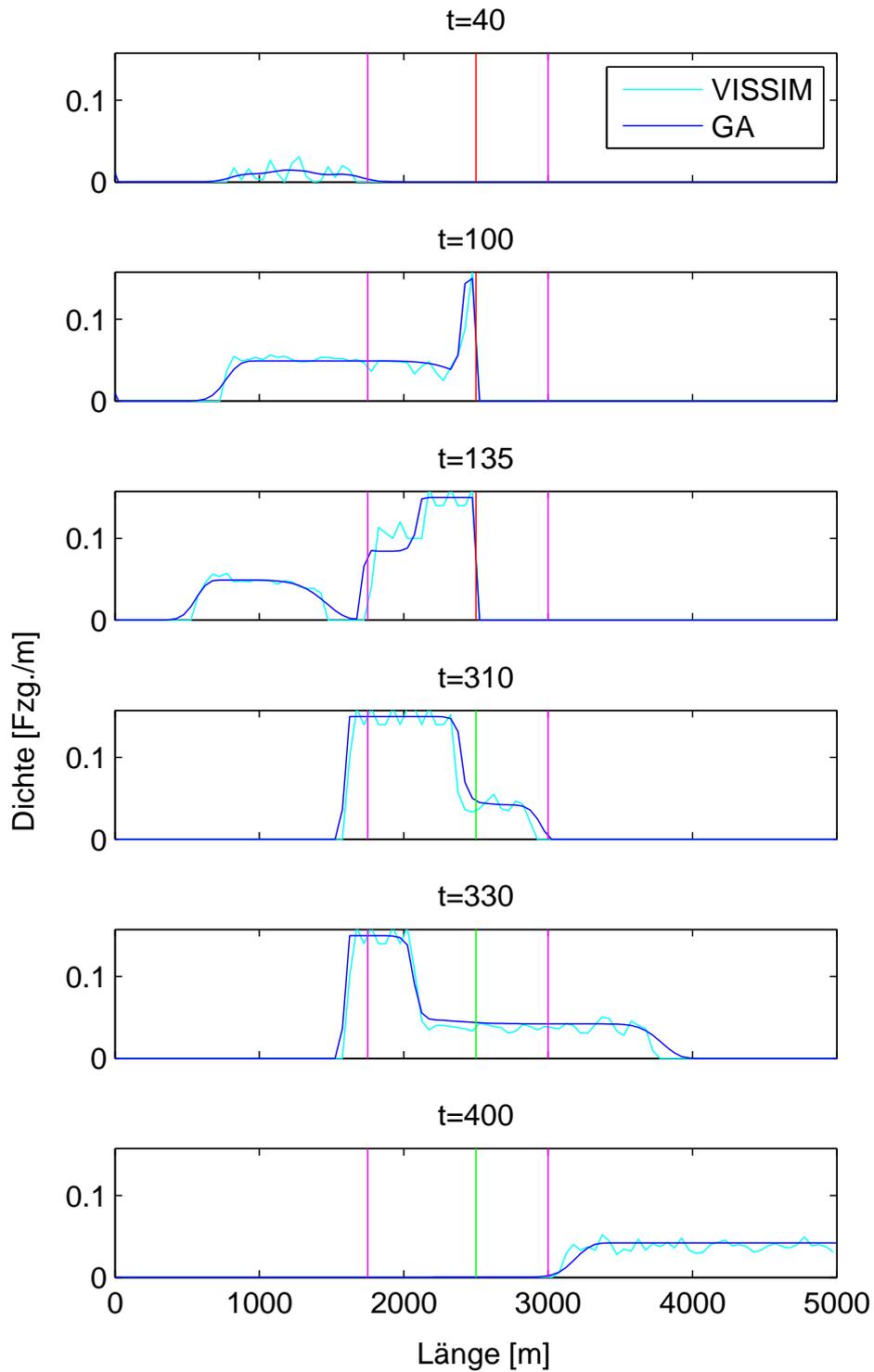


Abbildung 4.5: Dichteverlauf zu bestimmten Zeitpunkten

4.3 Straßenverengung mit Geschwindigkeitsreduktion

1) Demonstration

Im nachfolgenden Beispiel wird eine Straßenverengung mit zusätzlicher Geschwindigkeitsreduktion implementiert. Ausgangslage ist eine $5000m$ lange, zweispurige Straße mit einer maximalen Geschwindigkeit von $50km/h$. Für den Zeitraum von $400sec < t < 750sec$ wird im Bereich von $2500m$ bis $3000m$ eine Fahrspur gesperrt und eine zusätzliche Geschwindigkeitsreduktion auf $25km/h$ realisiert.

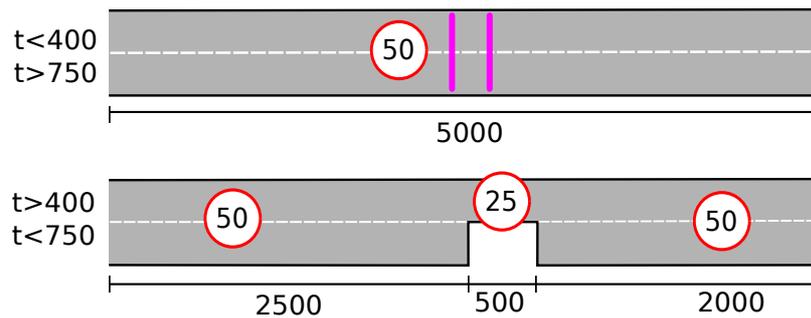


Abbildung 4.6: Kurzzzeitige Straßenverengung

2) Anfangs- und Randbedingungen

Als Anfangsbedingung wird eine leere Straße angenommen. Um die Ergebnisse von VISSIM und der Simulation vergleichen zu können muss die Simulation die gleichen Eingangsdichten wie VISSIM verwenden. Deshalb wird als linke Randbedingung die Zufluss Randbedingung, Gl. (2.13), verwendet. Am rechten Rand werden die absorbierenden Randbedingungen, Gl. (2.11), benötigt.

3) Parameteridentifikation

Für die Identifikation der Parameter werden zwei genetische Algorithmen verwendet. Ein GA versucht anhand der ersten Messstelle (bei $2450m$) das Fundamentaldiagramm der Straße zu bestimmen. Der zweite GA verwendet die zweite Messstelle (bei $2600m$), welche sich in dem Bereich des variierenden Fundamentaldiagramms befindet. Dieser GA bekommt nur die Messdaten in dem Zeitbereich $400sec < t < 500sec$, wodurch das zeitvariierende Fundamentaldiagramm gefunden werden kann. Für die Unterscheidung der beiden Resultate wird eine vorangehende tiefgestellte Nummerierung eingeführt. Beide Messstellen sind in Abb. 4.8 ersichtlich.

Für den ersten GA werden folgende Einstellungen vorgenommen:

Unter- und Obergrenze der Beschränkungen für die ${}_1\boldsymbol{\theta}$ Werte, Gleichung (3.22),

$${}_1\mathbf{UG} = \begin{bmatrix} -20 & 8 & 0.02 & 0.06 & 0 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.6)$$

$${}_1\mathbf{OG} = \begin{bmatrix} 0 & 15 & 0.06 & 0.14 & 5 & 0.5 & 0.99 \end{bmatrix}^T \quad (4.7)$$

und den weiteren Bedingungen, Gleichung (3.23),

$${}_1\theta_3 \leq 0.9 \, {}_1\theta_4 \quad (4.8)$$

$${}_1\theta_4 \leq 0.9 \, {}_1\theta_6 \quad (4.9)$$

ergibt sich mit 40 Populationen und 40 Generationen der ${}_1\boldsymbol{\theta}$ Vektor für das Fundamentaldiagramm zu

$${}_1\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} -5.5390 & 14.0628 & 0.0799 & 0.1167 & 0.6228 & 0.2956 & 0.492 \end{bmatrix}^T. \quad (4.10)$$

Für den zweiten GA werden folgende Einstellungen vorgenommen:

Unter- und Obergrenze der Beschränkungen für die ${}_2\boldsymbol{\theta}$ Werte, Gleichung (3.22),

$${}_2\mathbf{UG} = \begin{bmatrix} -20 & 8 & 0.04 & 0.08 & 0 & 0.07 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.11)$$

$${}_2\mathbf{OG} = \begin{bmatrix} 0 & 15 & 0.09 & 0.2 & 5 & 0.17 & 0.99 \end{bmatrix}^T \quad (4.12)$$

und den weiteren Bedingungen, Gleichung (3.23),

$${}_2\theta_3 \leq 0.9 \, {}_2\theta_4 \quad (4.13)$$

$${}_2\theta_4 \leq 0.9 \, {}_2\theta_6 \quad (4.14)$$

ergibt sich mit 40 Populationen und 40 Generationen der ${}_2\boldsymbol{\theta}$ Vektor für das Fundamentaldiagramm zu

$${}_2\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} -7.1974 & 8.8033 & 0.0502 & 0.0871 & 2.5047 & 0.1529 & 0.475 \end{bmatrix}^T. \quad (4.15)$$

Die Fundamentaldiagramme sind in Abb. 4.7 ersichtlich. Die verfügbaren VISSIM Werte der Messstellen sind als Kreuze in Abb. 4.7 eingetragen.

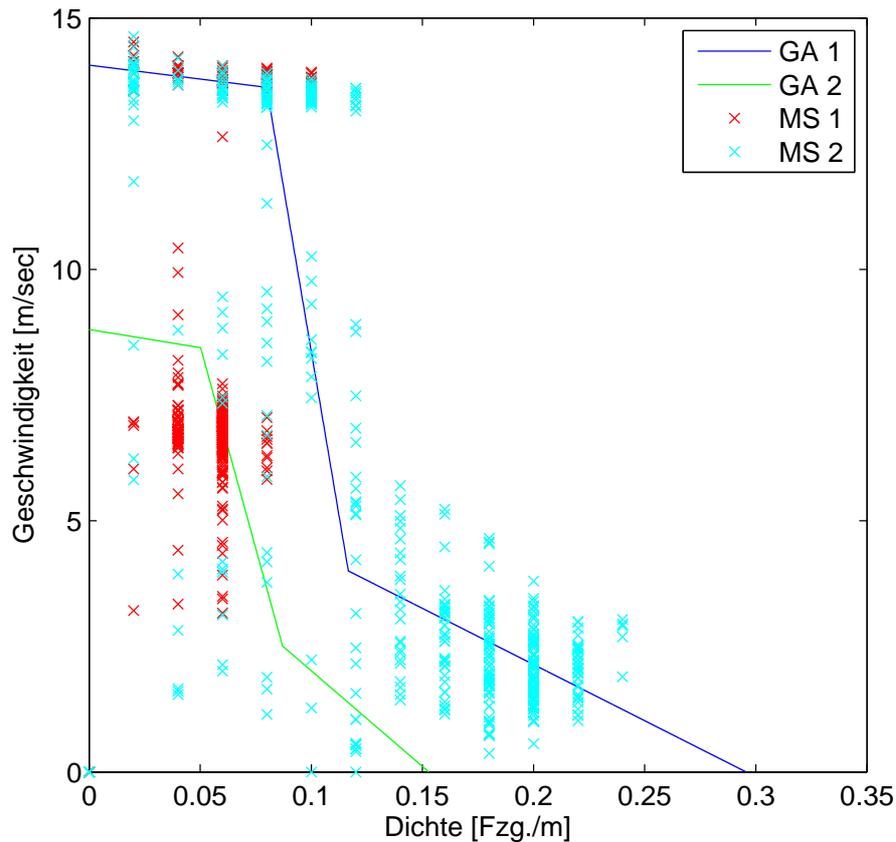


Abbildung 4.7: Fundamentaldiagramm

Die roten Kreuze entsprechen den Messwerten der zweiten Messstelle im Zeitbereich $400\text{sec} < t < 500\text{sec}$. In diesem Zeitbereich herrscht durchgehend die Geschwindigkeitsbegrenzung von 25km/h , es werden jedoch noch höhere Geschwindigkeiten gemessen. Der Grund dafür ist, dass Fahrzeuge die sich schon vor der Geschwindigkeitsreduktion in diesem Bereich befinden, die Änderung nicht mitbekommen und mit der vorher erlaubten Geschwindigkeit aus dem Bereich hinausfahren. Dies wird in Abb. 4.11, welche den Geschwindigkeitsverlauf zu bestimmten Zeitpunkten darstellt, noch einmal verdeutlicht.

4) Ergebnisse

Der Dichteverlauf der VISSIM Daten wird in Abb. 4.8 und der Dichteverlauf der Simulation in Abb. 4.9 dargestellt.

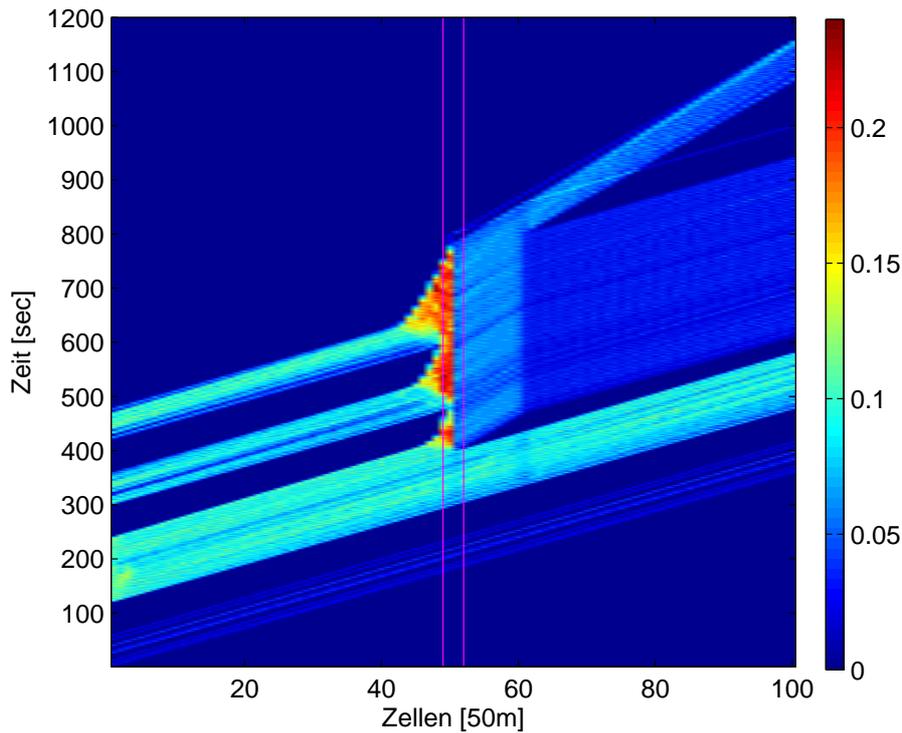


Abbildung 4.8: VISSIM Werte Q mit eingezeichneten Zeitschnitten

In Abb. 4.8 erkennt man, dass der letzte Autoblock ab der Zelle 60 zum Durchfahren der Straße das Zeitintervall $800\text{sec} < t < 1200\text{sec}$ benötigt. Im Vergleich dazu, sind die Fahrzeuge der Simulation bei $t = 1000\text{sec}$ am Ende angelangt. Durch eine genauere Untersuchung der VISSIM Daten konnte festgestellt werden, dass die Fahrzeuge nach der Geschwindigkeitsbegrenzung nicht mehr auf die maximale Geschwindigkeit beschleunigen. Dementsprechend fährt dieser Autoblock mit einer geringeren, als der möglichen Geschwindigkeit den restlichen Straßenabschnitt entlang. Ein Durchsuchen unzähliger VISSIM Einstellungen konnte diesen Effekt nicht korrigieren. Es wird jedoch anhand des vorherigen Beispiels die korrekte Auflösungsgeschwindigkeit der Modellsimulation bestätigt, weshalb nicht weiter versucht wurde, den VISSIM Verlauf zu korrigieren.

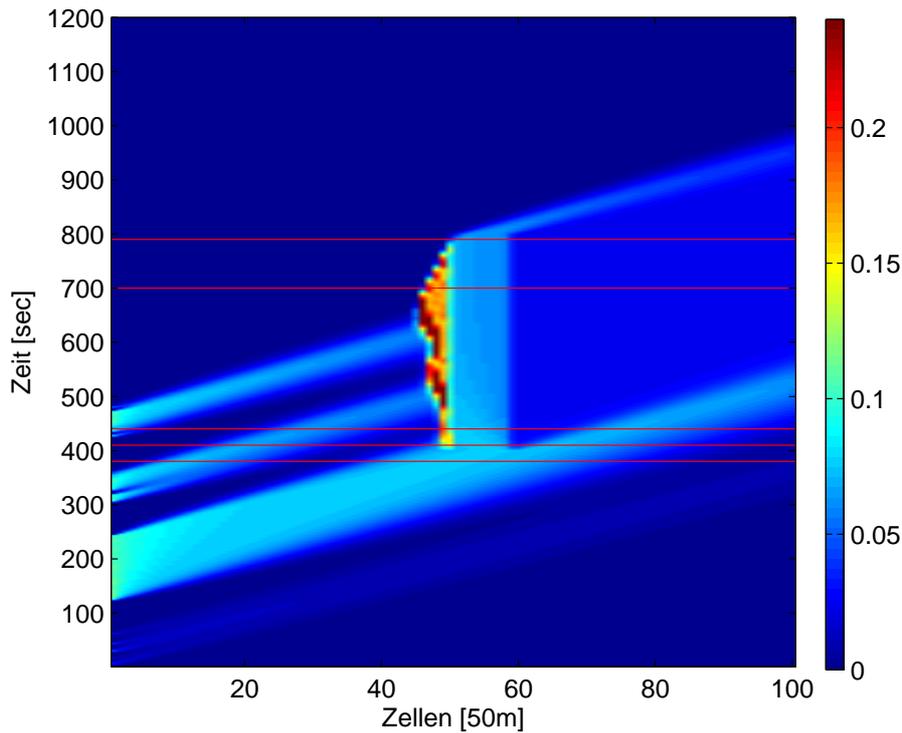


Abbildung 4.9: Simulation \hat{Q} mit eingezeichneten Zeitschnitten

In Abb. 4.10 ist der Dichteverlauf und in Abb. 4.11 der dazugehörige Geschwindigkeitsverlauf zu bestimmten Zeitschritten dargestellt. Anhand der rot strichlierten Linie (welche die Maximalwerte der Zellen darstellt) wird das zeitabhängige Fundamentaldiagramm ersichtlich. Wie zu erwarten, verdeutlicht Abb. 4.10, dass es vor der Straßenverengung und Geschwindigkeitsverringerung zu einer erhöhten Dichte kommt. Der Grund dafür wird in Abb. 4.11 erkennbar. Bei VISSIM wird durch das Abbremsen und Einordnen der Fahrzeuge die Dichte vor der Position $2500m$ erhöht und die Geschwindigkeit geringer. Bei der Modellsimulation wird durch den α Faktor die geringere Maximalgeschwindigkeit mitberücksichtigt, wodurch die Geschwindigkeit bei $2500m$ sinkt und die Dichte ansteigt. Man erkennt zum Zeitpunkt $t = 410sec$ sehr deutlich, dass bei VISSIM erst die nachfolgenden Autos von der Geschwindigkeitsbegrenzung betroffen sind. Fahrzeuge, welche sich schon vorher in dem Bereich befinden, fahren weiterhin mit der vorher gültigen Geschwindigkeit hinaus. Im Gegensatz dazu, werden bei der Simulation zu jedem Zeitschritt die Geschwindigkeiten für jede Zelle anhand dem momentan gültigen Fundamentaldiagramm berechnet, wodurch alle Fahrzeuge im Bereich der Verengung von der Geschwindigkeitsverringerung betroffen sind.

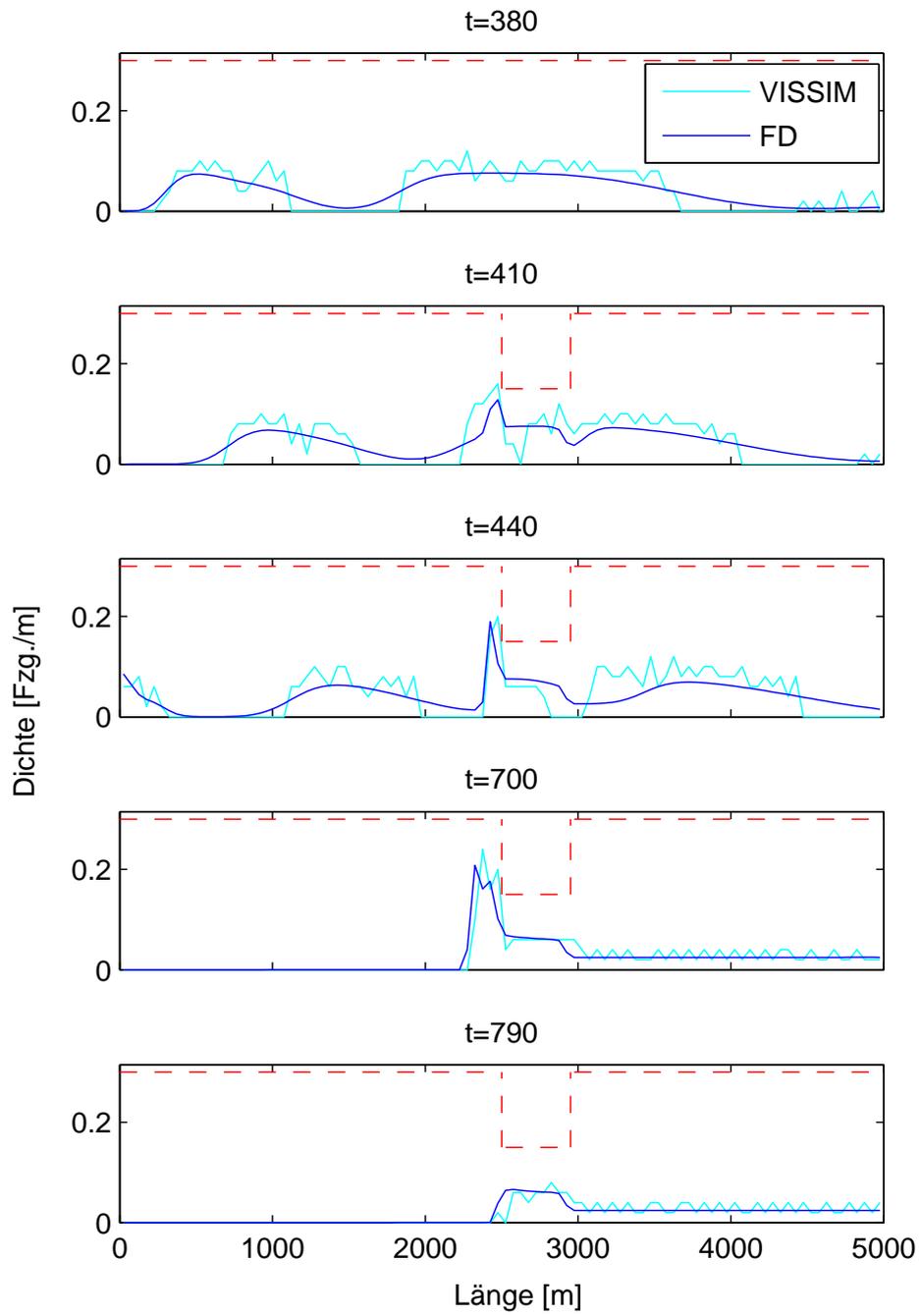


Abbildung 4.10: Dichteverlauf zu bestimmten Zeitpunkten

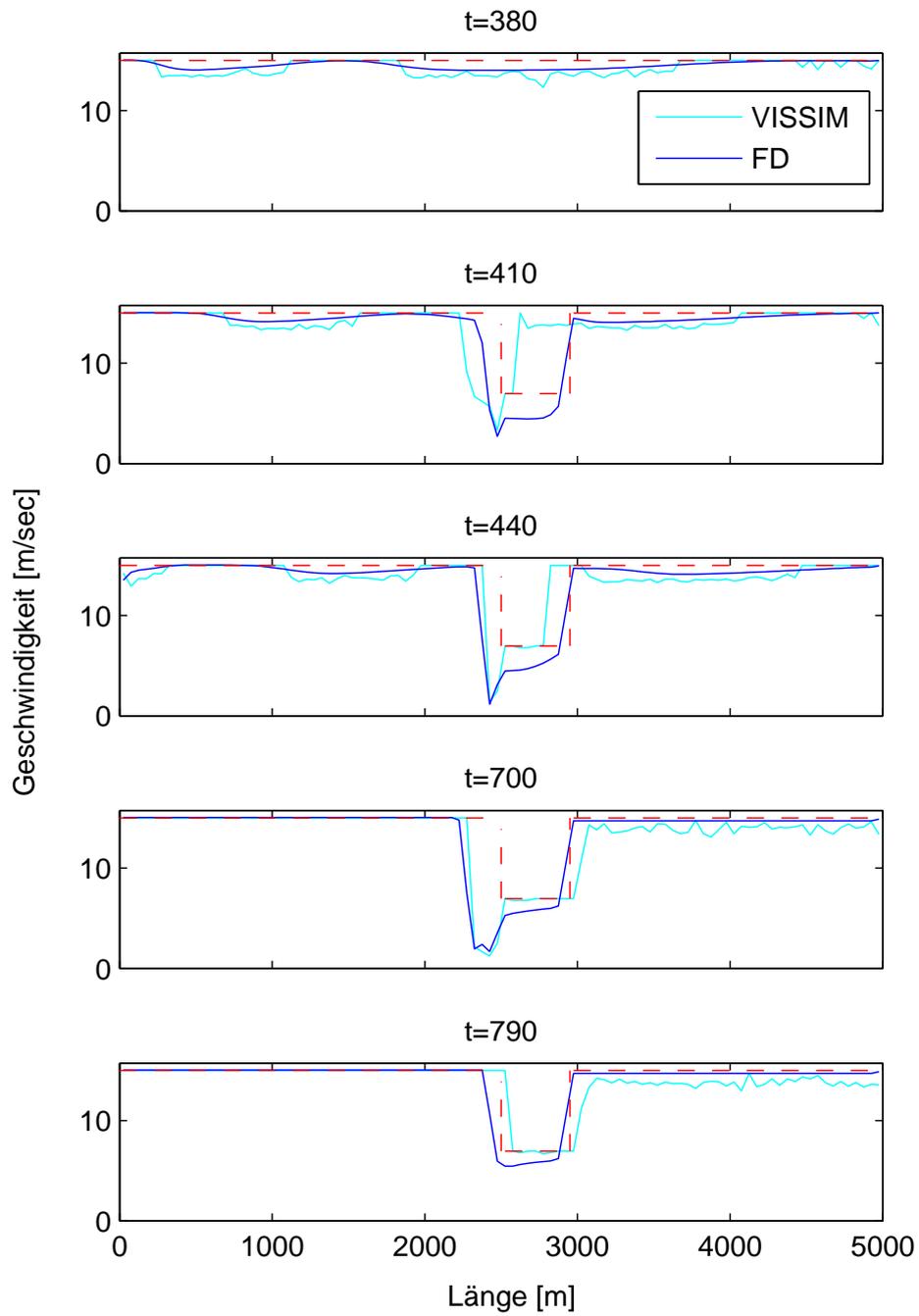


Abbildung 4.11: Geschwindigkeitsverlauf zu bestimmten Zeitpunkten

4.4 Straße mit einer Ab- und Auffahrt

1) Demonstration

Bei diesem Beispiel wird eine Straße mit einer Abfahrt, welche nach $800m$ wieder als Auffahrt in die Straße einmündet, simuliert. Es werden zwei Straßen mit jeweils einer Länge von $1000m$ simuliert. Die maximale Geschwindigkeit der zweispurigen Hauptstraße beträgt $130km/h$. Die abzweigende, einspurige Straße hat eine maximale Geschwindigkeit von $100km/h$. Um einen Rückstau zu erzeugen, wird die Ampel am Ende der Hauptstraße im Zeitintervall $0sec < t < 640sec$ auf rot gestellt. Für $640sec < t < 1500sec$ wechselt die Ampel auf grün, wodurch auch die Kolonnenauflösung simuliert wird.

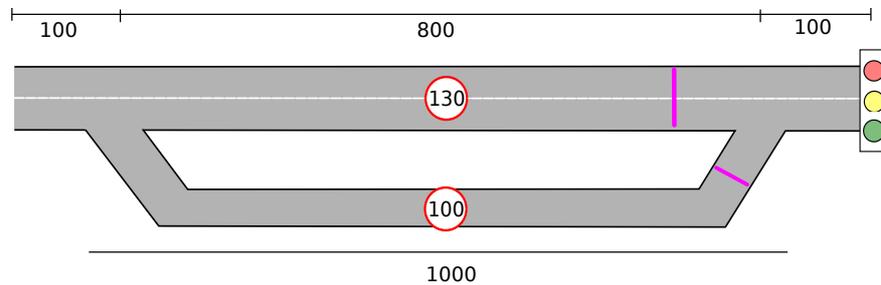


Abbildung 4.12: Straße mit einer Ab- und Auffahrt

2) Anfangs- und Randbedingungen

Als Anfangsbedingung werden zwei leere Straßen angenommen. Um die Ergebnisse von VIS-SIM und der Simulation vergleichen zu können muss die Simulation die gleichen Eingangs-dichten wie VISSIM verwenden. Deshalb wird bei der Hauptstraße als linke Randbedingung die Zufluss Randbedingung, Gl. (2.13), verwendet. Am rechten Rand werden die Gleichungen (2.12), (2.14), (2.11) und (2.15) für eine Ampel verwendet. Die Verknüpfungen der Straßen durch die Ab- bzw. Auffahrt werden, wie in Kapitel 2.4 und 2.4 beschrieben, realisiert.

3) Parameteridentifikation

Für die Identifikation der Parameter wird ein genetischer Algorithmus mit nachfolgenden Merkmalen verwendet. Der GA verwendet die Messdaten von zwei Positionen. Die erste Messstelle befindet sich auf der Hauptstraße bei $800m$, die zweite Messstelle befindet sich auf der zweiten Straße bei $950m$, siehe Abb. 4.12.

Für den GA der Hauptstraße werden folgende Einstellungen vorgenommen:

Unter- und Obergrenze der Beschränkungen für die ${}_1\theta$ Werte, Gleichung (3.22),

$${}_1\mathbf{UG} = \left[-60 \quad 30 \quad 0.05 \quad 0.15 \quad 2 \quad 0.2 \quad 0 \right]^T \quad (4.16)$$

$${}_1\mathbf{OG} = \begin{bmatrix} -10 & 40 & 0.15 & 0.25 & 6 & 0.4 & 0.99 \end{bmatrix}^T \quad (4.17)$$

und den weiteren Bedingungen, Gleichung (3.23),

$${}_1\theta_3 \leq 0.9 \, {}_1\theta_4 \quad (4.18)$$

$${}_1\theta_4 \leq 0.9 \, {}_1\theta_6 \quad (4.19)$$

ergibt sich mit 40 Populationen und 100 Generationen der ${}_1\boldsymbol{\theta}$ Vektor für das Fundamentaldiagramm zu

$${}_1\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} -10.7158 & 34.2105 & 0.0511 & 0.148 & 3.784 & 0.28 & 0.893 \end{bmatrix}^T. \quad (4.20)$$

Für den GA der zweiten Straße werden folgende Einstellungen vorgenommen:
Unter- und Obergrenze der Beschränkungen für die ${}_2\boldsymbol{\theta}$ Werte, Gleichung (3.22),

$${}_2\mathbf{UG} = \begin{bmatrix} -30 & 22 & 0.02 & 0.09 & 0 & 0.05 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.21)$$

$${}_2\mathbf{OG} = \begin{bmatrix} 0 & 30 & 0.06 & 0.2 & 5 & 0.25 & 0.99 \end{bmatrix}^T \quad (4.22)$$

und den weiteren Bedingungen, Gleichung (3.23),

$${}_2\theta_3 \leq 0.9 \, {}_2\theta_4 \quad (4.23)$$

$${}_2\theta_4 \leq 0.9 \, {}_2\theta_6 \quad (4.24)$$

ergibt sich mit 40 Populationen und 100 Generationen der ${}_2\boldsymbol{\theta}$ Vektor für das Fundamentaldiagramm zu

$${}_2\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} -2.2368 & 24.423 & 0.0467 & 0.0916 & 4.3736 & 0.152 & 0.671 \end{bmatrix}^T. \quad (4.25)$$

Die Fundamentaldiagramme der Straßen sind in Abb. 4.2 ersichtlich. Die verfügbaren VIS-SIM Werte der Messstellen sind als Kreuze in Abb. 4.2 eingetragen.

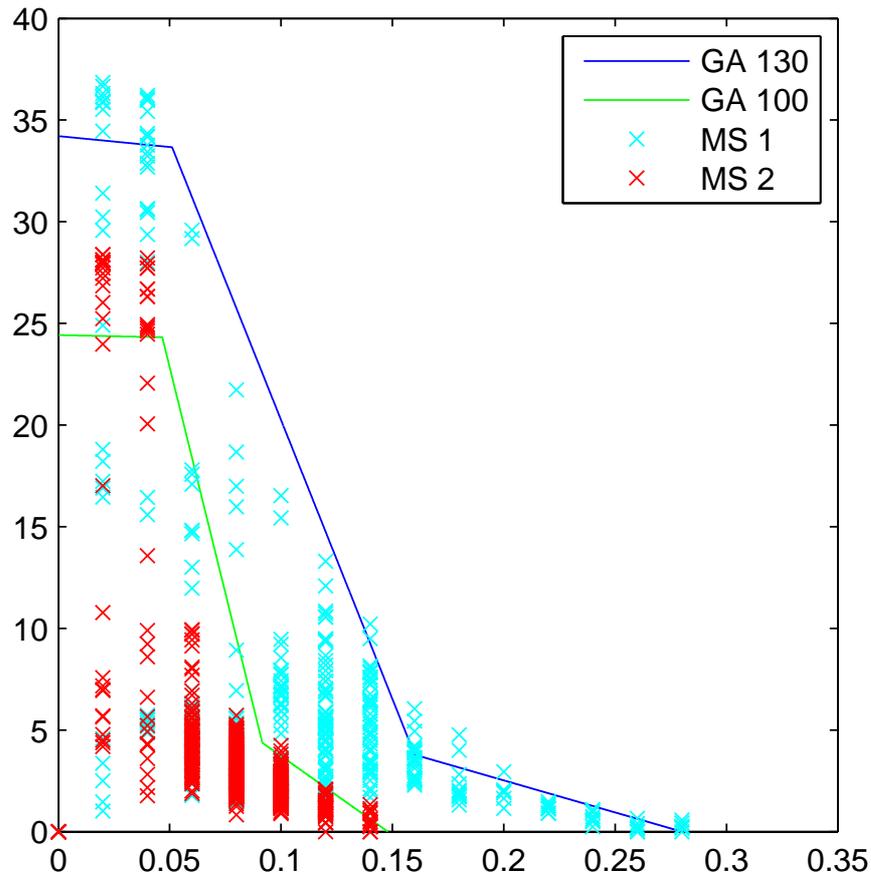
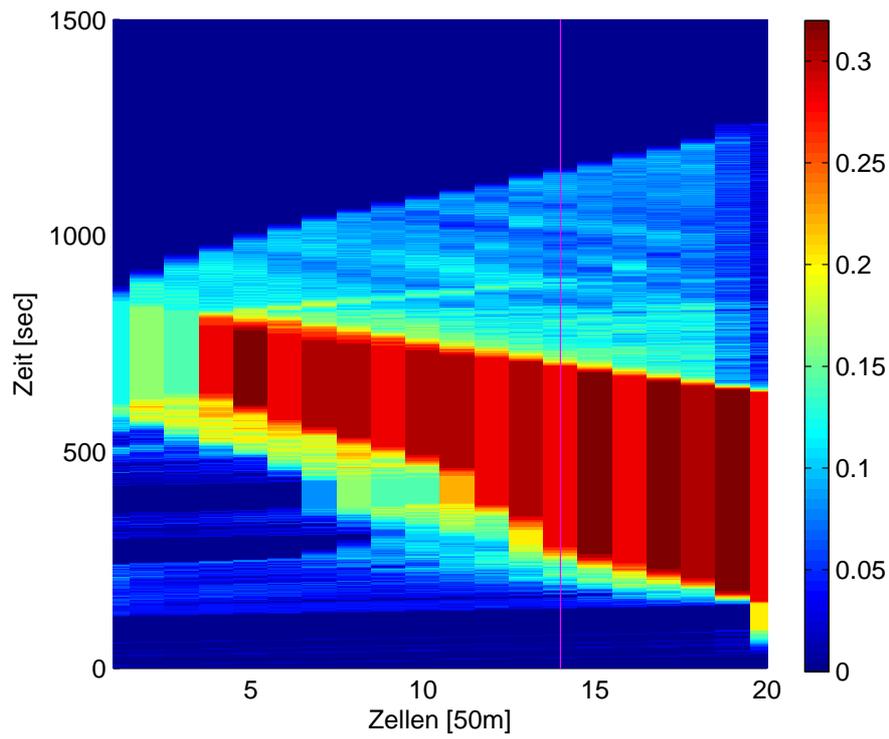
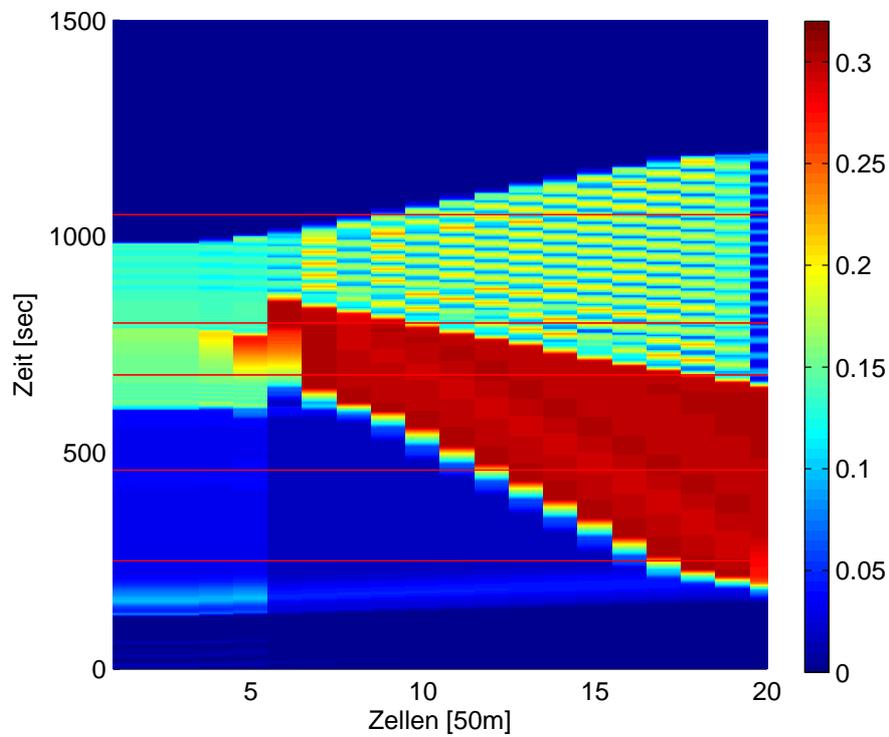


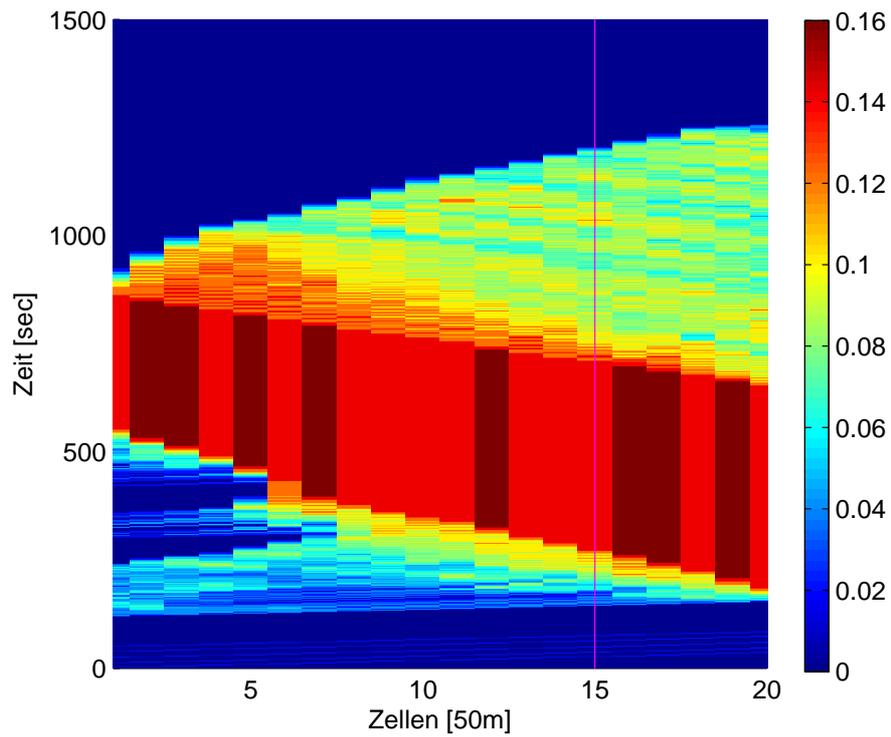
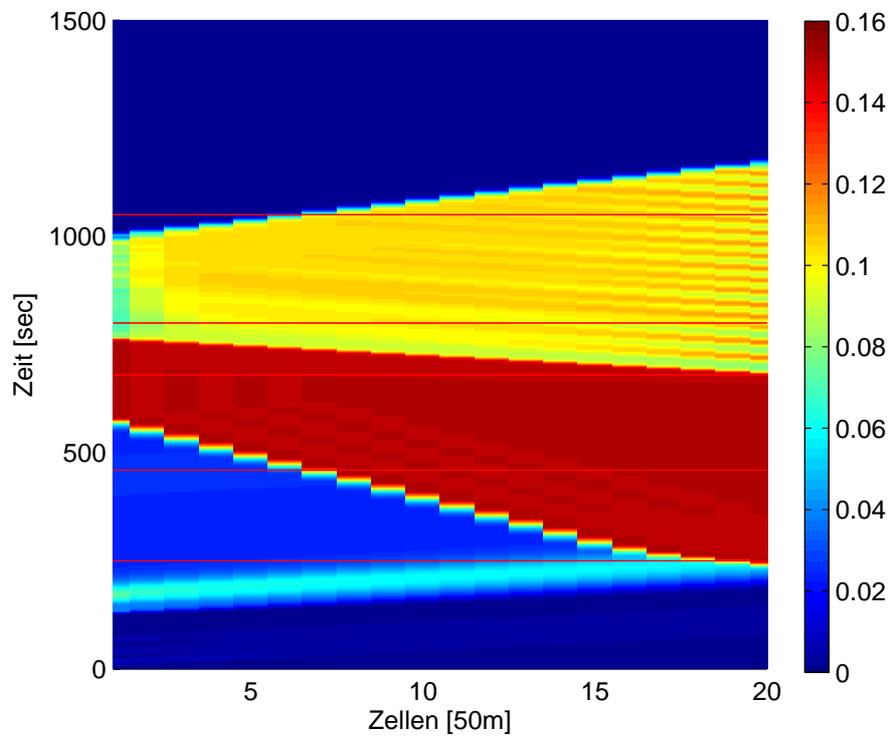
Abbildung 4.13: Fundamentaldiagramm

4) Ergebnisse

In Abb. 4.14 wird der Dichteverlauf der Hauptstraße 1Q der VISSIM Daten abgebildet. Im Vergleich dazu, wird in Abb. 4.15 der Dichteverlauf der Hauptstraße der Simulation ${}^1\hat{Q}$ dargestellt. Es wird deutlich, dass sich die Fahrzeuge der Simulation weniger weit zurückstauen und sich die Zellen schneller füllen. Dies liegt daran, dass die Fahrzeuge in VISSIM bei einer Staubildung die Spur nicht wechseln und sich daher der Stau auf einer Spur weiter ausbreitet als auf der zweiten. Dies wird in Abb. 4.14 als auch in Abb. 4.18 durch die halbvollen Zellen erkennbar.

In Abb. 4.16 und 4.17 wird der Dichteverlauf der Nebenstraße 2Q und ${}^2\hat{Q}$ ersichtlich. In Abb. 4.18 wird der Dichteverlauf der Hauptstraße und in Abb. 4.19 der Dichteverlauf der Nebenstraße zu bestimmten Zeitpunkten dargestellt. Desweiteren wird die Position der Abfahrt bzw. der Auffahrt mit einem roten x auf der Abszisse der Hauptstraße gekennzeichnet.

Abbildung 4.14: Hauptstraße, VISSIM Werte Q mit eingezeichneten MesspositionenAbbildung 4.15: Hauptstraße, Simulation \hat{Q} mit eingezeichneten Zeitschnitten

Abbildung 4.16: Nebenstraße, VISSIM Werte Q mit eingezeichneten MesspositionenAbbildung 4.17: Nebenstraße, Simulation \hat{Q} mit eingezeichneten Zeitschnitten

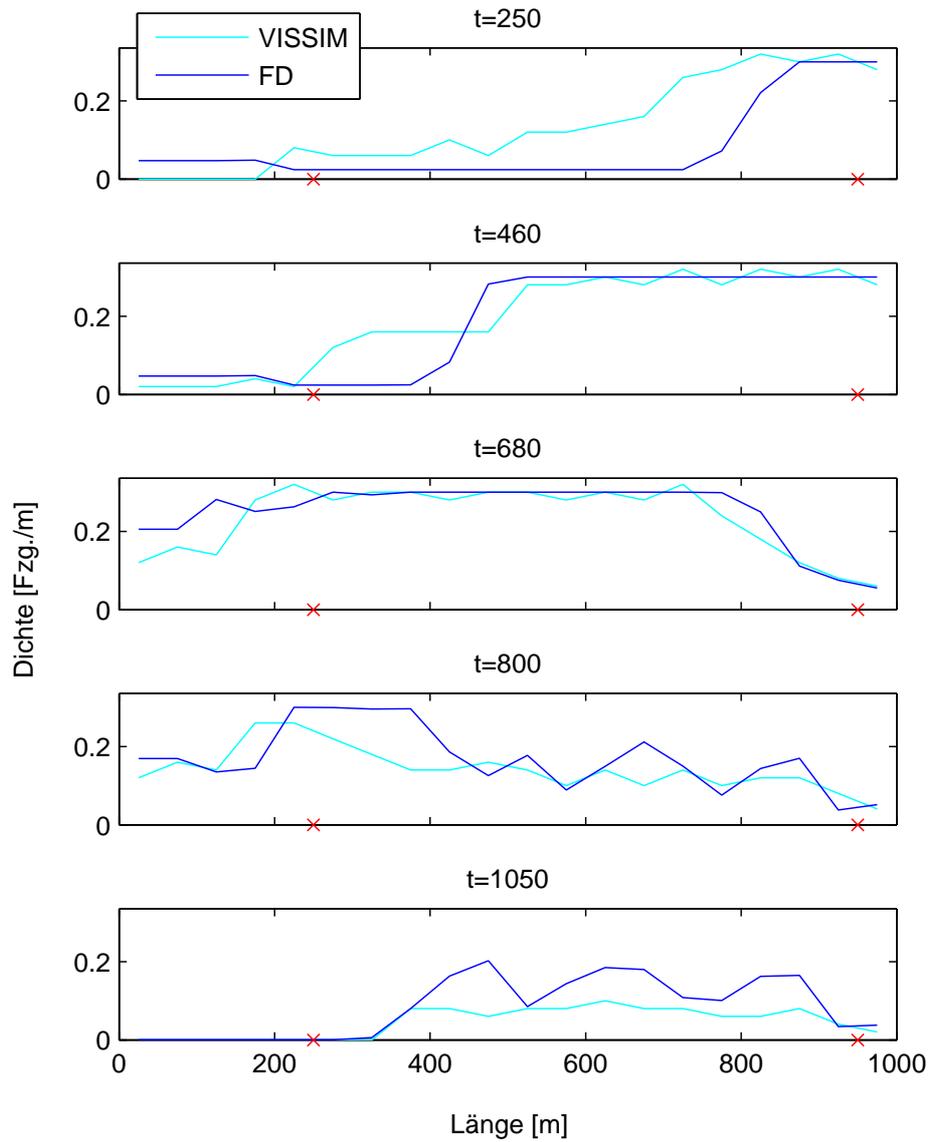


Abbildung 4.18: Dichteverlauf der Hauptstraße zu bestimmten Zeitpunkten

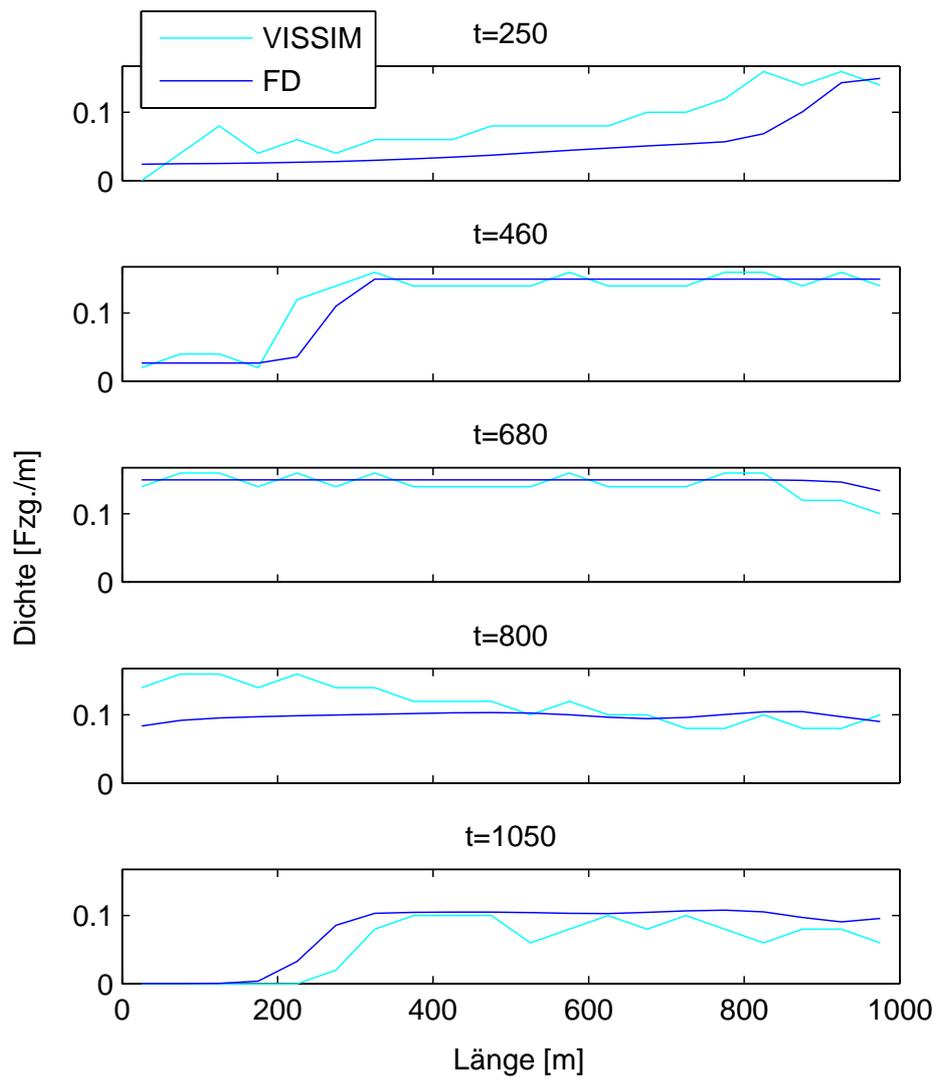


Abbildung 4.19: Dichteverlauf der Nebenstraße zu bestimmten Zeitpunkten

4.5 Straße mit einer Auffahrt und mehreren Fundamentaldiagrammen

1) Demonstration

Um das Zusammenspielen mehrerer Straßen mit verschiedenen Fundamentaldiagrammen zu zeigen, wird eine komplexe Straßensituation erstellt, siehe Abb. 4.20.

Die Hauptstraße (erste Straße $k = 1$) beginnt als zweispurige Straße der Länge $2500m$, mit einer $100km/h$ Geschwindigkeitsbegrenzung. An der Position $2500m$ mündet eine $5000m$ lange, einspurige Auffahrt mit der Geschwindigkeitsbegrenzung von $70km/h$ (zweite Straße $k = 2$) ein. An dieser Position erweitert sich die erste Straße zu einer $2500m$ langen, dreispurigen Straße mit einer Maximalgeschwindigkeit von $130km/h$. Anschließend an dieser Straße befindet sich eine weitere Straße mit einer Länge von $3000m$ und einer maximalen Geschwindigkeit von $130km/h$ (dritte Straße $k = 3$).

Um einen Rückstau über die Straßen zu simulieren, wurde eine Ampel zwischen der zweiten und dritten Straße eingefügt, welche im Zeitbereich $0sec < t < 1800sec$ auf rot geschaltet wird und während der restlichen Simulation von $1800sec < t < 3600sec$ auf grün bleibt. Die rote Phase der Ampel bewirkt einen Stau, welcher sich über die Einmündungszelle zurück bildet. Dadurch kommt der, im Kapitel 2.4, definierte Parameter β , Gl. (2.19), zum Einsatz.

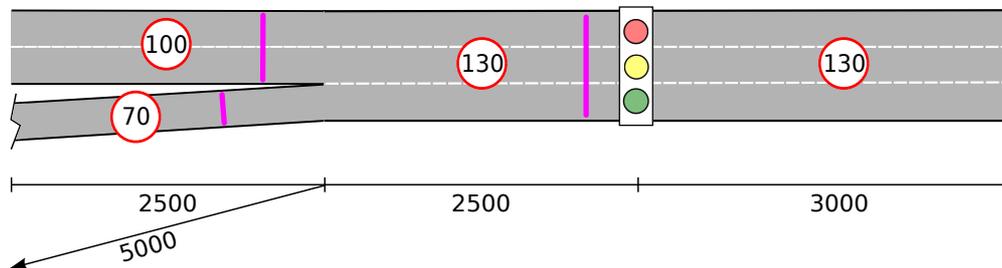


Abbildung 4.20: Straßenkonfiguration mit verschiedenen Fundamentaldiagrammen

2) Anfangs- und Randbedingungen

Als Anfangsbedingung wird eine leere Straße über die komplette Straßenkonfiguration angenommen. Um die Ergebnisse von VISSIM und der Simulation vergleichen zu können muss die Simulation die gleichen Eingangsdichten wie VISSIM verwenden. Deshalb wird für die linke Randbedingung der Straße $k = 1$ und $k = 2$ die Zufluss Randbedingung, Gl. (2.13), benötigt. Am rechten Rand der dritten Straße $k = 3$ wird die absorbierende Randbedingung, Gl. (2.11), verwendet. Die Verknüpfung zwischen der Straße $k = 1$ und $k = 3$ wird, je nach Ampelschaltung, bei rot mit den Gleichungen (2.12) und (2.14), bei grün mit den Gleichungen (2.11) und (2.15) definiert. Die Auffahrt wird gemäß Kapitel 2.4 realisiert.

3) Parameteridentifikation

Um die drei unterschiedlichen Fundamentaldiagramme der Straßen ermitteln zu können, wird für jedes Fundamentaldiagramm eine Messstelle eingefügt. Die erste Messstelle befindet sich auf der ersten Straße $k = 1$ an der Position $2250m$, die zweite Messstelle befindet sich an der Position $3500m$ der zweiten Straße $k = 2$ und die dritte Messstelle liegt ebenfalls auf der ersten Straße $k = 1$ an der Position $4500m$.

Es hat sich gezeigt, dass bei komplexen Beispielen mit mehreren Fundamentaldiagrammen ein α Faktor nicht ausreicht um das Verhalten der kompletten Straße richtig darzustellen. Bei positivem Gradienten reicht ein α Wert aus um ausreichend genaue Ergebnisse zu erzielen, für negative Gradienten hängt der α Wert jedoch vom FD ab. Deshalb wird ein positiver α_{pos} Wert für alle Straßen als konstanter Wert $\alpha_{pos} = 0.5$ festgelegt, der negative α_{neg} Wert wird als θ_7 Wert für jede Straße separat mit dem GA geschätzt.

Für den GA werden folgende Einstellungen vorgenommen: Die Unter- und Obergrenze der Beschränkungen, Gleichung (3.22), werden wie folgt festgelegt

$${}_1\mathbf{UG} = \begin{bmatrix} -30 & 25 & 0.05 & 0.1 & 0 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.26)$$

$${}_1\mathbf{OG} = \begin{bmatrix} 0 & 40 & 0.15 & 0.2 & 10 & 0.4 & 0.99 \end{bmatrix}^T \quad (4.27)$$

$${}_2\mathbf{UG} = \begin{bmatrix} -30 & 15 & 0.03 & 0.06 & 0 & 0.1 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.28)$$

$${}_2\mathbf{OG} = \begin{bmatrix} 0 & 30 & 0.1 & 0.12 & 6 & 0.2 & 0.99 \end{bmatrix}^T \quad (4.29)$$

$${}_3\mathbf{UG} = \begin{bmatrix} -45 & 30 & 0.05 & 0.15 & 0 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (4.30)$$

$${}_3\mathbf{OG} = \begin{bmatrix} 0 & 40 & 0.15 & 0.25 & 10 & 0.6 & 0.99 \end{bmatrix}^T \quad (4.31)$$

wobei die vorangehende tiefgestellte Nummerierung dem jeweiligen FD entspricht.

Die Bedingungen, Gleichung (3.23), gelten für alle drei Fundamentaldiagramme.

$$\theta_3 \leq 0.9\theta_4 \quad (4.32)$$

$$\theta_4 \leq 0.9\theta_6 \quad (4.33)$$

Daraus ergeben sich mit 400 Populationen und 30 Generationen die ${}_i\boldsymbol{\theta}$ Vektoren zu

$${}_1\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} -0.6939 & 27.78 & 0.83 & 0.18 & 3.52 & 0.3 & 0.07 \end{bmatrix}^T \quad (4.34)$$

$${}_2\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} -0.4982 & 19.44 & 0.06 & 0.11 & 2.14 & 0.15 & 0.2 \end{bmatrix}^T \quad (4.35)$$

$${}_3\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} -0.2373 & 36.11 & 0.068 & 0.23 & 4.23 & 0.42 & 0.07 \end{bmatrix}^T. \quad (4.36)$$

Diese werden zusammengefasst und führen auf einen $\boldsymbol{\theta}$ Vektor mit allen Fundamentaldiagrammen

$$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} {}_1\boldsymbol{\theta}^T & {}_2\boldsymbol{\theta}^T & {}_3\boldsymbol{\theta}^T \end{bmatrix}^T. \quad (4.37)$$

Die Fundamentaldiagramme sind in Abb. 4.21 ersichtlich. Die verfügbaren VISSIM Werte der Messstellen sind als Kreuze eingetragen. Die erste Messstelle (magenta farbige Kreuze) ist maßgebend für das zweispurige FD mit 100km/h , dargestellt in rot. Die zweite Messstelle (schwarze Kreuze) bestimmt das einspurige FD mit 70km/h , welches in grün eingezeichnet ist. Die dritte Messstelle (cyan farbige Kreuze) liefert die Werte für das dreispurige FD mit 130km/h Geschwindigkeitsbegrenzung, blaues FD.

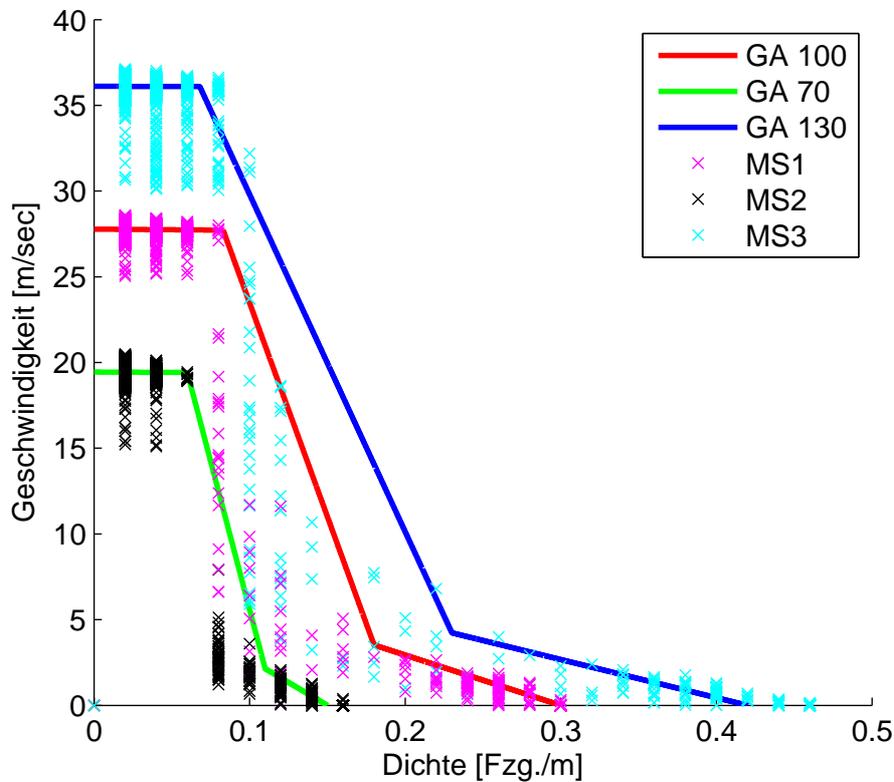


Abbildung 4.21: Fundamentaldiagramme

4) Ergebnisse

In Abb. 4.22 wird der Dichteverlauf der Hauptstraße $Q_{HS} = [{}^1Q \ {}^3Q]$ der VISSIM Daten abgebildet. Im Vergleich dazu, wird in Abb. 4.23 der Dichteverlauf der Hauptstraße $\hat{Q}_{HS} = [{}^1\hat{Q} \ {}^3\hat{Q}]$ der Simulation dargestellt. In Abb. 4.24 und 4.25 wird der Dichteverlauf der Nebenstraße $Q_{NS} = {}^2Q$ bzw. $\hat{Q}_{NS} = {}^2\hat{Q}$ ersichtlich.

Um die Farbverläufe der Dichten vergleichbar zu machen werden alle Werte auf den Maximalwert des jeweils gültigen FD normiert und die skalierten Werte ${}^k\hat{q}_{i,norm}^n$ verwendet.

$${}^k\hat{q}_{i,norm}^n = \frac{{}^k\hat{q}_i^n}{{}^k\theta_6} \quad (4.38)$$

In Abb. 4.26 wird der Dichteverlauf der Hauptstraße und in Abb. 4.27 der Dichteverlauf der Nebenstraße zu bestimmten Zeitpunkten dargestellt. Die rot strichlierten Linien stellen die maximale Dichte der unterschiedlichen Straßenabschnitte dar. Desweiteren wird die Position bei der die Auffahrt auf die Hauptstraße mündet, mit einem roten x auf der Abszisse gekennzeichnet.

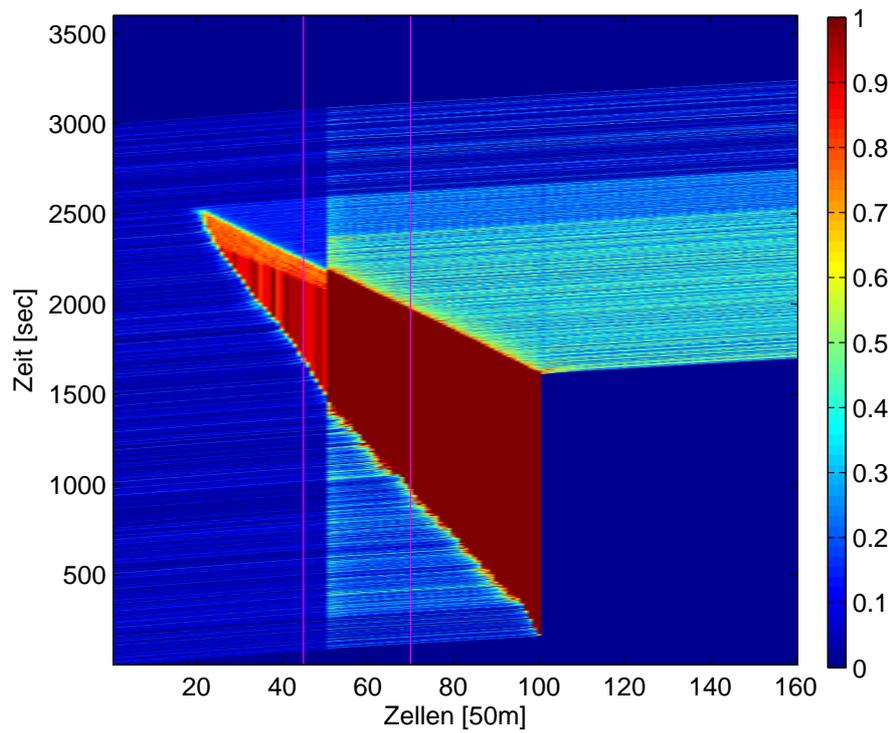


Abbildung 4.22: 1Q und 3Q der VISSIM Werte

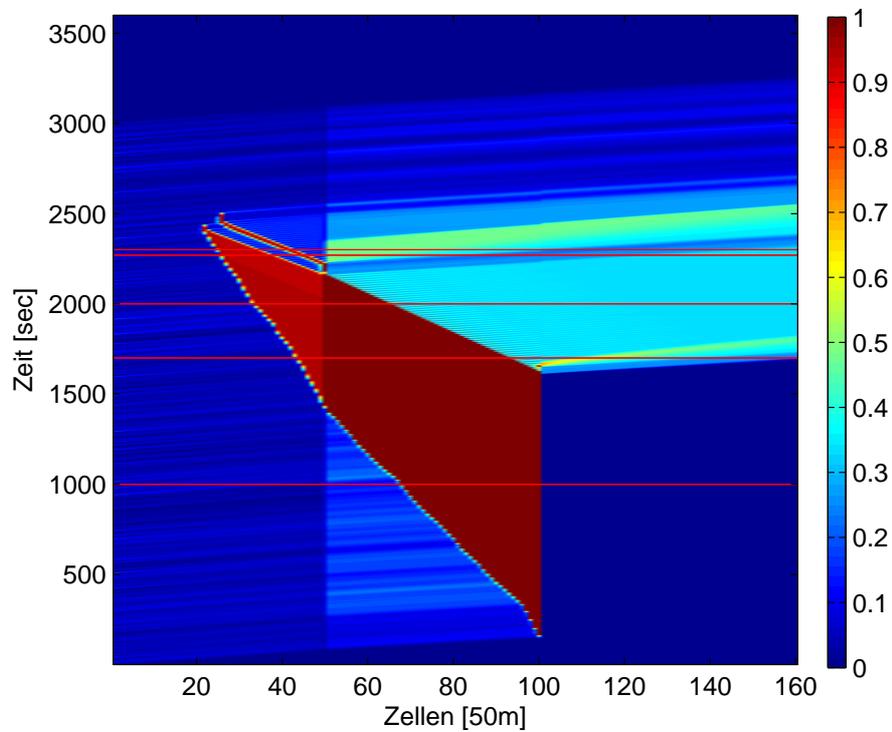


Abbildung 4.23: ${}^1\hat{Q}$ und ${}^3\hat{Q}$ der Simulation

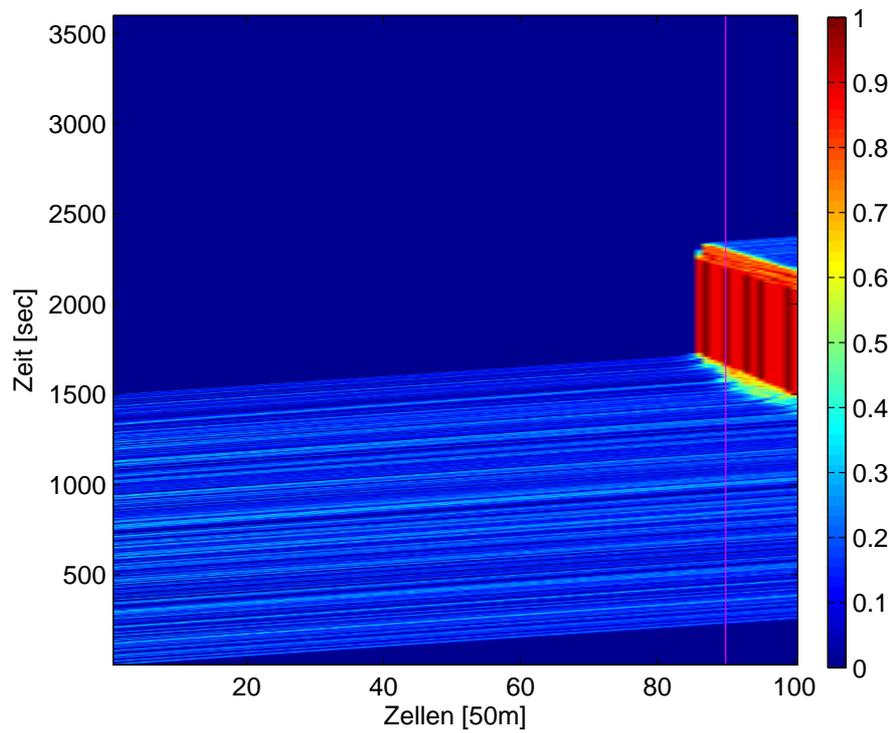


Abbildung 4.24: 2Q der VISSIM Werte

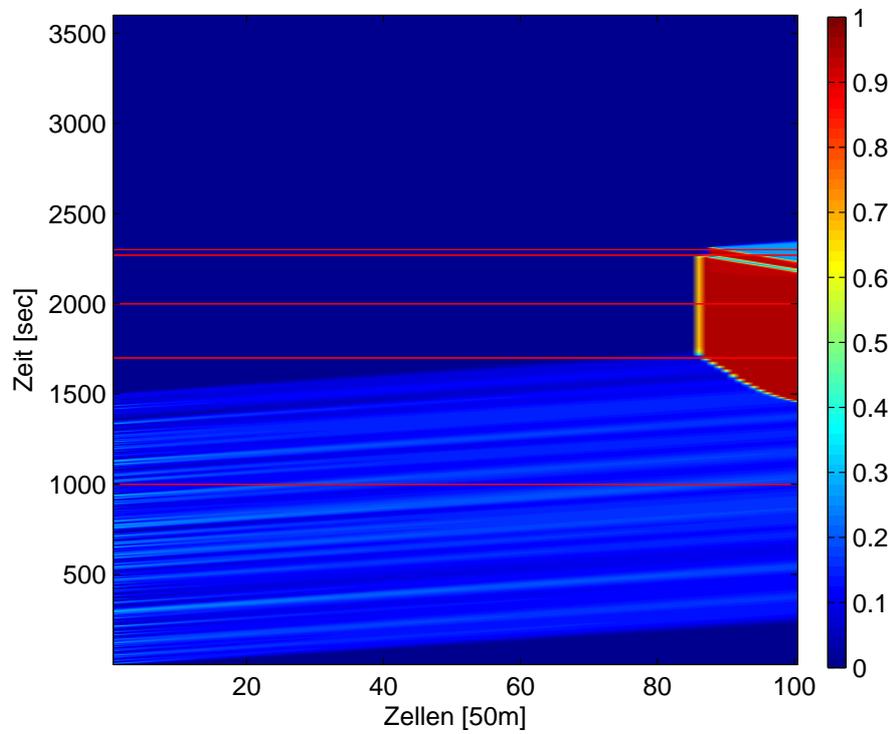


Abbildung 4.25: ${}^2\hat{Q}$ der Simulation

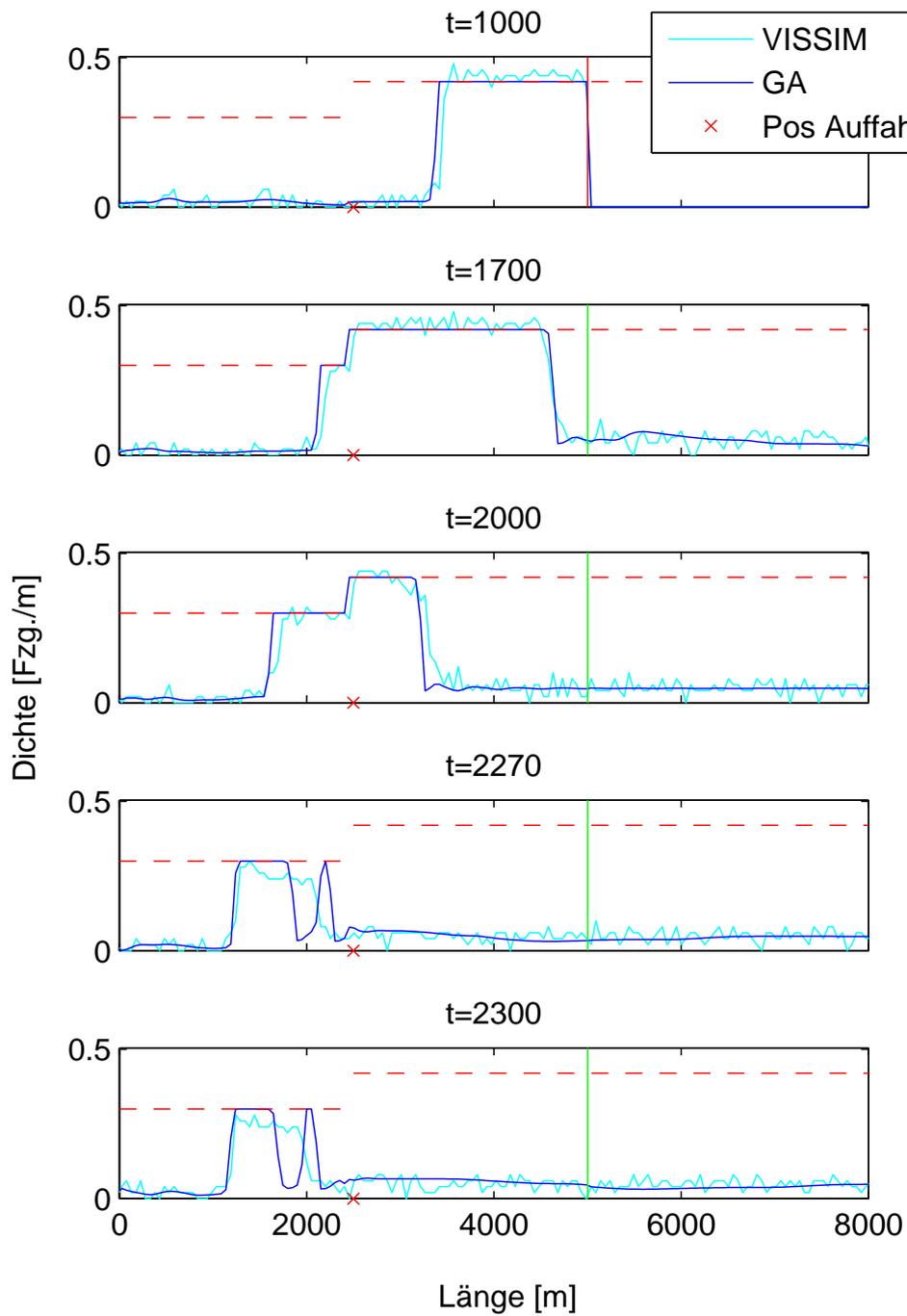


Abbildung 4.26: Dichteverlauf der Hauptstraße zu bestimmten Zeitpunkten

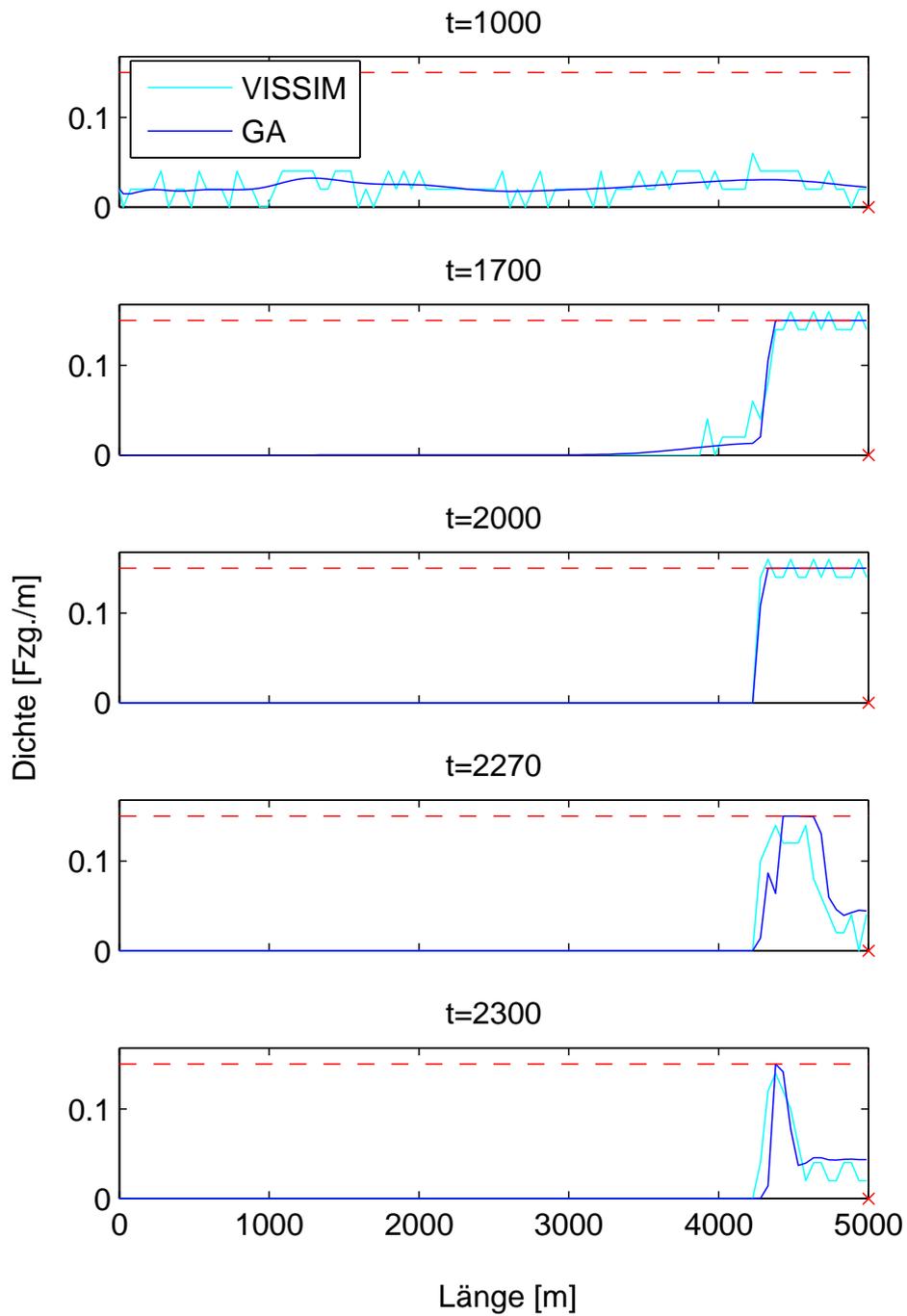


Abbildung 4.27: Dichteverlauf der Nebenstraße zu bestimmten Zeitpunkten

4.6 Identifizierbarkeit der Parameter

Es werden drei Sensorpositionen zur Eignung für die Parameteridentifikation untersucht. Betrachtet wird eine einspurige Straße mit einer roten Ampel am Ende. Die Straße hat eine Länge von $2500m$ und eine maximal erlaubte Geschwindigkeit von $50km/h$.

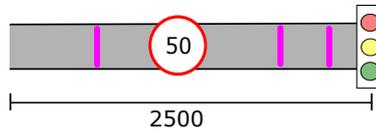


Abbildung 4.28: Straße mit einer Ampel am Straßenende

In Abb. 4.29 wird der Dichteverlauf von VISSIM dargestellt, die Messpositionen sind als vertikale magenta farbige Linien eingezeichnet. Es wird zwischen dem Sensor an der Position 15, dem Sensor an der Position 40 und einer Kombination aus zwei Sensoren an den Positionen 15 und 48 unterschieden.

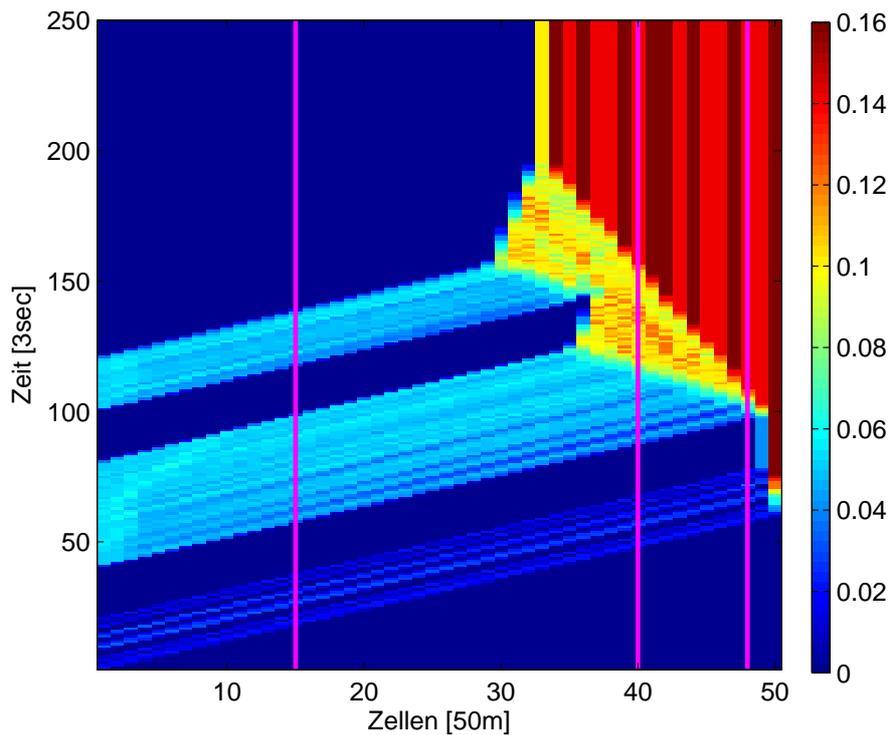


Abbildung 4.29: VISSIM Werte Q mit eingezeichneten Messpositionen

Im Vergleich dazu, wird bei der Position 40 während der Simulationszeit jeder Dichtebereich durchlaufen. Dementsprechend beinhaltet $\Sigma(\mathbf{q}_{40})$, Gl. (4.41), in diesem Fall keine 0 Einträge. Aus der dazugehörigen adjungierten Matrix $\mathbf{V}^*(\mathbf{q}_{40})$, Gl. (4.42), wird deutlich, dass θ_1 am wenigsten Einfluss auf das Ergebnis hat. Dieser Wert beschreibt die Neigung im ersten linearen Bereich. Die Simulation wird durch θ_3 und θ_4 am stärksten beeinflussen. Änderungen dieser Parameter haben den größten Einfluss auf das Simulationsergebnis.

$$\Sigma(\mathbf{q}_{40}) = \begin{pmatrix} 22.5364 & & & & & & & \\ & 16.4703 & & & & & & \\ & & 2.9894 & & & & & \\ & & & 0.5663 & & & & \\ & & & & 0.0611 & & & \\ & & & & & 0.0188 & & \\ & & & & & & 0.0005 & \end{pmatrix} \quad (4.41)$$

$$\mathbf{V}^*(\mathbf{q}_{40}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.99 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.43 & 0.9 & 0 \\ 0.99 & -0.15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.15 & -0.99 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9 & 0.43 & 0 \\ 0 & 0 & 0.99 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.99 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.42)$$

Beim Verwenden von den Sensorpositionen 15 und 48 erhält man, verglichen mit dem Sensor an Position 40, keinen Mehrwert an Information. Dadurch wird erkennbar, dass eine Messstelle auf jeden Fall ausreichen kann um das FD vollständig parametrieren zu können. Bei der Position 15 trifft dies, wie oben schon erwähnt, nicht zu. Eine gute Platzierung der Messsensoren wird in Realität nicht immer klar zu definieren sein, weshalb eine weitere Messposition die Sicherheit der Identifikation aller Parameter auf jeden Fall erhöht.

$$\Sigma(\mathbf{q}_{15,48}) = \begin{pmatrix} 32.2873 & & & & & & & \\ & 16.0324 & & & & & & \\ & & 4.0606 & & & & & \\ & & & 1.0091 & & & & \\ & & & & 0.0774 & & & \\ & & & & & 0.0417 & & \\ & & & & & & 0.0011 & \end{pmatrix} \quad (4.43)$$

$$\mathbf{V}^*(\mathbf{q}_{15,48}) = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.99 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.6 & 0.8 & 0 \\ 0.99 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.99 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & -0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0.99 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.99 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.44)$$

Die adjungierte Matrix $\mathbf{V}^*(\mathbf{q}_{40})$ beinhaltet eine Kopplung des θ_3 und θ_4 Wertes, welche bei der adjungierten Matrix $\mathbf{V}^*(\mathbf{q}_{15,48})$ nicht vorhanden ist. Betrachtet man in Abb. 4.29 die Dichten der Messpositionen, so wird ersichtlich, dass bei der Position 15 sehr niedrige Dichten, welche zum ersten linearen Bereich gehören und bei der Position 48 zuerst ebenfalls sehr niedrige Dichten im ersten linearen Bereich und danach abrupt sehr hohe Dichten, welche zum dritten linearen Bereich gehören, auftauchen. Dadurch wird erkennbar, dass zwar die Position von θ_3 eine wichtige Rolle für die Messposition 15 spielt (bzw. für die Messposition 40 noch zusätzlich die Position von θ_4) jedoch nicht die Neigung zwischen den zwei Werten. Im Gegensatz dazu tritt bei der Position 48 während der Simulation eine Dichte mittlerer Höhe auf, wodurch sich auch die Neigung von θ_3 zu θ_4 massiv auf das Simulationsergebnis auswirkt und diese Werte daher gekoppelt in $\mathbf{V}^*(\mathbf{q}_{40})$ vorkommen.

Kapitel 5

Fazit

5.1 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines makroskopischen Verkehrsmodells, welches typische Verkehrssituationen simulieren kann und einen korrekten Umgang mit Unstetigkeitsstellen ermöglicht. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Echtzeitfähigkeit des Modells um kritische Verkehrsaufkommen frühzeitig zu erkennen und rechtzeitig dagegen wirken zu können.

Zu diesem Zweck wurden zuerst die mathematischen Grundlagen des Verkehrs studiert und in weiterer Folge die bisherigen Modelle auf ihre Funktionalität getestet. Im weiteren Verlauf erfolgte die Entwicklung einer neuen Methodik, welche durch ein diskretisiertes Modell, basierend auf einem Angebot und Nachfrageprinzip, das Verkehrsgeschehen wiedergeben kann. Mit diesem Modell ist es möglich anhand gemessener Verkehrsdaten die beschreibenden Parameter des Fundamentaldiagramms zu schätzen. Mit der Fisher Informationsmatrix wird die Identifizierbarkeit der Parameter an bestimmten Messstellen beurteilt. Unter Kenntnis des zeitlichen Dichteverlaufs kann eine optimale Sensorposition gefunden werden.

Die Funktionalität des entwickelten Modells wird durch Verkehrsdaten, welche mit der mikroskopischen Verkehrsfluss-Simulationssoftware VISSIM erzeugt werden, validiert. Wie man an den Demonstrationsbeispielen erkennen kann, stellt die entwickelte Methodik einen guten Ansatz dar, Verkehrssituationen wiederzugeben.

Bei der Beurteilung der Simulationsgenauigkeit habe ich festgestellt, dass ein Abstimmen auf das Simulationsergebnis der VISSIM Daten nur begrenzt sinnvoll ist. Aus urheberrechtlichen Gründen ist es nicht immer möglich die genaue Vorgehensweise von VISSIM zu erhalten. Trotzdem kann gezeigt werden, dass die Simulation korrekte Ergebnisse liefert auch wenn der direkte Vergleich mit einem mikroskopischen Verkehrsmodell zu nachvollziehbaren Abweichungen führt.

5.2 Ausblick

In Zukunft wird die Genauigkeit der Simulation weiter überprüft. Es wird versucht Verkehrsdaten von bereits vorhandenen Sensoren zu erhalten. Da es sich aus rechtlichen Gründen jedoch als äußerst schwierig erweist diese Daten zu bekommen wird im Weiteren versucht anhand sogenannter *floating cars*, welche aktiv im Verkehr mitfahren und die Verkehrssituation aufzeichnen, auf das Fundamentaldiagramm zu schließen.

Ein weiterer Ausblick ist mit der Simulation komplexe Netzwerke anhand einer Kostenfunktion und mehreren gewichteten Regelungszielen zu optimieren. Diese Teilziele erfordern unter Umständen gegenläufige Maßnahmen, welche durch die Formulierung der Kostenfunktion und den Gewichtungen optimal erfüllt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Michael J Lighthill and Gerald Beresford Whitham. On kinematic waves. ii. a theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 229(1178):317–345, 1955.
- [2] Harold J Payne. Models of freeway traffic and control. *Mathematical models of public systems*, 1971.
- [3] Gordon F Newell. A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part i: General theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, 27(4):281–287, 1993.
- [4] Gordon F Newell. A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part ii: Queueing at freeway bottlenecks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 27(4):289–303, 1993.
- [5] Gordon F Newell. A simplified theory of kinematic waves in highway traffic, part iii: Multi-destination flows. *Transportation Research Part B: Methodological*, 27(4):305–313, 1993.
- [6] Dirk Helbing. Gas-kinetic derivation of navier-stokes-like traffic equations. *Physical Review E*, 53(3):2366, 1996.
- [7] Carlos F. Daganzo. The cell transmission model. part i: A simple dynamic representation of highway traffic. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1993.
- [8] Roberto Horowitz, Adolf May, Alex Skabardonis, Pravin Varaiya, Michael Zhang, Gabriel Gomes, Laura Munoz, Xiaotian Sun, and Dengfeng Sun. Design, field implementation and evaluation of adaptive ramp metering algorithms. 2005.
- [9] L. Muñoz, Xiaotian Sun, R. Horowitz, and L. Alvarez. Traffic density estimation with the cell transmission model. In *American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003*, volume 5, pages 3750 – 3755 vol.5, june 2003.
- [10] Laura Muñoz, Xiaotian Sun, Roberto Horowitz, and Luis Alvarez. Piecewise-linearized cell transmission model and parameter calibration methodology. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1965(-1):183–191, 01 2006.
- [11] Randall J LeVeque. *Finite volume methods for hyperbolic problems*, volume 31. Cambridge university press, 2002.
- [12] Richard Courant, Kurt Friedrichs, and Hans Lewy. On the partial difference equations of mathematical physics. *IBM journal of Research and Development*, 11(2):215–234, 1967.

-
- [13] Xing-Ju Wang, Xiao-Ming Xi, Lin Huang, and Tao Zhang. A traffic flow simulation model based on the desired speed in merging sections on freeways. *Advances in Information Sciences & Service Sciences*, 4(1), 2012.
 - [14] Christoph Hametner, Markus Stadlbauer, Maxime Deregnaucourt, Stefan Jakubek, and Thomas Winsel. Optimal experiment design based on local model networks and multi-layer perceptron networks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 26(1):251–261, 2013.
 - [15] Graham Clifford Goodwin and Robert L Payne. *Dynamic system identification: experiment design and data analysis*. 1977.