



BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Gegenüberstellung von Fahrzeugfolgmodellen und Experimenten zur
Verkehrsdynamik von Fahrrädern und E-Bikes

Bachelor Thesis

LuFG Computersimulation für Brandschutz und Fußgängerverkehr
FB D – Abteilung Bauingenieurwesen
Bergische Universität Wuppertal

Betreuer:

Prof. Dr. Armin Seyfried

Dr. Mohcine Chraibi

von

Erik Andresen

Eidesstattliche Erklärung

Ich gewährleiste hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig erarbeitet und verfasst habe. Ich habe ausschließlich die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und sämtliche Zitate kenntlich gemacht.

Wuppertal, den 20.10.2012

Erik Andresen

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle meinen Betreuern Prof. Dr. Armin Seyfried und Dr. Mohcine Chraïbi für die Unterstützung bei der Implementation der Modellierung, bei der Organisation und Ausführung der Radexperimente am 6. Mai 2012 und beim Verfassen dieser Arbeit selbst danken. Weiterhin gilt mein Dank meiner Familie für die Hilfe bei der Erstellung des Modells und für die Hilfe bei der Ausführung der Radexperimente. Ich danke Stefan Holl, Fred von Werne, Andreas Meunders und Jun Zhang für die Organisation und Mithilfe bei den Radexperimenten. Für die Unterstützung bei der Organisation und der Ausführung der Radexperimente und dem Basteln der Marker danke ich Hülya Sacihan. Für die excellenten Videoaufnahmen der Experimente danke ich Maik Boltes und Wolfgang Mehner. Ferner möchte ich mich bei Wolfgang Mehner für die professionelle Arbeit beim Extrahieren der Trajektorien aus den Videoaufnahmen bedanken. Aufgrund seiner guten Arbeit, musste ich die Trajektorien nicht mehr nachbearbeiten oder korrigieren. Ich bedanke mich bei allen Probanden und Helfern der Radexperimente die, trotz schlechtem Wetters, konzentriert und diszipliniert an den Versuchsreihen teilgenommen haben. Auch danke ich der Westdeutschen Zeitung, die uns ihr Gelände für die Versuche zur Verfügung stellten.

Kurzfassung

In dieser Thesis geht es um die Darstellung des selbst erarbeiteten Necessary-Deceleration-Fahrzeugfolgmodells (NDM). Nach mathematischer Beschreibung bzw. Herleitung werden Grenzen und Möglichkeiten des Modells erörtert. Dabei wird das NDM mit anderen bereits existierenden Fahrzeugfolgmodellen verglichen. Es stellt sich heraus, dass das NDM weitgehend realistisches und kollisionsfreies Fahrverhalten in allen Verkehrssituationen der Längsdynamik (freie Fahrt, Fahrgeschwindigkeit, Annäherung auf ein Hindernis) abbilden kann. Weiterhin ist das Modell als *robust* einzustufen, da das modellierte Fahrverhalten nur unwesentlich auf Veränderung der Modellparameter reagiert. Die Modellparameter, die jeweils eine Eigenschaft des Fahrers oder des Fahrzeugs widerspiegeln, werden durch Daten der Radexperimente vom 6. Mai 2012 bestimmt. Im darauf folgenden Vergleich des Modells mit den Ergebnissen der Radexperimente ergeben sich Übereinstimmungen im Beschleunigungs- und Bremsverhalten der Fahrzeuge. Die Übereinstimmungen der Fundamentaldiagramme aus Modellierung und den Radexperimenten in relevanten Merkmalen bestätigen, dass auch das Verkehrsverhalten bei Fahrgeschwindigkeit durch das NDM realistisch abgebildet wird. Bei Vergleich der Trajektorien der Versuche und der Trajektorien der Simulation, zeigt sich jeweils ein identisches Verhaltensmuster der Fahrzeuge.

Abstract

This thesis deals with the representation of the self-developed Necessary-Deceleration-Model (NDM). After mathematical description and derivation, the limits and possibilities of the model are discussed. The NDM is compared with other existing vehicle-following models. After proper calibration the NDM can model largely realistic collision-free driving in all longitudinal traffic situations (free travel, following another vehicle, approaching an obstruction). Furthermore, the model can be classified as *reasonable*, because the modeled driving behavior responds only slightly to changes in the model parameters. These parameters that reflect each one characteristic of the driver or the vehicle, are calibrated by means of empirical data from the bicycle-experiments executed on May 6th, 2012. The model shows good agreement with the empirical data especially in the acceleration- and breaking performance of the vehicles. The similarities of the fundamental diagrams of the simulation and the experiment in relevant characteristics confirm that the traffic behavior when following another vehicle by the NDM is also realistically. On the basis of the comparison of the trajectories of the experiments and the trajectories of the simulation it turns out that the following behavior emerging from the NDM is in each case realistic.

Variablenverzeichnis

Variable	Definition	Einheit
A	Querschnittsfläche des Messbereichs	m^2
a	Beschleunigung	m/s^2
a_{mic}	Anzustrebende Beschleunigung	m/s^2
b	Bremsverzögerung	m/s^2
β	Formfaktor	dimensionslos
b_2	Bremsverzögerung (Summand 2)	m/s^2
b_{kin}	Kinematische Verzögerung	m/s^2
b_{max}	Maximale Bremsverzögerung	m/s^2
γ	Sensitivitätsparameter	s^{-1}
δ	Formparameter	dimensionslos
ϵ	Geringe Differenzgeschwindigkeit	m/s
J	Verkehrsfluss	$1/\text{s}$
L	Länge des Messbereichs	m
l	Länge eines Fahrzeugs	m
N	Anzahl der Probanden im System	dimensionslos
r	Faktor für den idealen Abstand	dimensionslos
ρ	Verkehrsdichte	$1/\text{m}$
s	Abstand zum Vorderfahrzeug	m
s_0	Minimalabstand bei Stillstand	m
s^*	Wunschabstand	m
Δs	Übergangsbreite	m

Variable	Definition	Einheit
T	Folgezeit	s
τ	Relaxationszeit	s
t_{in}	Zeitpunkt des Erreichens des Messbereichs	s
t_{out}	Zeitpunkt des Verlassens des Messbereichs	s
δt	Numerischer Aktualisierungszeitschritt	s
v_0	Wunschgeschwindigkeit	m/s
v_e	Gleichgewichtsgeschwindigkeit	m/s
v_l	Geschwindigkeit des Vordermanns	m/s
v_{mic}	Anzustrebende Geschwindigkeit	m/s
v_{opt}	Optimale Geschwindigkeit	m/s
v_{safe}	Sichere Geschwindigkeit	m/s

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	i
Danksagung	iii
Kurzfassung	v
Abstract	vii
Variablenverzeichnis	x
Abbildungsverzeichnis	xx
Tabellenverzeichnis	xxi
I Einführung	1
1 Einleitung	3
1.1 Wozu Forschung in der Fahrradverkehrsdynamik?	3
1.2 Ziel der Arbeit	4
2 Einfache Fahrzeugfolgemodelle	5
2.1 Allgemeines	5
2.2 Mathematische Beschreibung von Fahrzeugfolgemodellen	6
2.3 Homogener und heterogener Verkehr	7
2.4 Optimal-Velocity-Modell	8
2.4.1 Definition	8
2.4.2 Möglichkeiten und Grenzen des OVM	10
2.5 Newell-Modell	11
2.5.1 Definition	11
2.6 Full-Velocity-Difference-Modell	12

2.6.1	Definition	12
2.6.2	Möglichkeiten und Grenzen des FVDM	13
3	Aus Fahrstrategien hergeleitete Fahrzeugfolgemodelle	15
3.1	Aufbau und Kriterien	15
3.2	Gipps-Modell	16
3.2.1	Allgemeine Beschreibung	16
3.2.2	Mathematische Beschreibung	17
3.2.3	Möglichkeiten und Grenzen des Gipps-Modells	18
3.3	Intelligent-Driver-Modell	19
3.3.1	Allgemeine Beschreibung	19
3.3.2	Mathematische Beschreibung	20
3.3.3	Möglichkeiten und Grenzen des IDM	23
II	Das Necessary-Deceleration-Modell	25
4	Das Necessary-Deceleration-Modell	27
4.1	Allgemeines	27
4.2	Herleitung bzw. mathematische Beschreibung	28
4.3	Grenzen und Möglichkeiten des NDM	31
4.4	Erweiterung des Modells	33
4.4.1	1. Erweiterung	33
4.4.2	2. Erweiterung	33
4.5	Betrachtung der Simulation in einem geschlossenen System	37
III	Die Radexperimente vom 6.Mai 2012	41
5	Beschreibung der Radexperimente vom 6.Mai 2012	43
5.1	Ziel der Experimente	43
5.2	Aufbau und Durchführung der Versuchsreihen	43
5.2.1	Versuchsaufbau	43
5.2.2	Durchführung	45
5.3	Beobachtungen	45

IV Auswertung der Experimente/Gegenüberstellung Experiment-Modellierung	49
6 Auswertung der Experimente/Gegenüberstellung Experiment-Modellierung	51
6.1 Auswertung der Einzelexperimente	51
6.1.1 Beschleunigungsphase	51
6.1.2 Bremsphase	52
6.2 Auswertung der Gruppenexperimente	54
6.2.1 Gegenüberstellung der Fundamentaldiagramme	54
6.2.2 Gegenüberstellung der Trajektorien	59
V Schlussbetrachtungen	63
7 Schlussbetrachtung	65
7.1 Zusammenfassung und Fazit	65
7.2 Ausblick	66
Literaturverzeichnis	67
VI Anhang	69
A Anhang A	71
A.1 Zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeit der Radfahrer bei den Gruppenversuchen am 6. Mai 2012.	71
A.2 Zeitliche Entwicklung der Dichte der geschlossenen Systeme bei den Gruppenversuchen am 6. Mai 2012.	72
B Anhang B	74
B.1 Methode <i>B</i> zur Bestimmung der Dichte in einem geschlossenen Verkehrssystem	74

Abbildungsverzeichnis

2.1	Die Abbildung zeigt den Verlauf der Funktion v_{opt} nach BANDO ET. AL (1995) mit folgenden Parametern: $v_0 = 120$ km/h; $\Delta s = 15$ m; $\beta = 1,5$ (auf der Autobahn); $v_0 = 54$ km/h; $\Delta s = 8$ m; $\beta = 1,5$ (für den Stadtverkehr) Quelle: M. TREIBER, A.KESTING (2010)	10
2.2	Die Abbildung zeigt den Verlauf der Funktion v_{opt} mit linearer Abhängigkeit vom Abstand s mit folgenden Parametern: $v_0 = 120$ km/h; $T = 1,4$ s; $s_0 = 3$ m (auf der Autobahn); $v_0 = 54$ km/h; $T = 1,2$ s; $s_0 = 2$ m (für den Stadtverkehr) Quelle: M. TREIBER, A.KESTING (2010)	11
2.3	Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des OV-Modells unter Verwendung der Geschwindigkeitsfunktion 2.14 in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Geschwindigkeitsfunktion wie in Abb. 2.2. $\tau = 0,65$ s. Quelle: M. TREIBER, A.KESTING (2010)	12
2.4	Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des Full-Velocity-Difference-Modell mit der Geschwindigkeitsfunktion 2.14 in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). $\gamma = 0.6$ s ⁻¹ ; $\tau = 5$ s. Restliche Parametrisierung des Modells wie in Abb. 2.2. Quelle: M. TREIBER, A.KESTING (2010)	14
3.1	Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des Gipps-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung des Modells: $v_0 = 54$ km/h; $\Delta t = 1,1$ s; $a = 1,5$ m/s ² ; $b = 1,0$ m/s ² ; $s_0 = 2$ m. Quelle: M. TREIBER, A.KESTING (2010)	19
3.2	Darstellung des Abbremsverhaltens bei Annäherung an eine LSA abhängig von der Wahl der komfortablen Verzögerung b . Die Ampel schaltet auf rot, wenn das betrachtete Fahrzeug sich 60 m von der Haltelinie entfernt ist. Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs beträgt dabei 54 km/h. Quelle: M. TREIBER, A.KESTING (2010)	23

- 3.3 Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des Intelligent-Driver-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung des Modells: $v_0 = 54$ km/h; $T = 1,0$ s; $a = 1,0$ m/s²; $b = 1,5$ m/s²; $s_0 = 2$ m; $\delta = 4$. Quelle: M. TREIBER, A. KESTING (2010) 24
- 4.1 Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des ...-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Modellierung wie folgt: $v_0 = 54$ km/h; $\tau = 3.6$ s; $b_{max} = 10$ m/s²; $s_0 = 2.25$ m; $l = 4.75$ m; $\Delta t = 0.001$ s; $T = 1$ s; $r = 5$ 31
- 4.2 Links: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des erweiterten ND-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Modellierung wie folgt: $v_0 = 54$ km/h; $\tau = 3.6$ s; $b_{max} = 10$ m/s²; $s_0 = 2.25$ m; $l = 4.75$ m; $\Delta t = 0.001$ s; $T = 1$ s; $r = 5$. Rechts: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des ND-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario für Fahrräder (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Modellierung wie folgt: $v_0 = 18$ km/h; $\tau = 2.4$ s; $b_{max} = 5$ m/s²; $s_0 = 0.9$ m; $l = 1.8$ m; $\Delta t = 0.001$ s; $T = 1$ s; $r = 3$. Die Legende (rechts) gilt für beide Abbildungen. 34
- 4.3 Links: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des erweiterten ND-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Modellierung wie folgt: $v_0 = 54$ km/h; $\tau = 3.6$ s; $b_{max} = 10$ m/s²; $s_0 = 2.25$ m; $l = 4.75$ m; $\Delta t = 0.001$ s; $T = 1$ s; $r = 5$. Rechts: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des ND-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario für Fahrräder (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Modellierung wie folgt: $v_0 = 18$ km/h; $\tau = 2.4$ s; $b_{max} = 5$ m/s²; $s_0 = 0.9$ m; $l = 1.8$ m; $\Delta t = 0.001$ s; $T = 1$ s; $r = 3$. Die Legende (rechts) gilt für beide Abbildungen. 36
- 4.4 Links: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des erweiterten ND-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Modellierung wie folgt: $v_0 = 54$ km/h; $\tau = 2.4$ s; $b_{max} = 10$ m/s²; $s_0 = 2.25$ m; $l = 4.75$ m; $\Delta t = 0.001$ s; $T = 2$ s. Rechts: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des ND-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario für Fahrräder (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Modellierung wie folgt: $v_0 = 18$ km/h; $\tau = 2.4$ s; $b_{max} = 5$ m/s²; $s_0 = 0.9$ m; $l = 1.8$ m; $\Delta t = 0.001$ s; $T = 2$ s. Die Legende (rechts) gilt für beide Abbildungen. 36

4.5	Visualisierung einer Verkehrssimulation in einem geschlossenen System mit einer Länge von 86 Metern und 33 (links) bzw. 5 (rechts) Verkehrsteilnehmern. Fahrtrichtung gegen den Uhrzeigersinn.	38
4.6	Darstellung der Trajektorien einer Verkehrssimulation in einem geschlossenen System mit einer Länge von 86 Metern und 33 Verkehrsteilnehmern. (Numerisches Aktualisierungsintervall $\Delta t = 0.001$ s). Links: Folgezeit $T = 4$ s. Rechts: Folgezeit $T = 1$ s. Weitere Parametrisierung s. Tabelle 4.1.	38
5.1	Skizze des Versuchsaufbaus für die Radexperimente. Quelle: Katasteramt Wuppertal	44
5.2	Gruppenexperiment mit 33 Probanden in einer 86 Meter langen Schleife. Quelle: Ralf Eisenbach, Haan.	46
5.3	Die Abbildung zeigt das Gruppenexperiment mit unterschiedlicher Anzahl an Teilnehmer. Anzahl steigt von oben nach unten. Quelle: Maik Boltes, Wolfgang Mehner, Forschungszentrum Jülich.	48
6.1	Ortskoordinaten und Geschwindigkeiten der Radfahrer während der Beschleunigungsphase.	52
6.2	Mittelwert der Geschwindigkeitsverläufe aller realen bzw. simulierten Fahrer während der Beschleunigungsphase.	53
6.3	Links: Ortskoordinaten und Geschwindigkeiten der Probanden in der <i>finalen</i> Bremsphase. Rechts: Gegenüberstellung des Mittelwertes des Geschwindigkeitsverlaufes aller Versuchsteilnehmer und des simulierten Bremsverhaltens.	53
6.4	Fundamentaldiagramm (links) und Flussdiagramm (rechts) der Gruppenversuche am 6.Mai unter ausschließlicher Verwendung von Daten, die im stationären Zustand aufgenommen sind.	54
6.5	Fundamentaldiagramm (links) und Flussdiagramm (rechts) der Gruppenversuche am 6.Mai unter Verwendung aller Daten.	55
6.6	Abhängigkeit Abstand zum Vordermann / Geschwindigkeit	56
6.7	Gegenüberstellung der Fundamentaldiagramme aus Experiment und Modellierung. Parametrisierung des Modells nach Tabelle 6.1	58
6.8	Trajektorien im geschlossenen System mit 15 Fahrzeugen. Links: Experiment. Rechts: Simulation.	59
6.9	Trajektorien im geschlossenen System mit 20 Fahrzeugen. Links: Experiment. Rechts: Simulation.	60

6.10	Trajektorien im geschlossenen System mit 33 Fahrzeugen. Links: Experiment. Rechts: Simulation.	60
A.1	Zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeit der Radfahrer bei den Gruppenversuchen am 6. Mai 2012.	71
A.2	Zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeit der Radfahrer bei den Gruppenversuchen am 6. Mai 2012.	72
A.3	Zeitliche Entwicklung der Dichte der geschlossenen Systeme bei den Gruppenversuchen am 6. Mai 2012.	72
A.4	Zeitliche Entwicklung der Dichte der geschlossenen Systeme bei den Gruppenversuchen am 6. Mai 2012.	73
B.1	Gegenüberstellung zweier Fundamentaldiagramme zur Fußgängerdynamik, erstellt aus identischen Trajektorien, jedoch mit Hilfe von verschiedenen Messmethoden. Links: Methode <i>B</i> . Rechts: Methode <i>C</i> . Quelle: ZHANG, J. ET AL. (2011)	75

Tabellenverzeichnis

4.1	Modellparameter für Radverkehrssimulationen im geschlossenen System. . .	37
6.1	Angepasste Modellparameter für Radverkehrssimulationen im geschlossenen System.	57

Teil I

Einführung

1 Einleitung

1.1 Wozu Forschung in der Fahrradverkehrsdynamik?

Das Fahrrad ist bereits Verkehrsmittel der Wahl, wenn es darum geht, kurze Strecken zu absolvieren. Weiterhin ist das Fahrradfahren selbst bereits eine gängige Freizeitbeschäftigung für alle Altersgruppen. Die in zunehmendem Maße entstehenden Fahrradtrassen, häufig umgebaute stillgelegte Bahntrassen, dienen erfolgreich zur weiteren Popularisierung des Radfahrens als Freizeitaktivität. Zusätzlich ändert sich das ökologische Bewusstsein des Bürgers im Zusammenhang mit der Klimaerwärmung und dem voraussichtlichen Mangel an Ressourcen wie Öl. Das Rad soll nun auch das Transportmittel der Wahl sein, um zum Arbeitsplatz zu gelangen bzw. längere Strecken zu absolvieren. Hierfür sollen auch in zunehmendem Maße die immer populärer werdenden E-Bikes bzw. Pedelecs eingesetzt werden. Die immer häufigere Nutzung des Fahrrads führt dazu, dass bestehende Freizeittrassen bereits von so vielen Fußgängern und Radfahrern genutzt werden, dass sich hier eine Betrachtung der Verkehrsdynamik lohnt. Weiterhin sind Strecken in Planung, auf denen Radfahrer und Autos gemeinsam fahren sollen. Weder das Fahrverhalten auf reinen Radtrassen noch das Verhalten der oben genannten Arten heterogenen Verkehrs sind bereits hinreichend wissenschaftlich untersucht.

Mit Hilfe von Experimenten und Modellierungen sollen nun die oben genannten Verkehrssysteme untersucht werden, aus den Ergebnissen neue Trassen geplant und dimensioniert werden bzw. schon existierende Wege aus- oder umgebaut werden. Dabei sollen die Modellierungen Anhaltspunkte für die Sicherheit der Radfahrer/Autofahrer und Fußgänger geben und weiterhin eine Vorhersage für Verkehrsflüsse (auch eventuelle Stauungen) ermöglichen.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, die simulierte Verkehrsdynamik des *Necessary-Deceleration-Modells* und das reale Verkehrsverhalten der Teilnehmer der Radexperimente am 6.Mai 2012 gegenüber zu stellen.

Dabei soll zunächst das *Necessary-Deceleration-Modell* entwickelt bzw. erörtert werden. Dazu gehört die Einordnung des Modells in die Reihe anderer Fahrzeugfolgemodelle und die Beantwortung der Frage, ob das Modell alle bekannten Verkehrssituationen (freie Fahrt, Folgefahrt und kollisionsfreie Annäherung an Hindernisse und langsamere vorrausfahrende Fahrzeuge) simulieren kann. Es gilt dann, die Ergebnisse der Radexperimente vom 6.Mai 2012 zu erarbeiten und zu interpretieren. Durch Auswertung von Beschleunigungs- bzw. Bremsverhalten bei den Einzelexperimenten, sowie des Fundamentaldiagramms aus den Gruppenexperimenten, kann dann das Modell kalibriert werden. Kalibrierung bedeutet, dass Beschleunigungs- bzw. Bremsverhalten, Größe des Sicherheitsabstands, etc. der virtuellen Fahrzeuge in der Simulation durch Veränderung von bisher frei gewählten bzw. abgeschätzten Parametern dem Verhalten der realen Probanden des Experiments angeglichen wird. Dabei sollen speziell die Fundamentaldiagramme aus Simulation und Experiment verglichen werden. Ziel ist es dabei auch herauszufinden, inwiefern bzw. wie stark sich die Veränderung der Modellparameter auf die modellierte Verkehrsdynamik auswirken. Abschließend sollen Stärken und Schwächen der Modellierung bewertet werden.

Auf der Grundlage der Ergebnisse aus dieser Thesis können weitere Untersuchungen bezüglich Verkehrsdynamik getätigt werden, wie z. B. die Gegenüberstellung von Fahrrad- und Fußgängerdynamik. Weiterhin kann aufbauend auf diese Thesis Forschung im Bereich des heterogenen Verkehrs durchgeführt werden.

2 Einfache Fahrzeugfolgemodelle

Die in den folgenden zwei Kapiteln (Kapitel 2 und 3) dargestellten Beschreibungen, Erörterungen, Herleitungen und Bewertungen der Verkehrsmodelle sind, sofern nicht explizit angegeben, aus dem Buch M. TREIBER, A.KESTING (2010) sinngemäß übernommen.

2.1 Allgemeines

Nach M. TREIBER, A.KESTING (2010) beschreiben Fahrzeugfolgemodelle das Verhalten eines Fahrzeugs aus seiner eigenen Perspektive, wenn es sich in einem Verkehrssystem befindet. D. h. jedes Fahrzeug bewegt sich nach bestimmten mathematisch vorgeschriebenen Gesetzmäßigkeiten. Fahrzeugfolgemodelle gehören zu den wichtigsten mikroskopischen Verkehrsmodellen, da sie sehr detailliert die Fahrweise eines einzelnen Fahrzeugs abbilden können. Die von Pipes und Reuschel (vgl. M. TREIBER, A.KESTING (2010) und PIPES, L.A. (1953)) in den 50er Jahren entwickelten Fahrzeugfolgemodelle enthalten bereits folgende Charakteristik, die Grundlage für viele weitergeführte Folgeemodelle sind. Die aktuelle Geschwindigkeit eines Fahrers sollte so angepasst sein, dass genug Sicherheitsabstand zum Vordermann eingehalten wird.

Fahrzeugfolgemodelle sind eindimensionale Modelle. Unterschieden wird dennoch zwischen Modellen der Längsdynamik und Modellen der Querdynamik. Modelle der Querdynamik beinhalten auch die Möglichkeit, dass die Fahrzeuge ihre Spur (z. B. um zu überholen) verlassen. Die Fahrzeuge bewegen sich immer in Fahrtrichtung der Spur. Daher sind auch Modelle der Querdynamik eindimensionale Modelle. In dieser Thesis werden ausschließlich Longitudinalmodelle (Modellierung der Längsdynamik) behandelt. Simulierte Fahrer in Longitudinalmodellen bewegen sich ausschließlich auf einer Fahrspur. Weiterhin lassen sich Fahrzeugfolgemodelle in Minimalmodelle und erweiterte bzw. aus Fahrstrategien hergeleitete Modelle unterscheiden. Zunächst sollen nur die Minimalmodelle betrachtet werden.

Minimalmodelle können oft nur einen Teil der allgemein bekannten Verkehrssituationen

(Freie Fahrt, Folgefahrt, Bremsen vor Hindernissen oder langsamer fahrenden Fahrzeugen) abbilden. Die ersten Folgemodelle von Reuschel und Pipes beispielsweise simulierten ausschließlich die Folgefahrt eines Fahrzeugs. Im Fall eines Hindernisses erfolgt die Geschwindigkeitsanpassung in diesen Modellen in einem Zeitschritt mit unendlicher Beschleunigung bzw. Bremsverzögerung. D. h. das Fahrzeug bleibt augenblicklich stehen, was offensichtlich nicht dem realen Fahrverhalten sämtlicher bekannter Fahrzeuge entspricht.

2.2 Mathematische Beschreibung von Fahrzeugfolgemo- deln

Zunächst ist jedes Fahrzeug i in einem Verkehrssystem durch eine Ortskoordinate $x_i(t)$ gekennzeichnet (vgl. M. TREIBER, A. KESTING (2010)). Das Fahrzeug kann sich nur in Fahrtrichtung der Fahrspur bewegen und diese nicht verlassen. Daher ist das Fahrzeug eindeutig durch die Ortskoordinate $x_i(t)$, seiner Geschwindigkeit und seiner Beschleunigung in Richtung der Fahrspur charakterisiert. In zeitkontinuierlichen Modellen kann die Ortskoordinate zu jedem Zeitpunkt t durch Lösung der folgenden Differentialgleichungen bestimmt werden:

$$\dot{x}_i(t) = \frac{dx_i(t)}{dt} = v_i(t), \quad (2.1)$$

$$\dot{v}_i(t) = \frac{dv_i(t)}{dt} = a_{mic,i}(t), \quad (2.2)$$

Wird die Zeit diskret modelliert, ändert sich die Ortskoordinate $x_i(t)$ in Abhängigkeit von der Größe der Geschwindigkeit $v_i(t)$ in jedem Zeitschritt Δt . Die Änderung der Geschwindigkeit errechnet sich wie folgt aus der Größe der Beschleunigung $a_{mic,i}(t)$. Es gilt:

$$v_i(t + \Delta t) = v_i(t) + a_{mic,i}(t)\Delta t, \quad (2.3)$$

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + \frac{v_i(t) + v_i(t + \Delta t)}{2} \Delta t. \quad (2.4)$$

Dabei beschreibt $a_{mic,i}$ die im nächsten Zeitschritt anzustrebende Beschleunigung. In vielen einfachen Modellen wird ausschließlich die Geschwindigkeit $v_i(t)$ ermittelt, bzw. auf eine explizite Berechnung der Beschleunigung $a_{mic,i}(t)$ verzichtet. Man erhält:

$$v_i(t + \Delta t) = v_{mic,i}(t), \quad (2.5)$$

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + \frac{v_i(t) + v_i(t + \Delta t)}{2} \Delta t. \quad (2.6)$$

Die Geschwindigkeit $v_{mic,i}$ bzw. Beschleunigung $a_{mic,i}$ werden durch verschiedenste mathematische Funktionen beschrieben. In vielen Modellen sind diese Funktionen abhängig von folgenden Parametern:

1. Abstand Δx_i zum Vordermann, der sich z. B. durch den Abstand der Schwerpunkte der beiden Fahrzeuge ermitteln lässt:

$$\Delta x_i = x_{i-1} - x_i \quad (2.7)$$

(Auch denkbar wäre eine Abhängigkeit vom Abstand zwischen Hinterkante des Fahrzeugs des Vordermanns zu Vorderkante des betrachteten Fahrzeugs).

2. Differenzgeschwindigkeit Δv_i zwischen betrachtetem Fahrzeug und Vordermann:

$$\Delta v_i = v_{i-1} - v_i \quad (2.8)$$

2.3 Homogener und heterogener Verkehr

Im mathematischen Sinne sind die Fahrzeuge also getriebene Teilchen, die eine treibende bzw. vom Vordermann abstoßende Kraft erfahren (vgl. M. TREIBER, A. KESTING (2010)). Wählt man für alle Fahrzeuge eines Systems identische Parameter, die für die Eigenschaften der Fahrzeuge stehen, erhält man sogenannten identische Fahrzeug-Fahrer-Einheiten bzw. homogenen Verkehr. Auf ebenfalls homogener Strecke gilt dann: Bei Gleichgewicht der treibenden und bremsenden Kräfte (sogenanntes Fließgleichgewicht) stellt sich auch ein Gleichgewicht im Verkehrssystem ein, z. B. alle Fahrzeuge fahren gleich schnell und halten denselben Sicherheitsabstand ein ($a_{mic}(t) = 0$ bzw. $v_{mic}(t) = v(t)$).

In der Realität gibt es keine identischen Fahrzeug-Fahrer-Einheiten. Selbst in Verkehrssystemen, in denen ausschließlich eine Sorte von Fahrzeugen, wie beispielsweise Fahrräder vorkommt, ist das Fahrverhalten (Wunschgeschwindigkeit, Beschleunigungsverhalten) der Personen unterschiedlich. Bei ungleich parametrisierten Fahrzeugen wird von heterogenem Verkehr gesprochen. Hier sind mikroskopische Modelle wie Fahrzeugfolgemodelle vorteilhaft, denn sie können heterogenen Verkehr durch folgende Verfahren simulieren. Die erste Möglichkeit besteht darin, für verschiedene Fahrzeugtypen unterschiedliche Modelle einzusetzen. Dieses Verfahren könnte beispielsweise in einem Verkehrssystem mit Autos und Fahrrädern eingesetzt werden. Alternativ ist es denkbar, für alle Fahrzeuge bzw. Fahrzeugtypen ein und dasselbe Modell zu benutzen. Lediglich die unterschiedlichen Parameter beschreiben die unterschiedlichen Eigenschaften von Fahrer und Fahrzeug.

In offenen Verkehrssystemen¹ bildet sich schnell eine Schlange hinter einem langsamen Fahrer. Für eine sinnvolle Untersuchung eines offenen Systems ist es dementsprechend nötig, den Fahrzeugen die Fähigkeit eines Spurwechsels zu ermöglichen. In geschlossenen Systemen tritt dasselbe Phänomen auf für eine kleine Zahl von Verkehrsteilnehmern im Verhältnis zur Schleifenlänge. Ab einer bestimmten Anzahl an Fahrzeugen im System behindern sich jedoch die Teilnehmer so stark, dass ihre Geschwindigkeit unter die Wunschgeschwindigkeit des langsamsten Fahrzeugs fällt und somit zähfließender Verkehr bzw. Staus entstehen.

2.4 Optimal-Velocity-Modell

2.4.1 Definition

Das *Optimal-Velocity-Modell* (OVM) ist ein einfaches zeitkontinuierliches Fahrzeugfolgemodell. Der Kern des OVM ist die Funktion $v_{opt}(s)$ ². Sie beschreibt die *optimale* Geschwindigkeit eines einzelnen Fahrzeugs, abhängig vom Abstand zum Vordermann. Dementsprechend verringert ein Fahrzeug seine Geschwindigkeit, falls es zu nah auf das Vorderfahrzeug aufgefahren ist, um wieder einen bestimmten Sicherheitsabstand einzuhalten. Um die Funktionalität der Funktion v_{opt} zu gewährleisten, muss sie für folgende Sonderfälle folgende Bedingungen erfüllen:

1. Bei geringerem Abstand zum Vordermann soll die optimale Geschwindigkeit $v_{opt}(s)$ ebenfalls kleiner werden. Anders herum formuliert soll bei steigendem Abstand auch immer $v_{opt}(s)$ steigen. Es gilt also:

$$v'_{opt}(s) \geq 0. \quad (2.9)$$

2. Ist der Vordermann auf Grund eines Staus beispielsweise komplett zum Stillstand gekommen und das betrachtete Fahrzeug zu ihm aufgefahren, so soll die optimale Geschwindigkeit 0 betragen. Also gilt:

$$v_{opt}(0) = 0. \quad (2.10)$$

¹In offenen Systemen wird das erste Fahrzeug nicht vom letzten Fahrzeug beeinflusst. In geschlossenen Systemen bewegen sich die Teilnehmer hingegen auf einem Kreis oder einer Schleife. Hier hat zu mindest theoretisch jedes Fahrzeug einen Vordermann, von dem es beeinflusst wird.

² s beschreibt dabei den aktuellen Abstand zwischen Hinterkante des Vordermanns und Vorderkante des aktuell betrachteten Fahrzeugs.

3. Bei sehr großem Abstand zum Vorderfahrzeug soll sich die optimale Geschwindigkeit $v_{opt}(s)$ der Wunschgeschwindigkeit v_0 annähern. Man erhält:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} v_{opt}(s) = v_0. \quad (2.11)$$

Für das Führungsfahrzeug in einem offenen System gilt dementsprechend generell:
 $v_{opt}(t) = v_0$.

Damit die Fahrzeuge nicht augenblicklich von ihrer aktuellen Geschwindigkeit v auf die optimale Geschwindigkeit v_{opt} wechseln, wird zunächst durch folgende Gleichung eine aktuelle Beschleunigung $a_{mic}(s, v)$ berechnet, aus der dann durch analytische Integration (das OVM ist ein zeitkontinuierliches Modell) Geschwindigkeit bzw. Ortskoordinate berechnet werden kann:

$$\dot{v} = \frac{v_{opt}(s) - v}{\tau} \quad (2.12)$$

Dabei ist der Parameter τ als Anpassungs- oder Verzögerungszeit zu verstehen. Er ist maßgeblich dafür, wie schnell sich die aktuelle Geschwindigkeit v der optimalen Geschwindigkeit v_{opt} nähert.

Die Funktion v_{opt} ist zunächst nicht weiter spezifiziert und kann frei gewählt werden, solange sie die Gleichungen (2.9), (2.10) und (2.11) erfüllt. Beispielfhaft werden hier zwei verschiedene Vorschläge für die Funktion v_{opt} erörtert:

Die von BANDO ET. AL (1995) dargestellte Funktion beschreibt die optimale Geschwindigkeit v_{opt} als Produkt der Wunschgeschwindigkeit mit einem Beiwert, der abhängig vom aktuellen Abstand zum Vordermann, die Wunschgeschwindigkeit abmindern soll:

$$v_{opt}(s) = v_0 \frac{\tanh\left(\frac{s}{\Delta s} - \beta\right) + \tanh \beta}{1 + \tanh \beta} \quad (2.13)$$

In Abb. 2.4.1 ist der Verlauf der Funktion für die optimale Geschwindigkeit nach BANDO ET. AL (1995) dargestellt. Dabei lässt sich die Funktion v_{opt} und damit das Modell durch die beiden Parameter Δs (Übergangsbreite) und β (Formfaktor) in gewissen Grenzen, die noch im nächsten Abschnitt erörtert werden, so anpassen, dass es realistisches Fahrverhalten simuliert.³

Eine alternative Funktion beschreibt die optimale Geschwindigkeit v_{opt} als proportional zur Differenz zwischen aktuellem Abstand s zum Vordermann und Mindestabstand s_0 bei stehendem Verkehr. Die Konstante T wird Folgezeit genannt.

$$v_{opt}(s) = \max \left[0, \min \left(v_0, \frac{s - s_0}{T} \right) \right] \quad (2.14)$$

³Die Darstellung der Funktion v_{opt} wurde gegenüber der Originalveröffentlichung von BANDO ET. AL (1995) in so fern angeglichen, dass v_0 als Wunschgeschwindigkeit angesehen werden kann (vgl. M. TREIBER, A.KESTING (2010)).

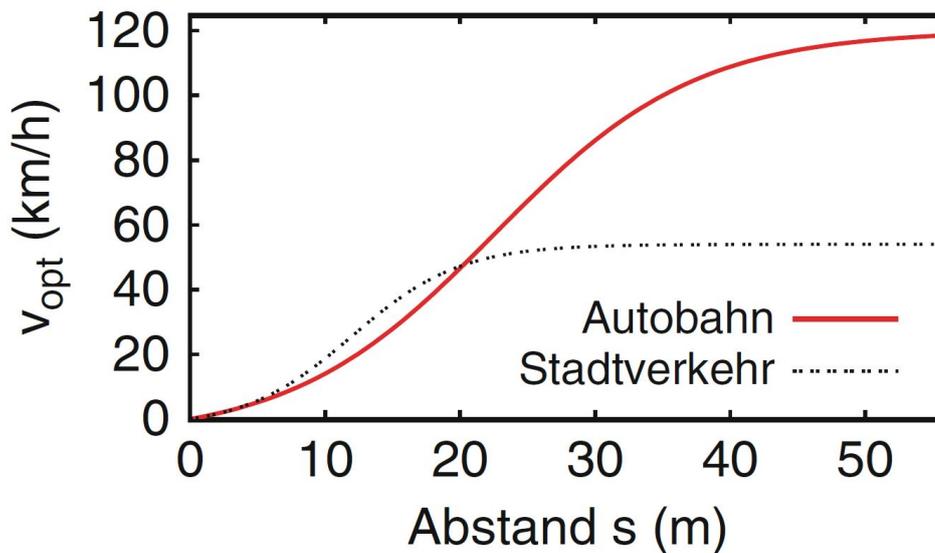


Abbildung 2.1: Die Abbildung zeigt den Verlauf der Funktion v_{opt} nach BANDO ET. AL (1995) mit folgenden Parametern: $v_0 = 120$ km/h; $\Delta s = 15$ m; $\beta = 1,5$ (auf der Autobahn); $v_0 = 54$ km/h; $\Delta s = 8$ m; $\beta = 1,5$ (für den Stadtverkehr) Quelle: M. TREIBER, A.KESTING (2010)

Dabei ist die optimale Geschwindigkeit v_{opt} durch die Wunschgeschwindigkeit v_0 begrenzt. Die Einschränkung, dass v_{opt} nicht negativ sein darf, verhindert *Rückwärtsfahren* bei Unterschreitung des Mindestabstandes s_0 . Der Minimalabstand s_0 ist hier als Abstand der Hinter- bzw. Vorderkanten der Fahrzeuge zu verstehen, nicht als Abstand der Schwerpunkte.

2.4.2 Möglichkeiten und Grenzen des OVM

Beschleunigung auf Wunschgeschwindigkeit des Führungsfahrzeugs, Folgefahrt der anderen Fahrzeuge und Annäherung an ein Hindernis sind zwar durch das OVM (mit beiden Funktionen für v_{opt}) simulierbar, die Anpassungszeit τ muss aber mit 0.65 s unrealistisch klein gewählt werden. Schon bei geringfügig höheren Anpassungszeiten (5%) entstehen negative Werte für den Abstand s zum Vordermann, d. h. das Modell ist nicht mehr kollisionsfrei. Weiterhin führen die klein gewählten Anpassungszeiten τ im Stadtverkehr zu nicht realisierbaren hohen Beschleunigungen bis zu 22 m/s² (realistisch wären maximale Beschleunigungen bis zu 3 m/s²). Stop-and-Go-Wellen treten zwar auf, ihre Periodendauern im Autobahnverkehr sind aber mit 1-2 min zu klein (vgl. M. TREIBER, A.KESTING (2010)). Bei Anpassungszeiten τ unterhalb von 0,65 s ergibt sich absolute Kolonnensta-

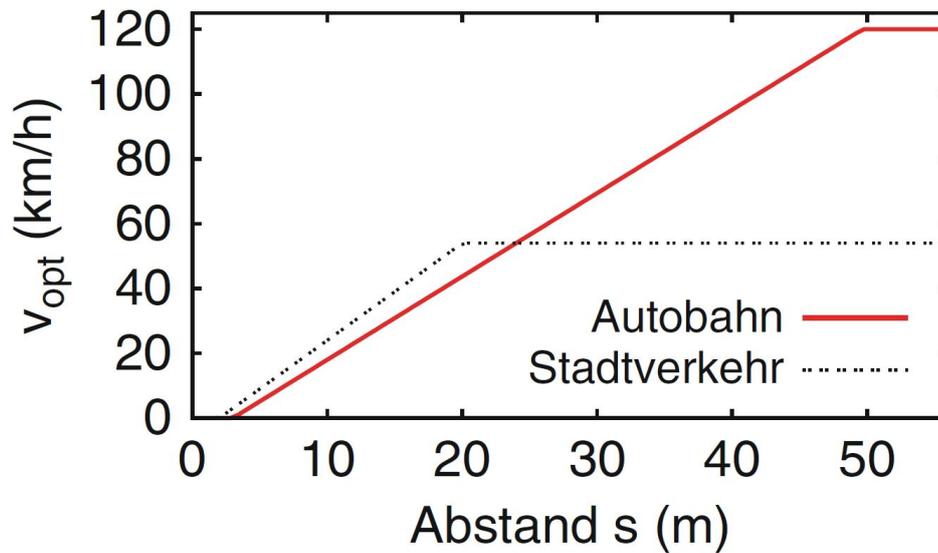


Abbildung 2.2: Die Abbildung zeigt den Verlauf der Funktion v_{opt} mit linearer Abhängigkeit vom Abstand s mit folgenden Parametern: $v_0 = 120$ km/h; $T = 1,4$ s; $s_0 = 3$ m (auf der Autobahn); $v_0 = 54$ km/h; $T = 1,2$ s; $s_0 = 2$ m (für den Stadtverkehr)
Quelle: M. TREIBER, A.KESTING (2010)

bilität⁴, bzw. damit verbundene nicht wirklichkeitsgetreue Staus ohne Wellenstruktur. Da das Modell derart empfindlich auf geringfügige Veränderung der Parameter reagiert, ist das Modell als nicht robust einzustufen. Dies ist damit zu erklären, dass das OVM ausschließlich vom Abstand s zum Vordermann abhängt, jedoch nicht von der Differenzgeschwindigkeit Δv zwischen Vordermann und betrachtetem Fahrzeug.

2.5 Newell-Modell

2.5.1 Definition

Nach M. TREIBER, A.KESTING (2010) ist das Newell-Modell das mathematisch äquivalente zeitdiskrete Modell zum OVM. Die Geschwindigkeit des nächsten Zeitschritts ist direkt durch die optimale Geschwindigkeit v_{opt} definiert:

$$v(t + \Delta t) = v_{opt}(s(t)) \quad (2.15)$$

⁴Kolonnenstabilität besteht dann, wenn durch Störung des Verkehrssystems (z. B. Führungsfahrzeug brems) entstandene Schwankungen sich nicht von Fahrzeug zu Hintermann aufschaukeln.

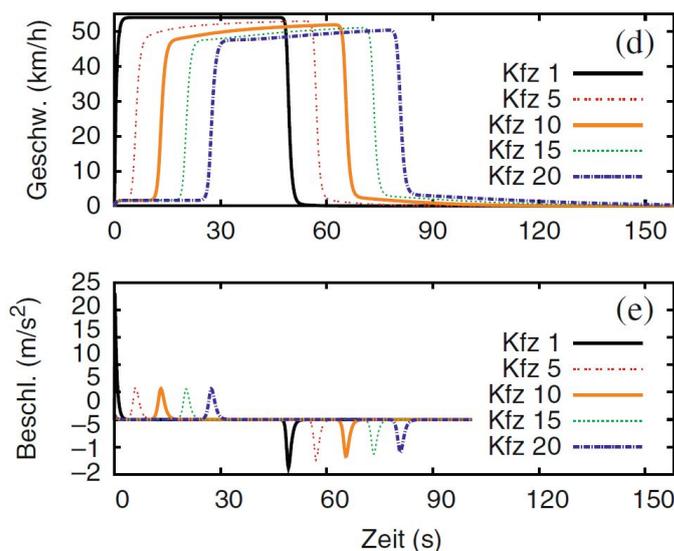


Abbildung 2.3: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des OV-Modells unter Verwendung der Geschwindigkeitsfunktion 2.14 in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Geschwindigkeitsfunktion wie in Abb. 2.2. $\tau = 0,65$ s. Quelle: M. TREIBER, A.KESTING (2010)

Dabei kann die Zeitspanne Δt genau wie der Parameter τ im OVM als Verzögerungszeit angesehen werden, welche ein Fahrzeug benötigt, um von aktueller Geschwindigkeit zu optimaler Geschwindigkeit zu beschleunigen bzw. abzubremsen. Gleicht man Δt der Anpassungszeit τ aus dem OVM an, so erhält man identische Simulationsergebnisse. Δt könnte ebenfalls als Reaktionszeit angesehen werden, dies macht aber nur in der Situation einer Folgefahrt Sinn. In der freien Beschleunigungsphase tritt nicht in jedem Zeitschritt eine Verzögerung auf, da Reaktionszeiten nur bei Ereigniswechseln⁵ auftreten. Eine Interpretation der Zeitspanne Δt als numerische Aktualisierungszeit ist in jeder Verkehrssituation sinnvoll. (vgl. M. TREIBER, A.KESTING (2010))

2.6 Full-Velocity-Difference-Modell

2.6.1 Definition

Das Full-Velocity-Difference-Modell (FVDM) ist ein gegenüber dem OV-Modell erweitertes Modell. Es berücksichtigt zusätzlich die relative Geschwindigkeit Δv zwischen Vordermann und aktuell betrachtetem Fahrzeug. Es ist wie das OVM als zeitkontinuierliches

⁵Mit Ereigniswechsel ist z. B. das Wechseln eines Fahrzeugs von Folgefahrt zu Bremsmanöver gemeint.

Modell definiert:

$$\dot{v} = \frac{v_{opt}(s) - v}{\tau} - \gamma \Delta v \quad (2.16)$$

γ ist hierbei ein Sensitivitätsparameter. Bei Wahl eines höheren Wertes für γ achtet ein Verkehrsteilnehmer stärker auf die Differenz zwischen seiner Geschwindigkeit und der des Verkehrsteilnehmers vor ihm (vgl. M. TREIBER, A.KESTING (2010)).

2.6.2 Möglichkeiten und Grenzen des FVDM

Die Erweiterung sorgt dafür, dass das Modell auch für Verzögerungszeiten τ größer als 1 kollisionsfrei bleibt.⁶ Die Festlegung der wesentlich höheren Anpassungszeit τ führt im Stadtszenario zu plausibleren Beschleunigungen im Bereich unterhalb von 2 m/s². Weiterhin entstehen im Autobahnverkehr realistischere Stop-and-Go-Wellen. Diese sehr kurzen Wellen entsprechen jedoch immer noch nicht der Wirklichkeit.

Ein weiterer Nachteil des Full-Velocity-Difference-Modells besteht darin, dass nicht alle Verkehrssituationen (Freie Fahrt, Folgefahrt, Annäherung an ein Hindernis) simuliert werden können: Auch ein weit entferntes stehendes oder langsam fahrendes Fahrzeug hindert einen Nachfolger daran, frei auf seine Wunschgeschwindigkeit zu beschleunigen, da die Berücksichtigung der Differenzgeschwindigkeit nicht vom Abstand zum Vordermann abhängt (vgl. M. TREIBER, A.KESTING (2010)).

⁶Im Vergleich: Beim OVM führten schon Erhöhungen von 5% gegenüber der Wahl einer unrealistischen Anpassungszeit τ von 0.65 s zu Unfällen.

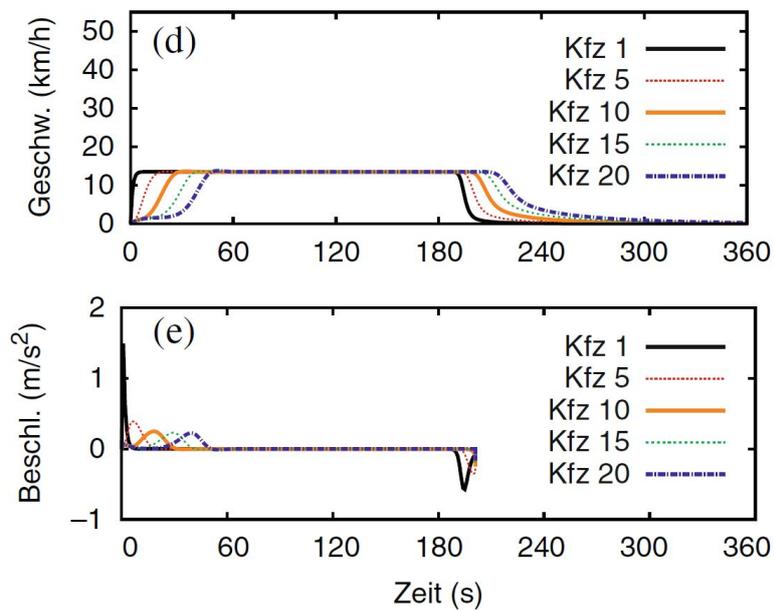


Abbildung 2.4: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des Full-Velocity-Difference-Modell mit der Geschwindigkeitsfunktion 2.14 in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). $\gamma = 0.6 \text{ s}^{-1}$; $\tau = 5 \text{ s}$. Restliche Parametrisierung des Modells wie in Abb. 2.2. Quelle: M. TREIBER, A.KESTING (2010)

3 Aus Fahrstrategien hergeleitete Fahrzeugfolge- modelle

3.1 Aufbau und Kriterien

Nach M. TREIBER, A.KESTING (2010) lassen sich die aus Fahrstrategien hergeleiteten Modelle, genau wie die im vorherigen Kapitel dargestellten einfachen Fahrzeugfolgemodelle, durch eine Beschleunigungsfunktion a_{mic} bzw. Geschwindigkeitsfunktion v_{mic} beschreiben. Wiederum kann zeitkontinuierlich oder diskret aktuelle Geschwindigkeit v bzw. Beschleunigung a berechnet werden. Daraus ergibt sich dann die Ortskoordinate x durch analytische oder numerische Integration.

Geht man davon aus, dass das Modell durch eine Beschleunigungsfunktion a_{mic} definiert ist, so sollte diese Funktion folgende Bedingungen erfüllen, damit das Modell alle bekannten Verkehrssituationen der Längsdynamik (Freie Fahrt, Fahrgasse, Annäherung an ein Hindernis) abbilden kann:

1. Bedingung für die freie Fahrt:

Ein Fahrzeug muss ungehindert auf seine Wunschgeschwindigkeit beschleunigen können, selbst wenn sich in hinreichender Entfernung ein Hindernis befindet. Es gilt:¹

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \frac{\partial a_{mic}(s, v, \Delta v)}{\partial s} = 0 \quad \text{für alle } \Delta v. \quad (3.1)$$

2. Bedingung für die Fahrgasse bzw. Situation einer Annäherung an ein Hindernis:

In einer Fahrzeugkolonne sollte die Beschleunigung eines Fahrzeugs (ausgenommen beim Führungsfahrzeug) abnehmen, wenn der Abstand zum Vordermann kleiner wird. Andere Variablen bleiben dabei konstant. Man erhält:

$$\frac{\partial a_{mic}(s, v, \Delta v)}{\partial s} \geq 0. \quad (3.2)$$

¹ Δv entspricht der Differenz zwischen Geschwindigkeit des aktuellen Fahrzeug und Vorderfahrzeug (Eine umgekehrte Definition wäre auch denkbar).

3. Weiterhin sollte die Bremsverzögerung umso stärker sein, je größer die Differenz der Geschwindigkeiten von aktuell betrachteten Verkehrsteilnehmer und seinem Vordermann (falls alle anderen Variablen konstant bleiben):

$$\frac{\partial a_{mic}(s, v, \Delta v)}{\partial \Delta v} \leq 0. \quad (3.3)$$

4. Ist ein Fahrzeug auf ein anderes aufgefahren, sollte es trotz Stillstand einen Minimalabstand s_0 einhalten:

$$a_{mic}(s, v = 0, \Delta v) = 0 \quad \text{für alle } \Delta v \leq 0, s \leq s_0. \quad (3.4)$$

Modelle, die die obigen Bedingungen erfüllen, bilden nicht nur alle relevanten Verkehrssituationen konsistent ab, sondern erzielen darüber hinaus noch folgende Effekte:

- Die Fahrzeuge, simuliert durch diese Modelle, reagieren nur bis zu einer bestimmten Entfernung auf bestimmte Wirkungen.
- Es existiert eine Gleichgewichtsgeschwindigkeit $v_e(s)$, die folgende Bedingungen erfüllt:

$$v_e'(s) \geq 0, \quad v_e(0) = 0, \quad \lim_{s \rightarrow \infty} v_e(s) = v_0 \quad (3.5)$$

Zusätzlich zu den bisher genannten Möglichkeiten sollte das Modell realistische Simulationen liefern, ohne dass Beschleunigungsparameter eingesetzt werden müssen, die zu physikalisch nicht möglichen Beschleunigungen bzw. Bremsverzögerungen führen. Für den Abbremsvorgang eines Fahrzeugs bedeutet das, dass früh genug mit sinnvoller Bremsverzögerung abgebremst werden muss (vorrasschauendes Fahren). Weiterhin ist das Auftreten von Stop-and-Go-Wellen erwünscht, denn diese Wellenstrukturen existieren in der Realität. Ein Modell, welches keine Kollisionsfreiheit² garantiert, ist unzulässig.

3.2 Gipps-Modell

3.2.1 Allgemeine Beschreibung

Die hier dargestellte Beschreibung des Gipps-Modells nach M. TREIBER, A.KESTING (2010) ist gegenüber der Originalpublikation von GIPPS, P.G. (1981) vereinfacht. Das

²Kollisionsfrei ist ein Modell dann, wenn es in üblichen Verkehrssituationen nicht zu Unfällen kommt. Unfälle, die durch grobe Fahrfehler (z. B. plötzliche Vollbremsung des Vorderfahrzeugs) erzeugt werden, sollen durchaus modelliert werden können, da sie in der Realität auftreten (Eine Unfallmodellierung wird hier nicht betrachtet).

Prinzip bzw. die Idee, die sich hinter dem Modell befindet, bleibt jedoch unverfälscht.

Den Kern dieses zeitdiskreten Modells bildet eine sichere Geschwindigkeit v_{safe} (ähnlich zur optimalen Geschwindigkeit v_{opt}). Jedes Fahrzeug hat diese Geschwindigkeit einzuhalten, damit es auch in der gefährlichsten (bei ausschließlicher Betrachtung der Längsdynamik) aller Verkehrssituationen (Vordermann macht eine plötzliche Vollbremsung) nicht zu Kollisionen kommt.

3.2.2 Mathematische Beschreibung

Wie in einigen bereits vorgestellten Modellen ist die Geschwindigkeitsfunktion v_{safe} abhängig vom Abstand zum Vordermann. Des Weiteren ist sie abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs.

Aus folgender grundlegender Gleichung ergibt sich der Bremsweg Δx eines Fahrzeugs bis zu einem stehenden Hindernis:

$$\Delta x = \frac{v^2}{2b}. \quad (3.6)$$

Dabei ist die Bremsverzögerung b im gesamten Bremsvorgang konstant. Da das Führungsfahrzeug jedoch nicht abrupt stehen bleibt, sondern auch bei Vollbremsung einen gewissen Bremsweg braucht, um stehen zu bleiben, gilt weiterhin³:

$$\Delta x = \frac{v^2}{2b} - \frac{v_l^2}{2b}. \quad (3.7)$$

Bei plötzlichem Bremsvorgang des Vorgängers braucht der betrachtete Verkehrsteilnehmer eine Zeitspanne Δt , um zu reagieren und seinen Bremsvorgang einzuleiten. Dies wird auch im Modell berücksichtigt. Man erhält:

$$\Delta x = v\Delta t + \frac{v^2}{2b} - \frac{v_l^2}{2b}. \quad (3.8)$$

Auch bei Stillstand halten Verkehrsteilnehmer einen Mindestabstand s_0 bzw. fahren nicht bis zur Stoßstange bzw. Hinterrad des Vordermanns auf. Bei Berücksichtigung dieser Tatsache gilt folglich:

$$\Delta x = s - s_0 = v\Delta t + \frac{v^2}{2b} - \frac{v_l^2}{2b}. \quad (3.9)$$

Wird die Gleichung nach v aufgelöst, so erhält man die Geschwindigkeit v_{safe} , bei der ein Fahrzeug im *Worst-Case* gerade noch einen Unfall vermeiden kann.

$$v_{safe}(s, v_l) = -b\Delta t + \sqrt{b^2\Delta t^2 + v_l^2 + 2b(s - s_0)}. \quad (3.10)$$

³ v_l ist die Geschwindigkeit des Vordermanns.

Die zweite Lösung der Gl. (3.9) ist nicht sinnvoll und wird daher nicht weiter betrachtet. Ist die sichere Geschwindigkeit v_{safe} kleiner als die aktuelle Geschwindigkeit, so bremst das Fahrzeug ab und nimmt im nächsten Iterationsschritt die sichere Geschwindigkeit v_{safe} an (Aktualisierungszeitschritt = Reaktionszeit Δt). Ist dagegen die aktuelle Geschwindigkeit im Verhältnis zur sicheren Geschwindigkeit kleiner, beschleunigt das Fahrzeug mit konstanter Beschleunigung a bis es wieder v_{safe} erreicht hat. Ist v_{safe} größer als die Wunschgeschwindigkeit, z. B. wenn der Vorgänger weit entfernt ist, wird logischerweise nur bis auf die Wunschgeschwindigkeit beschleunigt. Man erhält:

$$v(t + \Delta t) = \min[v + a\Delta t, v_0, v_{safe}(s, v_l)]. \quad (3.11)$$

3.2.3 Möglichkeiten und Grenzen des Gipps-Modells

Aus einer Fahrstrategie hergeleitet, enthält das Gipps-Modell ausschließlich anschauliche Parameter wie Größe der Beschleunigung oder Bremsverzögerung. Parameter wie der Formfaktor β der optimalen Geschwindigkeit aus dem OV-Modell, die keinen direkt Bezug zur Realität haben und deren Werte durch *Ausprobieren* bestimmt werden, sind hier nicht vorhanden. Weiterhin reagiert die Modellierung relativ unempfindlich auf Änderungen der Modellparameter. D. h. auch bei grober Veränderung der Parameter liefert das Modell noch sinnvolle Ergebnisse. Das Modell kann dementsprechend als *robustes* Modell angesehen werden. Im Autobahnverkehr ergibt sich eine wirklichkeitsnähere Dynamik verglichen mit denen der bereits vorgestellten Modelle: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit und Wellenlänge der Stop-and-Go-Wellen liegen wesentlich näher an der Realität. Das Beschleunigungs-, Brems- und Fahrverhalten generell ist im Stadt-Szenario ebenfalls näher an der Wirklichkeit: Die maximale Beschleunigung bzw. Bremsverzögerung liegt im Bereich unterhalb von 2 m/s^2 (s. Abb. 3.1). Das Wechseln von Brems- zu Beschleunigungsvorgang (oder umgekehrt) erfolgt jedoch augenblicklich ohne Übergang und wirkt unnatürlich. Das liegt daran, dass die Brems- und Beschleunigungsparameter a, b konstant bleiben. Dem Fahrzeug bleibt folglich nur die Möglichkeit seine Geschwindigkeit mit Beschleunigung a zu erhöhen, mit Bremsverzögerung b abzubremsen oder die Geschwindigkeit beizubehalten. Eine Unterscheidung zwischen komfortabler und maximaler Beschleunigung wird nicht berücksichtigt.

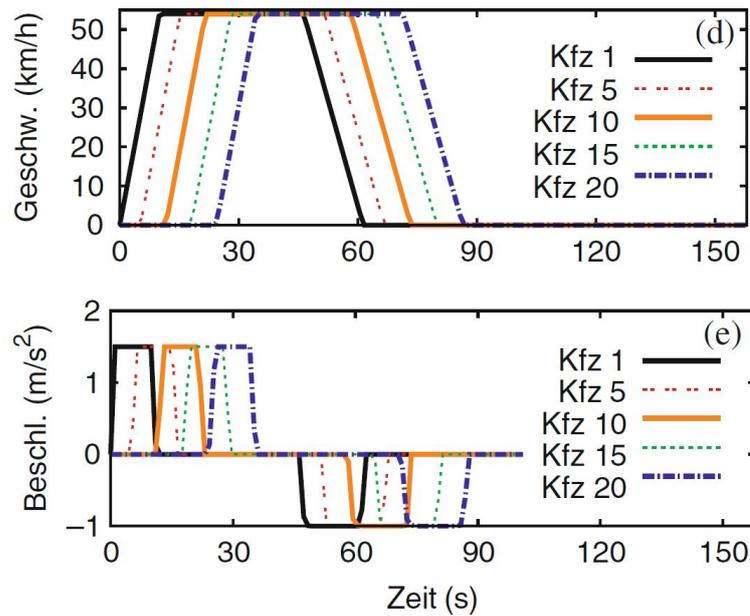


Abbildung 3.1: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des Gipps-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung des Modells: $v_0 = 54 \text{ km/h}$; $\Delta t = 1,1 \text{ s}$; $a = 1,5 \text{ m/s}^2$; $b = 1,0 \text{ m/s}^2$; $s_0 = 2 \text{ m}$.
Quelle: M. TREIBER, A.KESTING (2010)

3.3 Intelligent-Driver-Modell

3.3.1 Allgemeine Beschreibung

Nach TREIBER ET AL. (2000) und M. TREIBER, A.KESTING (2010) kann das zeitkontinuierlich definierte Intelligent-Driver-Model (IDM) alle Verkehrssituationen der Längsdynamik (freie Fahrt, Folgefahrt, Annäherung auf ein Hindernis) abbilden. Es ist vollständig kollisionsfrei und liefert wahrheitsgetreue Ergebnisse in Bezug auf die Größe der Beschleunigung bzw. Bremsverzögerung. Eine Erweiterung gegenüber dem Gipps-Modell besteht darin, dass wesentlich natürlicheres Brems- und Beschleunigungsverhalten simuliert werden kann. Dies wird u. a. durch die Einbringung einer kollisionsvermeidenden intelligenten Bremsstrategie ermöglicht, die folgendermaßen aufgebaut ist:

1. Situation I:

Ist es für ein Fahrzeug nicht notwendig, stark abzubremsen, da z. B. der Vordermann noch hinreichend weit entfernt ist oder dessen Geschwindigkeit nur wenig kleiner ist als die des betrachteten Fahrzeugs, so soll der betrachtete Verkehrsteilnehmer ein komfortables Bremsmanöver einleiten.

2. Situation II:

Der Abstand zum Vordermann ist relativ klein und dieser bremst plötzlich stark. Hier gilt es einen Unfall zu vermeiden, indem das Fahrzeug mit höherer, bis zu maximaler Bremsverzögerung abbremst. Ist dann ein gewisser Sicherheitsabstand wieder eingehalten und die Differenzgeschwindigkeit der beiden Fahrzeuge klein genug, kann mit komfortabler Verzögerung weitergebremst werden.

Das Modell soll die folgenden weiteren Bedingungen erfüllen:

- Die Funktion der Beschleunigung des Modells muss die in Kapitel 3.1 beschriebenen Kriterien und damit die Gleichungen (3.1), (3.2), (3.3) und (3.4) erfüllen.
- Bei Folgefahrt sollte ein Verkehrsteilnehmer einen von seiner Geschwindigkeit abhängigen Sicherheitsabstand einhalten. Dieser Sicherheitsabstand beschreibt sich im einfachsten Fall durch die Funktion⁴:

$$s_{safe} = s_0 + vT \quad (3.12)$$

- Nähert sich ein Fahrzeug an seinen Vorgänger, so soll allmählich ein komfortables Bremsmanöver eingeleitet werden und möglichst nicht ruckartig mit hoher Bremsverzögerung abgebremst werden.
- Das Modell sollte einfach konstruiert sein und seine Parameter eine anschauliche physikalische Bedeutung haben sowie realistische Werte annehmen.

3.3.2 Mathematische Beschreibung

Im Gegensatz zum Gipps-Modell wird hier keine sichere Geschwindigkeit, sondern ein Wunschabstand s^* berechnet. Mit Hilfe von s^* kann dann die Beschleunigung \dot{v} berechnet werden:

$$\dot{v} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right] \quad (3.13)$$

Der Parameter a beschreibt eine konstante, frei wählbare, Beschleunigung. Der Term in der eckigen Klammer beeinflusst diese Beschleunigung in Abhängigkeit des Abstands und der Differenzgeschwindigkeit. Falls der reale Abstand eines Fahrzeugs kleiner geworden ist als der Wunschabstand, ist die Beschleunigung negativ, womit sich das Fahrzeug wieder

⁴ s_0 beschreibt, wie in den zuvor beschriebenen Modellen, den Minimalabstand bei Stillstand.

zurückfallen lässt. Weiterhin wird die Beschleunigung durch den Quotienten von aktueller Geschwindigkeit und Wunschgeschwindigkeit abgemindert. Dies führt einerseits dazu, dass bei Erreichen der Wunschgeschwindigkeit nicht weiter beschleunigt wird, andererseits wird auch unterhalb der Wunschgeschwindigkeit die Beschleunigung bei zunehmender Geschwindigkeit zunehmend abgemindert. Diese Charakterisierung der Beschleunigung ist realistischer als die Annahme, die Beschleunigung sei durchgehend konstant. Mit Hilfe des Parameters δ lässt sich einstellen, ab welcher Geschwindigkeit im Verhältnis zur Wunschgeschwindigkeit die Beschleunigung relevant abgemindert werden soll. Je größer δ gewählt wird, desto geringer beeinflusst der Quotient v/v_0 die Beschleunigung bei niedrigen Geschwindigkeiten.

Der Wunschabstand ist wie folgt charakterisiert:

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max\left(0, vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}\right) \quad (3.14)$$

Der Parameter b stellt eine konstante, beliebige Bremsverzögerung dar. Der Wunschabstand setzt sich aus einem Gleichgewichtsteil $s_0 + vT$ und einem dynamischen Anteil $\frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}$ zusammen (s. Abb. 3.14). Der Gleichgewichtsanteil $s_0 + vT$ sorgt dafür, dass ein Fahrzeug in einer Kolonne einen Sicherheitsabstand, abhängig von der eigenen Geschwindigkeit einhält. Der Gleichgewichtsanteil wirkt hier ausschließlich, da bei Folgefahrt die Differenzgeschwindigkeit 0 beträgt und damit der dynamische Anteil $\frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}$ ebenfalls den Wert 0 annimmt. Verringert der Vorgänger seine Geschwindigkeit oder nähert sich das betrachtete Fahrzeug einem Hindernis, wirkt zusätzlich zum Summanden $s_0 + vT$ der dynamische Anteil. Dieser sorgt dann für die Einleitung eines intelligenten Bremsmanövers.

Intelligente Bremsstrategie

Betrachtet wird eine Situation, in der sich ein Fahrzeug an ein stehendes Fahrzeug oder an eine rote LSA nähert. Hier gilt: $v = \Delta v$, da $v_l = 0$. Um die intelligente Bremsstrategie besser beschreiben zu können wird bei der Berechnung der Beschleunigung ausschließlich der dynamische Anteil $\frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}}$ berücksichtigt. Tatsächlich sind die beiden anderen Summanden $s_0 + vT$ und $(v/v_0)^\delta$ ebenfalls in jeder Situation wirksam (s. Gl. 3.13) und Gl. (3.14)). Bei Annäherung an ein Hindernis ist jedoch der dynamische Anteil maßgeblich. Man erhält:

$$\dot{v} = -a \left(\frac{s^*}{s}\right)^2 = -\frac{av^2(\Delta v)^2}{4abs^2} = -\left(\frac{v^2}{2s}\right)^2 \cdot \frac{1}{b}. \quad (3.15)$$

Der Quotient $\frac{v^2}{2s}$ wird nun durch eine kinematische Verzögerung b_{kin} beschrieben:

$$b_{kin} = \frac{v^2}{2s} \quad (3.16)$$

Wird die Gleichung nach dem Abstand s aufgelöst, gilt dann:

$$s = \frac{v^2}{2b_{kin}} \quad (3.17)$$

Die Variable s beschreibt den nötigen Bremsweg bei einer bestimmten Bremsverzögerung b_{kin} . Da der aktuelle Abstand s jedoch vorgegeben ist, ist die Gleichung hier in umgekehrter Weise zu interpretieren. Die kinematische Verzögerung ist jene Bremsverzögerung, die eingehalten werden muss, damit das Fahrzeug noch unfallfrei vor seinem Vorgänger zum Stehen kommt. Unter Berücksichtigung der Definition für b_{kin} (s. Gl. (3.16)) lässt sich Gl. (3.15) folgendermaßen darstellen:

$$\dot{v} = -\frac{b_{kin}^2}{b}. \quad (3.18)$$

Eine „kritische Situation“ ist dann gegeben, wenn stärker als mit der komfortablen Bremsverzögerung b gebremst werden muss, d. h. wenn gilt: $b_{kin} \geq b$. Entscheidend ist nun die Quadratur der kinematischen Verzögerung in der Gleichung 3.18. Sie führt dazu, dass ein Fahrzeug in einer kritischen Situation zunächst stärker abbremst als notwendig, da gilt:

$$|\dot{v}| = \frac{b_{kin}^2}{b} \geq b_{kin} \text{ für } b_{kin} \geq b \quad (3.19)$$

Der Abbremsvorgang mit überhöhter Bremsverzögerung bringt das Fahrzeug frühzeitig wieder in eine sichere und komfortable Situation, in der es abhängig von der Differenzgeschwindigkeit genug Abstand zum Vordermann wahrnt.

Ist die Situation durch den starken Abbremsvorgang unkritisch geworden (wenn gilt: $b_{kin} < b$), wird mit einer Verzögerung weitergebremst, die geringer ist als die komfortable Bremsverzögerung b . Falls die Situation von Anfang an unkritisch ist, wird ebenfalls erst mit einer Verzögerung im Bereich unterhalb von b gebremst. Das führt wiederum dazu, dass b_{kin} wieder steigt bis die kinematische Verzögerung erreicht ist. Die Fahrzeuge, simuliert durch das IDM, versuchen dementsprechend ihre Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung so zu regulieren, dass mit der komfortablen Verzögerung b abgebremst werden muss. Wie in Abb. 3.2 deutlich zu sehen ist, hängt das Verhalten bei Annäherung an ein Hindernis stark von der Größe der komfortablen Verzögerung b ab. Wird der Parameter b verhältnismäßig klein gewählt (wie beispielweise in der Abb. 3.2 mit $b = 1\text{m/s}^2$), verringert der Fahrer frühzeitig und intensiv seine Geschwindigkeit. Ein Verkehrsteilnehmer mit höherer komfortabler Verzögerung dagegen, lässt sich zunächst nur „ausrollen“ und bremst dann stärker.

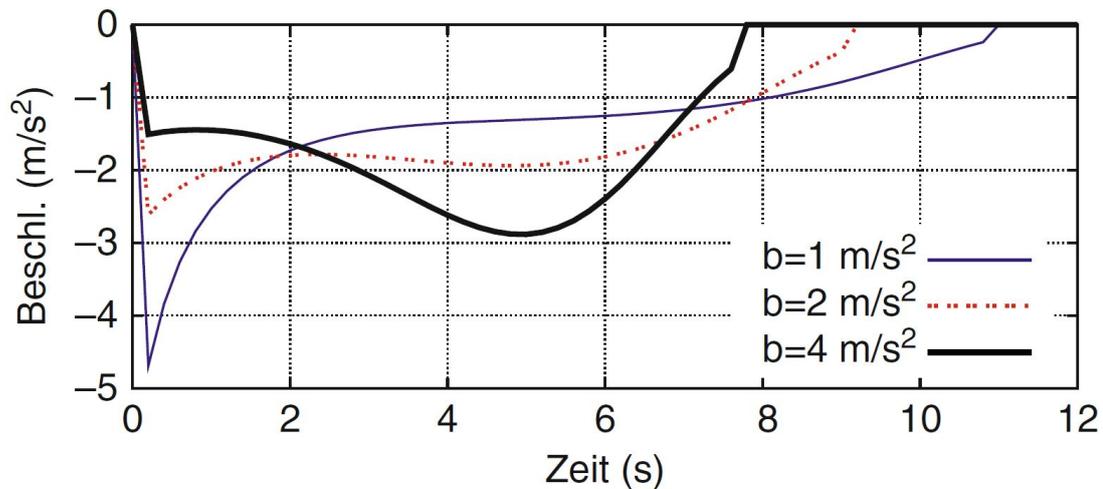


Abbildung 3.2: Darstellung des Abbremsverhaltens bei Annäherung an eine LSA abhängig von der Wahl der komfortablen Verzögerung b . Die Ampel schaltet auf rot, wenn das betrachtete Fahrzeug sich 60 m von der Haltelinie entfernt ist. Die Geschwindigkeit des Fahrzeugs beträgt dabei 54 km/h. Quelle: M. TREIBER, A.KESTING (2010)

3.3.3 Möglichkeiten und Grenzen des IDM

Ebenfalls aus Fahrstrategien hergeleitet, beinhaltet das IDM ähnlich dem Gipps-Modell anschauliche Parameter. Bei Einsetzen von realistischen Werten für die Modellparameter liefert das Modell wirklichkeitsnahe Ergebnisse. Das Modell reagiert bezüglich Veränderung von Modellparametern unempfindlich und kann daher als *robust* eingeordnet werden. Die Parameter beschreiben jeweils nur eine Eigenschaft des individuellen Fahrverhaltens. Um städtischen und Autobahnverkehr zu simulieren, kann daher die gleiche Parametrisierung vorgenommen werden.⁵ Weiterhin ermöglicht das IDM kontinuierliche Übergänge im Beschleunigungs- und Bremsverhalten (s. Abb. (3.3)).

In Abb. (3.3) ist zu erkennen, dass beim Abbremsvorgang des Führungsfahrzeugs die komfortable Verzögerung b fast erreicht wird. Die Nachfolger des ersten Fahrzeugs hingegen bremsen mit einer im Verhältnis zu b höheren Verzögerung. Das IDM ist aber bei realistischen Parameterwerten immer kollisionsfrei. Im Autobahnszenario vor einer Zufahrt als Engstelle entstehen Stauwellen mit einer wirklichkeitsnahen Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die Wellenlängen sind in der Realität größer, dennoch wird die raumzeitliche Dynamik gut abgebildet.

Das IDM steht dem realen Fahrverhalten in der Reihe alle bisher vorgestellten Modelle

⁵Die Wunschgeschwindigkeit ändert sich selbstverständlich.

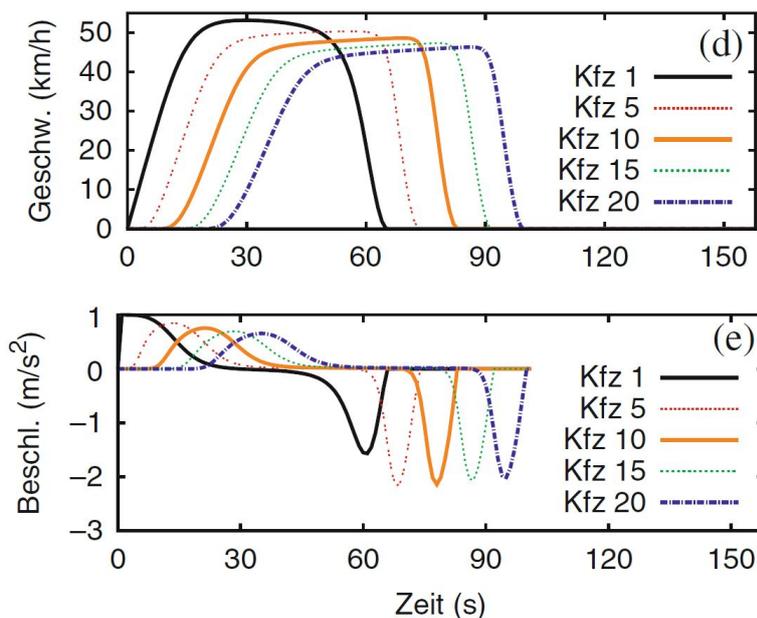


Abbildung 3.3: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des Intelligent-Driver-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung des Modells: $v_0 = 54$ km/h; $T = 1,0$ s; $a = 1,0$ m/s²; $b = 1,5$ m/s²; $s_0 = 2$ m; $\delta = 4$. Quelle: M. TREIBER, A.KESTING (2010)

am nächsten.

Bei der Folgefahrt tritt allerdings folgender nicht wirklichkeitsnaher Effekt auf: Aufgrund der kontinuierlichen Beschleunigungsfunktion hat der Vordermann auch noch bei größerem Abstand einen Einfluss auf das betrachtete Fahrzeug. Dies führt dazu, dass das betrachtete Fahrzeug nicht vollständig auf seine Wunschgeschwindigkeit beschleunigt. Weiterhin ist bei Folgeverhalten nahe der Wunschgeschwindigkeit der Abstand zum Vordermann größer als der Wunschabstand $s^*(v, 0) = s_0 + vT$. Um diesen Effekt auszugleichen, wurde im *Improved-Intelligent-Driver-Modell* (IIDM) eine verbesserte Beschleunigungsfunktion entwickelt. Da sich das IIDM ansonsten wie das IDM verhält, wird das Improved-Intelligent-Driver-Modell hier nicht näher vorgestellt (vgl. M. TREIBER, A.KESTING (2010)).

Teil II

Das

Necessary-Deceleration-Modell

4 Das Necessary-Deceleration-Modell

Im Folgenden soll ein neues, speziell für den Radverkehr abgestimmtes, Fahrzeugfolgemo-
dell entwickelt werden. Sämtliche Gleichungen, Herleitung, Diagramme, Beschreibungen
und Bewertungen in diesem Kapitel sind, sofern nicht explizit anderweitig angegeben,
selbstständig erarbeitet und nicht der Literatur entnommen. Selbstverständlich basieren
die Ideen und Charakteristiken des Modells auf bereits entwickelten Modellen bzw. deren
Charakteristiken.

4.1 Allgemeines

Das *Necessary-Deceleration-Modell* (NDM) ist wie die bereits vorgestellten Modelle
ein Fahrzeugfolgemo-
dell. Es gehört daher ebenfalls in die Reihe der mikroskopischen
Verkehrsmodelle. Weiterhin ist das Modell wie das Gipps- und das Intelligent-Driver-
Modell aus einer bzw. mehreren Fahrstrategien hergeleitet. Eine Beschleunigungsfunktion
 $a_{ges,mic}(s(t), v(t), \Delta v(t))$ bildet den Kern des NDM. Das NDM ist ein zeitdiskretes Mo-
dell. Daher kann die Geschwindigkeit im nächsten Zeitschritt folgendermaßen berechnet
werden:

$$v_i(t + \Delta t) = a_{ges,mic,i}(s(t), v(t), \Delta v(t))\Delta t \quad (4.1)$$

Aus der Geschwindigkeit wird dann die Ortskoordinate im nächsten Zeitschritt berechnet:

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + \frac{v_i(t) + v_i(t + \Delta t)}{2} \Delta t. \quad (4.2)$$

Da die Interpretation der Zeitspanne Δt als Reaktionszeit in vielen Phasen (z. B. freie
Fahrt) keinen Sinn macht, ist Δt als numerisches Aktualisierungsintervall zu verstehen.

4.2 Herleitung bzw. mathematische Beschreibung

Beschleunigung a

Die Beschleunigungsfunktion a_{mic} setzt sich aus mehreren Teilen zusammen. Der erste Teil besteht aus einer Beschleunigungsfunktion $a(t)$, die es den Fahrzeugen (u. a.) ermöglicht bis zur Wunschgeschwindigkeit bei freier Fahrt zu beschleunigen. Die Funktion $a(t)$ ist wie folgt definiert:

$$a(t) = \frac{v_0 - v(t)}{\tau} \quad \text{Quelle: PIPES, L.A. (1953)} \quad (4.3)$$

Legt man die obige Beschleunigungsfunktion (s. Gl. (4.3)) zu Grunde, erhält man den nach PIPES, L.A. (1953) entwickelten exponentiellen Geschwindigkeitsverlauf. Ebenso denkbar wäre eine lineare Geschwindigkeitsfunktion bzw. eine Beschleunigung mit einem konstanten Wert. Nach PIPES, L.A. (1953) ist die Annahme, der reale Geschwindigkeitsverlauf bei freier Fahrt sei einer exponentiellen Funktion näher, deutlich realistischer. Im Bereich der Wunschgeschwindigkeit ist die Beschleunigung nach Gl. (4.3) zwar nie genau 0, jedoch vernachlässigbar klein. Genau wie bei Optimal-Velocity-Modell ist τ als Anpassungs- oder Verzögerungszeit zu verstehen. Die oben beschriebene Beschleunigung wirkt, bis das Fahrzeug soweit auf seinen Vorgänger aufgefahren ist, dass nur noch ein Vielfaches vom idealen Sicherheitsabstand $d(v)$ eingehalten ist. Das Vielfache $r \cdot d(v)$ des idealen Abstands definiert den Abstand, unterhalb dessen ein Fahrer seinen Vorgänger beachtet und ggf. seine Geschwindigkeit verringert. Die Konstante r ist hierbei variabel und hängt vom Typ des Fahrzeugs ab. (Ein Auto hat eine viel höhere Durchschnittsgeschwindigkeit, reagiert daher früher auf Hindernisse. Hier wäre der Parameter r größer zu wählen.)

Der ideale Sicherheitsabstand $d(v)$ ist nicht konstant, sondern abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit des betrachteten Verkehrsteilnehmers. Im Allgemeinen halten Fahrer bei höherer Geschwindigkeit einen größeren Abstand zum Vorderfahrzeug. Der Sicherheitsabstand $d(v)$ ist charakterisiert durch folgende lineare Funktion¹:

$$d(v) = l + s_0 + Tv. \quad (4.4)$$

Die Folgezeit T beeinflusst die Sensitivität des idealen Abstands gegenüber der aktuellen Geschwindigkeit. Die Annahme, dass der Sicherheitsabstand linear von der Geschwindigkeit abhängt, ist zunächst willkürlich und aus Gründen der Einfachheit so getroffen. Befindet sich ein Fahrzeug innerhalb des Abstandes $r \cdot d(v)$, so soll es nur noch bis zur

¹Der Minimalabstand s_0 symbolisiert den Abstand zwischen Vorderkante und Hinterkante zweier Fahrzeuge. l beschreibt die Länge eines Fahrzeugs.

Geschwindigkeit des Vordermanns beschleunigen. Ist der ideale Abstand $d(v)$ selbst beispielsweise nach einem Bremsmanöver unterschritten, soll gar nicht mehr beschleunigt werden. Nach Möglichkeit sollte der Sicherheitsabstand allerdings nie unterschritten werden. Zusammenfassend lässt sich die Beschleunigungsfunktion a wie folgt beschreiben:

$$a = \begin{cases} 0 & \text{für } s < d(v) \\ 0 & \text{für } d(v) \leq s < r \cdot d(v) \text{ und } \Delta v \leq 0 \text{ (bzw. } v \geq v_l) \\ \frac{v_0 - v}{\tau} & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (4.5)$$

Bremsverzögerung

Die Bremsverzögerung b ist wirksam, wenn der Abstand s zwischen den Fahrzeugen ein Vielfaches ($r \cdot d$) vom idealen Abstand unterschreitet. Zusätzlich soll die Bremsverzögerung b nur wirken, wenn der Vordermann langsamer ist als das betrachtete Fahrzeug ($\Delta v < 0$). Die Berechnung der Verzögerung b hängt sowohl vom aktuellen Abstand s als auch von der Differenzgeschwindigkeit Δv ab.

Ein erfahrender Fahrrad- oder Autofahrer kann einschätzen, wie stark er bremsen muss, damit er in Abhängigkeit von dem vor ihm zur Verfügung stehenden Bremsweg und der Differenzgeschwindigkeit gegenüber dem Vordermann im mitbewegtem² System zur Ruhe kommt. Bei einem absolut ruhenden Hindernis heißt das, der Fahrer muss vollständig stoppen. Bei einem sich bewegenden Hindernis (ein Fahrzeug vor ihm), muss er seine Geschwindigkeit nur rechtzeitig angleichen. Die elementare Formel

$$s = \frac{(\Delta v)^2}{2b}. \quad (4.6)$$

beschreibt den nötigen Bremsweg in Abhängigkeit von Δv (im mitbewegtem System) und der Bremsverzögerung b . Wird die Formel nach b umgestellt, so erhält man:

$$b = \frac{(\Delta v)^2}{2s}. \quad (4.7)$$

Die Variable b beschreibt nun die notwendige Bremsbeschleunigung eines Fahrzeugs in Abhängigkeit von seiner Geschwindigkeit und vom Abstand zum Vorderfahrzeug, damit der Schwerpunkt des betrachteten Verkehrsteilnehmers gerade noch vor dem Schwerpunkt seines Vordermanns im mitbewegtem System zum Stillstand kommt. Das bedeutet, dass die Fahrzeuge kollidieren, da sie in der Realität eine echte Länge besitzen. Deshalb wird die Verzögerungsfunktion so verändert, dass ein Fahrzeug auf seinen Vordermann nur bis

²Gemeint ist ein System, in dem der Vordermann ruht.

zu einem Minimalabstand s_0 auffährt. Es gilt folglich:

$$b = \frac{(\Delta v)^2}{2\left(s - 2\frac{l}{2} - s_0\right)} \quad \text{bzw.} \quad b = \frac{(\Delta v)^2}{2(s - (l + s_0))}. \quad (4.8)$$

Zur Vereinfachung gilt die Annahme, dass die Fahrzeuflänge l aller Fahrzeuge identisch ist. Zusammengefasst erhält man für die Bremsverzögerung:

$$b_1 = \begin{cases} \frac{(\Delta v)^2}{2(s - (l + s_0))} & \text{für } s < r \cdot d(v) \\ 0 & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (4.9)$$

Da die Verzögerung b so charakterisiert ist, dass auch im ungünstigsten Fall vermieden wird, dass ein Fahrzeug den Minimalabstand $s_0 + l$ unterschreitet, erübrigt sich vorerst eine Betrachtung des Verhaltens bei $s < s_0 + l$. Beschleunigung a und Bremsverzögerung b lassen sich zusammenfassen zu:

$$a_{mic,ges} = \begin{cases} 0 & \text{für } s < d(v) \text{ und } \Delta v \geq 0 \\ -\frac{(\Delta v)^2}{2(s - (l + s_0))} & \text{für } s < r \cdot d(v) \text{ und } \Delta v < 0 \\ \frac{v_0 - v}{\tau} & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (4.10)$$

Auch wenn das Modell über die Beschleunigung definiert ist, ist es dem Gipps-Modell sehr nah, da es über dieselbe Fahrstrategie hergeleitet ist. Durch die Herleitung des Bremsverhaltens über die Beschleunigung ergibt sich folgender Nachteil: Die aktuelle Beschleunigung ist zwar immer so definiert, dass sie hoch genug ist, damit ein Fahrzeug noch rechtzeitig vor seinem Vordermann zum Stillstand kommt, bei ganz kleinen Abständen (im Bereich $s = s_0 + l$) zum Vorderfahrzeug werden die Beschleunigungen jedoch unrealistisch hoch. Beträgt der Abstand s genau $s_0 + l$, wäre eine unendlich große Bremsverzögerung notwendig, um das Fahrzeug zu stoppen. Um unrealistisch hohe Bremsverzögerungen zu vermeiden, wird die Verzögerung durch einen Maximalwert b_{max} eingeschränkt. Diese Einschränkung führt zu folgender Beschreibung für $a_{mic,ges}$:

$$a_{mic,ges} = \begin{cases} 0 & \text{für } s < d(v) \text{ und } \Delta v \geq 0 \\ \min\left(-\frac{(\Delta v)^2}{2(s - (l + s_0))}; -b_{max}\right) & \text{für } s < r \cdot d(v) \text{ und } \Delta v < 0 \\ \frac{v_0 - v}{\tau} & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (4.11)$$

Durch die Begrenzung der Bremsverzögerung auf einen Maximalwert kommt es in besonders gefährlichen Bremssituationen zu leichten Unterschreitungen des Minimalabstands $s_0 + l$. Bei Einsetzen von realistischen Parametern in die Modellierung bewegen sich die Unterschreitungen im einstelligen Zentimeterbereich und sind daher vertretbar.

4.3 Grenzen und Möglichkeiten des NDM

Bei Einsetzen von plausiblen Werten für die Modellparameter ist das Modell kollisionsfrei. Weiterhin ist es vollständig aus Fahrstrategien hergeleitet. Sämtliche Parameter des Modells (l ; s_0 ; b_{max} ; v_0 ; τ ; T) beschreiben jeweils nur eine anschauliche Eigenschaft des Modells (Fahrzeugs oder des Fahrers). Die Modellierung verhält sich selbst bei wesentlichen Veränderungen der Modellparameter unempfindlich. Dementsprechend kann das Modell als *robust* eingestuft werden. Da die Parameter Eigenschaften der Fahrzeuge beschreiben, lassen sich diese durch experimentelle Daten der Realität entsprechend bestimmen. Obwohl das Modell ursprünglich für den Fahrradverkehr gedacht war, lässt sich mit Hilfe der Modellierung auch Autoverkehr simulieren. Zum Vergleich mit den bisher vorgestellten Modellen in den vorherigen Kapiteln zeigt die folgende Abbildung das bereits bekannte Stadt-Szenario (Autoverkehr) zwischen zwei Ampeln, simuliert durch das Necessary-Deceleration-Modell. Maximale Beschleunigung bzw. Bremsverzögerung (vgl. Abb. 4.1) liegen zwar im Bereich

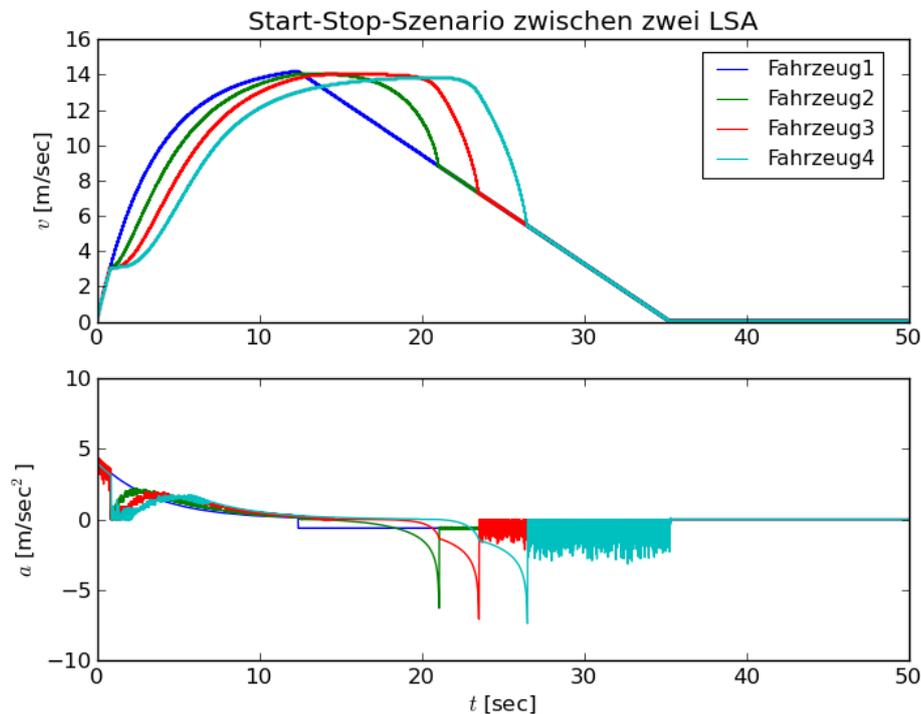


Abbildung 4.1: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des ...-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Modellierung wie folgt: $v_0 = 54$ km/h; $\tau = 3.6$ s; $b_{max} = 10$ m/s²; $s_0 = 2.25$ m; $l = 4.75$ m; $\Delta t = 0.001$ s; $T = 1$ s; $r = 5$.

des Möglichen, sind aber teilweise unrealistisch hoch. Die Bremsverzögerungen erreichen in bestimmten Fällen Werte oberhalb von 6 m/s^2 . Verzögerungen in dieser Größenordnung werden definitiv nicht mehr als komfortabel empfunden und gleichen fast einer Vollbremsung. Grund dafür ist, dass zu jedem Zeitpunkt nur mit gerade notwendiger Verzögerung abgebremst wird. Ein vorrausschauender Fahrer würde zunächst versuchen, einen größeren Sicherheitsabstand zu gewinnen, um dann nicht gezwungen zu sein, im Nahbereich zum Vordermann sehr stark zu verzögern (vgl. Intelligent-Driver-Modell (Kapitel 3.3)).

Die Übergänge von Beschleunigung und Bremsverzögerung sind kontinuierlich. D. h. die Fahrzeuge verhalten sich natürlich im Gegensatz zu den Fahrzeugen des Gipps-Modells, die sich aufgrund der konstanten Parameter für Beschleunigung und Verzögerung *roboterhaft* bewegen (vgl. Gipps-Modell (Kapitel 3.2)). Die Modellierung kann zwar alle drei bekannten Verkehrssituationen der Längsdynamik abbilden, jedoch treten in zwei speziellen Situationen Phänomene auf, die nicht dem realen Fahrverhalten entsprechen.

1. Da die Fahrzeuge erst auf ihren Vorgänger reagieren, wenn sie ein Vielfaches des Sicherheitsabstandes unterschritten haben, gibt es in der Modellierung im Gegensatz zum IDM nicht das Problem, dass Fahrzeuge generell nicht vollständig auf ihre Wunschgeschwindigkeit beschleunigen. Haben die Fahrzeuge jedoch ein Vielfaches des Sicherheitsabstandes unterschritten, beschleunigen sie nur noch bis zur aktuellen Geschwindigkeit des Vordermanns. Dabei ergibt sich folgendes Problem: Wenn der aktuell betrachtete Verkehrsteilnehmer zu Beginn der Simulation einen Abstand $s > r \cdot d(v)$ vom Vordermann besitzt und außerdem seine Geschwindigkeit $v < v_l$ ist, nähert er sich nur bis auf $r \cdot d(v)$ dem Vordermann. Dieser Abstand ist bei Folgefahrt viel zu hoch.
2. Der zweite Punkt betrifft folgenden Fall: Ist ein Fahrzeug gezwungen, stark abzubremsen, weil der Vordermann seine Geschwindigkeit drastisch reduziert hat (er kommt aber nicht zum Stillstand), fährt es ggf. über den idealen Abstand hinaus auf das Vorderfahrzeug auf. Das Fahrzeug passt seine Geschwindigkeit dann an die des Vordermanns an. Es lässt sich aber nicht bis zum idealen Abstand zurückfallen, sondern fährt mit dem viel zu kurzen Abstand, der nach dem Bremsvorgang geblieben ist, weiter. Die bereits implementierte Bremsbeschleunigung b kann nicht dafür sorgen, dass ein Fahrer sich zurückfallen lässt, denn bei gleichen Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge ist $b=0$.

4.4 Erweiterung des Modells

4.4.1 1. Erweiterung

Um das erste Problem zu lösen, wird den Verkehrsteilnehmern erlaubt, auch im Abstand zum Vordermann unterhalb $r \cdot d(v)$ auf Wunschgeschwindigkeit zu beschleunigen. Im Nahbereich ($s \leq d(v)$) soll weiterhin nicht beschleunigt werden. Die Erweiterung führt dazu, dass in manchen Situationen Beschleunigung und Bremsverzögerung superponiert werden, folglich gleichzeitig wirken.

$$a_{mic,ges} = \begin{cases} 0 & \text{für } s < d(v) \text{ und } \Delta v \geq 0 \\ \min\left(-\frac{(\Delta v)^2}{2(s-(l+s_0))} + \frac{v_0-v}{\tau}; b_{max}\right) & \text{für } d(v) \leq s < r \cdot d(v) \text{ und } \Delta v < 0 \\ \min\left(-\frac{(\Delta v)^2}{2(s-(l+s_0))}; b_{max}\right) & \text{für } s < d(v) \text{ und } \Delta v < 0 \\ \frac{v_0-v}{\tau} & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (4.12)$$

Die Erweiterung führt zwar einerseits dazu, dass Fahrzeuge bei Folgefahrt den richtigen Sicherheitsabstand einhalten, andererseits bremsen die Fahrzeuge zu Beginn der Annäherung an den Vordermann nun noch schwächer. Grund dafür ist die abgeminderte Bremsverzögerung nach Superposition mit der Beschleunigung auf Wunschgeschwindigkeit. Aufgrund des schwachen Abbremsens zu Beginn der Bremsphase ist das Fahrzeug daraufhin gezwungen, später umso stärker abzubremsen, um noch rechtzeitig vor dem Vordermann zu stehen zu kommen. Abb. 4.2 zeigt das Start-Stop-Szenario nach Erweiterung des Modells. Kraftfahrzeug Nr. 4 (rot markiert) verzögert mit bis zu 10 m/s^2 . Diese hohe Bremsverzögerung wird nur bei Vollbremsungen erreicht. Weiterhin wird aufgrund der notwendig gewordenen Vollbremsungen der Minimalabstand $s_0 + l$ bei Stillstand mit bis zu 25 cm unterschritten. Ein Unterschreiten von 25 cm bedeutet zwar kein Zusammenstoß der Fahrzeuge, insgesamt ist das Bremsverhalten aber zu risikobehaftet, bzw. nicht vorrausschauend genug und damit nicht wirklichkeitsnah. Das in Abb. 4.2 dargestellte Start-Stop-Szenario für Fahrräder zeigt dieselbe Problematik wie beim Autoverkehr: Durch das schwache Abbremsen zu Beginn der Bremsphase ist der Radfahrer gezwungen, zum Ende der Bremsphase unkomfortabel hoch zu verzögern.

4.4.2 2. Erweiterung

Zur Lösung des noch verbliebenen zweiten Problems wird folgende Erweiterung eingeführt: Nur im Nahbereich, d. h. innerhalb des idealen Abstands wirkt eine zusätzliche Bremskraft b_2 auf das aktuell betrachtete Fahrzeug. Die Bremskraft wirkt dann, wenn der Vor-

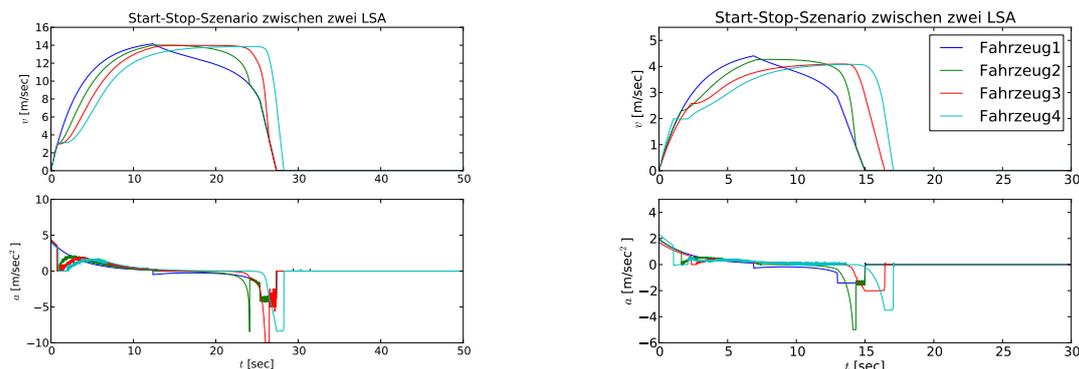


Abbildung 4.2: Links: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des erweiterten ND-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Modellierung wie folgt: $v_0 = 54$ km/h; $\tau = 3.6$ s; $b_{max} = 10$ m/s²; $s_0 = 2.25$ m; $l = 4.75$ m; $\Delta t = 0.001$ s; $T = 1$ s; $r = 5$. Rechts: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des ND-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario für Fahrräder (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Modellierung wie folgt: $v_0 = 18$ km/h; $\tau = 2.4$ s; $b_{max} = 5$ m/s²; $s_0 = 0.9$ m; $l = 1.8$ m; $\Delta t = 0.001$ s; $T = 1$ s; $r = 3$. Die Legende (rechts) gilt für beide Abbildungen.

dermann langsamer oder nur geringfügig schneller ist. Aus Sicherheitsgründen würde ein Fahrer, selbst wenn der Vordermann etwas schneller fährt, den Sicherheitsabstand wieder einhalten wollen. Um einen kontinuierlichen Übergang zwischen den Bremsphasen vor und nach Überschreitung des idealen Abstands zu schaffen, soll die zusätzliche Bremsverzögerung b_2 nicht konstant sein, sondern mit kleiner werdendem Abstand zum Vorderfahrzeug quadratisch³ zunehmen. Es gelte:

$$b_2 = k \cdot (s - d(v))^2 \quad (4.13)$$

Der Stauchungsfaktor k wird nun so gewählt, dass b_2 bei $s = l$ der maximalen Bremskraft entspricht:

$$k \cdot (l - d(v))^2 = b_{max} \quad (4.14)$$

Nach Umstellung nach k erhält man:

$$k = \frac{b_{max}}{(l - d(v))^2} \quad (4.15)$$

³Es wäre auch eine lineare Funktion für die Bremsverzögerung b_2 denkbar, aber die Wahl des quadratischen Terms sorgt dafür, dass b_2 bei Annäherung an $d(v)$ schneller verschwindet.

Somit erhält man für b_2 :

$$b_2 = \begin{cases} \frac{b_{max}}{(l-d(v))^2} \cdot (s - d(v))^2 & \text{für } s \leq d(v) \text{ und } \Delta v \leq \epsilon \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.16)$$

Wie bereits erwähnt, soll die Bremskraft b_2 selbst dann noch wirken, wenn der Vordermann geringfügig schneller, d. h. bis die Differenzgeschwindigkeit einen Wert ϵ^4 überschreitet. Bei höherer Differenzgeschwindigkeit vergrößert sich der Abstand ohnehin. Die Einführung einer zusätzlich Bremskraft führt innerhalb des idealen Abstands ggf. zu einer Superposition mit der Bremskraft b_1 . Auch für die Summe der beiden Bremskräfte gilt, dass die maximale Bremskraft b_{max} nicht überschritten werden darf. Zusammengefasst erhält man für $a_{mic,ges}$:

$$a_{mic,ges} = \begin{cases} 0 & \text{für } s < d(v) \text{ und } \Delta v \geq \epsilon \\ \frac{\min\left(-\frac{(\Delta v)^2}{2(s-(l+s_0))} + \frac{v_0-v}{\tau}; b_{max}\right)}{} & \text{für } d(v) \leq s < r \cdot d(v) \text{ und } \Delta v < 0 \\ \frac{\min\left(-\frac{(\Delta v)^2}{2(s-(l+s_0))} - \frac{b_{max}}{(l-d)^2} \cdot (s-d)^2; b_{max}\right)}{} & \text{für } s < d(v) \text{ und } \Delta v \leq 0 \\ -\frac{b_{max}}{(l-d(v))^2} \cdot (s-d(v))^2 & \text{für } s < d(v) \text{ und } 0 < \Delta v < \epsilon \\ \frac{v_0-v}{\tau} & \text{ansonsten} \end{cases} \quad (4.17)$$

Mit Hilfe der beiden oben beschriebenen Erweiterungen kann das ND-Modell realistisches Fahrverhalten in allen denkbaren Verkehrssituationen simulieren. Unter Berücksichtigung der Erweiterungen ergibt sich die in Abb. 4.3 dargestellte Geschwindigkeit- bzw. Beschleunigungsverteilung im bekannten städtischen Start-Stop-Szenario. Die Fahrzeuge bremsen zwar nun schon frühzeitiger, besonders beim letzten der fünf Fahrzeuge ist die Bremsverzögerung aber immer noch unkomfortabel hoch.

Bisher ist für die Folgezeit T der Wert 1 s angenommen worden. Wird dieser Wert nun auf 2 s erhöht, ergeben sich die in Abb. 4.4 dargestellten Geschwindigkeits- bzw. Beschleunigungsverteilungen: Durch die Wahl der oben genannten Folgezeit ergibt sich bei ca. 50 km/h ein Sicherheitsabstand von ca. 28 m. Folgt man der Faustregel, dass ein Fahrer die halbe Geschwindigkeit [km/h] in Metern Abstand halten sollte, ist der Sicherheitsabstand von 28 m realistisch. Durch die Erhöhung der Folgezeit wird nun mehr Sicherheitsabstand eingehalten. Diese Tatsache wiederum ergibt wesentlich komfortablere Bremsverzögerungen, die eher der Wahrheit entsprechen.

⁴Sinnvolle Werte für ϵ bewegen sich im Bereich von 1-4 km/h.

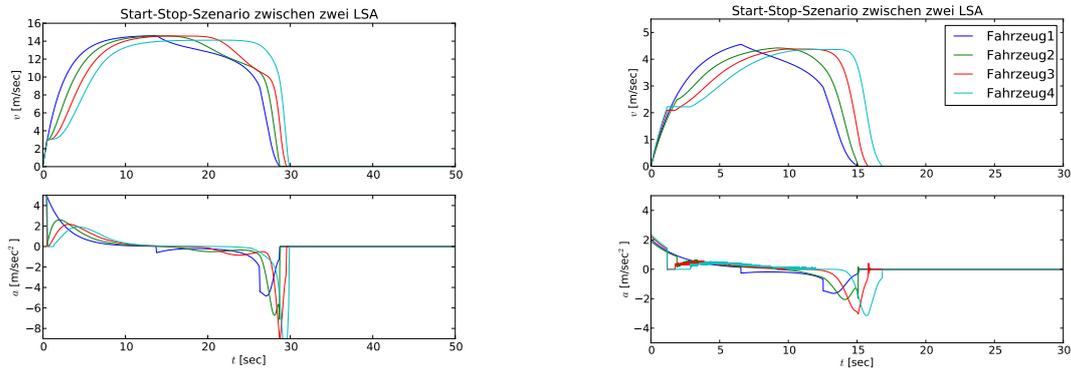


Abbildung 4.3: Links: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des erweiterten ND-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Modellierung wie folgt: $v_0 = 54 \text{ km/h}$; $\tau = 3.6 \text{ s}$; $b_{max} = 10 \text{ m/s}^2$; $s_0 = 2.25 \text{ m}$; $l = 4.75 \text{ m}$; $\Delta t = 0.001 \text{ s}$; $T = 1 \text{ s}$; $r = 5$. Rechts: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des ND-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario für Fahrräder (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Modellierung wie folgt: $v_0 = 18 \text{ km/h}$; $\tau = 2.4 \text{ s}$; $b_{max} = 5 \text{ m/s}^2$; $s_0 = 0.9 \text{ m}$; $l = 1.8 \text{ m}$; $\Delta t = 0.001 \text{ s}$; $T = 1 \text{ s}$; $r = 3$. Die Legende (rechts) gilt für beide Abbildungen.

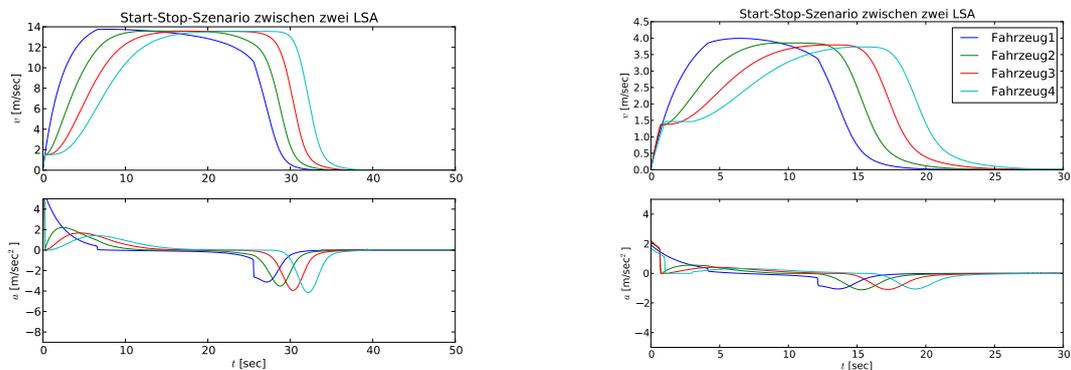


Abbildung 4.4: Links: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des erweiterten ND-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Modellierung wie folgt: $v_0 = 54 \text{ km/h}$; $\tau = 2.4 \text{ s}$; $b_{max} = 10 \text{ m/s}^2$; $s_0 = 2.25 \text{ m}$; $l = 4.75 \text{ m}$; $\Delta t = 0.001 \text{ s}$; $T = 2 \text{ s}$. Rechts: Darstellung der Beschleunigung und Geschwindigkeit des ND-Modells in einem städtischen Start-Stop-Szenario für Fahrräder (z. B. zwischen zwei Ampeln). Parametrisierung der Modellierung wie folgt: $v_0 = 18 \text{ km/h}$; $\tau = 2.4 \text{ s}$; $b_{max} = 5 \text{ m/s}^2$; $s_0 = 0.9 \text{ m}$; $l = 1.8 \text{ m}$; $\Delta t = 0.001 \text{ s}$; $T = 2 \text{ s}$. Die Legende (rechts) gilt für beide Abbildungen.

4.5 Betrachtung der Simulation in einem geschlossenen System

Die folgenden Abbildungen wurden mit Hilfe des vollständig erweiterten ND-Modells erzeugt. Sofern nicht explizit in der Beschreibung der Diagramme angegeben, sind dabei die in der Tabelle 4.1 aufgeführten Parameter eingesetzt worden. Für niedrige

Parameter	Wert
Folgezeit T	1 s
Minimalabstand zwischen den Fahrzeugen s_0	0.4 m
Fahrzeuglänge l	1.73 m
Maximale Bremsverzögerung b_{max}	5 m/s ²
Wunschgeschwindigkeit v_0	Normalverteilt (Mittelwert: 18 km/h; Standardabweichung: 2 km/h)
Beiwert ϵ	1,8 km/h
Beiwert r	4

Tabelle 4.1: Modellparameter für Radverkehrssimulationen im geschlossenen System.

Dichten zeigen Fahrzeuge in einem geschlossenen System folgendes Verhalten: Nach einer bestimmten Zeit bildet sich eine Schlange hinter dem langsamsten Fahrzeug (s. Abb. 4.5). Ab einer gewissen Anzahl von Fahrzeugen existiert kein Fahrzeug mehr, das frei mit Wunschgeschwindigkeit fahren kann. Alle Fahrzeuge werden vom Vorgänger beeinflusst. Das Verhalten der Fahrer hängt in einem System mit hoher Dichte im Wesentlichen von der Folgezeit T ab, die maßgebend dafür ist, wie viel Sicherheitsabstand bei der Folgefahrt eingehalten wird. Bei hohem Sicherheitsabstand stellt sich ein Gleichgewicht im System ein, d. h. alle Fahrzeuge fahren mit gleicher Geschwindigkeit und halten denselben Abstand ein. Dementsprechend treten selbst im Bereich oberhalb einer Dichte von 0.4 m⁻¹ keine Stauwellen auf.

Abb. 4.6 zeigt den Verlauf der Ortskoordinaten der 33 Fahrzeuge im geschlossenen System. In der linken Abbildung verlaufen die Ortskoordinaten eines jeden Fahrzeugs linear, d. h. die Geschwindigkeit ist im gesamten Zeitabschnitt konstant. Da die Fahrzeuge alle streng den bereits vorgestellten mathematischen Regeln folgen, halten diese immer präzise den richtigen Abstand und die richtige Geschwindigkeit ein. So kommt es zu keinerlei Störungen im System und damit auch nicht zu Stauwellen.

Die rechte Abbildung zeigt, dass sich auch bei niedrigen Folgezeiten zunächst ein Gleich-

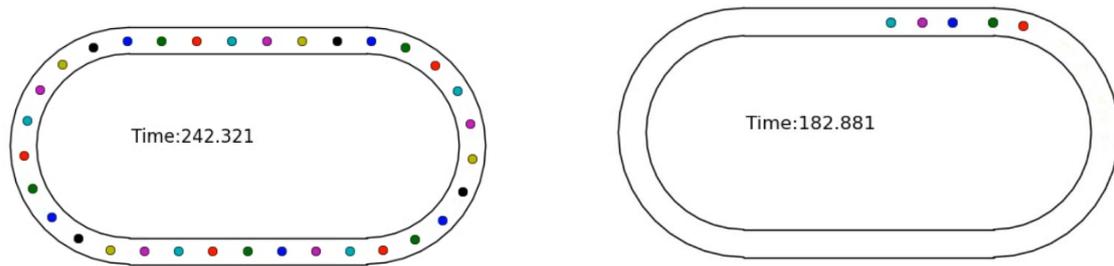


Abbildung 4.5: Visualisierung einer Verkehrssimulation in einem geschlossenen System mit einer Länge von 86 Metern und 33 (links) bzw. 5 (rechts) Verkehrsteilnehmern. Fahrtrichtung gegen den Uhrzeigersinn.

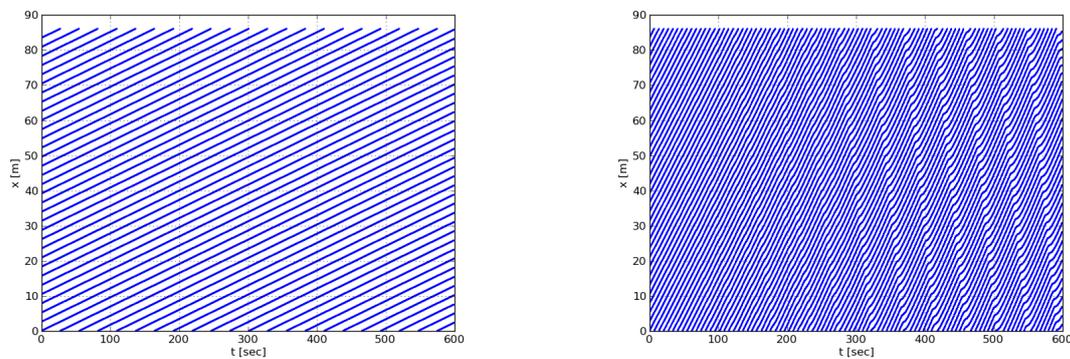


Abbildung 4.6: Darstellung der Trajektorien einer Verkehrssimulation in einem geschlossenen System mit einer Länge von 86 Metern und 33 Verkehrsteilnehmern. (Numerisches Aktualisierungsintervall $\Delta t = 0.001$ s). Links: Folgezeit $T = 4$ s. Rechts: Folgezeit $T = 1$ s. Weitere Parametrisierung s. Tabelle 4.1.

gewicht einstellt. Die Fahrzeuge weichen aber nach einer gewissen Zeit immer wieder in geringem Umfang von der Ideallinie bzw. der Idealgeschwindigkeit ab. Die Fahrzeuge halten sich natürlich selbstverständlich immer noch genau an ihre mathematischen Vorschriften. Bei niedrigeren Folgezeiten, bzw. bei höheren Geschwindigkeiten im System hat der Bremssummand b_2 einen größeren Einfluss, sodass die Fahrzeuge sich teilweise über den Gleichgewichtsabstand hinaus zurückfallen lassen. Diese kleinen Störungen bringen das System aus dem Gleichgewicht und es kommt zu einer zyklisch wiederkehrenden Welle. Die Geschwindigkeit der Fahrzeuge erreicht dabei jedoch nie den Wert 0.

Die Entstehung der Wellen lässt sich definitiv auf den zweiten Bremssummanden b_2 zurückführen, denn ohne die Verwendung dieser Bremskraft zeigen sich keine Wellenstrukturen in den Trajektorien. Stauungen entstehen auch bei Verwendung des

Bremssummanden b_2 nur bei Folgezeiten $T \leq 3$ (vgl. linke und rechte Abb. der Abb. 4.6) Die Wunschgeschwindigkeit der Fahrer war bisher normalverteilt. Bei Gleichschaltung der Wunschgeschwindigkeiten ergeben sich ebenfalls zyklisch wiederkehrende Wellen. Diese treten allerdings etwas später auf und sind weniger ausgeprägt, d. h. die Fahrzeuge, die sich in einer Stauung befinden, fahren dort mit etwas höherer Geschwindigkeit. Sind auch die Folgezeiten der Fahrer unterschiedlich (z. B. normalverteilt), treten Wellenstruktur früher und ausgeprägter auf.

Die anderen Modellparameter einschließlich des Aktualisierungsintervalls haben einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf das Verhalten im geschlossenen System.

Teil III

**Die Radexperimente vom 6.Mai
2012**

5 Beschreibung der Radexperimente vom 6.Mai 2012

5.1 Ziel der Experimente

Ziel der Experimente war es, Aufschlüsse über das Fahrverhalten von Radfahrern zu erhalten. Dabei sollten alle drei bekannten Verkehrssituationen der Längsdynamik (freie Beschleunigung bzw. freie Fahrt, Folgefahrt und Annäherung an ein Hinderniss) untersucht werden.

Mit Hilfe der Ergebnisse aus den Versuchsreihen können Modellparameter von Fahrzeugfolgemodellen bestimmt werden. Das durch die Parametrisierung beeinflusste Fahrverhalten der Simulation kann dann mit dem Verhalten der realen Fahrer verglichen werden. Darüber hinaus leisten die Ergebnisse auch in anderen Forschungsbereichen bezüglich Verkehrsdynamik einen Beitrag. Beispielsweise können die erhaltenen Daten mit Ergebnissen aus Versuchen zu Fußgänger- und Autoverkehr verglichen werden. Je nachdem wie stark sich die Ergebnisse der einzelnen Verkehrstypen unterscheiden, ist zu überlegen heterogenen Verkehr durch ein einziges, ggf. angepasstes, Modell zu simulieren.

5.2 Aufbau und Durchführung der Versuchsreihen

5.2.1 Versuchsaufbau

Zunächst wird die Versuchsstrecke auf dem Versuchsgelände durch Markierungen auf dem Boden gekennzeichnet (s. Abb. 5.1). Die Versuchsstrecke besteht aus zwei Geraden mit einer beliebigen Länge und zwei Halbkreisen mit einem beliebigen Radius.¹ Eine Video-

¹Die Länge der Versuchsstrecke der Radexperimente am 6.Mai betrug zunächst 100 Meter (zwei 25 Meter lange Geraden und zwei Halbkreise mit einem Radius von 8 Metern). Es stellte sich im Verlauf der Versuche heraus, dass die Schleife zu lang war um bei 33 Verkehrsteilnehmern Stauungen zu erzeugen.

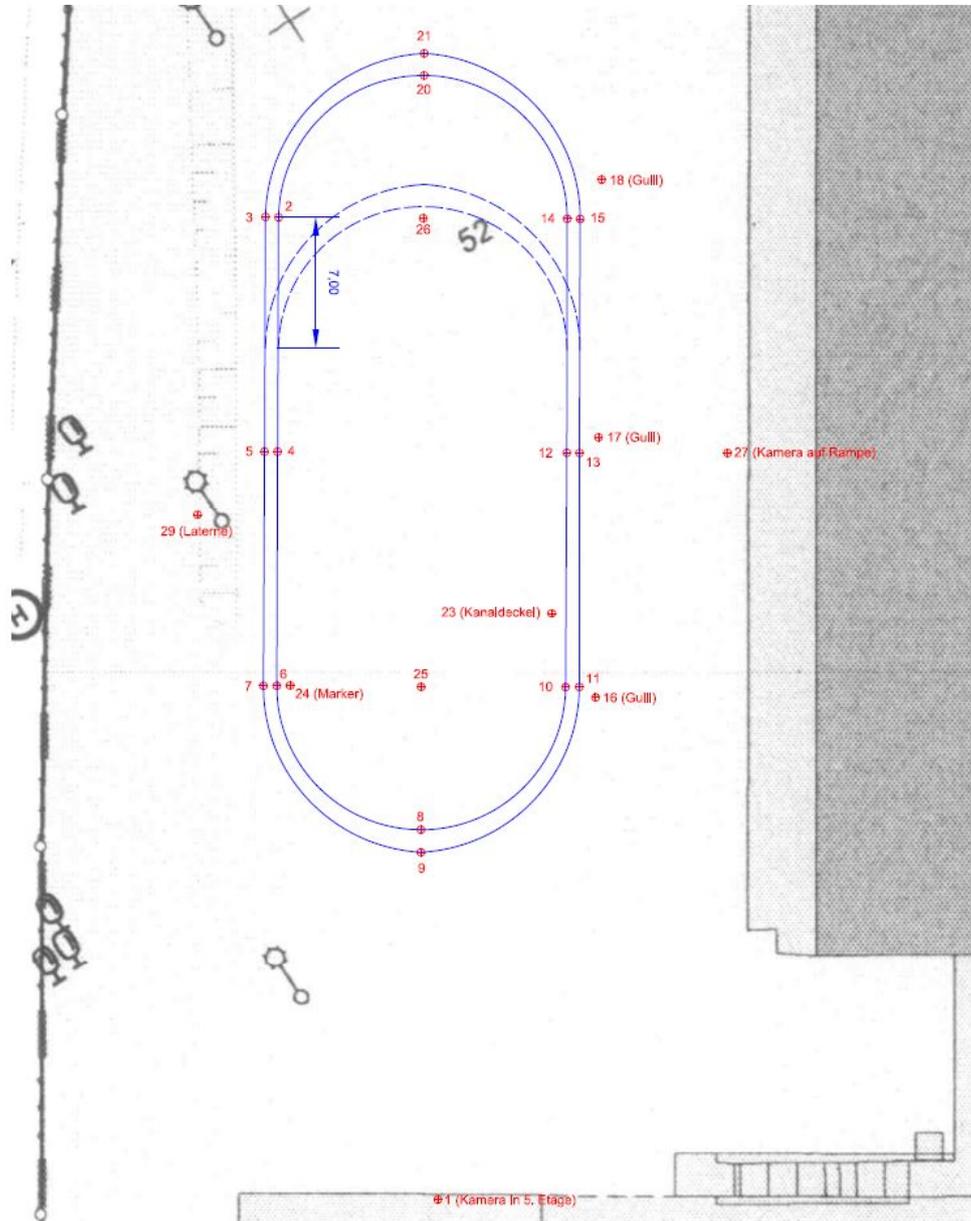


Abbildung 5.1: Skizze des Versuchsaufbaus für die Radexperimente. Quelle: Katasteramt Wuppertal

kamera wird neben einer der Geraden auf Höhe ihres Mittelpunkts aufgebaut und so ausgerichtet, dass sie die Fahrzeuge auf der gegenüberliegenden Gerade erfassen kann. Eine zweite Kamera wird auf einem höher gelegenen Standort positioniert, sodass sie von oben herab die Probanden filmen kann. Die Probanden werden mit zwei Markern ausgestattet, die von den Kameras erfasst werden können. Die Marker werden am Helm der Fahrer und auf dem Gepäckträger der Räder angebracht. Weiterhin werden vor Beginn der Versuche Maße und Gewicht eines jeden Rads und Fahrers festgestellt.²

5.2.2 Durchführung

Die Versuche lassen sich zunächst in zwei verschiedene Versuchstypen aufteilen.

1. Einzelexperimente: In den Einzelexperimenten geht es darum, das Beschleunigungsverhalten bei freier Fahrt und das Verhalten bei Annäherung an ein stehendes Hindernis zu analysieren. Hierfür werden die Probanden einzeln an einem beliebigen Startpunkt in die Schleife geschickt. Die Fahrer beschleunigen dann auf ihre Wunschgeschwindigkeit, durchqueren einmal die Schleife und bremsen nach einer Umrundung so ab, dass sie am Startpunkt zum Stillstand kommen.
2. Gruppenexperimente: Die Gruppenexperimente dienen dazu, das Verhalten der Fahrer bei Fahrgemeinschaft in einem geschlossenen System zu untersuchen. Die Probanden werden dazu in einem bestimmten Zeitabstand in die Schleife eingewiesen, bis sich eine gewisse Anzahl an Teilnehmern³ in der Schleife befindet. Um die Ausbildung eines stationären Zustands⁴ zu gewährleisten, bewegen sich die Teilnehmer noch eine gewisse Zeitspanne, ohne durch das Einscheren weiterer Fahrzeuge gestört zu werden, in der Schleife.

5.3 Beobachtungen

Da der Asphalt der Versuchsstrecke durch Regen nass geworden war, waren die Probanden über den gesamten Zeitraum aller Versuche stets gezwungen, besonders in den Kurven der Schleife, vorsichtig zu agieren.

Daher wurde sie auf 86 Meter verkürzt, indem man jeweils 7 Meter der beiden Geraden nicht mehr nutzte (s. Abb. 5.1).

²Die durchschnittliche Länge der am 6.Mai ausgemessenen Fahrzeuge betrug 1,73 m.

³Am 6.Mai wurde dieses Experiment jeweils mit 5,7,10,15,18,20,33 Probanden durchgeführt.

⁴Ein System befindet sich dann im stationären Zustand, wenn das Verhalten der Fahrzeuge nicht mehr durch Startbedingungen beeinflusst wird.



Abbildung 5.2: Gruppenexperiment mit 33 Probanden in einer 86 Meter langen Schleife. Quelle: Ralf Eisenbach, Haan.

1. Einzelexperimente: Die Beschleunigung auf Wunschgeschwindigkeit gelang allen Fahrern reibungslos noch vor Erreichen der ersten Kurve.
Bezüglich ihres Bremsverhaltens unterschieden sich die Fahrer. Teilweise ließen sich die Probanden zunächst ausrollen und bremsten dann bei schon relativ niedriger Geschwindigkeit kurz vor der Markierung, die das Hindernis darstellte. Andere Teilnehmer dagegen hielten ihre Geschwindigkeit und bremsten, z.T. auch unkomfortabel hoch, erst kurz vor der Markierung ab. Ein letzter Teil der Fahrzeuge überfuhr sogar die Markierung, bevor gebremst wurde. Das Bremsverhalten letzterer Fahrer wurde dennoch von der Kamera, dessen Blickwinkel die gesamte Gegengerade einschloss, erfasst. Die hier entstandenen Daten sind also ebenfalls nutzbar.
2. Gruppenexperimente: Bei Versuchen mit, im Verhältnis zur Schleifengröße, wenigen Probanden, d. h. bei Versuchen mit niedrigen Dichten kam es stets entweder zu Gruppenbildungen oder zu einer Fahrzeugschlange, die sich hinter einem besonders langsamen Fahrzeug bewegte. Ab einer Anzahl von etwa 18-20 Teilnehmern wurde die freie Beschleunigung eines jeden Fahrzeugs durch seinen Vordermann behindert (s. 1. Abbildung von unten der Abb. 5.3). Die Probanden fuhren gleichverteilt im System mit gleicher Geschwindigkeit. Erst ab etwa 25-28 Fahrzeugen in der Schleife entstanden Stauungen mit Wellenstrukturen, die sich entgegen der Fahrtrichtung ausbreiteten. Bei 33 Fahrzeugen ist die Geschwindigkeit vieler Radfahrer so klein geworden, dass sie anhalten und sich mit dem Fuß abstützen mussten, um das Gleichgewicht nicht zu verlieren.

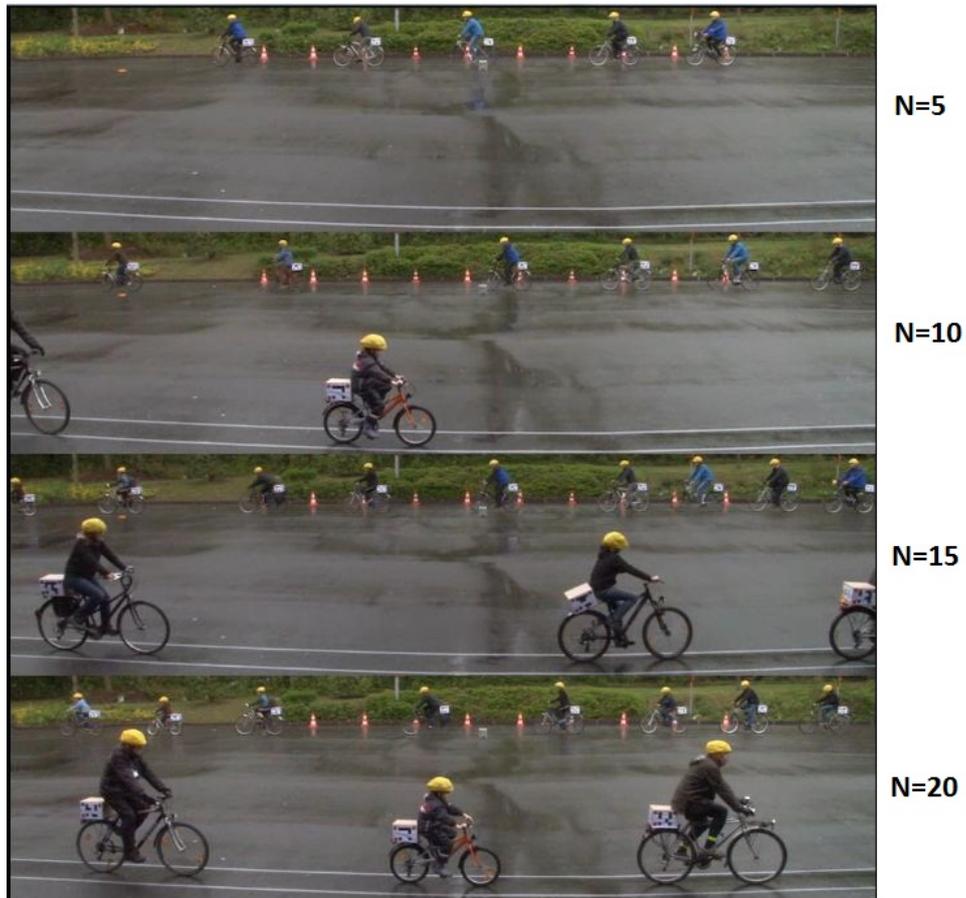


Abbildung 5.3: Die Abbildung zeigt das Gruppenexperiment mit unterschiedlicher Anzahl an Teilnehmer. Anzahl steigt von oben nach unten. Quelle: Maik Boltes, Wolfgang Mehner, Forschungszentrum Jülich.

Teil IV

Auswertung der
Experimente/Gegenüberstellung
Experiment–Modellierung

6 Auswertung der Experimente/Gegenüberstellung Experiment–Modellierung

Sämtliche Diagramme, Beschreibungen, Auswertungen und Gleichungen in diesem Kapitel sind, sofern nicht explizit angegeben, selbstständig erarbeitet bzw. entstammen nicht der Literatur.

6.1 Auswertung der Einzelexperimente

6.1.1 Beschleunigungsphase

Die linke Abbildung des Diagramms 6.1 zeigt den Verlauf der Ortskoordinaten und Geschwindigkeiten der Radfahrer während der Beschleunigungsphase in den Einzelexperimenten. In der rechten Abb. ist der Mittelwert der Geschwindigkeitsverteilung aller Fahrer zu jedem Zeitpunkt der Beschleunigungsphase zu sehen. Die Trajektorien wurden, um Messungenauigkeiten auszugleichen, geglättet. Trotz mehrfacher Glättung der Ortskoordinaten enthält das Beschleunigungs-Zeit-Diagramm immer noch zu hohe Fluktuationen, um daraus einen funktionalen Verlauf abzuleiten. Daher wird auf die Darstellung der Beschleunigungsverteilung verzichtet. Das Beschleunigungsverhalten der simulierten und realen Fahrer, wird über die Geschwindigkeitsverteilung verglichen.

Die Steigung des durchschnittlichen Geschwindigkeitsverlaufs ist monoton fallend. Das bedeutet, die Beschleunigung der Fahrer ist anfangs am größten und fällt dann stetig bis die Wunschgeschwindigkeit erreicht ist. Die durchschnittliche Dauer der freien Beschleunigungsphase beträgt 6-7 Sekunden. Der benötigte Weg um auf Wunschgeschwindigkeit zu beschleunigen beträgt 20-25 Meter. Da die Probanden angewiesen waren bis zur ihrer Wunschgeschwindigkeit zu beschleunigen, lässt sich der Mittelwert der Wunschgeschwindigkeit bzw. ihre Standardabweichung ermitteln: Der Mittelwert der Wunschgeschwindigkeit beträgt ca. 4,3 m/s, das entspricht einer Geschwindigkeit von ca. 15,5 km/h. Die

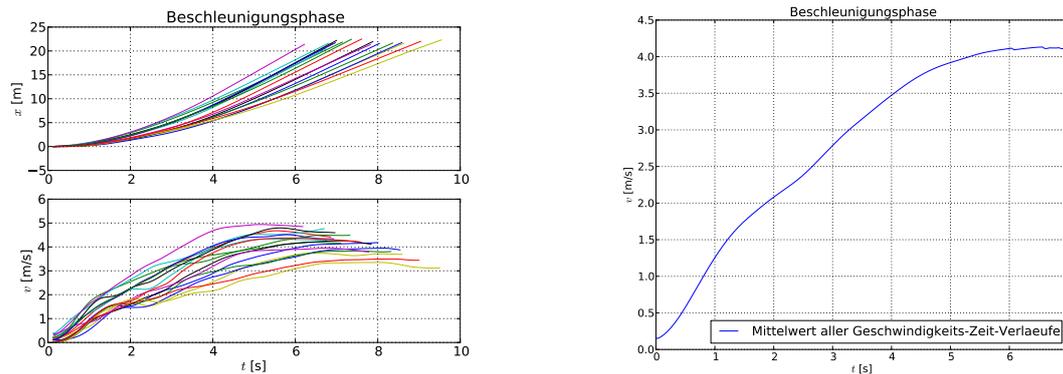


Abbildung 6.1: Ortskoordinaten und Geschwindigkeiten der Radfahrer während der Beschleunigungsphase.

Standardabweichung beträgt ca. 0,55 m/s bzw. etwa 2 km/h.

Zur Erinnerung: Die Beschleunigungsfunktion des Necessary-Deceleration-Modells ist folgendermaßen definiert:

$$a(t) = \frac{v_0 - v(t)}{\tau}. \quad (6.1)$$

Aus dieser Beschleunigungsfunktion ergibt sich der in Abb. 6.2 dargestellte exponentielle Geschwindigkeitsverlauf. Die Anpassungszeit τ soll nun anhand der Daten aus den Experimenten bezüglich der Beschleunigungsphase der Realität entsprechend angepasst werden. Die Anpassungszeit τ wird solange erhöht bzw. vermindert, bis die Mittelwerte der Geschwindigkeitsverläufe der Beschleunigungsphase übereinstimmen.

Identische Mittelwerte ergeben sich bei einem τ von 1,8 Sekunden. Bei angepasster Relaxationszeit τ stimmt auch der Verlauf der Geschwindigkeit von realen und simulierten Fahrzeugen sehr gut überein (s. Abb. 6.2). Das Beschleunigungsverhalten, welches die oben dargestellte exponentielle Geschwindigkeitsverteilung nach PIPES, L.A. (1953) ergibt, stimmt tatsächlich sehr gut mit dem realen Beschleunigungsverhalten von Fahrrädern überein.

6.1.2 Bremsphase

Abb. 6.3 zeigt den Verlauf der Geschwindigkeiten aller Probanden während der *finalen* Bremsphase kurz vor dem Hindernis. Die maximale Bremsverzögerung einiger Fahrzeuge erreicht sogar Bereiche über 5 m/s^2 , obwohl die Fahrbahn durch Regen nass geworden war. Die durchschnittliche maximale Bremsbeschleunigung liegt nur bei ca. 3 m/s^2 . Das liegt daran, dass das Bremsverhalten der Probanden so unterschiedlich war. Einige bremsen

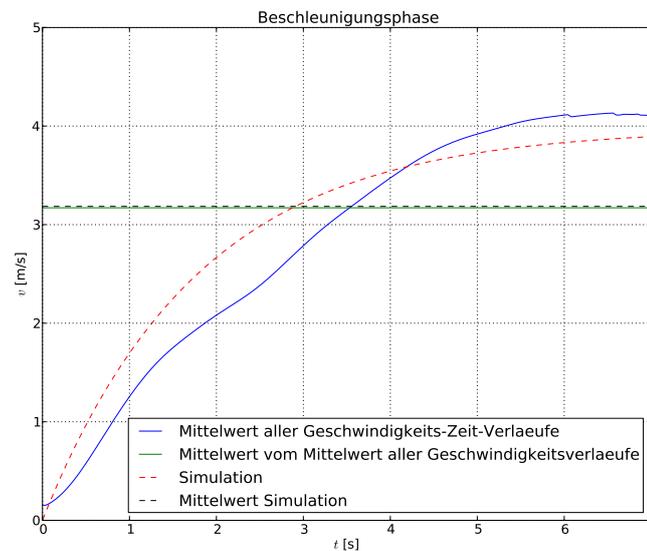


Abbildung 6.2: Mittelwert der Geschwindigkeitsverläufe aller realen bzw. simulierten Fahrer während der Beschleunigungsphase.

spät mit hoher Bremsverzögerung, andere ließen ihre Geschwindigkeit in weiter Entfernung vom Hinderniss sinken und bremsten dann komfortabel ab, da ihre Geschwindigkeit bereits stark gesunken war. Je nach Geschwindigkeit am Anfang der finalen Bremsphase beträgt der Bremsweg ca. 3-5 Meter, die Bremsdauer beträgt ca. 1 bis 2 Sekunden.

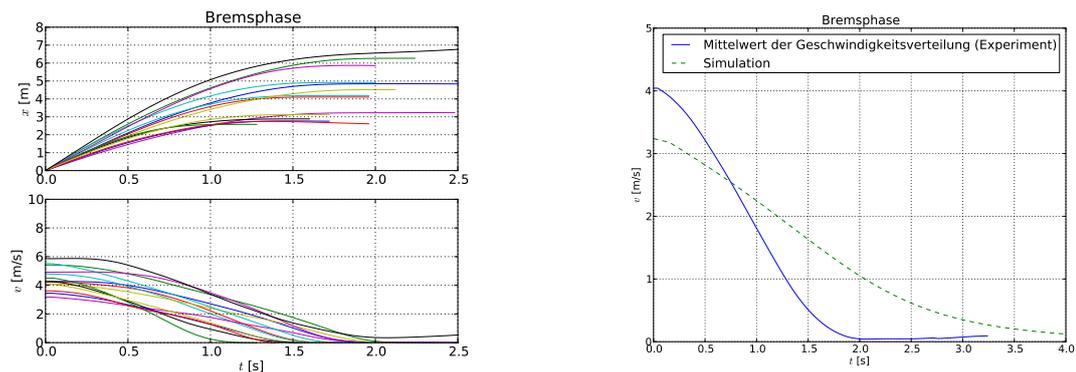


Abbildung 6.3: Links: Ortskoordinaten und Geschwindigkeiten der Probanden in der finalen Bremsphase. Rechts: Gegenüberstellung des Mittelwertes des Geschwindigkeitsverlaufes aller Versuchsteilnehmer und des simulierten Bremsverhaltens.

Der Vergleich der Geschwindigkeitsverläufe von Experiment und Simulation zeigt, dass die

simulierten Fahrer vorrausschauender und damit komfortabler bremsen als die Probanden des hier vorliegenden Experiments (s. Abb. 6.3).

6.2 Auswertung der Gruppenexperimente

6.2.1 Gegenüberstellung der Fundamentaldiagramme

Der Messbereich, indem die Trajektorien der Gruppenversuche ermittelt wurden, entspricht im Wesentlichen einer der beiden Geraden der Schleife. An den Randbereichen werden jeweils 2,5 Meter der Gerade nicht berücksichtigt. Damit beträgt die Länge des Messbereiches 20 Meter. Die Dichte im Messbereich wird aus den Trajektorien (aus Experiment und Modellierung) mit Hilfe der Methode *B* nach ZHANG, J. ET AL. (2011) berechnet.¹

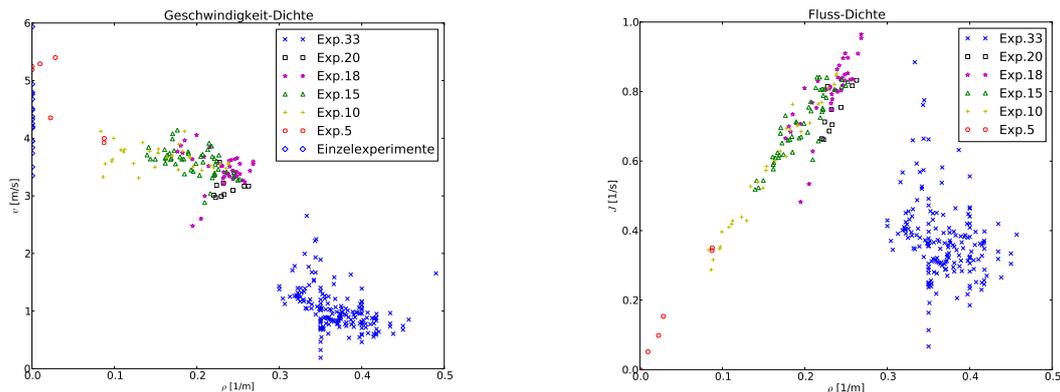


Abbildung 6.4: Fundamentaldiagramm (links) und Flussdiagramm (rechts) der Gruppenversuche am 6. Mai unter ausschließlicher Verwendung von Daten, die im stationären Zustand aufgenommen sind.

Da noch nicht bekannt war, ob die Störungen des Systems, verursacht durch das Einscheren von weiteren Probanden, das Verhältnis von Geschwindigkeit und Dichte (Fundamentaldiagramm) beeinflussen wurden zunächst nur die Messwerte übernommen, die ermittelt wurden, als sich bereits ein stationärer Zustand im System eingestellt hatte (s. Abb. 6.4). Die Messergebnisse, die im instationären Zustand ermittelt worden sind, stimmen gut mit

¹Eine kurze Definition der Messmethode *B* zur Bestimmung der Dichte nach ZHANG, J. ET AL. (2011) befindet sich im Anhang B.

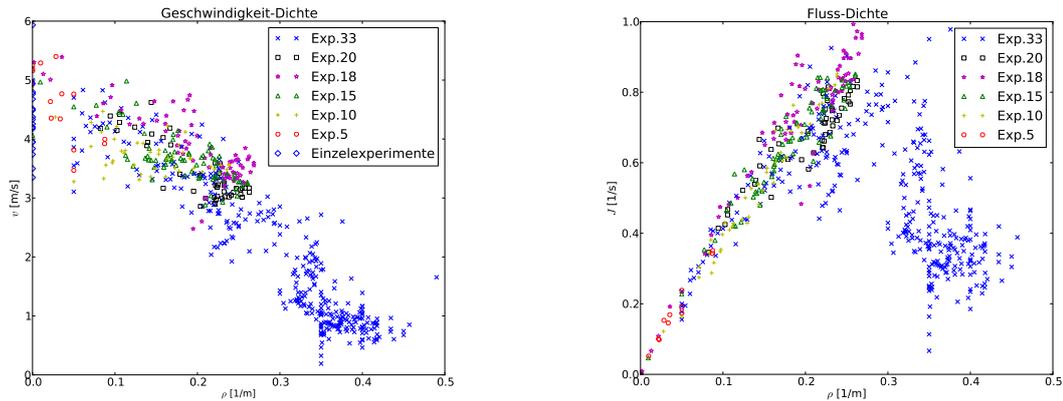


Abbildung 6.5: Fundamentaldiagramm (links) und Flussdiagramm (rechts) der Gruppenversuche am 6. Mai unter Verwendung aller Daten.

den Messwerten aus dem stationären Zustand überein. Das heißt, die Störungen des Verkehrssystems durch das Einscheren von Probanden haben keinen relevanten Einfluss auf das Verhältnis von Geschwindigkeit und Dichte. Daher werden alle Messergebnisse zur Bildung des Fundamental- und Flussdiagramms berücksichtigt (s. Abb. 6.5). Der maximale Fluss ergibt sich bei 18 Fahrzeugen.

Befinden sich mehr Teilnehmer in der Schleife, wird jeder Fahrer von seinem Vorgänger daran gehindert, frei auf Wunschgeschwindigkeit zu beschleunigen. Die Geschwindigkeit im System sinkt unter die Wunschgeschwindigkeit des langsamsten Fahrzeugs.

Unterhalb einer Anzahl von 18 Fahrzeugen im Verkehrssystem ist die Geschwindigkeit der Fahrzeuge abhängig vom langsamsten Teilnehmer, d. h. bei steigender Anzahl an Probanden (bis zu 18) fällt die Geschwindigkeit nicht (s. Abb. 6.5).

Bildet man den Kehrwert eines jeden Wertes der Dichte, so erhält man den Abstand der Räder untereinander in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Mit Hilfe des Fundamentaldiagramms soll dementsprechend u. a. der ideale Abstand $d(v(t)) = s_0 + l + T \cdot v(t)$, der von den virtuellen Fahrern bei Folgefahrt eingehalten wird, bestimmt werden. Es wird davon ausgegangen, dass bei weniger als 20 Fahrzeugen im System, der Abstand zum Vordermann größer ist als der Sicherheitsabstand, da viele Fahrzeuge noch nicht durch ihren Vorgänger beeinflusst werden, bzw. noch nicht auf ihn aufgefahren sind. Daher sollen ausschließlich Daten zur Bestimmung des idealen Abstands $d(v)$ benutzt werden, bei denen sichergestellt ist, dass der Abstand zum Vorderfahrzeug einem Sicherheitsabstand entspricht.

Befinden sich 20 Probanden in der Schleife, beträgt die Geschwindigkeit etwa 3,1 m/s bzw. 11,2 km/h. Die Dichte beträgt hier ca. 0,24 1/m. Das entspricht einem Abstand zwischen den Schwerpunkten der Räder von 4,167 Metern. Die Dichte eines Systems mit 33 Fahrzeu-

gen liegt bei ca. 0,4 1/m. Die 33 Fahrer halten folglich etwa einen Abstand von 2,5 m ein. Die Geschwindigkeit beträgt dabei ca. 0,8 m/s bzw. 2,8 km/h. Diese beiden Wertepaare sind ausreichend für die vollständige Bestimmung von $d(v)$, sofern nach wie vor von einem linearen Zusammenhang zwischen Abstand und Geschwindigkeit ausgegangen wird. Man erhält:² $T = 0,72$ s und $s_0 = 0,2$ m, also

$$d(v) = 1,73 + 0,20 + 0,72 \cdot v = 1,93 + 0,72 \cdot v \quad (6.2)$$

Bei Einsetzen der linearen Gleichung für $d(v)$ in ein Diagramm, welches die Abhängigkeit des Abstands zum Vordermann zur Geschwindigkeit darstellt, ergibt sich Abb. 6.6.

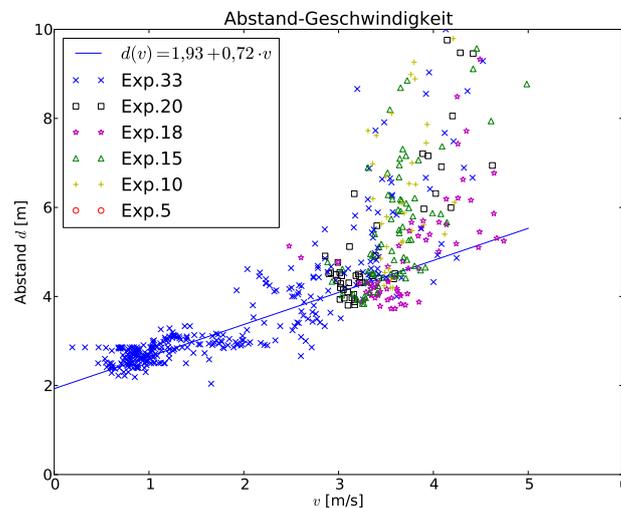


Abbildung 6.6: Abhängigkeit Abstand zum Vordermann / Geschwindigkeit

Die Gerade liegt im Bereich der Geschwindigkeiten von 1-3 m/s leicht oberhalb der Messwerte. Im Bereich zwischen den Geschwindigkeiten von 0-1 und von 3-3,5 m/s liegen die Messdaten oberhalb der linearen Funktion. Bei einer Geschwindigkeit oberhalb von 3,5 m/s wird davon ausgegangen, dass nicht alle Fahrräder auf ihren Vordermann aufgefahren sind, dementsprechend ihr Abstand kein Sicherheitsabstand darstellt.

Der Abstand bei Stillstand $s_0 + l$ ist mit nur 1,93 Metern unrealistisch klein. Bei 1,93 m Abstand zwischen den Schwerpunkten der Räder bliebe nur noch eine Distanz s_0 zwischen Vorderrad des aktuell Betrachteten und dem Hinterrad seines Vordermanns von 20 cm. Eher realistisch wäre ein Freiraum s_0 von 40 cm und damit ein Abstand der Schwerpunkte bei Stillstand von 2,13 Metern. Bessere Übereinstimmung von Funktion und Messdaten

²Bereits zuvor in Kapitel 5.3 bestimmt: $l_{mittel} = 1,73$ Meter

würde ein Polynom höheren Grades erzielen. Die Abweichungen der linearen Funktion gegenüber einem Polynom höherer Ordnung sind verhältnismäßig gering. Daher wird aus Gründen der Einfachheit und der Minimierung der Rechenzeit in der Modellierung nach wie vor von einer linearen Funktion ausgegangen.

Parameter	Wert
Folgezeit T	0,72 s
Minimalabstand zwischen den Fahrzeugen s_0	0.2 m
Fahrzeuglänge l	1.73 m
Maximale Bremsverzögerung b_{max}	5 m/s ²
Wunschgeschwindigkeit v_0	Normalverteilt (Mittelwert: 15,5 km/h; Standardabweichung: 2 km/h)
Beiwert ϵ	1,8 km/h
Beiwert r	4

Tabelle 6.1: Angepasste Modellparameter für Radverkehrssimulationen im geschlossenen System.

Bis auf die beiden Beiwerte r und ϵ , die sich ohne Weiteres nicht aus den Versuchsergebnissen bestimmen lassen, wurden bereits alle Modellparameter durch Messdaten bestimmt. Im Folgenden soll eine Simulation unter den gleichen Bedingungen, unter denen das Experiment durchgeführt worden ist, ausgeführt werden. Das heißt, die Modellparameter der Tabelle 6.1 werden für die Ausführung der Simulation berücksichtigt. Daraufhin soll das Fundamentaldiagramm aus dem Experiment mit dem Fundamentaldiagramm der Modellierung verglichen werden und nach Möglichkeit das Modell abschließend validiert werden.

Abb. 6.7 zeigt die gute Übereinstimmung der Geschwindigkeit-Dichte-Verhältnisse aus den realen bzw. modellierten Systemen. Folgende Punkte sind dabei besonders entscheidend:

1. Bis zu einer Anzahl von 18-20 Fahrzeugen im System bildet sich eine Schlange hinter dem langsamsten Teilnehmer. Die Geschwindigkeit hängt folglich von diesem Fahrer ab. Zu erkennen ist dies an der Tatsache, dass sich für Systeme mit einer Anzahl an Teilnehmern unterhalb von 20 die Punkte im Fundamentaldiagramm auf einer Horizontalen befinden. Für die experimentell ermittelten Punkte gilt dies tendenziell auch.

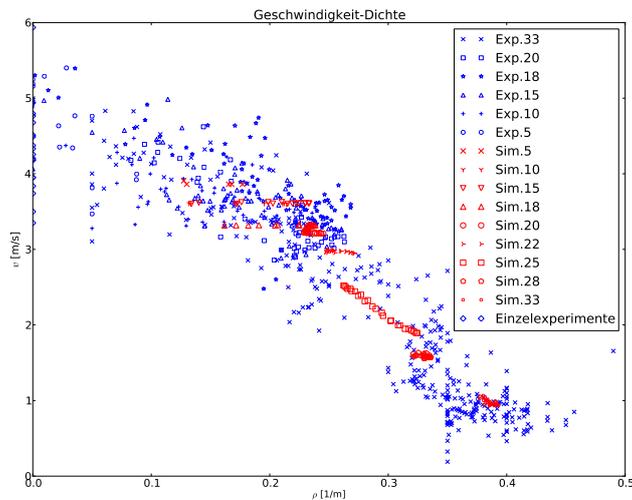


Abbildung 6.7: Gegenüberstellung der Fundamentaldiagramme aus Experiment und Modellierung. Parametrisierung des Modells nach Tabelle 6.1

2. Bei ca. 18-20 Teilnehmern herrscht der größte Fluss im System. Nach Einweisung weiterer Probanden in die Schleife sinkt die Geschwindigkeit unter die Wunschgeschwindigkeit des langsamsten Fahrzeug, da auch der langsamste Fahrer durch einen Vordermann behindert wird. Die Geschwindigkeit sinkt ab hier mit zunehmender Zahl an Fahrzeugen bzw. mit zunehmender Dichte.

Einerseits folgt der sich deckende Verlauf der beiden Fundamentaldiagramme aus den oben genannten Übereinstimmungen im Verhalten der simulierten und realen Verkehrsteilnehmern. Weiterhin ist auch der zuvor bestimmte ideale Sicherheitsabstand $d(v)$ maßgebend für den Verlauf des Fundamentaldiagramms. Die anderen Modellparameter haben einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Ausbildung des Fundamentaldiagramms. Im simulierten System mit 25 Fahrzeugen gibt es die größten Geschwindigkeitsschwankungen, da hier bereits Stauungen auftreten. Im Vergleich zum System mit 33 Fahrzeugen ist die Geschwindigkeit der Fahrzeuge, die sich nicht in einer Stauung befinden, allerdings größer. Daher entsteht die größere Geschwindigkeitsdifferenz. Dieses Phänomen kann nicht durch die experimentellen Daten bestätigt werden, da im Bereich der Dichte von 0,3 1/m (entspricht etwa der Dichte eines System mit 25 Fahrrädern) zu wenig Messwerte vorliegen. Folgende Unterschiede zeigen sich beim Vergleich der Fundamentaldiagramme:

1. Die Fluktuation der experimentell bestimmten Messwerte im Fundamentaldiagramm (Abb. 6.7) ist wesentlich größer, da das Modell deterministisch ist, d. h. die simulierten Fahrzeuge verhalten sich streng nach mathematischen Vorschriften. Reale

Fahrer folgen zwar auch gewissen Grundbedingungen, weichen aber stark von ihnen ab. Weiterhin unterscheiden sich reale Fahrzeuge wesentlich prägnanter in ihren Eigenschaften (z.B. Beschleunigungsverhalten, Bremsverhalten, etc.).

2. Während sich in der Simulation eines Systems mit einer Dichte unterhalb von 0,25 1/m (etwa 18-20 Fahrzeugen) stets eine Schlange hinter dem langsamsten Fahrzeug bildet, entstehen im realen Versuch z.T. auch mehrere kleinere Gruppen. Das liegt daran, dass z.T. experimentelle Daten vor Erreichen eines stationären Zustands aufgenommen worden sind. In jedem System bilden sich zunächst kleine Gruppen, die sich dann nach einer gewissen Zeit zu einer großen Gruppe zusammenschließen. Die Daten aus der Modellierung zeigen ausschließlich das System im stationären Zustand nach Zusammenschluss der kleinen Gruppen zu einer Schlange hinter dem Fahrer mit der niedrigsten Geschwindigkeit.

6.2.2 Gegenüberstellung der Trajektorien

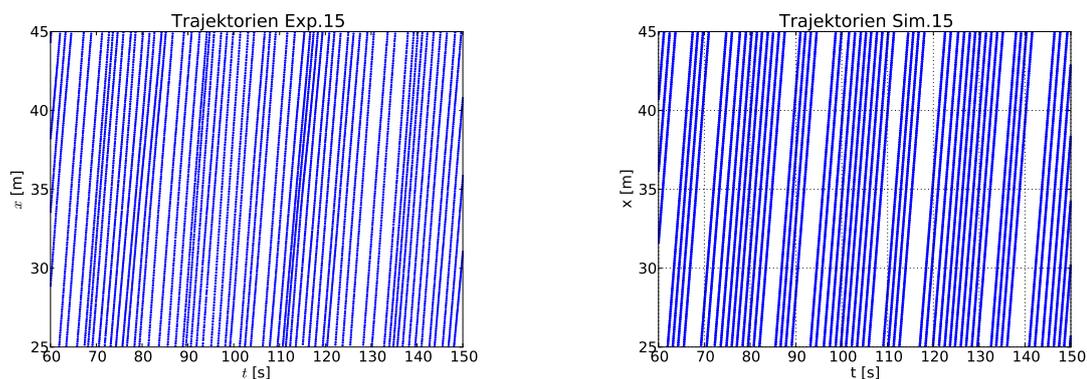


Abbildung 6.8: Trajektorien im geschlossenen System mit 15 Fahrzeugen. Links: Experiment. Rechts: Simulation.

Der Vergleich der Trajektorien aus Modellierung und Versuchsreihen bestätigen die bisherigen Aussagen: Die Trajektorien der Simulation (s. Abb. 6.8) zeigen deutlich den Zusammenschluss einer größeren und einer kleinen Gruppe zu einer einzigen großen Gruppe. Die Wunschgeschwindigkeit des Führungsfahrzeugs beider Gruppen ist ähnlich, daher bleiben die Gruppen zunächst noch getrennt. Sie ist jedoch nicht identisch. Folglich ist es nur eine Frage der Zeit, bis sich alle Fahrzeuge hinter dem Fahrer mit niedrigster Wunschgeschwindigkeit einfinden. Die Trajektorien des Experiments zeigen ebenfalls Zusammenschlüsse von Fahrergruppen. Ab $t=120$ Sekunden existiert eine große Gruppe und eine kleine Gruppe mit zwei Fahrern, die sich der großen Gruppe nähert.

Ab 20 Probanden im System herrscht Gleichgewicht (s. Abb. 6.9). Die Fahrer behal-

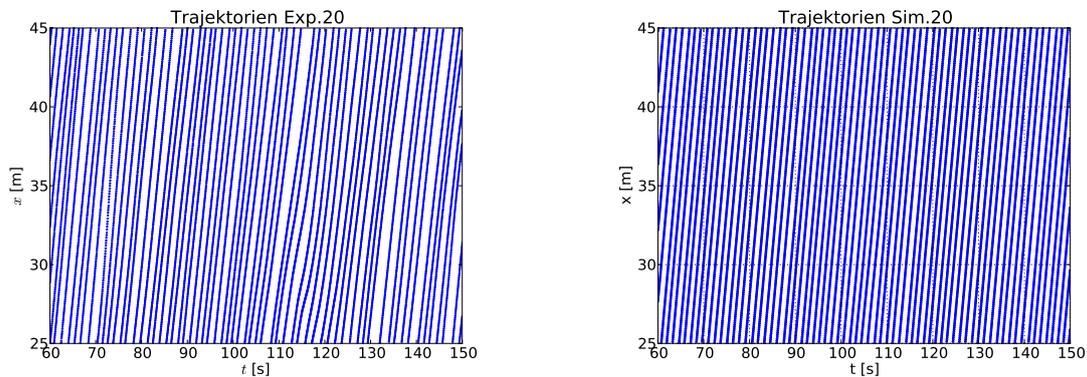


Abbildung 6.9: Trajektorien im geschlossenen System mit 20 Fahrzeugen. Links: Experiment. Rechts: Simulation.

ten identische Geschwindigkeiten und Abstände bei. Stauungen treten nicht auf. In den Trajektorien des Experiments erkennt man bei $t=112$ Sekunden eine Störung durch einen Fahrfehler eines Probanden. Trotz der Störung treten keine Stauerscheinungen im weiteren Verlauf auf.

Die Trajektorien des Gruppenexperiments mit 33 Probanden (s. Abb. 6.10 (links)) zeigt

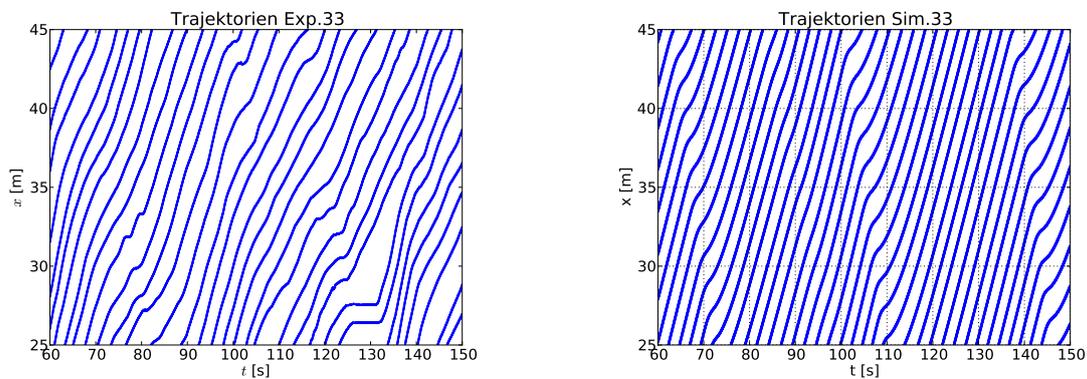


Abbildung 6.10: Trajektorien im geschlossenen System mit 33 Fahrzeugen. Links: Experiment. Rechts: Simulation.

die Existenz von Stauwellen im System. In den Stauungen kommen die Fahrzeuge z. T. zum Stillstand. In der äquivalenten Simulation treten ebenfalls Stauerscheinungen auf. Dabei kommen die Fahrzeuge nicht komplett zum Stillstand. Sie bewegen sich jedoch teilweise mit sehr kleiner Geschwindigkeit. Reale Radfahrer können diese geringe Geschwindigkeit nicht halten und müssten anhalten, um das Gleichgewicht nicht zu verlieren. Daher treten kurze Stillstände in den Trajektorien des Experiments auf. Die Ausprägung der Wellen ist in Experiment und Modellierung ähnlich. Die Welle schaukelt sich, wenn überhaupt, nur

leicht auf. Sie klingt jedoch auch nicht nach wenigen Fahrern ab. Dementsprechend ist das reale und simulierte Fahrverhalten weder absolut kolonnenstabil, noch absolut instabil.

Teil V

Schlussbetrachtungen

7 Schlussbetrachtung

7.1 Zusammenfassung und Fazit

Das vollständig erweiterte Necessary-Deceleration-Modell kann alle drei bekannten Verkehrssituationen der Längsdynamik konsistent und kollisionsfrei darstellen. Das Modell reagiert unempfindlich bei Veränderung der anschaulichen Modellparameter. Es wird daher als *robust* angesehen. Bis auf wenige Ausnahmen, können die Parameter durch experimentelle Daten bestimmt werden, da sie jeweils eine Eigenschaft des Fahrers oder Fahrzeugs widerspiegeln.

Das freie Beschleunigungsverhalten ist durch die Einzelversuche der Radexperimente vom 6.Mai 2012 vollständig kalibriert und validiert. Nicht nur die Größenordnung der maximalen Beschleunigung, sondern auch der Verlauf der Beschleunigungsverteilung stimmt gut mit der Wirklichkeit überein. Das Verhalten bei Annäherung an ein Hinderniss befindet sich ebenfalls im Rahmen des Realen.

Nach Erweiterung des Modells bremsen die simulierten Fahrzeuge nicht mehr mit unmöglichen hohen Verzögerungen, sondern mit wirklichkeitsnahen, komfortablen Bremsverzögerungen. Weiterhin zeigt der Verlauf der Bremsverzögerungsverteilung Merkmale der realen Verteilung.

Nach Kalibrierung des Abstandsverhaltens der Verkehrsteilnehmer bei Folgefahrt durch die Gruppenversuche der Radexperimente vom 6.Mai 2012 zeigt der Vergleich der Trajektorien bzw. Fundamentaldiagramme Übereinstimmungen in relevanten Punkten. Verlauf und Punkte der Fundamentaldiagramme sind weitgehend identisch.

Folgende Phänomene treten ebenfalls in Simulation und Experiment auf: Die Trajektorien zeigen Gruppenbildung unterhalb einer Dichte von $0,25 \text{ 1/m}$. Oberhalb der Dichte von $0,25 \text{ 1/m}$ tritt zunächst Gleichgewicht im System auf. Bei weiterhin steigender Dichte treten Stauungen in der Schleife auf.

Die Validation des Modells durch den Vergleich der Fundamentaldiagramme und der Trajektorien lässt darauf schließen, dass das ND-Modell in Systemen mit beliebigen Dichten

reales Fahrverhalten simuliert.

Das Necessary-Deceleration-Modell liefert in bestimmten Situationen realistischere Ergebnisse als das Gipps-Modell (z.B. in Bezug auf das Beschleunigungsverhalten) und simuliert ähnlich wirklichkeitsnahes Verkehrsverhalten wie das Intelligent-Driver-Modell.

Beide Erweiterungen des Modells sind notwendig, da ohne sie in bestimmten Situationen unnatürliches Fahrverhalten auftritt. Mit den Erweiterungen steigt jedoch die Komplexität des Modells bzw. die mathematische Beschreibung des Modells wird unübersichtlich.

7.2 Ausblick

Da sich in dieser Thesis herausgestellt hat, dass das ND-Modell realistisches Fahrverhalten modellieren kann, ist die Weiterverwendung des Modells für den Radverkehr sinnvoll. Der nächste Schritt, der sich unmittelbar an die bereits implementierte Modellierung anschließt, ist die erweiternde Modellierung von diskreten Entscheidungen (z. B. Fahrstreifenwechsel). Sinnvoll wäre hier eine Darstellung eines offenen Systems mit zwei Fahrstreifen. Die Räder können den linken Fahrstreifen zum Überholen nutzen, müssen aber ggf. Gegenverkehr beachten. Dieses System würde die Situation auf einer realen Fahrradtrasse widerspiegeln.

Weiterhin gilt es zu klären, ob das Modell ausschließlich wirklichkeitsnahes Fahrverhalten von Fahrrädern abbildet oder ob auch realistischer Autoverkehr oder sogar Fußgängerverkehr simuliert werden kann. Dazu können auch zunächst die experimentellen Daten der jeweiligen Verkehrssystemtypen gegenüber gestellt werden.

Es ist dann möglich, ggf. unter Nutzung weiterer Modelle, Systeme zu simulieren, in denen die drei oben genannten Verkehrsteilnehmer (Auto, Rad, Fußgänger) involviert sind (heterogener Verkehr).

Literaturverzeichnis

- M. TREIBER, A. KESTING (2010) *Verkehrsdynamik und -simulation*, Springer Lehrbuch.
- BANDO, M., HASEBE, K., NAKAYAMA, A., SHIBATA, A., SUGIYAMA, Y. (1995) *Dynamical model of traffic congestion and numerical simulation*, Phys. Rev. E 51, 1035-1042.
- GIPPS, P.G. (1981) *A behavioural car-following model for computer simulation*, Transp. Res. B Methodol. 15, 105-111.
- TREIBER, M., HENNECKE, A., HELBING, D. (2000) *Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations.*, Phys. Rev. E 62, 1805–1824
- PIPES, L.A. *An Operational Analysis of Traffic Dynamics*, J. Appl. Phys. 24, 274 (1953)
- J. ZHANG, W. KLINGSCH, A. SCHADSCHNEIDER, A. SEYFRIED (2011) *Transitions in pedestrian fundamental diagrams of straight corridors and T-junctions*, Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment, P06004 (2011)

Teil VI

Anhang

A Anhang A

A.1 Zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeit der Radfahrer bei den Gruppenversuchen am 6. Mai 2012.

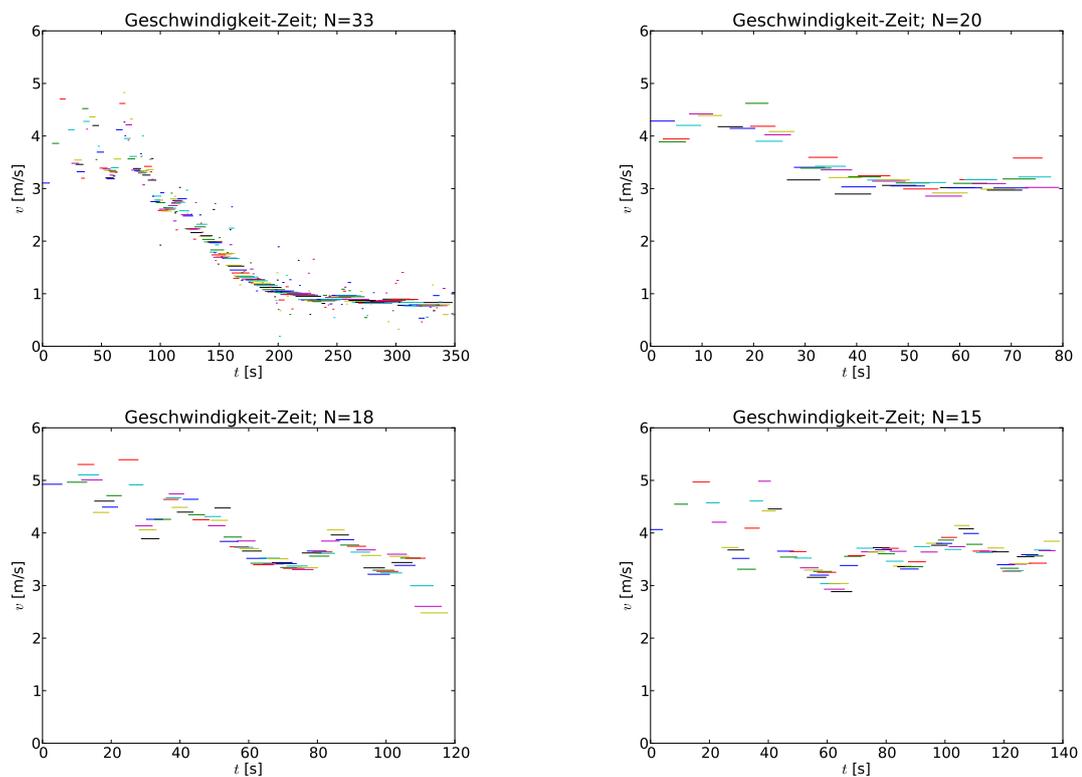


Abbildung A.1: Zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeit der Radfahrer bei den Gruppenversuchen am 6. Mai 2012.

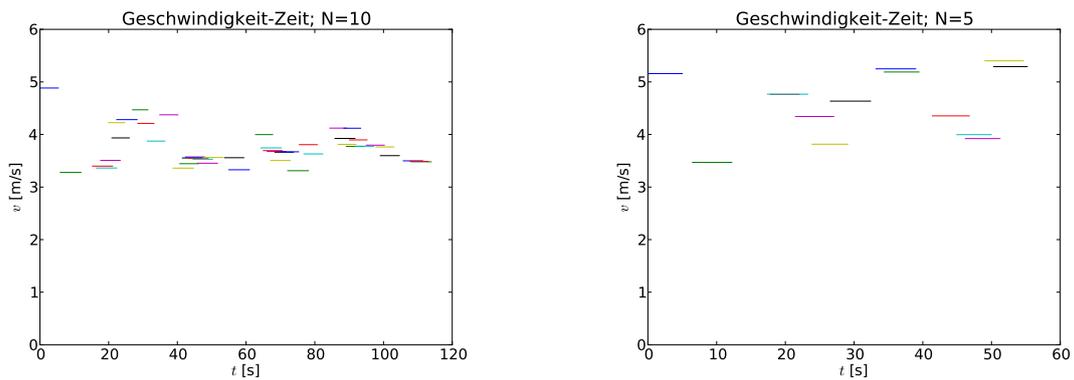


Abbildung A.2: Zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeit der Radfahrer bei den Gruppenversuchen am 6. Mai 2012.

A.2 Zeitliche Entwicklung der Dichte der geschlossenen Systeme bei den Gruppenversuchen am 6. Mai 2012.

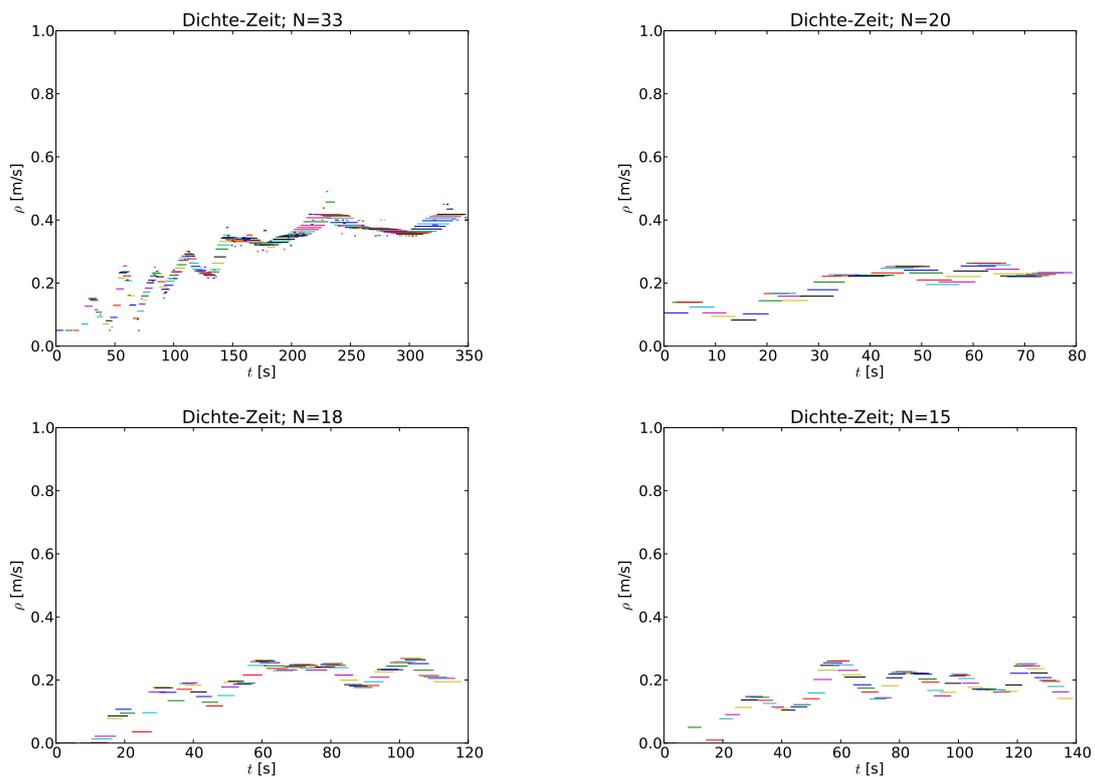


Abbildung A.3: Zeitliche Entwicklung der Dichte der geschlossenen Systeme bei den Gruppenversuchen am 6. Mai 2012.

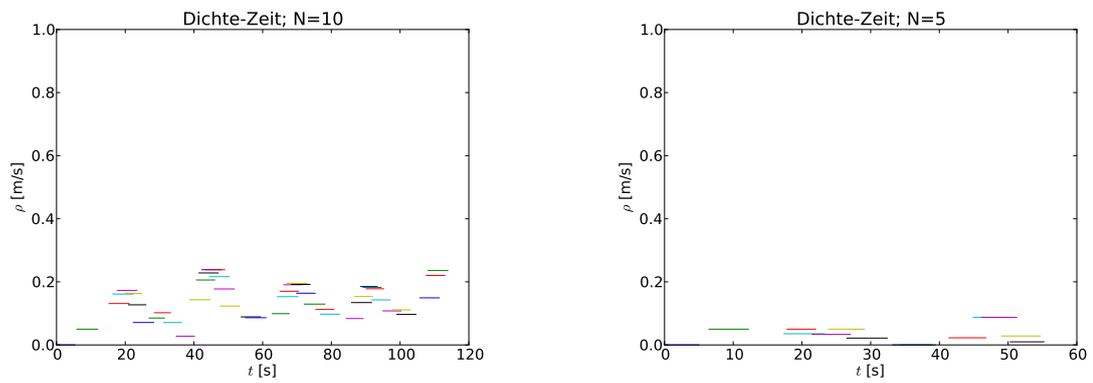


Abbildung A.4: Zeitliche Entwicklung der Dichte der geschlossenen Systeme bei den Gruppenversuchen am 6. Mai 2012.

B Anhang B

B.1 Methode B zur Bestimmung der Dichte in einem geschlossenen Verkehrssystem

Nach ZHANG, J. ET AL. (2011) wird die Dichte in einem geschlossenen System mit der Methode B folgendermaßen gemessen:

Innerhalb des geschlossenen Verkehrssystems gibt es einen Abschnitt, den Messbereich, indem die Bewegungen der Probanden z. B. durch Kameras erfasst werden. Immer dann, wenn ein Proband den Messbereich betritt wird daraufhin bei jedem erfassten Zeitpunkt t die Anzahl der Probanden N im Messbereich bestimmt. Dies geschieht solange bis der betrachtete Proband den Messbereich wieder verlassen hat. Die durchschnittliche Dichte lässt sich mit Hilfe der folgenden Formel berechnen:¹

$$\rho_i = \frac{1}{t_{out} - t_{in}} \int_{t_{in}}^{t_{out}} \frac{N'(t)}{A} dt. \quad (\text{B.1})$$

A beschreibt die Querschnittsfläche des Messbereiches. t_{out} und t_{in} charakterisieren die Zeitpunkte des Verlassens und Erreichens des Messbereiches. Wir betrachteten ein eindimensionales System. Daher gilt:

$$A = 1 \cdot L \quad (\text{B.2})$$

L steht hier für die Länge des Messbereiches. Der Mittelwert der Dichte wird dem betrachteten Probanden zugewiesen. Weiterhin wird seine durchschnittliche Geschwindigkeit im Messbereich durch folgende Gleichung berechnet:

$$v_i = \frac{A}{t_{out} - t_{in}}. \quad (\text{B.3})$$

¹Die Darstellungen der Gleichungen (B.1), (B.3), (B.4) und (B.5) sind gegenüber der Originalpublikation leicht verändert.

So entsteht ein Wertepaar (Geschwindigkeit-Dichte) im Fundamentaldiagramm.

Wird Methode *C* nach ZHANG, J. ET AL. (2011), die klassische Messmethode, verwendet, wird bei jedem erfassten Zeitpunkt t die Anzahl der Probanden im Messbereich bestimmt. Nach Gl. (B.1) kann dann für jeden Zeitpunkt t die Dichte berechnet werden.

$$\rho(t) = \frac{N(t)}{A} \quad (\text{B.4})$$

Zusätzlich wird die durchschnittliche Geschwindigkeit aller Fahrzeuge im Messbereich bei jedem erfassten Zeitpunkt t berechnet:

$$\bar{v}(t) = \frac{1}{N(t)} \sum_{i=1}^{N(t)} v_i(t) \quad (\text{B.5})$$

Das entstandene Wertepaar ist also keinem Probanden, sondern dem betrachteten Zeitpunkt t zugeordnet. Der Nachteil an der Methode ist, dass die Dichte nur wenige bestimmte Werte annehmen kann, da sie immer aus dem Kehrwert einer ganzen Zahl bestimmt ist. Unter Verwendung der Methode *B* hingegen, wird die durchschnittliche Anzahl der Probanden \bar{N} , während sich der betrachtete Proband im Messbereich befindet, genutzt. \bar{N} kann durchaus zwischen zwei ganzen Zahlen liegen.

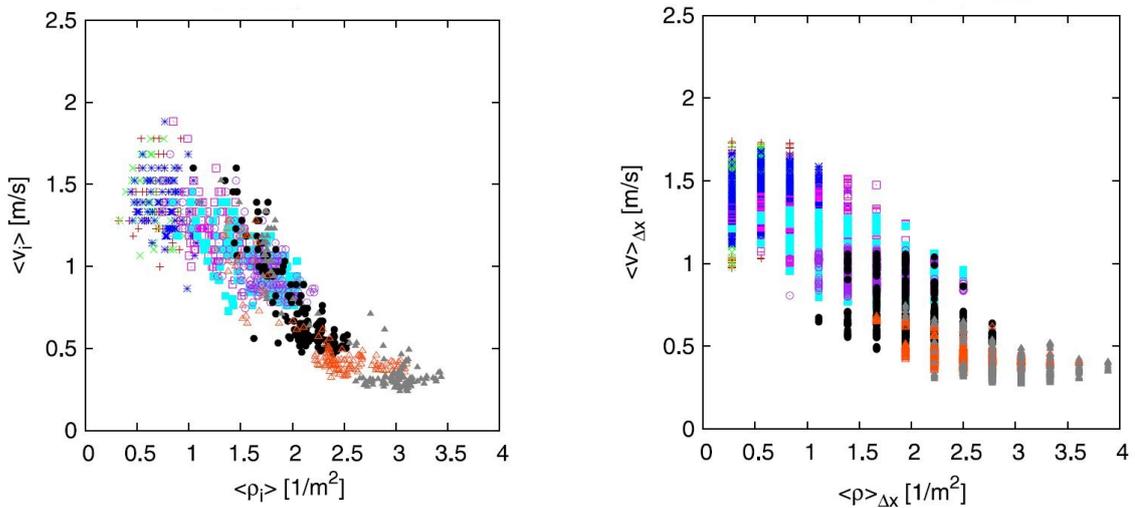


Abbildung B.1: Gegenüberstellung zweier Fundamentaldiagramme zur Fußgängerdynamik, erstellt aus identischen Trajektorien, jedoch mit Hilfe von verschiedenen Messmethoden. Links: Methode *B*. Rechts: Methode *C*. Quelle: ZHANG, J. ET AL. (2011)

