

Einfluss unterschiedlicher Templimits auf den Verkehrsfluss und das Unfallgeschehen auf zweispurigen Autobahnen

Dieter Süss

Kuratorium für Schutz und Sicherheit, Ölzeltgasse 3, 1031 Wien

1. Einleitung

Empirische Daten von Verkehrszuständen auf Autobahnen legen die Einführung von drei verschiedenen Verkehrszuständen nahe [1], den freien Verkehr, den synchronisierten Verkehr und die großräumige Staubildung. Der freie Verkehr ist durch eine große mittlere Verkehrsgeschwindigkeit, nahe der Geschwindigkeitsbeschränkungen, charakterisiert. Die Linie (F) in Abbildung [1] zeigt, dass beim freien Verkehr der Verkehrsfluss annähernd linear mit der Verkehrsdichte zunimmt. Das heißt, dass beim freien Verkehr die mittlere Verkehrsgeschwindigkeit annähernd konstant ist. Im freiem Verkehr existieren Kolonnen von Fahrzeugen, die annähernd mit der selben Geschwindigkeit und kleinem Zeitabstand fahren.

Großräumige Staus sind stromaufwärts bewegende Strukturen, die durch zwei Fronten begrenzt sind, wobei innerhalb dieser beiden Fronten der Verkehrsfluss annähernd Null ist. Verkehrsstaus können durch ihre Geschwindigkeit, mit der sie sich stromaufwärts bewegen, ihrer Dichte und dem Ausfluss aus dem Stau, charakterisiert werden. Diese Parameter sind sehr robust und hängen nur von den Straßenbedingungen ab. Ein typischer Wert für den Ausfluss von einem großräumigen Stau ist,

$J_{max}^{free}/J_{out} \approx 1.5$, und die Geschwindigkeit mit der sich ein Stau entgegen der Fahrtrichtung bewegt kann mit 15 km/h [1,2] angegeben werden .

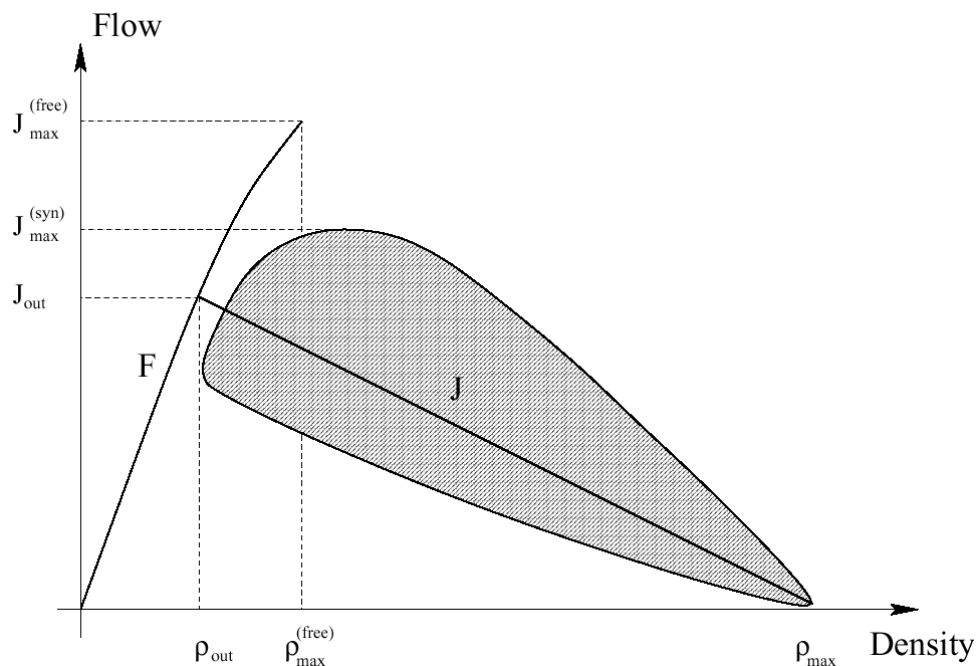


Abbildung 1: Schematische Zeichnung des Fundamentaldiagramms für eine mehrspurige Straße. Der freie Verkehrsfluss ist durch die Linie (F) charakterisiert. Synchronisierter Verkehr ist durch den grauen Bereich gekennzeichnet. Die Linie (J) bestimmt die Charakteristik von großräumigen Staus. Unterhalb von J können großräumigen Staus nicht für einen längeren Zeitraum auftreten. Oberhalb von J sind Verkehrsstaus metastabil.

Lange Zeit herrschte die Auffassung vor, dass der freie Verkehr und der großräumige Stau, die einzig beiden stabilen Verkehrszustände sind. Untersuchungen von Hall et al. [3] und Kerner et al. [1,4] ist die Einführung des synchronisierten Verkehrs zu verdanken. Synchronisierter Verkehr ist vor allem nahe von Auf- und Abfahrten von Autobahnen zu beobachten. Im Gegensatz zum freien Verkehr und zum großräumigen Stau gibt es beim synchronisiertem Verkehr keinen klaren Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte und Verkehrsfluss. Diese Beobachtung folgte aus Berechnungen der Kreuzkorrelation (Cross-Correlation) zwischen Verkehrsfluss und Verkehrsdichte. Es zeigt sich, dass die Kreuzkorrelation dieser Größen verschwindet [5]. Dieser fehlende Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte und Verkehrsfluss macht die Anwendung des Fundamentaldiagramms, für die Beschreibung des synchronisierten Verkehrs, sehr fraglich, zumindest muss mit einer sehr großen Varianz gerechnet werden. Im Fundamentaldiagramm in Abbildung [1] ist der synchronisierte Verkehr durch den grau schattierten Bereich gekennzeichnet. Der Name „synchronisierter Verkehr“ beruht auf der Tatsache, dass Verkehrsmessungen auf verschiedenen Fahrspuren, stark korrelierte Ergebnisse liefern. Das heißt, die Fahrzeuge bewegen sich auf beiden Spuren synchron.

2. Verkehrsmodelle

Die ersten Modellierungsansätze für die Straßenverkehrsdynamik reichen in die 50-er Jahre zurück. Lighthill und Whitham [6] beschrieben die Ausbreitung von Schockwellen durch fluid-dynamische Modelle. Seither wurden eine Vielzahl weiterer Modelle vorgeschlagen, die prinzipiell in mikroskopische und makroskopische Verkehrsmodelle eingeteilt werden können. Bei mikroskopischen Modellen wird die Dynamik jedes Fahrzeuges mit seiner Wechselwirkung mit seiner Umgebung simuliert. Makroskopische Modelle lösen nicht jedes einzelne Fahrzeug auf. Sie beschränken sich auf die Beschreibung der kollektiven Gesamtheit (z.B. mittlere Geschwindigkeit, die Fahrzeugdichte, Verkehrsfluss).

Verkehrsmodelle, die durch ihre Einfachheit und ihre realistische Beschreibung der Verkehrsdynamik bestechen, beruhen auf zellularen Automaten (ZA). Die ersten Modelle dieser Art wurden von Cremer und Ludwig [7] sowie von Nagel und Schreckenberg[8] entwickelt. Das Nagel-Schreckenberg-Modell führt zu einem schon recht realistischen Verkehrsfluss-Verkehrsdichte Zusammenhang (Fundamentaldiagramm). Auch die Ausbildung spontaner Verkehrsstaus konnte beschrieben werden. In den letzten Jahren wurden erweiterte ZA-Modelle entwickelt, die noch weitere subtile Effekte beschreiben können, wie zum Beispiel die größere Fahrzeugdichte auf der zweiten Spur auf Autobahnen verglichen mit der ersten Spur und metastabile Verkehrszustände.

Das in dieser Arbeit entwickelte Simulationsprogramm beruht auf dem “Bremslicht Modell” von Knospe et al. [9]. Bei dem Modell von Knospe et al. wird eine Fahrstrategie angenommen, die wie folgt beschrieben werden kann.

- (i) Bei grossen Abständen bewegen sich die Fahrzeuge mit ihrer gewünschten Geschwindigkeit (v_{\max})
- (ii) Bei mittleren Abständen reagieren die Fahrer auf Geschwindigkeitsänderungen der vorausfahrenden Fahrzeuge, zum Beispiel auf Bremslichter.
- (iii) Bei kleinen Abständen wählen die Fahrer die Geschwindigkeit so, dass sicheres Fahren möglich ist. Der Sicherheitsabstand wird eingehalten.
- (iv) Die Beschleunigung wird verzögert (zirka 1 Sekunde), wenn die Fahrzeuge anfahren oder direkt nachdem sie eine Bremsung durchgeführt haben.

Um das Verhalten auf Autobahnen richtig beschreiben zu können, müssen neben Beschleunigung – und Bremsvorgängen auch Spurwechselvorgänge berücksichtigt werden. Prinzipiell können Spurwechselvorgänge symmetrisch oder asymmetrisch bezüglich den Fahrspuren sein. Während bei symmetrischen Spurwechselregeln beide Fahrspuren äquivalent beschrieben werden können (z.B.: Highways in den USA), erfordern asymmetrische Spurwechselregeln eine individuelle Behandlung der linken - und der rechten Fahrspur. In Österreich müssen auf Grund des Rechtsüberholverbots und der Bevorzugung der rechten Fahrspur bei freier Fahrt, asymmetrische Spurwechselregeln im Modell eingeführt werden.

Sicherheitskriterium:

Prinzipiell muss sowohl beim Spurwechsel von rechts nach links, als auch beim Wechsel von links nach rechts, gewährleistet sein, dass auf der Zielspur genügend freier Platz ist. Gefahrlos kann gewechselt werden, wenn der Sicherheitsabstand zum nachfolgendem Fahrzeug auf der Zielspur mindestens eine Sekunde ist. Ferner muss auch ein Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug auf der Zielspur, von mindestens einer Sekunde, eingehalten werden können.

Absichtskriterium:

Ist das Sicherheitskriterium erfüllt kann prinzipiell die Fahrspur gewechselt werden. Ob ein Fahrspurwechsel für einen Fahrer als sinnvoll erscheint - im Sinne einer Fahrzeitorientierung - kann mit dem Absichtskriterium beschrieben werden. Wenn dies erfüllt ist wird die Fahrspur gewechselt, sofern das Sicherheitskriterium zutrifft.

- rechts -> links: Ein Fahrer versucht von rechts nach links zu wechseln, wenn die folgenden zwei Bedingungen erfüllt sind.
 - (i) er holt in der nächsten Sekunde das vorausfahrende Fahrzeug ein
 - (ii) es wurde nicht unmittelbar zuvor gebremst.
- links -> rechts: Von links nach rechts wird gewechselt, wenn
 - (i) das vorausfahrende Fahrzeug auf der linken Spur weiter als 3 Sekunden entfernt ist und das vorausfahrende Fahrzeug auf der rechten Spur weiter als 6 Sekunden entfernt ist,
 - (ii) nicht unmittelbar zuvor gebremst wurde.

Im folgendem werden die beschriebenen Regeln angewendet um die Verkehrsdynamik auf einer zweispurigen Autobahn zu beschreiben. Abbildung [2] vergleicht ein experimentell gemessenes Fundamentaldiagramm [10] mit einem Simulierten. Der Verkehrsfluss J und die Fahrzeuggeschwindigkeit v wurde in [10], mit Hilfe von zwei in einem bestimmtem Abstand angebrachten Induktionsschleifen, bestimmt. Genauer gesagt sind J und v der Durchschnittsfluss beziehungsweise die Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeuge die den Detektor in einer Zeitspanne von 1 Minute passiert haben. Die Fahrzeugdichte wurde über die Relation $\rho = J/v$ bestimmt. Es ist zu bemerken, dass diese dynamische Abschätzung der Fahrzeugdichte nur dann die reale Fahrzeugdichte ergibt, wenn die Geschwindigkeit der Fahrzeuge zwischen den Induktionsschleifen konstant ist. Als reale Fahrzeugdichte auf einem Autobahnabschnitt wird der Quotient, $\rho_r = (\text{Anzahl der Autos auf dem betrachteten Abschnitt zu einem bestimmten Zeitpunkt}) / (\text{Abschnittslänge})$, bezeichnet. Analog zur empirischen Messung, wurde in der Computersimulation der Durchschnittsfluss und die Durchschnittsgeschwindigkeit mit Hilfe zweier virtueller Induktionsspulen bestimmt. Die Mittelung erfolgt analog zum Experiment über 1 Minute. Der Vergleich der Fundamentaldiagramme in Abbildung 2 zeigt, dass die Computersimulation ein äußerst realistisches Fundamentaldiagramm liefert.

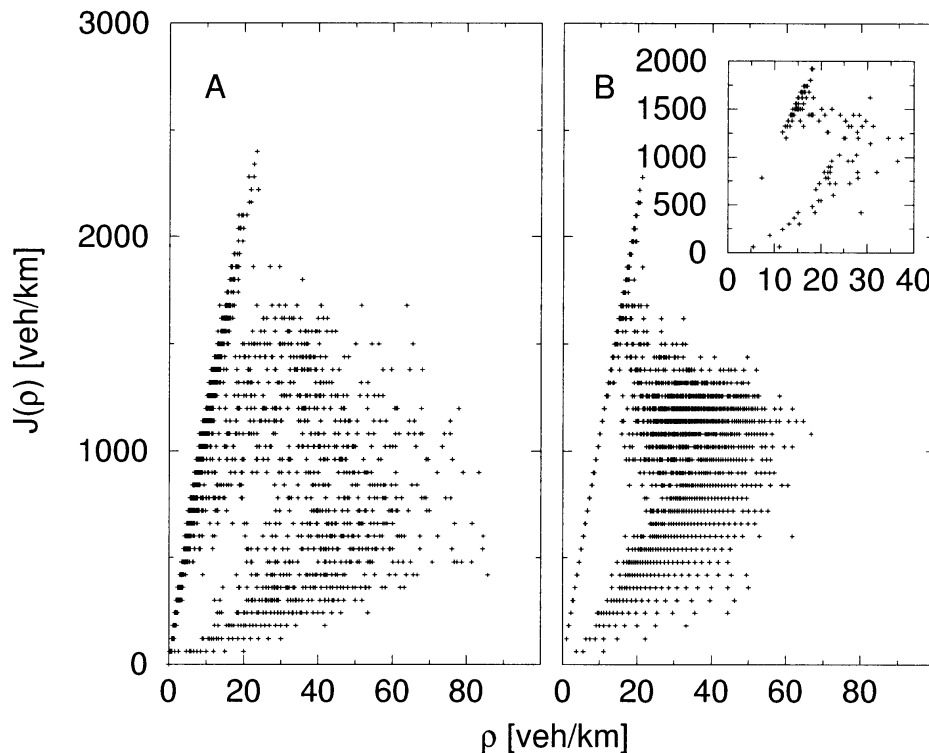


Abbildung 2: Vergleich des berechneten Fundamentaldiagramms (B) mit einem empirisch gemessenen Fundamentaldiagramm (A). Der Detailausschnitt in (B) zeigt den Ausfluss von einem Megastau.

Eine weitere Messgröße, die herangezogen werden kann, um die Computersimulation mit dem Experiment vergleichen zu können, ist die Geschwindigkeit, mit der sich ein Stau in entgegengesetzte Fahrtrichtung bewegt.¹ Die Computersimulation liefert dafür einen Wert von ungefähr 12.7 km/h. Diese Geschwindigkeit steht ebenfalls in sehr guter Übereinstimmung mit den empirischen Daten [11].

Um die Qualität der Spurwechselregeln testen zu können, kann die Fahrzeugdichte auf der linken Fahrspur mit der auf der rechten Fahrspur verglichen werden. Die empirischen Daten wurden von [12] entnommen. Da bei den empirischen Messungen der Anteil der Lastkraftwagen zirka 13% betrug, wurden auch bei den Simulationen, bei einem entsprechendem Anteil der Fahrzeuge, die Maximalgeschwindigkeit auf zirka 70 km/h reduziert.

Abbildung 3 zeigt, dass bei kleinen Verkehrsdichten mehr Fahrzeuge auf der rechten als auf der linken Spur fahren. Jedoch als Folge des Rechtsüberholverbots vermeiden bei steigender Dichte immer mehr Fahrer auf der rechten Spur zu fahren. Als Folge dessen, befinden sich bei Verkehrsdichten zwischen 10 und 20 Fahrzeuge pro km mehr Fahrzeuge auf der linken Spur als auf der rechten. Auch diese interessante Eigenheit von asymmetrischen Spurwechselregeln kann durch die Computersimulationen sehr gut wiedergegeben werden, wie aus Abbildung 3 zu erkennen ist.

¹ Während sich ein Stau am Ende auflöst, wird er gleichzeitig durch neu hinzukommende Fahrzeuge am Anfang genährt. Es folgt eine Bewegung des Stauzentrums in umgekehrte Fahrtrichtung.

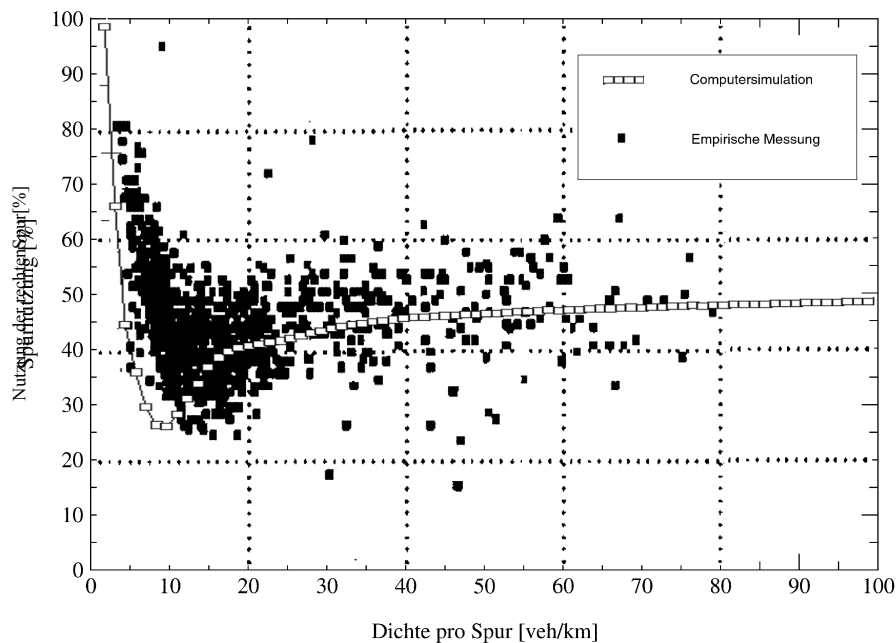


Abbildung 3: Vergleich der Fahrzeugdichte auf der linken und der rechten Fahrspur für verschiedene Verkehrsdichten. Ist die Spurnutzung 100% fahren alle Fahrzeuge auf der rechten Spur. Bei einer Spurnutzung von 50% befinden sich gleich viele Fahrzeuge auf der linken als auch auf der rechten Fahrspur.

3. Zusammenhang Verkehrsgeschwindigkeit und Verkehrsfluss

Das entwickelte Simulationsprogramm erlaubt die Untersuchung der zulässigen Maximalgeschwindigkeiten auf die Verkehrsdynamik. Im speziellen wird untersucht, wie sich eine Anhebung der maximal zulässigen Geschwindigkeit von 130 km/h auf 160 km/h auf den Verkehrsfluss und auf das Unfallgeschehen auf Autobahnen auswirken könnte. Experimentell liegen nur wenige Daten vor, die den Zusammenhang zwischen maximal erlaubter Verkehrsgeschwindigkeit und Verkehrsfluss untersuchen. Einige Daten dazu konnten im Highway-Capacity-Manual (HCM) [13] gefunden werden.

LOS	zul. Dichte [Pkw/km]	Freie Verkehrsflußgeschwindigkeit											
		113 km/h			105 km/h			97 km/h			89 km/h		
		mittl. Pkw- Geschw. [km/h]	höchste zul. Ver- kehrsst. [Pkw/h]	max. Sätti- gungs- grad	mittl. Pkw- Geschw. [km/h]	höchste zul. Ver- kehrsst. [Pkw/h]	max. Sätti- gungs- grad	mittl. Pkw- Geschw. [km/h]	höchste zul. Ver- kehrsst. [Pkw/h]	max. Sätti- gungs- grad	mittl. Pkw- Geschw. [km/h]	höchste zul. Ver- kehrsst. [Pkw/h]	max. Sätti- gungs- grad
A	≤ 6	113	700	0,33	105	640	0,30	97	575	0,27	89	540	0,25
B	≤ 10	113	1140	0,53	105	1050	0,49	97	950	0,44	89	875	0,41
C	≤ 15	≥ 108	1600	0,74	≥ 103	1550	0,72	97	1450	0,67	89	1325	0,62
D	≤ 20	≥ 95	1900	0,88	≥ 95	1900	0,88	≥ 93	1800	0,87	89	1750	0,81
E	≤ 25,5	≥ 85	2150	1,00	≥ 85	2150	1,00	≥ 85	2150	1,00	≥ 85	2150	1,00
F	> 25,5	< 85	–	–	< 85	–	–	< 85	–	–	–	–	–

Erläuterung: Kennwerte (Dichte, Verkehrsstärke usw.) fahrspurbezogen

Tabelle 1: Mittlere Geschwindigkeit und Verkehrsfluss als Funktion der Verkehrsdichte und der freien Geschwindigkeit [13].

Tabelle [1] fasst tabellarisch den Zusammenhang zwischen Verkehrsdichte und Verkehrsfluss bei verschiedenen freien Verkehrsflussgeschwindigkeiten zusammen. Wird angenommen, dass die freie Verkehrsflussgeschwindigkeit durch die gesetzliche Geschwindigkeitsbeschränkung bestimmt wird, kann aus der Tabelle [1] der Einfluss der maximal erlaubten Geschwindigkeit auf den Verkehrsfluss untersucht werden. Generell zeigt sich, dass eine kleine freie Geschwindigkeit auch zu einem kleinen Verkehrsfluss führt. Dies gilt für Verkehrsdichten bis zirka 25 Pkw/km. Ab 25 Pkw/km wird der Verkehrsfluss durch Stauereigenschaften bestimmt, die nicht von der maximal erlaubten Geschwindigkeit abhängen.

3.1. Homogene Geschwindigkeitsverteilung

In den folgenden Simulationen wurde der Verkehrsfluss auf einer zweispurigen Autobahn untersucht. Eine homogene Geschwindigkeitsverteilung wurde den Simulationen zugrunde gelegt, das heißt, dass alle Fahrzeuge die gleiche maximale Geschwindigkeit besitzen. Lastkraftfahrzeuge, die schon auf Grund gesetzlicher Regelungen nicht schneller als 100 km/h auf Autobahnen fahren dürfen, wurden in diesem Kapitel nicht berücksichtigt.

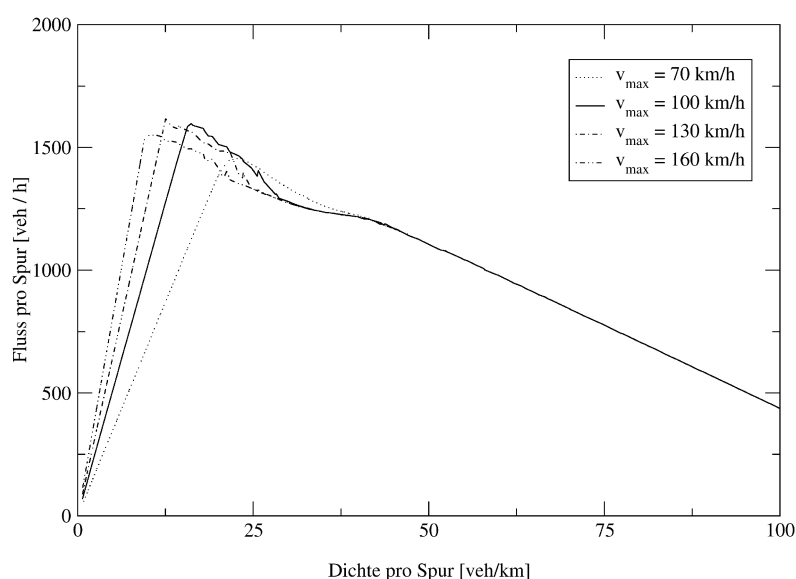


Abbildung 4: Fundamentaldiagramme für unterschiedliche Maximalgeschwindigkeiten. Alle Fahrzeuge besitzen die gleiche Maximalgeschwindigkeit.

In Abbildung 4 werden die Fundamentaldiagramme für unterschiedliche Maximalgeschwindigkeiten der Fahrzeuge verglichen. Die Fundamentaldiagramme wurden erhalten indem auf einer 150km langem ringförmigen Autobahn, die Anzahl der Fahrzeuge von Null bis zur Sättigung erhöht wurden. Die reale Fahrzeugdichte ergibt sich aus der Anzahl der Fahrzeuge dividiert durch die Autobahnlänge (150 km). Für jede Dichte wurde die Verkehrsdynamik 3 Stunden lang simuliert. Die letzten beiden Stunden wurden

herangezogen um den mittleren Verkehrsfluss zu bestimmen. Die Daten der ersten Stunde wurden verworfen, da das System zu Beginn nicht im Gleichgewicht ist. Es fällt der prinzipielle Unterschied zwischen den Fundamentaldiagrammen aus Abbildung 4 und dem aus Abbildung 2 auf. Der Grund liegt in den beiden unterschiedlichen Berechnungsarten der Verkehrsdichte.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Simulationen enthalten keine langsamen Fahrzeuge. Das heißt, wenn es die Verkehrssituation zulässt, fahren alle Fahrzeuge mit ihrer maximalen Geschwindigkeit von 70, 100, 130 beziehungsweise 160 km/h. Daraus ergibt sich, dass im freien Verkehr, also bei Verkehrsdichten bis zirka 10 Fahrzeuge pro km, der Verkehrsfluss linear mit steigender maximaler Geschwindigkeit zunimmt. Der maximale Durchfluss wird mit steigender maximaler Fahrgeschwindigkeit, bei kleineren Verkehrsdichten erreicht. Bei $v_{\max}=70$ km/h wird der maximale Durchfluss, $F_{\max}=1443$ veh/h, bei einer Verkehrsdichte von zirka 22 Fahrzeugen/km erreicht, wohingegen bei $v_{\max}=160$ km/h der maximale Durchfluss, $F_{\max}=1555$ veh/h, bei einer Dichte von 10 Fahrzeugen/km erreicht wird. Ab einer Verkehrsdichte von 40 Fahrzeugen/km hat die maximal erlaubte Geschwindigkeit keinerlei Einfluss auf den Verkehrsfluss. In diesem Bereich werden die einzelnen Fahrzeuggeschwindigkeiten rein durch das Verkehrsaufkommen bestimmt und nicht durch die gesetzliche Geschwindigkeitsbeschränkung.

Abbildung 5 zeigt die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit als Funktion der Verkehrsdichte für verschiedene Maximalgeschwindigkeiten. Im freien Verkehr ist die Durchschnittsgeschwindigkeit gleich der Maximalgeschwindigkeit. Ist der maximale Durchfluss erreicht, nimmt die Durchschnittsgeschwindigkeit stark ab.

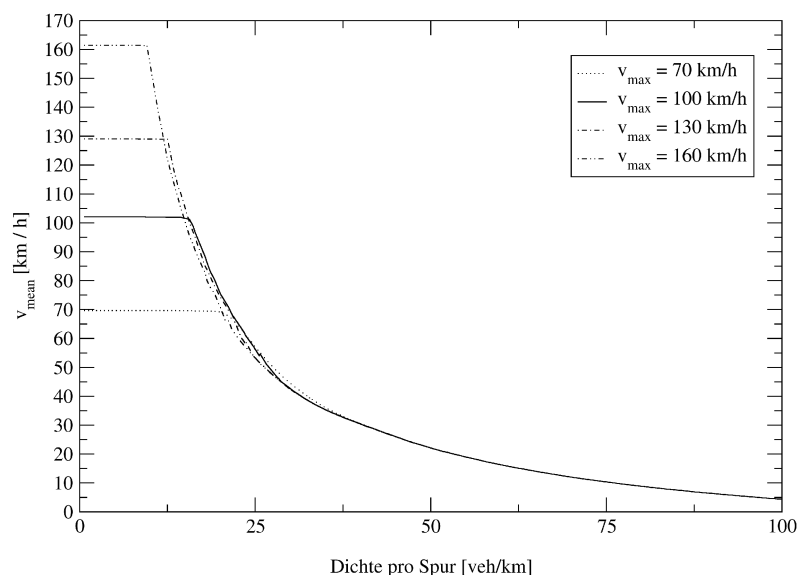


Abbildung 5: Durchschnittsgeschwindigkeiten als Funktion der Verkehrsdichte für die unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten aus Abbildung [4].

Bei einer maximalen Geschwindigkeit von 130 km/h wird der maximale Durchfluss bei einer Dichte von 18 veh/km erreicht. Bei dieser Dichte ist die Durchschnittsgeschwindigkeit zirka 110 km/h. Das soll aber nicht heißen, dass bei einer Senkung der Maximalgeschwindigkeit auf 110 km/h, der Durchfluss erhöht wird. Diese Schlussfolgerung wird beispielsweise in [14] gezogen, wo aus dem Fundamentaldiagramm (z.B. Abbildung 7) und dem dazugehörigem Geschwindigkeits-Dichte-Diagramm (z.B. Abbildung 5) geschlossen wird: „... Autobahnen erreichen ihre höchste Leistungsfähigkeit nicht bei Spitzengeschwindigkeiten, sondern bei 60 bis 80 Stundenkilometern...“. Daraus wird in [14] geschlossen, dass ein Tempolimit in diesem Bereich sich günstig auf den maximalen Verkehrsfluss auswirkt. Dass diese Schlussfolgerung zu kühn ist, kann sowohl an den empirischen Daten aus Tabelle [1] erkannt werden, als auch an den berechneten Fundamentaldiagrammen aus Abbildung [4].

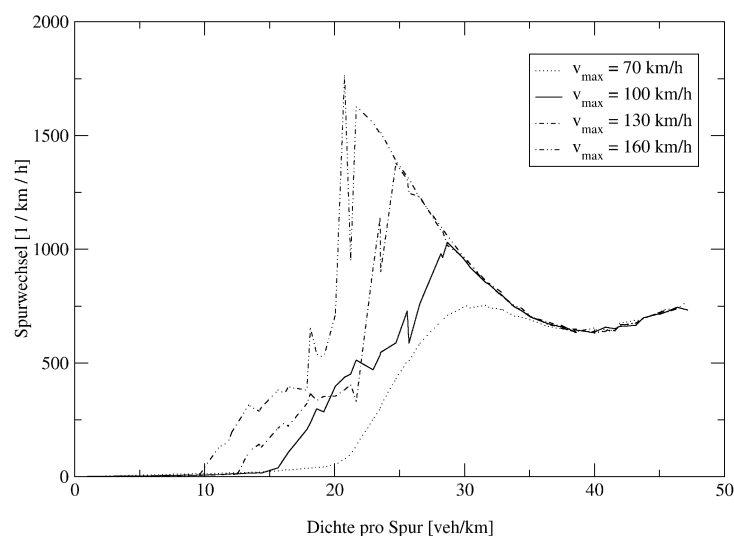


Abbildung 6: Spurwechsel pro Stunde und pro km als Funktion der Verkehrsdichte für unterschiedliche Maximalgeschwindigkeiten.

In Abbildung 6 wird die Anzahl der Spurwechselvorgänge pro Stunde und pro Kilometer für die vier unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten verglichen. Bei der Verkehrsdichte von 22 Fahrzeugen pro km wird bei einem Tempolimit von $v_{\max}=70$ nur 211 mal Spur gewechselt (gezählt werden sowohl Spurwechsel von der rechten auf die linke Spur also auch Wechsel von der linken auf die rechte Spur). Bei der gleichen Verkehrsdichte - jedoch bei $v_{\max}=160$ - wird zirka 1600 mal die Spur gewechselt. Das heißt, obwohl sich der Durchfluss nur knapp veroppelt, stieg die Anzahl der Spurwechsel auf das Achtfache an. Daraus ergibt sich zweifellos eine drastische Zunahme der Unfallwahrscheinlichkeit.

3.2. Inhomogene Geschwindigkeitsverteilung

Bei den Simulationen in diesem Kapitel wird bei 6 % der Fahrzeuge eine Maximalgeschwindigkeit von 100 km/h angenommen (z.B. Lastkraftwägen). Die anderen 94% fahren mit 130 km/h beziehungsweise mit 160 km/h. Zum Vergleich wird in Abbildung 7 auch das Fundamentaldiagramm dargestellt, bei dessen Berechnung bei allen Fahrzeugen eine maximal Geschwindigkeit von 100 km/h angenommen wurde.

Nur bei sehr geringen Verkehrsdichten, bis zirka 5 Fahrzeuge pro km und pro Spur, führt eine Erhöhung des Tempolimits von 130 km/h auf 160 km/h zu einer Zunahme des Verkehrsflusses. In diesem Bereich können sich die schnelleren Autos frei mit ihrer Maximalgeschwindigkeit bewegen. Daraus folgt, dass in diesem kleinen Bereich die Zunahme des Verkehrsflusses proportional zur Zunahme der maximal erlaubten Geschwindigkeit ist. Bei Verkehrsdichten größer als 5 Fahrzeuge pro km und kleiner als 14 Fahrzeuge/km wird die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit und somit der Verkehrsfluss durch die langsam, mit 100 km/h, fahrenden Fahrzeuge bestimmt. Dies zeigt, dass in diesem Bereich die drei Fundamentaldiagramme aus Abbildung 7 annähernd übereinander liegen. (Wird angenommen, dass 10% der Fahrzeuge mit maximal 100 km/h unterwegs sind, führt eine Erhöhung des Tempolimits von 130 km/h auf 160 km/h, nur bis zu Verkehrsdichten von 3 Fahrzeugen pro km zu einer Erhöhung des Verkehrsflusses)

Der größte Fluss wird im homogenen System erreicht, bei dem alle Autos mit maximal 100 km/h fahren. Die inhomogene Geschwindigkeitsverteilung der Fahrzeuge, in den beiden Systemen mit $v_{\max}=160$ und $v_{\max}=130$ führt dazu, dass Staus bereits bei einer Dichte von 14 Fahrzeugen pro km entstehen. Fahren alle Autos hingegen mit $v_{\max}=100$ entsteht Stau erst bei einer Dichte von 16 Fahrzeugen pro km. Ab einer Dichte von 30 Fahrzeugen pro km hat das Tempolimit keinen Einfluss auf den Verkehrsfluss.

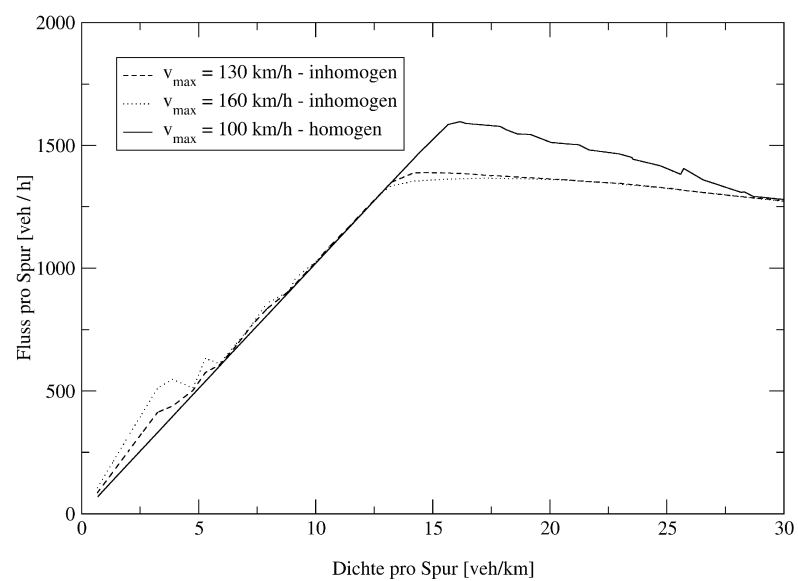
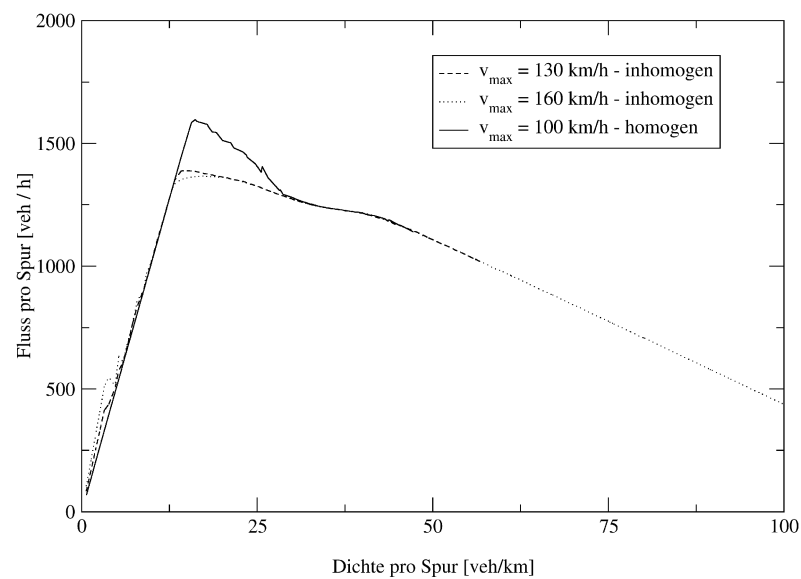


Abbildung 7: punktierte Linie und strichlierte Linie: Fundamentaldiagramme wenn bei 6% der Fahrzeuge eine Maximalgeschwindigkeit von 100 km/h angenommen wird. Bei den restlichen Fahrzeugen ist $v_{\max} = 130$ km/h (strichliert) beziehungsweise $v_{\max} = 160$ km/h (punktiert).

Die durchgezogene Linie zeigt zum Vergleich das Fundamentaldiagramm, wenn bei allen Fahrzeuge $v_{\max} = 160$ angenommen wird. Im unterem Diagramm ist das Fundamentaldiagramm vergrößert dargestellt.

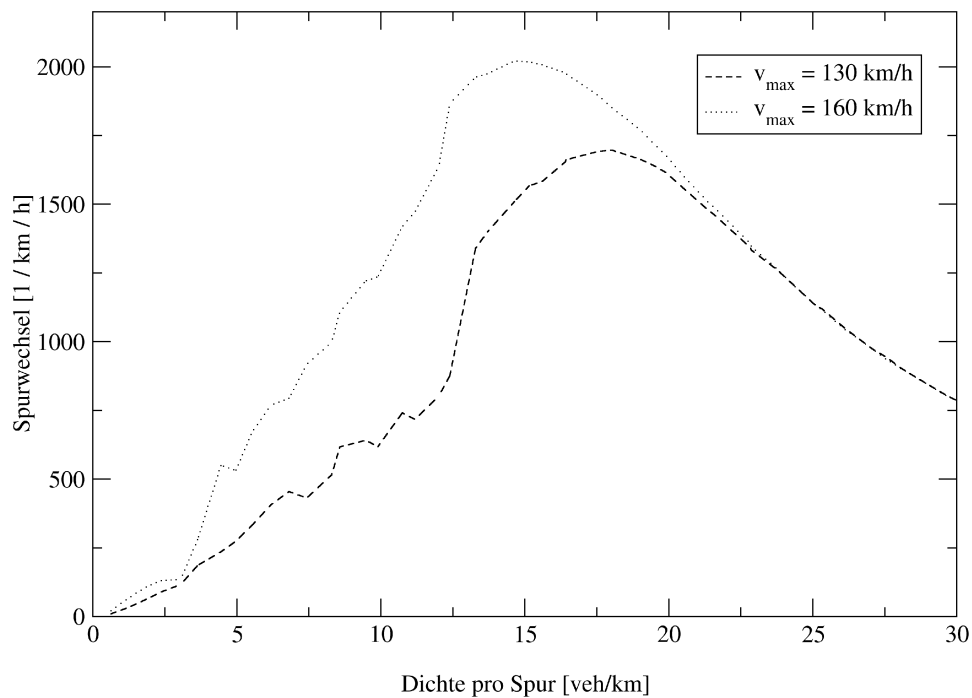


Abbildung 8: Spurwechselvorgänge pro Stunde und pro km als Funktion der Verkehrsdichte für unterschiedliche Maximalgeschwindigkeiten. 6 % der Fahrzeuge fahren mit maximal 100 km/h.

Äußerst interessant ist der Einfluss langsamer Fahrzeuge auf die Anzahl der Spurwechselvorgänge. Abbildung 8 vergleicht die Anzahl der Spurwechselvorgänge des Systems, bei dem 94% mit 130 km/h fahren und 6% mit 100 km/h, mit jenem System, bei dem dem 94% mit 160 km/h fahren und 6% mit 100 km/h. Obwohl bei Verkehrsdichten zwischen 5 und 14 Fahrzeugen pro km sich der Durchfluss beider Systeme nicht unterscheidet, erhöht sich die Anzahl der Spurwechselvorgänge um 100 % in diesem Bereich, wie aus Abbildung 9 zu entnehmen ist.

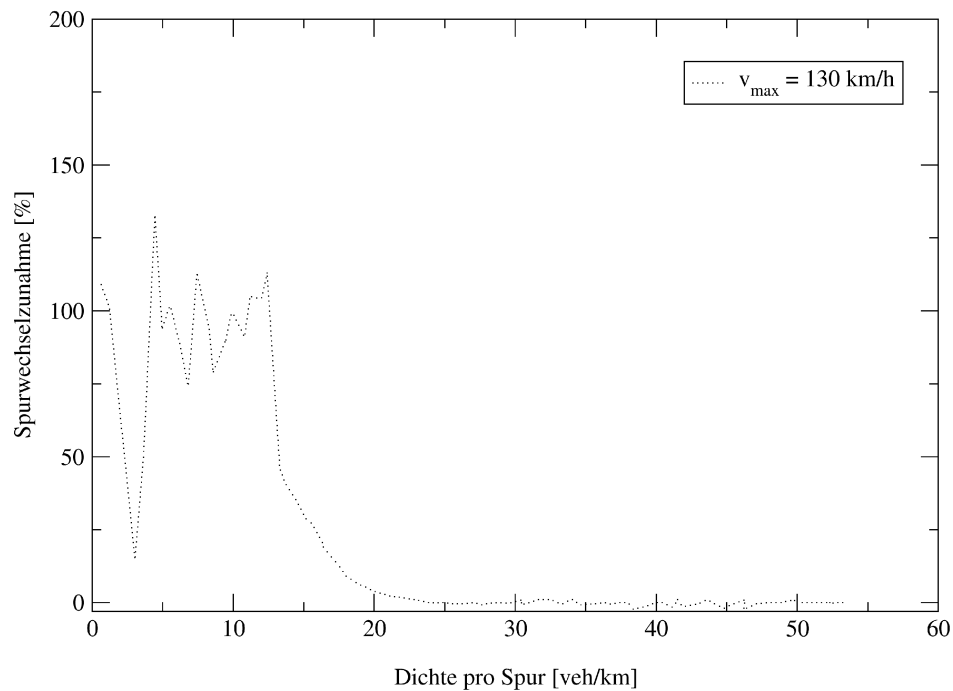


Abbildung 9: Zunahme der Spurwechselvorgänge pro Stunde und pro km in Prozent, wenn das Tempolimit von 130 km/h auf 160 km/h angehoben wird.. Die Zunahme ist für verschiedene Verkehrsdichten aufgetragen. Es wurde angenommen, dass 6 % der Fahrzeuge mit 100 km/h fahren.

4. Schlussfolgerungen

Computersimulationen auf der Basis des “Bremslichtmodells” beschreiben die Verkehrsdynamik äußerst detailliert. Das Modell hat gezeigt, dass eine Erhöhung des Tempolimits von 130 km/h auf 160 km/h nur bei sehr kleinen Verkehrsdichten (< 5 Fahrzeuge/km) zu einer Erhöhung des Verkehrsflusses führt. Bei höheren Verkehrsdichten bestimmen langsamen Fahrzeuge den Verkehrsfluss. Tempo 160 führt in diesem Bereich zu keiner Erhöhung des Verkehrsflusses jedoch zu einer Verdoppelung der Überholvorgänge und somit zu einer dementsprechend höheren Unfallwahrscheinlichkeit.

- [1] B. S. Kerner „Complexity of synchronized flow and related problems for basic assumptions of traffic flow theories,“ *Network and Spatial Economics 1*, S. 35, 2001
- [2] B. Kerner und H. Rehborn, „Experimental features and characteristics of traffic jams,“ *Phys. Rev. E*, vol 53, S. 1297, 1996.
- [3] F. Hall, B. Allen und M. Gunter, „Empirical analysis of freeway flow-density relationships,“ *Trans. Res. A*, vol 20, S 191, 1987.
- [4] B. Kerner, „Experimental features of self-organization of traffic flow,“ *Phys. Rev. Lett.*, Vol 81, S. 3797, 1998.
- [5] B. Kerner und H. Rehborn, „Experimental properties of complexity in traffic flow,“ *Phys. Rev. E*, vol 53. S. 4275, 1996.
- [6] M. J. Lighthill, G. B. Whitham, „On kinematic waves: A theory of traffic on long crowded roads,“ *Proceeding of the Royal Society*, 1955.
- [7] M. Cremer, J. Ludwig, „A fast simulation model for traffic flow on the basis of Boolean operations,“ *Mathematics and Computers in Simulations*,“ S. 197, 1986.
- [8] K. Nagel, M. Schreckenberg, *J. Physique*, vol. 2, S. 2221, 1992.
- [9] W. Knospe, L. Santen, A. Schadschneider, M. Schreckenberg, „A realistic two lane traffic model for highway traffic,“ *J. Phys. A*, vol. 35, S. 3369, 2002.
- [10] L. Neubert, L. Santen, A. Schadschneider und M. Schreckenberg, *Phys. Rev. E*, vol. 60, S. 6480, 1999.
- [11] B. S. Kerner und H. Rehborn, *Phys. Rev. E*, vol. 53, S. 1297, 1996.
- [12] R. Wiedmann, „Beiträge zur Theorie des Straßenverkehrs,“ Köln, 1995.
- [13] Highway Capacity Manual 1985, Transportation Research Board, Special Report 209, Washington D.C., 1985.
- [14] H. Monheim und Rita Monheim-Dandorfer „Straßen für alle,“ Hamburg, 1990.