

Risikoanalyse von Massenunfällen bei Nebel

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Mensch und Sicherheit Heft M 169

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page, partially overlapping a vertical white line that runs down the right edge of the cover.

Risikoanalyse von Massenunfällen bei Nebel

von

Günter Debus
Dieter Heller
Matthias Wille
Elisabeth Dütschke
Matthias Normann
Lars Placke

Institut für Psychologie der RWTH Aachen

mit einem Beitrag von

Henning Wallentowitz
Dirk Neunzig
Ahmed Benmimoun

Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Mensch und Sicherheit Heft M 169

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M- Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 82.108/1997:
Risikoanalyse von Massenerkrankungen bei Nebel

Projektbetreuung:

Claudia Evers

Herausgeber:

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion:

Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9315
ISBN 3-86509-303-5

Bergisch Gladbach, Juni 2005

Kurzfassung – Abstract

Risikoanalyse von Massenfällen bei Nebel

Ziel des Projektes war, die Bedeutung und Einordnung sozialer Risikofaktoren für das Entstehen von nebelbedingten Massenfällen und deren Konsequenzen für Präventionsmaßnahmen empirisch zu klären. Ausgangspunkt war die Hypothese, dass sich Fahrer im Nebel an der Fahrweise des vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrers (Sog-Druck-Hypothese) orientieren (SCHÖNBACH, 1996a, 1996b). Die Hypothese wurde in einen breiteren Erklärungsansatz für eine empirische Klärung integriert.

Nach einer Literaturanalyse wurden eine Serie von Simulatoruntersuchungen, eine Datenerhebung an der Autobahn und eine Verkehrssimulation durchgeführt. In den Untersuchungen am Fahrsimulator wurde das Fahrverhalten in Allein- und Fahrgelenken unter verschiedenen Witterungsbedingungen (Klarsicht, mäßiger und starker Nebel) bei verschiedenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen untersucht. Die an einer Autobahn-Messschleife erhobenen Fahrdaten wurden für einen Vergleich von Nebel- und Klarsichtbedingung organisiert und hinsichtlich Fahrgeschwindigkeit und -abstand analysiert. Schließlich wurden Fahrparameter aus den eigenen Untersuchungen in ein Simulationsmodell des Verkehrsflusses eingegeben und die Bedingungskonstellationen für das Auftreten von Unfällen ermittelt (Beitrag von WALLENTOWITZ, NEUNZIG und BENMIMOUN, Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen).

Die Ergebnisse stützen die „Sog-Druck“-Hypothese nach SCHÖNBACH nicht, sondern sprechen für die Annahme, dass das zu schnelle Fahren Folge genereller Anpassungen des Fahrverhaltens an Fahrbedingungen, wie Verkehr und Witterung, sind. Die Anpassungen sind hinsichtlich ihrer Sicherheitsmarge nur unzureichend erfahrbar. Sowohl die Höhe der Fahrgeschwindigkeit als auch das bei Nebel verstärkte Oszillieren von Geschwindigkeit und Abstand in der Kolonne werden nur unzulänglich erkannt und deshalb zu Risikofaktoren, wie in der Verkehrssimulation gezeigt.

In einem Expertengespräch wurden die Befunde hinsichtlich möglicher Schlussfolgerungen für Präventivmaßnahmen bewertet.

Aus den im Forschungsprojekt gewonnenen Befunden lassen sich Maßnahmenempfehlungen ableiten, die als Ausgangspunkt die Fahrweise unter eingeschränkten Sichtbedingungen und deren Erkennbarkeit (awareness) haben. Diese liegen im rechtlichen (StVO, StVZO), pädagogischen (z. B. Thematisierung der Fahrweise in der Kolonne), technischen (z. B. Fahrerassistenzsysteme) und straßenseitigen Bereich (z. B. Markierungen).

Der Originalbericht enthält als Anhänge die Ergebnisniederschrift eines Expertengesprächs (A), eine Präsentation der Ergebnisse des Institutes für Psychologie der RWTH Aachen im Rahmen dieses Expertengesprächs (B), eine Präsentation der Ergebnisse des Institutes für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen im Rahmen dieses Expertengesprächs (C) sowie zusätzliche Grafiken zu Kapitel 6 „Verkehrssimulation“ (D). Auf die Wiedergabe dieser Anhänge wurde in der vorliegenden Veröffentlichung verzichtet. Sie liegen bei der Bundesanstalt für Straßenwesen vor und sind dort einsehbar. Verweise auf die Anhänge wurden zur Information des Lesers im Berichtstext beibehalten.

Risk analysis of multiple crashes in fog

This project was intended to empirically determine and categorize the significance of social risk factors contributing to multiple crashes in fog, as well as consequential requirements for preventive measures. The initial hypothesis was that drivers in fog orient themselves toward the driving patterns of the preceding and succeeding automobiles (pull-push hypothesis, SCHÖNBACH, 1996a, 1996b). This hypothesis was included in a broader empirical examination.

A literature analysis was followed by a series of driving simulator tests, motorway data acquisition and a traffic simulation. The driving simulator tests focused on driving behaviour in lone as well as trailing vehicles under different weather conditions (clear visibility, moderate fog, heavy fog) at various speeds and accelerations. The motorway data measured by means of an induction loop were organized for purpose of comparisons between clear-visibility and fog conditions, and analyzed in terms of vehicle speed and spacing. Finally, the driving parameters ascertained during the

independent investigations were fed to a traffic flow simulation model for determining the sets of conditions under which accidents occur (report by WALLENTOWITZ, NEUNZIG and BENMIMOUN, Automotive Institute at the RWTH Aachen).

Instead of corroborating SCHÖNBACH's "pull-push" hypothesis, the obtained results suggest that overspeeding results from a generally inadequate adaptation of driving behaviour to driving conditions such as those related to traffic flow and weather. The safety tolerances of these adaptations cannot be determined to a sufficient degree of accuracy. Absolute travelling speed, as well as speed fluctuations and clearances between vehicles in convoys in fog are not identified properly, thus giving rise to risk factors as indicated by the traffic simulations.

A panel of experts discussed the findings to ascertain consequential requirements for preventive measures.

The findings obtained in the research project serve for an issue of recommendations for measures based on driving patterns in restricted visibility and related awareness levels. They fall into legal (road traffic and road worthiness regulations), educational (for example, convoy driving patterns), technical (for example, driver assistance systems) and road-specific categories (for example, markings).

Appendices to the original report include a record of the outcome of a discussion by a panel of experts (A), a presentation to this panel of results obtained by the Institute of Psychology at the RWTH Aachen (B), a presentation to this panel of results obtained by the Automotive Institute at the RWTH Aachen (C) as well as additional diagrams related to Chapter 6 "Traffic Simulation" (D). The appendices do not accompany this publication. They are available for viewing at the Federal Highway Research Institute. References to the appendices have been retained in the report for the reader's information.

Inhalt

1	Einführung	7	3.2.4	Replikationsstudie 3: „Bildschirm: Strukturierte Landschaft“	22
1.1	Einleitung	7	3.2.5	Replikationsstudie 4: „Fahrsimulator“	23
1.1.1	Massenunfälle bei Nebel und Präventionsmaßnahmen	7	3.2.6	Zusammenfassung	24
1.1.2	Hypothesenprüfungen in Feld- und Simulationsstudien	8	4	Modelluntersuchungen 1-3	24
1.1.3	Die Hypothese von SCHÖNBACH	8	4.1	Konzeption	24
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit	9	4.1.1	Theoretischer Ansatz	24
2	Literaturanalyse	10	4.1.2	Fragestellungen	25
2.1	Befunde zum Fahren im Nebel	10	4.1.3	Untersuchungsmethode	25
2.1.1	Daten zu Unfällen im Nebel	10	4.2	Modelluntersuchung 1	26
2.1.2	Fahrverhaltensparameter und Nebelunfälle	11	4.2.1	Versuchsplan	26
2.1.3	Wahrnehmungs- und Motivations- faktoren	14	4.2.2	Durchführung und Auswertung	27
2.2	Maßnahmen zur Vermeidung von Nebelunfällen	15	4.2.3	Ergebnisse	27
2.2.1	Maßnahmen zur Verbesserung der Sichtbedingungen	15	4.2.4	Diskussion	30
2.2.2	Maßnahmen in Form von Warnsystemen	16	4.3	Modelluntersuchung 2	31
2.2.3	Personenbezogene Maßnahmen	17	4.3.1	Versuchsplan	31
3	Vorstudien und Replikationen	17	4.3.2	Durchführung und Auswertung	32
3.1	Vorstudien	17	4.3.3	Ergebnisse	33
3.1.1	Durchführung	18	4.3.4	Diskussion	39
3.1.2	Studie 1: Abstandsschätzungen	18	4.4	Modelluntersuchung 3	40
3.1.3	Studie 2: Nebelfahrten mit freier Geschwindigkeitswahl	19	4.4.1	Versuchsplan	40
3.1.4	Studie 3: Sichteinschränkungen durch Nebel vs. Straßen- topografie	19	4.4.2	Durchführung und Auswertung	41
3.1.5	Studie 4: Sichteinschränkung durch Nebel und Abstand zum Vordermann	20	4.4.3	Ergebnisse	41
3.2	Replikationsstudien	21	4.4.4	Oszillationen im Fahrverhalten	48
3.2.1	Das Simulationsexperiment von SNOWDEN et al. (1998)	21	4.4.5	Diskussion	51
3.2.2	Replikationsstudie 1: „Bildschirm: Unstrukturierte Landschaft mit Seitenpfosten“	21	5	Analyse von Autobahndaten	51
3.2.3	Replikationsstudie 2: „Bildschirm: Unstrukturierte Landschaft ohne Seitenpfosten“	22	5.1	Reanalyse der Daten von RICHTER und SCHLAG	51
			5.1.1	Der Datensatz	52
			5.1.2	Ergebnisse	52
			5.1.3	Zusammenfassung	57
			5.2	Eigene Erhebung	58
			5.2.1	Umsetzung der Datenerhebung	58
			5.2.2	Nebelereignisse	59
			5.2.3	Diskussion	65
			6	Verkehrssimulation der gewonnenen Daten in PELOPS	66
			6.1	Einleitung und Aufgabenstellung	66
			6.2	Modell des Fahrerhaltens im Nebel	67
			6.2.1	Das Verkehrssimulationsprogramm PELOPS	67
			6.2.2	Nebelmodell	70
			6.2.3	Verkehrliche Wirkung des Fahrer- haltens bei verkürzter Sichtweite ...	74

6.2.4	Szenario Spurwegfall auf der Autobahn	77
6.3	Zusammenfassung	80
7	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	81
7.1	Stellungnahme zur SCHÖNBACH- Hypothese	81
7.1.1	Die Befundlage	81
7.1.2	Der Untersuchungsplan	83
7.1.3	Simulator- und Realdaten	84
7.1.4	Verkehrssimulation	86
7.2	Alternativ-Hypothesen	86
7.2.1	Fehleinschätzung der Fahr- geschwindigkeit bei Nebel	86
7.2.2	Generelle sichtbezogene Fehl- anpassung der Geschwindigkeit	87
7.2.3	Generelle kolonnenbezogene Fehlanspassung der Fahrge- schwindigkeit	88
7.2.4	Oszillation der Fahrgeschwindigkeit bei Sichtbehinderung	88
7.2.5	Fahrttypbezogenes Fehlverhalten	88
7.3	Bedingungsfaktoren von Massen- unfällen bei Nebel	88
7.3.1	Erklärungsmuster für das Fehlverhalten	88
7.3.2	Erklärungsansatz zur Entstehung von Massenunfällen im Nebel	90
7.3.3	Offene Fragen	90
7.4	Empfehlungen	90
7.4.1	Ausgangspunkt und Zielsetzung	90
7.4.2	Optionen und Empfehlungen für Maßnahmen	91
7.4.3	Maßnahmenbewertung	92
8	Literatur	93

1 Einführung

1.1 Einleitung

1.1.1 Massenunfälle bei Nebel und Präventionsmaßnahmen

Massenunfälle bei Nebel sind Ereignisse, die immer wieder auftreten. Die Überraschung durch eine plötzliche Nebelbank mag eine plausible Erklärung für das scheinbar Unvermeidbare sein. Doch weisen die Berichte auch Unfälle beim Fahren im Nebel aus. Hierfür werden überhöhte Geschwindigkeit und zu geringer Sicherheitsabstand beim Fahren im Nebel als wesentliche Ursache verantwortlich gemacht. Wird ein Unfall ausgelöst, kommt es – zumindest der öffentlichen Berichterstattung zufolge – zu Massenkarambolagen. Das Bilden von unangemessen dichten Fahrzeugkolonnen scheint dafür eine wesentliche Ausgangsbedingung zu sein.

Das Risiko eines Unfalls im Nebel sollte – und ist es wahrscheinlich auch – jedem Fahrer bewusst sein, ist ihm doch Absatz 1 des Paragraphen 3 der Straßenverkehrsordnung (StVO, § 3 (1)) bekannt: „Der Fahrzeugführer darf nur so schnell fahren, dass er sein Fahrzeug ständig beherrscht. Er hat die Geschwindigkeit insbesondere den Straßenverhältnissen sowie seinen persönlichen Fähigkeiten und den Eigenschaften von Fahrzeug und Ladung anzupassen. Beträgt die Sichtweite durch Nebel, Schneefall oder Regen weniger als 50 m, so darf er nicht schneller als 50 km fahren, wenn nicht eine geringere Geschwindigkeit geboten ist. Er darf nur so schnell fahren, dass er innerhalb der übersehbaren Strecke halten kann.“

Auch ist davon auszugehen, dass die meisten Fahrer die Aussagen des § 17 (3) StVO kennen: „Behindert Nebel, Schneefall oder starker Regen die Sicht erheblich, dann ist auch am Tag mit Abblendlicht zu fahren. Nur bei solcher Witterung dürfen Nebelscheinwerfer eingeschaltet werden [...]. Nebelschlussleuchten dürfen nur dann benutzt werden, wenn durch Nebel die Sichtweite weniger als 50 m beträgt.“

Neben der allgemeinen Kenntnis der StVO – zumindest in diesen Punkten – bringen die Fahrer weiteres Wissen aus der Fahrschule mit. Die Lehrmittel (z. B. Degener Lehrmittel GmbH Hannover) gehen explizit auf Unfallgefahr bei Nebel ein. Es wird hervorgehoben gewarnt: Unfälle enden oft tödlich. Verwiesen wird auf Nebelfallen: Flussläufe,

Seen, Mooregebiete, feuchte Wiesen und Talsenken. Konkrete Handlungsanweisungen werden gegeben:

- Abblendlicht frühzeitig einschalten (Nebelscheinwerfer/-schlussleuchten nach Vorschrift nutzen),
- Sicht nur 50 m = nicht schneller als 50 km/h (noch weniger Sicht = noch langsamer),
- mehr Abstand, nicht „anhängen“,
- besser nicht überholen, Verbote beachten,
- nicht auf der Mittellinie fahren.
- Bei Zwischenfällen keine Zeit verlieren:
 - wenn möglich, runter von der Fahrbahn,
 - raus aus dem Fahrzeug (Vorsicht!),
 - Schutz suchen, z. B. hinter die Leitplanke,
 - herankommenden Verkehr warnen.

Die über die Fahrschulen vermittelten Instruktionen werden durch Medien bei gegebenen Anlässen regelmäßig wiederholt. In solchen Warnungen werden über Handlungsanweisungen hinaus noch plausible Erklärungen für falsches Verhalten angeboten. So warnt der Automobil-Club Verkehr (ACV) in seiner Mitgliederzeitschrift vor der dunklen Jahreszeit und beschreibt, dass vor allem auf Autobahnen Nebelunfälle oft folgenschwer in einer Massenkarambolage enden. Fast immer seien zu hohes Tempo und zu geringer Abstand die Ursachen. Der Grund: Es entstehe ein „Mitzieheffekt“, weil sich die Autofahrer an den Rücklichtern des Vordermanns orientieren. Weil die Hintermänner meinen, genug zu sehen, beginnen sie zu drängeln. Die Vorherfahrenden werden schneller. Das Tempo wächst. Dabei wissen Nebelfahrer meist gar nicht, wie schnell sie tatsächlich sind. Mit der reduzierten Sicht auf die Umwelt gehe nicht nur die Orientierung verloren, der Fahrer verliere auch das Gefühl für die Geschwindigkeit des Wagens. Auch erscheint im dichten Nebel das vorausfahrende Auto weiter weg, als es wirklich ist.

Auch im Internet findet der Fahrer Beratung zum Verhalten bei Nebel, zum Beispiel (www.rheinische-post.de):

„Bei Nebel grundsätzlich Tempo drosseln und Abstand halten. Der Sicherheitsabstand zum Vordermann sollte im Normalfall der Sichtweite entsprechen. So kann man rechtzeitig reagieren, wenn ein

vorausfahrendes Fahrzeug plötzlich verzögert oder gar auf ein Hindernis auffährt. Außerdem besteht so die Möglichkeit, zu dichtes Auffahren Nachfolgender auszugleichen. Bei Nebel unbedingt das Abblendlicht einschalten, die Nebelschlussleuchte jedoch erst bei Sichtweiten unter 50 Metern. Sonst können nachfolgende Verkehrsteilnehmer geblendet werden.“

Meldungen über Massenunfälle bei Nebel werden in den Medien genutzt, um den Fahrer über angemessenes Fahren bei Nebel zu informieren. Dennoch scheint der Erfolg auszubleiben.

Wenn Kolonnenbildungen bei Nebel zu einem typischen Phänomen gehören, dann sollte man annehmen, dass einige Fahrer als Schrittmacher die Nebel-bezogenen Handlungsanweisungen umsetzen und so andere Fahrer zu ähnlichem Verhalten veranlassen und sich dadurch ein homogenes Kolonnenverhalten einstellt: Verlangsamung, größere Abstandswahrung, Einschalten des Abblendlichts und der Nebelschlussleuchte (unter 50 m Sichtweite). Für das Einschalten der Beleuchtung – als diskrete Handlung – scheint dies zu funktionieren. Problematisch scheint die angemessene Umsetzung für die Geschwindigkeits- und Abstandsregulation – als Handlungsprozess – zu sein.

Unterstellt wird bei den Handlungsanweisungen, dass der Fahrer kognitiv in der Lage ist, die Handlungsanweisungen so zu befolgen, wie sie konzipiert sind: die Sichtweite zutreffend bestimmen, die eigene Fahrgeschwindigkeit und den Abstand zum Vordermann zutreffend einschätzen, die Beschleunigung und Verzögerung im Kontext des vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeugs angemessen wahrnehmen. Auch wird unterstellt, dass der Fahrer rational die richtigen Zuschreibungen vornimmt, wer sich beim Fahren in der Kolonne wann wie warum verhält.

Welche wissenschaftlichen Belege gibt es für die vorgenannten Annahmen? Festzustellen ist, dass Erkenntnisse über Bedingungen und Wirkmechanismen des Fahrverhaltens im Nebel noch wenig systematisch und valide untersucht wurden. Das liegt in erster Linie an methodischen Schwächen der bislang angewandten Untersuchungsmethoden.

1.1.2 Hypothesenprüfungen in Feld- und Simulationsstudien

In Feldstudien ist man darauf angewiesen, auf zufällig auftretende Nebelereignisse zu warten, was zu relativ langen Untersuchungszeiträumen führt, in deren wenigen Nebelphasen selten ähnliche Sichtbedingungen, geschweige denn vergleichbare Randbedingungen, wie Verkehrsaufkommen, Tages- und Wochenzeit oder Lichtverhältnisse, herrschen. Daher sind die Ergebnisse solcher Studien auch untereinander kaum zu vergleichen. Über Messschleifen an Straßen registrierte Parameter des Fahrens sind punktuell gemessene Geschwindigkeiten und Abstände der Fahrzeuge. Kontinuierliche Erhebungen dieser Parameter für einzelne Fahrzeuge zur Beschreibung der Fahrpassungen im Nebel und im jeweiligen Verkehrsgeschehen liegen nicht vor. Einheitliche und allgemein gültige Schlussfolgerungen und Maßnahmeempfehlungen existieren somit kaum bzw. gehen mehr oder weniger von der allgemeinen Aussage aus: „Im Nebel wird zu schnell gefahren und der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug ist zu gering.“ Darüber hinausgehende Erklärungsmodelle für ein solches Fehlverhalten zahlreicher Autofahrer sind empirisch bisher kaum untersucht.

Die wenigen bisher existierenden Simulatorstudien zum Fahren im Nebel versuchen ansatzweise, das Fehlverhalten unter kontrollierten Bedingungen zu untersuchen. Die Simulationstechnik erreichte aber erst in den letzten Jahren ein Niveau, das eine realitätsgetreue Darstellung von Nebel und entsprechenden Fahrsituationen erlaubt. Die Zukunft der Forschung zum Fahren im Nebel liegt sicherlich in entsprechenden Simulationsparadigmen, in denen reales Fahrverhalten bei konstanten bzw. kontrollierten Nebel- und Sichtbedingungen und vergleichbaren Randbedingungen systematisch analysiert werden kann. Nur so können tief greifendere Erklärungsmodelle zum Verstehen des Fahr- und Fehlverhaltens im Nebel entwickelt und überprüft werden.

1.1.3 Die Hypothese von SCHÖNBACH

Unter der Perspektive kontrollierter experimenteller Untersuchungsmöglichkeiten mittels eines Fahr-simulators gewann ein Erklärungsansatz von SCHÖNBACH (1996a) Bedeutung. SCHÖNBACH nimmt – bestärkt durch Befragungsdaten – an, dass unangemessenes Fahren bei Nebel außer auf perzeptive Faktoren vor allem auf unbewusst ab-

laufende Prozesse, die die Interaktion eines Fahrers mit dem vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrer („Druck-Sog“-Hypothese) betreffen, zurückzuführen ist. Seiner Hypothese zufolge verhindern die weitgehend unbewusst ablaufenden Prozesse die angemessene Umsetzung der Handlungsanweisungen bei Nebel, nämlich hinreichend die Geschwindigkeit zu reduzieren und hinreichend Abstand zu halten. SCHÖNBACH schlug Untersuchungen zu „sozialen Risikofaktoren bei Nebelfahrten“ vor und machte „Vorschläge für sachdienliche Untersuchungen mit einem Fahrsimulator“ (SCHÖNBACH, 1996b, unveröffentlichtes Exposé). Die Anregung wurde von der Bundesanstalt für Straßenwesen aufgegriffen und ein Projekt zur „Risikoanalyse für Massenanfälle bei Nebel“ mit folgender Erläuterung ausgeschrieben: „Vor dem Hintergrund sozialpsychologischer Theorien (Theorie sozialer Vergleichsprozesse und Reaktanztheorie) sind universitäre Untersuchungen mit Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) zu einer in sich stimmigen Erklärung für das Zustandekommen des Massenanfalls bei Nebel und seiner Voraussetzungen gekommen, die sich – vereinfachend – aus der psychologischen Beeinflussung des Fahrers durch den vorausgehenden Verkehr (erlebter Sog) und nachfolgendem Verkehr (erlebter Druck) ergibt. Die Ergebnisse dieser Arbeit gilt es zu überprüfen und für die praktische Verkehrssicherheit nutzbar zu machen“ (Ausschreibung FE 82.108/1997).

1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Es ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, die SCHÖNBACH-Hypothese zugleich anhand von Fahrsimulator- und Realdaten zu überprüfen. In der Untersuchungsplanung folgen wir jedoch nicht ausschließlich den Vorschlägen von SCHÖNBACH (1996, unveröffentlichtes Exposé), sondern beziehen in unsere Untersuchungspläne weitere Erklärungsansätze ein. So werden nicht nur Vorhersagen aus sozialpsychologischen Konzepten, sondern auch allgemein psychologische Annahmen bei der Versuchsplanung berücksichtigt. Auch liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der Analyse der Bedingungsfaktoren von Nebelunfällen und nicht auf der Evaluation von Maßnahmen. Beide Ziele in einem Projekt umzusetzen, wie von SCHÖNBACH angedacht, würde das Projekt überfrachten. Die Zielsetzung ist jedoch, die SCHÖNBACH-Hypothese so zu prüfen, dass geeignete

Ansätze für präventive Maßnahmen aufgezeigt werden können. Grundlage dafür ist die hypothesengeleitete systematische Untersuchung des Fahrverhaltens und die modellbasierte Vorhersage von Unfällen auf der Basis des beobachteten Fahrverhaltens.

Die Arbeit gliedert sich in folgende Kapitel: Nach der Einleitung (Kapitel 1) werden zunächst die wichtigsten Befunde aus der Unfallstatistik referiert und anschließend in einem Literaturüberblick die in der Literatur zurzeit diskutierten Erkenntnisse und Modelle zum Fahren im Nebel dargestellt (Kapitel 2). Es werden die wichtigsten Erklärungsansätze besprochen und die bisher existierenden Maßnahmeempfehlungen kritisch gewürdigt. Dabei wird auf den sozial-psychologischen Ansatz der Druck- und Sog-Hypothese von SCHÖNBACH (1996a und 1996b) hier nur insoweit eingegangen, wie es für die Verhaltensvorhersage erforderlich ist. Da die sozial-kognitionspsychologischen Annahmen selbst nicht explizit geprüft werden, wird auf ihre Darstellung verzichtet.

Der empirische Teil beginnt mit dem Bericht über eine Reihe von Vorstudien (Kapitel 3), durch die eine empirische Vorklärung zur Gestaltung der Simulationsanordnung vorgenommen wird. Es schließt sich der erste zentrale empirische Teil zu den Fahrsimulationsuntersuchungen an (Kapitel 4), im dem drei Experimente berichtet werden. Darauf folgt der zweite zentrale empirische Teil (Kapitel 5) mit einer Reanalyse der umfangreichen Feldstudie zum Fahren im Nebel von RICHTER und SCHLAG (1997, siehe auch RICHTER, 2002) sowie der Analyse einer eigenen Datenerhebung an der Bundesautobahn.

An den empirischen Teil (Kapitel 3-5) schließt sich eine Verkehrssimulation (Kapitel 6) an, in der eine computergestützte Simulation des Verkehrsflusses mit Eingabe der im empirischen Teil gewonnenen Daten zur Vorhersage des Auftretens von Unfällen im Nebel durchgeführt wird.

Schließlich werden abschließend die Befunde bezüglich der Schlussfolgerungen und Maßnahmeempfehlungen diskutiert sowie das Ergebnis einer Expertenrunde zur Entwicklung von Präventionsmaßnahmen zusammengefasst (Kapitel 7).

2 Literaturanalyse

2.1 Befunde zum Fahren im Nebel

2.1.1 Daten zu Unfällen im Nebel

Unfälle, bei denen Nebel als Ursache genannt wird, stellen entgegen der öffentlichen Wahrnehmung zahlenmäßig nur einen sehr kleinen Anteil aller polizeilich erfassten Unfälle dar – der Prozentsatz von so genannten Nebelunfällen lag in den Jahren 1995 bis 2001 bei maximal 0,21 %. Die Bedeutung von Nebelunfällen in der Unfallprävention ergibt sich jedoch daraus, dass Unfälle mit der Ursache Nebel häufig besonders schwere Unfälle sind. Das zeigt sich daran, dass bei Nebelunfällen mehr Personen getötet oder schwer verletzt werden als bei Unfällen mit anderen Ursachen. Während beispielsweise Unfälle mit der Ursache Nebel im Jahr 1999 nur 0,13 % von allen Unfällen mit Personenschaden ausmachten, kamen 0,31 % aller Getöteten in einem Nebelunfall um (LERNER, 2002).

Die Statistik zeigt seit 1995 insgesamt einen Rückgang der absoluten Zahl von Nebelunfällen. Es zeigen sich aber starke Schwankungen, die auch auf der jeweiligen Nebelhäufigkeit in den einzelnen Jahren beruhen. Gleich bleibend ist jedoch die besondere Gefährlichkeit von Nebelunfällen, die sich in den vergleichsweise hohen Anteilen Getöteter und schwer Verletzter zeigt (LERNER, 2002).

Weiterhin unterscheiden sich Nebelunfälle von Unfällen anderer Art auch dahingehend, dass sie sich zu zwei Dritteln außerorts (ohne Autobahn) ereignen, nur zu 20 % innerorts und zu 15 % auf Autobahnen. Für alle anderen Unfallursachen liegen die

Anteile insgesamt bei knapp zwei Dritteln innerorts und einem knappen Drittel außerorts, 8 % auf Autobahnen (LERNER, 2002).

Trotz der starken öffentlichen Wahrnehmung von Massenunfällen ist der Anteil von Alleinunfällen – ohne weitere Unfallbeteiligte – mit 30 % bei Nebel deutlich höher gegenüber 20 % ohne Nebel. Wenn weitere Personen am Unfall beteiligt sind, dann ist die Anzahl unter Nebel etwas höher als unter Klarheit: Während es bei 16 % der Nebelunfälle mehr als zwei Beteiligte gibt, liegt der Prozentsatz bei anderen Unfällen nur bei 10 % (Angaben für die Jahre 1995-1999 nach LERNER, 2002; alle Tendenzen stimmen mit den Angaben des Statistischen Bundesamtes, 2003, zu den Jahren 2000 und 2001 überein).

Die zeitliche Verteilung von Nebelunfällen hängt direkt mit dem zeitlichen Auftreten von Nebel zusammen. Jahreszeitlich treten Nebelunfälle vorwiegend in den Herbst- und Wintermonaten auf. Die tageszeitliche Häufung liegt in den Morgenstunden zwischen 5 und 9 Uhr – im Zusammenhang mit typischem Frühnebel und Berufsverkehr.

Bei der Erfassung von Unfällen wird nach Art der ersten Kollision der Unfalltyp festgehalten. Bei Nebel ereignen sich typischerweise so genannte Fahrnfälle (rund 40 %), bei denen der Fahrer die Kontrolle über das Fahrzeug verliert ohne eine Beteiligung eines anderen Verkehrsteilnehmers. Typisch sind jedoch auch das Abkommen von der Fahrbahn im Nebel (ca. ein Drittel) oder Konflikte mit anderen Verkehrsteilnehmern im Längsverkehr (d. h. ein Fahrzeug, das sich in gleicher oder entgegengesetzter Richtung bewegt, Anteil ca. 30 %).

Jahr	Nebelunfälle mit Personenschaden	Verunglückte bei Nebelunfällen			Anteil in % an allen Unfällen mit			
		Getötete	schwer Verletzte	leicht Verletzte	Personenschaden	Getöteten	schwer Verletzten	leicht Verletzten
1995	648	44	307	695	0,17	0,47	0,25	0,18
1996	791	49	427	819	0,21	0,56	0,37	0,22
1997	704	35	375	766	0,18	0,41	0,32	0,20
1998	418	24	233	457	0,11	0,31	0,21	0,12
1999	500	24	255	500	0,13	0,31	0,23	0,12
2000	488	28	222	588	0,13	0,37	0,22	0,15
2001	464	30	209	518	0,12	0,43	0,22	0,13
2002	399							

Tab. 1: Nebelunfälle mit Personenschaden und Verunglückte bei Nebelunfällen sowie deren Anteil an allen Unfällen mit Personenschaden bzw. allen Verunglückten von 1995-2002 (LERNER, 2002)

Hauptverursacher von Nebelunfällen sind mit 80 % Pkw-Fahrer, was deutlich über dem entsprechenden Anteil bei Unfällen ohne Nebel liegt. Als typische Ursache des Unfalls auf Seiten des Fahrers liegt in der Regel unangepasstes Fahrverhalten vor: zu hohe Geschwindigkeiten (60 %), Überholen oder unangemessener Abstand (zusammen 10 %) (LERNER, 2002).

Das Problem überhöhter Geschwindigkeiten als nebeltypische Unfallursache ebenso wie die auffallend vielen Beteiligten zeigen sich auch in Statistiken der BAST in einer Strukturuntersuchung zum Unfallgeschehen auf Autobahnen (KÜHNEN, BRÜHNING, SCHEPERS, SCHMID, 1995). In Nebelunfälle auf Autobahnen waren in den Jahren 1991/92 (nur alte Bundesländer) mit 4,3 Beteiligten pro Unfall fast doppelt so viele Verkehrsteilnehmer verwickelt als im Durchschnitt aller Autobahnunfälle mit schwerem Personenschaden (2,2 Beteiligte). Auf unangepasste Geschwindigkeit gehen laut Strukturuntersuchung bei Nebel 74 % aller Unfälle, die von Pkw verursacht werden, zurück, insgesamt sind dies jedoch unter 50 % (Daten aus den alten Bundesländern, 1991/92).

Genauere Angaben zu der Entstehung von Nebelunfällen lassen sich aus den existierenden Statistiken nicht ableiten, da die Erfassung von Unfällen stark vereinfacht erfolgt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Brisanz von Nebelunfällen sich nicht aus ihrer absoluten Häufigkeit ergibt, sondern aus ihrer besonderen Unfallschwere entsteht. Der typische Nebelunfall ereignet sich in herbsthlichen oder winterlichen Morgenstunden, in der Regel außerorts oder auch auf der Autobahn. Auslöser ist eine zu hohe Geschwindigkeit oder ein zu geringer Abstand, sodass der Fahrer entweder von der Fahrbahn abkommt oder in Konflikt mit mehreren anderen Verkehrsteilnehmern gerät, die in gleicher oder in entgegengesetzter Richtung unterwegs sind.

Eine Forschung, die auf die Prävention von Nebelunfällen abzielt, hat sich somit damit zu beschäftigen, weshalb und inwiefern bei Nebel unangepasst gefahren wird und wie genau aus diesem Fahrverhalten heraus typischerweise ein Unfall entsteht.

2.1.2 Fahrverhaltensparameter und Nebelunfälle

Erklärungsmodelle und Untersuchungen zum Fahren im Nebel und zur Entstehung von Unfällen im

Nebel betrachten vornehmlich relativ einfach zugängliche Parameter des Fahrverhaltens, wie Geschwindigkeit, Abstand und Zeitlücke. Weniger zugängliche Parameter betreffen die Regulation des Fahrverhaltens, wie Beschleunigungs- und Verzögerungsparameter.

Geschwindigkeitsverhalten

Nicht angepasste Geschwindigkeit wird von vielen als die Hauptursache von Unfällen im Nebel angesehen. 60 % der Nebelunfälle von Pkw sollen darauf zurückzuführen sein (vgl. LERNER, 2002). Die Betrachtung der gefahrenen Geschwindigkeiten bei unterschiedlichen Sicht- und Fahrbedingungen ist daher von zentraler Bedeutung für die Konzeption eines geeigneten Untersuchungsparadigmas.

In seiner umfangreichen, oft zitierten Studie zum Verkehrsverhalten auf Autobahnen bei eingeschränkter Sicht kommt HAWKINS (1988) zu dem Schluss, dass die mittlere Geschwindigkeit die sich am deutlichsten ändernde Variable unter den verschiedenen Wetterbedingungen ist. Ein Geschwindigkeitsrückgang setzt nach HAWKINS bereits bei einer Sichtweite von ungefähr 300 m ein. Wenn die Sichtweite nur noch etwa 100 m beträgt, reduzieren sich die Geschwindigkeiten auf allen Fahrstreifen um 25 % bis 30 %. Auch die Standardabweichungen der gefahrenen Geschwindigkeiten reduzieren sich mit abnehmender Sichtweite. Dennoch bleiben die reduzierten Geschwindigkeiten deutlich über den entsprechenden empfohlenen Richtgeschwindigkeiten.

SHEPARD (1996) führte eine Metastudie zu reduzierter Sicht unter Nebelbedingungen auf Autobahnen durch. Eine signifikante Verringerung der Geschwindigkeit gibt es seiner Analyse nach erst, wenn die Sichtweite unter 150 m liegt.

In einer Feldstudie auf britischen Autobahnen untersuchte EDWARDS (1999) unterschiedliche Einflussfaktoren auf die Fahrgeschwindigkeit. Der Einfluss von Witterungsbedingungen auf die Fahrgeschwindigkeit lässt sich vor dem Hintergrund des Einflusses von Fahrzeugart, Tageszeit, Wochentag, Verkehrsaufkommen, Fahrspur und weiteren Faktoren darstellen. Die Geschwindigkeitsreduktion bei Nebel (über die Sichtweite gibt er keine Angaben) liegt in seiner Untersuchung bei 9,2 %. Bei Regen wird die Geschwindigkeit hingegen nur um 2,9 % verringert. Die Studie von EDWARDS macht deutlich, wie schwierig es in einer Feldstudie ist,

vergleichbare Untersuchungsbedingungen herzustellen bzw. zu finden, da die unterschiedlichen Einflussfaktoren der gefahrenen Geschwindigkeiten nicht unabhängig voneinander sind und kaum kontrolliert werden können.

HOGEMA und van der HORST (1995) führten eine Feldstudie mit Induktionsschleifenmessung auf niederländischen Autobahnen durch. Sie fanden, dass die Geschwindigkeitsreduktion im Nebel auf der linken Fahrspur weniger stark ausgeprägt war als auf der rechten. Dabei wurde nicht zwischen Einzel- und Kolonnenfahrern unterschieden. Beim Vergleich der Ergebnisse der Feldstudie mit einer Simulatorstudie zeigten sich im hohen und niedrigen Geschwindigkeitsbereich keine Unterschiede zwischen den realen und im Simulator gefahrenen Geschwindigkeiten. Im mittleren Geschwindigkeitsbereich waren die im Simulator gefahrenen Geschwindigkeiten geringer als in der Realität.

Auch Fahrermerkmale, wie z. B. Persönlichkeitseigenschaften, werden in Zusammenhang mit Fahrgeschwindigkeit bei Nebel gebracht. SCHLAG (1988) betont, dass 47 % der Fahranfänger zu riskantem Fahren, also auch zu überhöhten Geschwindigkeiten, in kritischen Situationen wie Nebelfahrten neigen. Bei männlichen Fahrern ist die Tendenz noch einmal wesentlich stärker.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Geschwindigkeiten, die im Nebel gefahren werden, nicht nur von der Sichtweite abhängen, sondern auch von den unterschiedlichen Rahmenbedingungen der Fahrstrecke und der Fahrsituation sowie von individuellen Faktoren. Die Geschwindigkeit wird im Nebel zwar reduziert, jedoch nicht so weit, wie es die Sichtbedingungen eigentlich erfordern.

Abstandsverhalten

Neben den überhöhten Geschwindigkeiten wird in der Literatur immer wieder das unangemessene Abstandsverhalten als Ursache für Nebelunfälle thematisiert. Ein zu geringer Sicherheitsabstand gilt mit 31 % als zweithäufigste Unfallursache.

HAWKINS (1988) erfasste in seiner Studie neben den Geschwindigkeiten auch andere Verkehrsparameter, wie Abstände, Fahrstreifenverteilungen und Pulkbildungen. Die Daten erhielt er über Induktionsschleifen in der Fahrbahn und Zeitmessungen. Die Sicht wurde durch Beobachtungen und Nebeldetektoren ermittelt. Geschwindigkeiten und Fahr-

zeuglängen wurden durch doppelten Infrarotstrahl gemessen.

Die Pulkbildung ist nach HAWKINS bei starkem Nebel auf allen drei Fahrstreifen stärker als bei klarer Sicht. Dabei nimmt zwar die Anzahl der Pulks ab, die jeweilige Größe der Pulks (Anzahl der Fahrzeuge) wächst jedoch deutlich. Auch treten im Nebel weniger Fahrstreifenwechsel auf. Als Folge der Pulkbildung nehmen die gefahrenen Abstände unter 60 Metern im Nebel zu. Die Fahrer hängen sich mit relativ geringem Abstand an den Vordermann und achten darauf, dass der Sichtkontakt erhalten bleibt. Zeitlücken von unter einer Sekunde – die den tatsächlichen Gefahrenbereich ausmachen – gehen aber auf dem rechten und dem mittleren Fahrstreifen zurück und nehmen nur auf dem linken Fahrstreifen leicht zu.

In ihrer Feldstudie kamen HOGEMA und van der HORST (1995) zu dem Ergebnis, dass sich der Abstand zum Vordermann bei Nebel besonders auf der rechten Spur verringerte. Da sie weder zwischen Lkw und Pkw unterschieden noch unterschiedliche Verkehrsbelastungen berücksichtigten, bleibt die Aussagekraft dieses Ergebnisses allerdings unklar.

Die Ergebnisse zum Abstandsverhalten beim Fahren im Nebel sind noch nicht sehr aussagekräftig und eignen sich nicht zu verallgemeinerten Aussagen. Systematische Untersuchungen über Ausmaß und Bedingungen für ein verändertes Abstandsverhalten existieren noch nicht.

Zeitlücke

Zeitbasierte Maße spielen für Verhaltensweisen zur Fahrzeugkontrolle eine große Rolle. Die Zeitlücke ist dabei die Zeit, die ein Fahrer benötigt, um den Ort des vorausfahrenden Fahrzeugs mit der aktuellen Geschwindigkeit zu erreichen. Berücksichtigt man darüber hinaus auch die Differenzgeschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge, kann man die Zeit bis zur Kollision (TTC = Time to collision) bei gleich bleibenden Geschwindigkeiten berechnen.

In einer Simulatorstudie variierten HOGEMA, van der HORST, van NIFTERICK und STOOP (1996) die Sichtweiten, die Tageszeit und die Geschwindigkeitsvorgaben. Sie verwendeten neben einer „Free-Driving“- (Einzelfahrt) auch eine „Car-Following“-Bedingung (Kolonnenfahrt), in der sie die „Time to collision“ (TTC) zum Vordermann analysierten. Die TTCs stiegen bei Nebel leicht an. Insgesamt wur-

den TTCs unter 5 Sekunden jedoch selten beobachtet. In keiner der beiden Studien von HOGEMA et al. (1995, 1996) zeigten die TTCs zum Vordermann einen Effekt der Sichtweite. Die reduzierten Abstände bei Nebel sind also alleine durch die verringerten Geschwindigkeiten zu begründen.

Van der HULST, MEIJMAN und ROTHENGATTER (1999) betonen die Bedeutung der Zeitlücke für ein sicheres und vorausschauendes Fahren. In einem Simulatorexperiment zeigten sie, dass Fahrer, die ein kritisches Ereignis, z. B. das Abbremsen des vorausfahrenden Fahrzeugs, erwarteten und vorhersehen konnten, eine größere Zeitlücke zu diesem Fahrzeug einhielten als Fahrer, für die dieses Ereignis unerwartet und plötzlich eintrat. Sie betonen, dass gerade bei Fahrbedingungen wie Nebel und Dunkelheit die Vorhersehbarkeit stark herabgesetzt ist. Berücksichtigen Fahrer dieses bei der Wahl ihrer Zeitlücke zum Vordermann nicht, so fahren sie mit geringeren Zeitlücken, als es die Sichtbedingungen zulassen.

GODTHELP et al. (1986) stellen fest, dass Autofahrer in der Regel eine sehr gute Fähigkeit besitzen, die Zeitlücke abzuschätzen, und sie tun es ihrer Meinung nach beim Fahren auf der Autobahn auch ständig und regelmäßig. SUMMALA (1998) unterstreicht dies mit der Feststellung, dass die Zeitlücken häufig mit Reaktionszeiten korrelieren. Je besser ein Fahrer also auf ein Ereignis reagieren kann, desto geringer ist die Zeitlücke, die er zum Vordermann wählt.

Bei der Betrachtung des Fahrverhaltens im Nebel ist das Maß der Zeitlücke der Time to collision vorzuziehen, da Letzteres den Aspekt der eingeschränkten Vorausschau, der im Nebel eine entscheidende Rolle spielt, nicht angemessen berücksichtigt. Darüber hinaus nutzen Fahrer nach GODTHELP (1986) auch eher die Zeitlücke und weniger die TTC als Kontrollvariable beim Fahren.

Fahrverhaltensparameter als Regelgrößen

Welche Verhaltensweisen beim Steuern eines Kraftfahrzeugs auftreten, ist Gegenstand von Fahrermodellen in Verkehrssimulationen. Bei der Gestaltung und Entwicklung von Verkehrssimulationen spielen die Auswahl und Beschreibung eines geeigneten Fahrermodells eine wichtige Rolle. In diesen Modellen des Fahrers treten Geschwindigkeitsverhalten und Abstand bzw. Zeitlücke zum Vordermann als Regelgrößen auf, die sich in Interaktion mit dem direkten Verkehrsumfeld verändern.

DIEKAMP (1995) beschreibt die Parameter in diesen so genannten psychophysischen Fahrzeug-Folge-Modellen. Der Fahrer ist in diesen Modellen determiniert durch seine Wunschgeschwindigkeit, die er unbeeinflusst (also als Einzelfahrer) auf freier Strecke fahren möchte, sein individuelles Sicherheitsbedürfnis, das sich im Abstandsverhalten zeigt, seine Kontrolle über das eigene Fahrzeug und seinen maximalen Beschleunigungswunsch, also auch die Bereitschaft, Geschwindigkeitsänderungen vorzunehmen.

Im Fahrzeug-Folge Modell von WIEDEMANN (1974) wird der Fahrtverlauf als eine Kombination von vier unterschiedlichen Fahr-situationen beschrieben, in denen der Fahrer sich signifikant unterschiedlich verhält. Beim freien Fahren (1) fährt der Fahrer möglichst mit seiner Wunschgeschwindigkeit. Beschleunigungen treten in diesem Fall nur in geringem Ausmaß als Folge zufälliger Fluktuationen oder nach Behinderungen zum Wiedererreichen der Wunschgeschwindigkeit auf. Beim Annähern (2) an ein vorausfahrendes Fahrzeug passt sich der Fahrer durch Verzögerung und unter Berücksichtigung seines Sicherheitsbedürfnisses bezüglich Abstand und Zeitlücke dem Geschwindigkeitsniveau des Vorausfahrenden an. Beim Kolonnenfahren (3) kann es schnell zu Abstandsschwingungen kommen, die abhängig von der Differenzgeschwindigkeit der beiden Fahrzeuge und deren Abstand sind. Aber auch Wahrnehmungsschwellen spielen hier eine Rolle. Bei Erreichen eines für den Fahrer charakteristischen unteren Folgeabstands verlangsamt er etwas und folgt dem vorausfahrenden Fahrzeug mit variablem Abstand. Erhöht sich der Abstand auf einen charakteristischen oberen Folgeabstand, versucht der Fahrer, durch kurzzeitiges Beschleunigen wieder den unteren Folgeabstand zu erreichen. Innerhalb dieses Folgebereichs sind Beschleunigungen und Verzögerungen zumeist unbewusst. Verlangt die Verkehrssituation ein gezieltes Bremsen (4), spielen der Anhalteabstand und die Time to collision eine große Rolle für das Fahrverhalten.

In Verkehrssimulationsstudien zeigt sich, dass größer werdende Differenzgeschwindigkeiten und der daraus resultierende höhere Regulationsaufwand beim Annähern und Folgen schnell zu Störungen im Verkehrsfluss, bis hin zum Stau, und zu einer entsprechenden Erhöhung des Unfallrisikos führen. Inwieweit auch Einschränkungen der Sichtbedingungen, zum Beispiel durch Nebel, diesen Regulationsmechanismus beeinflussen, ist

noch nicht untersucht. Denkbar ist, dass sich die Differenzgeschwindigkeiten und Abstandsschwüngen beim Fahren im Nebel durch individuell breiter streuende Wunschgeschwindigkeiten und Sicherheitsabstände erhöhen.

2.1.3 Wahrnehmungs- und Motivationsfaktoren

Wahrnehmungsleistungen

KIEGELAND (1996) betont in seiner Abhandlung zu „Fahrzeugführung im Nebel“, dass der optische Kanal, als wichtigste Informationsquelle für Kraftfahrer, bei Nebel, Schnee und Regen stark beeinträchtigt ist. Dies betrifft die Erkennbarkeit von Objekten, die Entfernungsschätzungen und die Geschwindigkeitswahrnehmung. Er hebt hervor, dass der Tachometer als Informationsquelle gerade im Nebel unbeliebt ist, da er den Blick zu lange von der Fahrbahn lenkt.

Nach einem Befund von ROSS (1967) werden Objekte unbekannter Größe bei natürlichem Nebel von 30-130 m Sicht als doppelt so weit entfernt wahrgenommen als bei einwandfreier Sicht. CAVALLO, COLOMB und DORÉ (2000) replizierten dieses Ergebnis in einem Laborexperiment mit Fahrsimulator und künstlichem Nebel für Objekte bekannter Größe (3 Arten von Rückleuchten). Sie kamen zu dem Ergebnis, dass Entfernungen bei Nebel um 60 % größer eingeschätzt werden. Darüber hinaus fanden sie eine Wechselwirkung zwischen der Art der Rückleuchten und den Sichtbedingungen. Die Fehleinschätzung der Entfernung war bei kleinem horizontalem Abstand der Leuchten größer als bei größerem Abstand der Leuchten. Sie empfehlen demnach, dass der Abstand zwischen den Rückleuchten möglichst groß sein sollte, um Fehleinschätzungen des Abstands zum Vordermann möglichst gering zu halten. Auch RICHTER und SCHLAG (1998) betonen, dass bei Nebel die Entfernungen deutlich überschätzt werden und auch die Streuungen der Entfernungsschätzungen deutlich ansteigen.

PAUMIER, PAULMIER, DUBUISSON, DORÉ und COLOMB (1991) liefern eine psychophysische Begründung für den Effekt der schlechteren Entfernungsschätzung bei Nebel. Sie haben in Laborexperimenten eine quantitative Abschätzung des Kontrastverlustes von Verkehrszeichen vorgenommen. Bei dichtem nächtlichem Nebel war der Schwellenkontrast am geringsten. SCHMEDDING, SAAT und SCHAL (1994) bestimmten die Erkennbarkeitsweiten von unbeleuchteten bzw. verschiedenartig beleuchteten Pkw bei homogener Nebel-

verteilung. Sie fanden einen Zusammenhang zwischen der Erkennbarkeitsentfernung und dem Kontrast. Je höher der Kontrast, desto höher liegt die Erkennbarkeitsentfernung.

CAVALLO, LAYA und LAURENT (1986) ließen ihre Versuchspersonen in einem Laborexperiment die Zeit bis zur Kollision mit einem vorausfahrenden Fahrzeug schätzen und beschränkten dabei systematisch das zur Verfügung stehende visuelle Feld. Mit zunehmender Einschränkung des visuellen Feldes kam es zu Unterschätzungen der Zeit bis zur Kollision. Da auch im Nebel das visuelle Feld peripher eingeschränkt ist, lassen sich die Ergebnisse auf Fahrten im Nebel übertragen. Denn Fahren im Nebel stellt eine Belastungssituation dar, die zu einer Einengung des funktionalen visuellen Feldes führen kann. Dadurch werden periphere Bewegungsreize weniger wahrgenommen, Tachoblicke bleiben aus, und die Geschwindigkeitskontrolle wird reduziert.

Nach einer Hypothese von SNOWDEN, STIMPSON und RUDDLE (1998) wissen Autofahrer, dass bei Nebel die Geschwindigkeit reduziert werden muss. Der Grund für dennoch überhöhte Geschwindigkeiten im Nebel liegt nicht im bewussten Verstoß gegen diese Vorschrift, sondern darin, dass die Wahrnehmung der Geschwindigkeit verzerrt ist. Sie wird bei zunehmendem Nebel unterschätzt, weil sich der Kontrast des Umgebungsbildes verringert und somit die wahrgenommene Fahrgeschwindigkeit abnimmt. Die Fahrer haben also den Eindruck, sie fahren angemessen, obwohl sie objektiv zu schnell fahren.

In einem Experiment mit einer einfachen Fahrsimulation am Bildschirm hat SNOWDEN seine Versuchspersonen gebeten, bestimmte vorgegebene Geschwindigkeiten zu fahren und einzuhalten. Es zeigte sich, dass umso schneller gefahren wird, je nebliger es ist. Der Tachoblick wird zunehmend wegen der nicht gewollten Abwendung des Blickes von der Fahrbahn vermieden. Bei Nebelszenarien werden Geschwindigkeiten als langsamer wahrgenommen als bei Klarsichtszzenarien. Die Ergebnisse der experimentellen Simulationsstudie von SNOWDEN et al. (1998) deuten darauf hin, dass Geschwindigkeiten bei Nebel umso stärker unterschätzt werden, je schlechter die Sichtbedingungen sind. Hierbei waren die Versuchspersonen nicht in der Lage, mittels eines Fahrsimulators eine unter Klarsicht geübte Geschwindigkeit bei Nebel korrekt erneut einzustellen.

Dieser Befund ist sowohl aus ergonomischer Sicht interessant, da sich auf dessen Grundlage potenzielle, technische Einflussmaßnahmen gegen ein Fehlverhalten konzipieren ließen, als auch aus methodischer Sicht, da mittels eines solchen Standardparadigmas weitere Fragestellungen der Fahrzeugführung im Nebel untersucht werden könnten.

Die Veränderungen von Wahrnehmungsbedingungen beim Fahren im Nebel dürfen bei der Entwicklung von Erklärungsansätzen für Fehlverhalten im Nebel nicht unberücksichtigt bleiben und spielen eine große Rolle bei der Konzeption eines geeigneten Simulationsparadigmas.

Motivationsfaktoren

Nach KIEGELAND (1996) liegt das subjektive Sicherheitsgefühl im Nebel höher als die objektiv gegebene Sicherheit, was zu kollektivem Fehlverhalten auf den Straßen führe. So werden die Fahrer bei einer geringen Sichtweite und einem Vorderfahrzeug außerhalb dieser Sichtweite ihre Fahrweise eher so wählen, als sei kein Fahrzeug vor ihnen vorhanden, und sich nicht auf möglicherweise vorhandene Vorderfahrzeuge einstellen.

HAWKINS kommt zu dem Schluss, dass die Sichtverhältnisse von den Fahrern unwissentlich missinterpretiert werden, sodass ihnen die Gefährlichkeit ihres Verhaltens nicht bewusst wird. Die große Variationsbreite des Verhaltens von Kraftfahrern im Nebel zeigt, dass die normalen Verhaltensgewohnheiten nicht mit den Anforderungen im dichten Nebel in Einklang stehen. Das irrationale Verhalten der Kraftfahrer bei eingeschränkter Sicht ist nicht vermeidbar, solange den Fahrern die Gefährlichkeit ihres Verhaltens nicht klar ist. Nach HAWKINS ist also fehlendes Bewusstsein über die im Nebel wirkenden Mechanismen ein Hauptgrund für das Fehlverhalten im Nebel.

Das bisher umfassendste auf kognitive Urteilsprozesse bezogene Erklärungsmodell für das Entstehen von Unfällen im Nebel liefert SCHÖNBACH (1996). Grundlagen seiner theoretischen Konzeption sind die Theorie der sozialen Vergleichsprozesse von FESTINGER (1957) und die Theorie der psychologischen Reaktanz von BREHM (1966). Komplexe kognitive Prozesse determinieren nach SCHÖNBACH das Fahrverhalten, welches als Zusammenspiel mehrerer intrapersonaler Faktoren mit der Verkehrssituation angesehen werden kann. Das Fahr-

verhalten des Einzelnen ist dabei in die Kommunikationsprozesse integriert und wirkt auf diese ein.

Nach SCHÖNBACH (1996a und 1996b) entstehen Massenunfälle im Nebel aufgrund folgender sozialpsychologischer Kausalität: Fahrer fühlen sich einerseits im Nebel durch die Scheinwerfer eines nachfolgenden Fahrzeugs bedrängt und andererseits durch das Sehen der Rücklichter des Vordermanns beruhigt. Dies führt zu Geschwindigkeitserhöhungen, einerseits um den Sicherheitsabstand zum Hintermann zu wahren und andererseits um Anschluss an den Vordermann zu halten.

Die Kolonnenfahrt ist bei SCHÖNBACH also eine wichtige Bedingung für überhöhte Geschwindigkeiten. SCHÖNBACH schließt nicht explizit aus, dass auch Einzelfahrer überhöhte Geschwindigkeiten zeigen können, wofür perzeptive Faktoren maßgeblich sein dürften. Das Fahrverhalten der Einzelfahrer im Nebel wird im sozialpsychologischen Ansatz (Druck-Sog-Hypothese) nicht thematisiert. Den Einzelfahrer bei der Überprüfung des sozialpsychologischen Ansatzes auszuklammern würde jedoch eine aus unserer Sicht unzulässige Einengung der Untersuchungskonzeption darstellen. Vergleichend mit Fahrern in der Kolonne muss geprüft werden, wieso auch Einzelfahrer im Nebel oftmals mit unangepasster Geschwindigkeit fahren. Der Erklärungsansatz von SCHÖNBACH, ergänzt um wahrnehmungspsychologische Aspekte, ist deshalb der Ausgangspunkt für die Konzeption unserer Simulatorexperimente (siehe Kapitel 3).

2.2 Maßnahmen zur Vermeidung von Nebelunfällen

Trotz der zurzeit noch relativ geringen Erkenntnislage über Wirkmechanismen und Bedingungen für Fahren im Nebel gibt es bereits eine Reihe von Maßnahmeempfehlungen, um Nebelunfälle zu vermeiden und richtiges Verhalten zu fördern. Man kann dabei unterscheiden zwischen Maßnahmen zur Verbesserung der Wahrnehmungsbedingungen im Nebel und Maßnahmen zur Verhaltenssteuerung durch Warnsysteme sowie personenbezogenen Maßnahmen.

2.2.1 Maßnahmen zur Verbesserung der Sichtbedingungen

Eine Möglichkeit, die Wahrnehmungsbedingungen im Nebel zu verbessern, ist ein Vision Enhancement System (VES). Das VES präsentiert dem Fah-

rer Schwarz-weiß-bilder der Fahrstrecke in Klar-sicht in einem Head-up-Display. Dadurch wird die Vorausschau beim Fahren im Nebel erhöht, wo-durch die Sicherheit bei Nebelfahrten erhöht wer-den soll. Untersuchungen von NILSSON und ALM (1993) zeigen, dass sich zwar die Reaktionszeiten verbessern, gleichzeitig aber auch höhere Ge-schwindigkeiten gefahren werden. Workloadmaße wurden über einen Fragebogen ermittelt (NASA-TLX). Hierbei zeigte sich niedrigere mentale und physische Beanspruchung bei Fahrten ohne das VES-System.

ISHIMOTO, FUKUZAWA, KAJIYA, HAGIWARA und TAKEUCHI (1993) beschäftigten sich ebenfalls mit Möglichkeiten der Wahrnehmungsverbesserung unter schlechten Sichtbedingungen (Nebel und Schneetreiben). Sie zeigten, dass optische Hin-weisreize in der Umgebung in Form von die Straße flankierenden Bäumen zur Aufrechterhaltung einer Sichtlinie effektiver sind als konventionelle Markie-rungsmaßnahmen in Form von Straßenmarkie-rungspfosten. Außerdem wurde festgestellt, dass mit abnehmender Sichtweite die Blickbewegungen der Fahrer von der Mitte der Straße häufiger an den linken Fahrbahnrand tendieren (Japan hat Links-verkehr) und gleichzeitig die Dauer der Blickzuwen-dungszeit steigt.

SCHREUDER (1991) beschäftigt sich mit der Ver-besserung der Fahrbahnbeleuchtung, um bei Nebel kritische Elemente besser sichtbar zu ma-chen. Die Umgebung sollte über 200 bis 300 m zu überblicken sein, damit sicheres und schnelles Fahren möglich ist.

Alle diese Maßnahmen dienen eher dazu, das zu hohe Tempo im Nebel noch zusätzlich zu fördern, und helfen nicht, Fehlverhalten zu erkennen und zu korrigieren. Das wäre besonders bei solchen Sys-temen, die direkt im Fahrzeug eingebaut sind (wie z. B. dem VES oder einem Anti-Kollisions-System) gefährlich, da sich dadurch die Spannweite der ge-fahrenen Geschwindigkeiten weiter erhöht und somit das Unfallrisiko weiter steigt.

2.2.2 Maßnahmen in Form von Warnsystemen

Maßnahmenempfehlungen zur Einführung von Warnsystemen können sich auf fahrzeuginterne oder -externe Warnsysteme beziehen. Bei externen Systemen handelt es sich in erster Linie um so ge-nannte „intelligente Beschilderung“.

Nach SHEPARD (1996) kann zwar die Geschwin-digkeitsreduktion durch Beschilderung beeinflusst werden, was aber nicht verhindert, dass immer noch zu schnell gefahren wird. Die Schilder sollten konkrete Geschwindigkeiten vorgeben und nicht nur eine allgemeine Anweisung, bei Nebel die Ge-schwindigkeit zu reduzieren. SHEPARD sieht ins-besondere die Variabilität der Geschwindigkeit als Ursache vieler Unfälle im Nebel.

Ziel eines Forschungsvorhabens von DURTH, BARK & LIPPOLD (1995) war es, Hinweise für die Entwicklung einer effektiven Nebelwarnung im Straßenverkehr zu geben. Prinzipiell sind danach zwei Möglichkeiten denkbar, den Kraftfahrer an der Strecke vor Nebel zu warnen. Zum einen sind das an Unfallschwerpunkten installierte stationäre Ver-kehrsbeflussungs- oder Nebelwarnanlagen. Sie erreichen mit ihrer Information jeden Kraftfahrer ohne zusätzliche Ausrüstung am Fahrzeug. Auf der anderen Seite sind mobile Nebelwarngeräte im Kraftfahrzeug möglich. Diese besitzen den Vorteil, Nebel an jedem Punkt des Straßennetzes erfassen zu können. Zur Beschreibung des Unfallgesche-hens bei Nebel wurden Daten über Unfallzeitpunkt, Unfallort und die zum Unfallzeitpunkt vorherr-schenden Nebelarten (Nebelbank, gleichmäßiger Nebel) erhoben. Von allen Nebelunfällen ereigneten sich 15 % auf Bundesautobahnen und 85 % auf Bundes-, Landes- (Staats-) und Kreisstraßen. Da auf Bundes- und Landstraßen in der Regel keine externen Warnanlagen installiert werden können, können damit rund vier Fünftel aller Nebelunfälle nur durch eine zusätzliche Warnung des Kraftfah-rers aus dem Fahrzeug vermieden werden. Wegen der vor allem auf Landstraßen ebenfalls hohen An-zahl von Unfällen, bei denen Fahrzeuge nach rechts oder nach links abkommen, wurde eine zu-sätzliche Information des Fahrers über seitliche Ab-stände zur Querregelung empfohlen.

BRISBANE (1992 und 1994) führte auf australi-schen Straßen eine Feldstudie mit Geschwindig-keits- und Abstandsmessung sowie Erfassung der aktuellen Sichtverhältnisse durch. Die Fahrer er-hielten über „intelligente Schilder“, so genannte Fibreoptic Signs eine Warnung, wenn ihre Ge-schwindigkeit beim aktuellen Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug in Abhängigkeit der Sichtverhältnisse nicht angemessen war. Die Schilder geben Informationen über die aktuellen Sichtverhältnisse und eine Rückmeldung über die eigene Geschwindigkeit, sowie Anweisungen zur Anpassung der eigenen Geschwindigkeit an die

Geschwindigkeiten umgebender Fahrzeuge. Dieses System führte in den Untersuchungen von BRISBANE (1994) zu einer Verminderung der gefahrenen Geschwindigkeiten unter allen Sichtbedingungen.

BRISBANE (1996) vergleicht seine Ergebnisse des Fahrverhaltens von Australiern im Nebel mit Übersee-Studien und findet eine deutlichere und sichtweitenangepasste Geschwindigkeitsreduktion bei australischen Autofahrern.

Traditionelle Nebelwarnsysteme zeigen lediglich eine Geschwindigkeitsempfehlung für bestimmte Sichtverhältnisse und führen nach BRISBANE (1996) zum Gegenteil des erwünschten Effekts, da durch sie die Variabilität der gefahrenen Geschwindigkeit steigt und sich infolgedessen das Unfallrisiko erhöht.

In einer Simulatorstudie verwandten HOGEMA et al. (1995) ein Nebelsignal-System, das jeweils die den Sichtverhältnissen angemessene Geschwindigkeit zeigt. Die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten näherten sich zwar den vorgegebenen an, erreichten diese jedoch nicht völlig – es wurde immer noch zu schnell gefahren.

Allen hier vorgestellten Maßnahmen ist gemein, dass sie sich nicht auf ein vorhandenes Erklärungsmodell für Fahrverhalten im Nebel stützen und daher unspezifisch und bis zu einem gewissen Grad beliebig sind.

2.2.3 Personenbezogene Maßnahmen

Im Kontrast zu den zuvor behandelten sicht- und rückmeldungsbezogenen Maßnahmen, nach denen der Fahrer als „Opfer“ suboptimaler Wahrnehmungsbedingungen gesehen wird, stehen auf die Person gerichtete Maßnahmen, Training und Wissensvermittlung. Derartige Maßnahmen werden explizit von SCHÖNBACH (1996) als Konsequenz seiner umfassenden Theorie des Zusammenwirkens mehrerer Faktoren erwartet. Diese schließen „sowohl intrapersonale Faktoren als auch das Zusammentreffen bestimmter Merkmale der Verkehrssituation mit Eigenschaften und Handlungstendenzen der beteiligten Personen“ ein (S. 124). SCHÖNBACH schlägt nach erwarteter empirischer Bestätigung seiner Hypothese die Überprüfung personenbezogener Maßnahmen vor: „dann wäre der nächste Schritt ein Trainingsprojekt, in dem Fahrschüler als Teil ihrer Ausbildung Gelegenheit zu einer Fahrt im Simulator bei

Nebel erhalten, einschließlich der Erfahrung eines Auffahrunfalls, wenn sie die Sicherheitsgrenzen von Abstand und/oder Geschwindigkeit verletzen. Dieses Projekt sollte außer einer Wiederholung der Simulationsfahrt nach einem angemessenen Zeitraum zur Evaluation des Lernerfolgs möglichst auch eine Langzeitbeobachtung der Unfallhäufigkeit in der Testgruppe und in einer Kontrollgruppe ohne Simulatorerfahrung einschließen, wobei Unfälle bei Nebel und ähnlichen Situationen schlechter Sicht (Nachtfahrten, Schneetreiben, starker Regen) besonders zu beachten wären“ (S. 125). Weiterhin: „die Grundzüge der hier angewandten sozialpsychologischen Theorien [...] sollten im Anschluss an die Simulatorerfahrungen erörtert werden und gegebenenfalls auch in den Fahrschulunterricht, also insbesondere auch zum festen Bestand der Fahrlehrerausbildung, gehören“ (S. 215).

Angesichts dieses Gegenentwurfs ist es auch Ziel der vorliegenden Arbeit, darüber zu entscheiden, welcher Typ von Maßnahmen zur Vermeidung von Massenunfällen bei Nebel als zielführend empfohlen werden kann. So wird als Ziel und Nutzen von Simulationsuntersuchungen formuliert (BASt-Ausschreibung): „Bestätigen sich die bisherigen Befunde, wäre die Entwicklung von Trainingsprogrammen für Fahrlehrer und Fahrschüler mit dem Ziel, verdeckt ablaufende sozialpsychologische Prozesse bewusst und damit beeinflussbar zu machen, angezeigt. Je nach Befund können auch Änderungen der StVO und StVZO in Betracht gezogen werden (obligatorisches Anbringen von Nebelschlussleuchten, strengere Benutzungskriterien als bisher).“

3 Vorstudien und Replikationen

3.1 Vorstudien

Die Vorstudien dienten dazu, die verwendete Fahrsimulation und insbesondere die Nebelsimulation auf Realitätsnähe und Aussagekraft hin zu überprüfen. Es wurde eine Studie zur Abstandsschätzung durchgeführt, eine Studie zum Einfluss des simulierten Nebels auf das frei gewählte Fahrverhalten und eine Studie zum Einfluss einer Sichtbeschränkung durch Nebel im Vergleich zur Sichtbeschränkung, die durch einen entsprechenden Streckenverlauf entsteht (z. B. unübersichtliche Kurven).

3.1.1 Durchführung

Die Vorstudien wurden in Räumen des Institutes durchgeführt. Es wurde eine einfache Simulationsanordnung realisiert. Das Simulationsprogramm wurde mit Hilfe eines tragbaren Projektors auf eine Projektionswand geworfen. Dieser wurde unter einem leichten Winkel unter der Raumdecke in einem Abstand von vier Metern zur Projektionswand befestigt. Daraus ergab sich eine leicht trapezförmige Projektion der Simulation (Breite 2 m Höhe 1,70 m). Die Versuchsperson saß zwei Meter vor der Projektionswand an einem Tisch. Zur Bedienung der Simulation stand ihr ein Lenkrad mit einer Pedalkombination (Brems- und Gaspedal) zur Verfügung. Lenkrad und Pedalkombination waren getrennt und nur über ein Kabel verbunden. Der Raum war während der Experimente abgedunkelt.

Die simulierte Strecke bestand aus einer Geraden, gefolgt von einer sehr lang gezogenen Linkskurve, an die sich erneut eine Gerade anschloss, wiederum gefolgt von einer lang gezogenen Rechtskurve. Die Strecke endete am Ausgang der Rechtskurve. Die Länge betrug 6.000 m. Sie wurde ein oder zwei Mal durchfahren, was zu einer Gesamtlänge der Teststrecke von bis zu 12.000 m führte. Die Strecke enthielt keine Veränderung des Höhenprofils, um den Einfluss von Steigungen oder Gefällen auszuschließen.

An den im Folgenden beschriebenen Vorstudien nahmen sechs bis acht spontan rekrutierte Probanden aus dem Institut teil. Alle Versuchspersonen konnten vor dem eigentlichen Experiment das Fahren mit dem Fahr Simulator trainieren.

3.1.2 Studie 1: Abstandsschätzungen

In den Studien zur Abstandsschätzung befand sich vor dem Wagen des Fahrers in einem bestimmten Abstand ein anderer Pkw. Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand zunächst darin, diesen Abstand zu schätzen. Sie waren instruiert, dabei nicht loszufahren. Folgende Abstände wurden jeder Versuchsperson in randomisierter Abfolge gezeigt: 30 m – 40 m – 50 m – 60 m – 75 m – 100 m – 150 m (siehe Bild 1).

Bild 2 zeigt die Darstellung der Mittelwerte der abgegebenen Abstandsschätzungen und die dazugehörigen Standardabweichungen. Die gestrichelte Linie markiert den Verlauf einer theoretisch korrekten Schätzung.

Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Schätzungen mit den simulierten Abständen bis etwa 80 m. In diesem Bereich sind auch die Standardabweichungen relativ gering. Bei Abständen über 80 m werden die Abstände jedoch deutlich überschätzt und auch die Standardabweichungen werden deutlich größer.

Die Größe der Projektion und die damit verbundenen scheinbaren Maße und Verhältnisse, wie die Breite der Straße oder die Größe des entfernten Wagens bei einem bestimmten Abstand, blieben in allen folgenden Studien konstant. Daher können die hier gewonnenen Abstandsschätzungen für die späteren Studien als Grundlage verwendet werden. Es zeigt sich, dass in der gegebenen Versuchsanordnung Entfernungen bis 80 m von den Versuchspersonen korrekt und mit geringer Varianz eingeschätzt werden können. Daraus ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die simulierten Abstandsparameter (z. B. Sichtweite) im Bereich unter 80 m die wahrgenommenen Abstände der Versuchspersonen



Bild 1: Darstellung der Fahrsimulation während der Abstandsschätzung Version 2 der Vorstudie 1 (abgebildet ist ein Fremdfahrzeug, dessen Abstand – 40 m – zu schätzen war); Original in Farbe

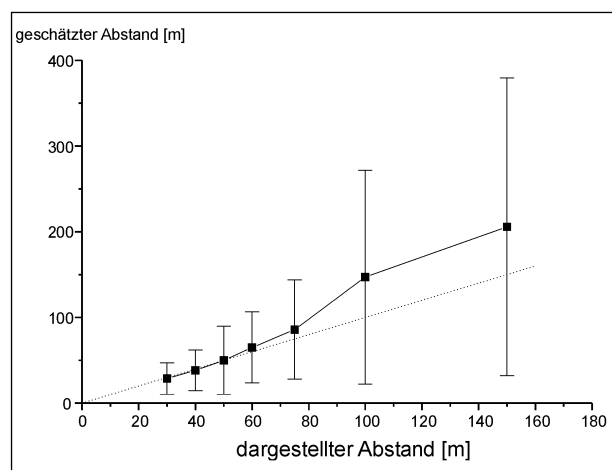


Bild 2: Ergebnisse der Abstandsschätzung der Vorstudie 1. Die gestrichelte Linie gibt die dargestellten Abstände wieder

sonen relativ exakt abbilden. In den weiteren Versuchen können Abstandsparameter bis 80 m daher als realistisch im Sinne der Simulation angesehen werden.

3.1.3 Studie 2: Nebelfahrten mit freier Geschwindigkeitswahl

Ziel der zweiten Studie war es, den Einfluss der verwendeten Nebelsimulation auf das Fahrverhalten zu prüfen. Es wurden zwei Nebelbedingungen simuliert, die beide auch in den weiteren Studien verwendet wurden. In der ersten Bedingung wurde eine Sichtweite von 80 m simuliert, in der zweiten Bedingung eine Sichtweite von 30 m.

Die Abfolge der Bedingungen erfolgte zufällig. Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin, den simulierten Wagen auf eine Geschwindigkeit zu beschleunigen, die ihrer Einschätzung nach den Sichtverhältnissen angemessen ist. Sobald sie sich, ohne Zeitdruck, auf diese Geschwindigkeit eingependelt hatten, wurde die Fahrt abgebrochen und die zuletzt gefahrene Geschwindigkeit gewertet. Die Fahrten erfolgten ohne Geschwindigkeitsrückmeldung.

Es zeigt sich, wie in Tabelle 2 zu sehen, dass die eingestellte Endgeschwindigkeit mit zunehmender Nebelstärke sinkt. Zudem wählten die Versuchspersonen Geschwindigkeiten, die der Sichtweite angemessen sind. Die Nebelsimulation beeinflusst also das Fahrverhalten. Bei 30 m bzw. 80 m Sichtweite werden Geschwindigkeiten gewählt, die unter Gesichtspunkten der Verkehrssicherheit als

Sichtweite	Mittelwert	St. -Abw.
80 m	64,97	21,18
30 m	37,63	16,00

Tab. 2: Eingestellte Endgeschwindigkeiten (Werte in km/h), die die Versuchspersonen als sicherheitsangemessen einstufen, Vorstudie 2



Bild 3: Darstellung der Nebelsimulation mit 30 m Sichtweite in der Vorstudie 2; Original in Farbe

vernünftig anzusehen sind. Das deckt sich mit den Befunden aus den Abstandsschätzungen, da Entfernungen und damit auch Sichtweiten bis 80 m als realistisch erlebt werden. Auch die Geschwindigkeiten in der Simulation werden, zumindest in dem hier gewählten Geschwindigkeitsbereich, als realistisch im Sinne dieser Simulation erlebt.

3.1.4 Studie 3: Sichteinschränkungen durch Nebel vs. Straßentopografie

Ziel der Studie war es, den Einfluss einer Sichtbehinderung durch Nebel mit der Sichtbehinderung durch eine entsprechende Streckenführung zu vergleichen. In einer ersten Untersuchung wurden die Versuchspersonen instruiert, die Strecke von 5.952 m einmal vollständig zu durchfahren. Die Versuchspersonen konnten die Geschwindigkeit frei wählen, mussten diese aber nicht konstant halten. Es gab wieder keine Geschwindigkeitsrückmeldung durch den Tacho. Die Strecke wurde unter drei verschiedenen Sichtbedingungen durchfahren (klare Sicht, Nebel mit 80 m Sichtweite und Nebel mit 30 m Sichtweite). Die Reihenfolge der Bedingungen erfolgte wiederum zufällig. Ausgewertet wurden die mittlere Geschwindigkeit und der Geschwindigkeitsverlauf in Abhängigkeit zur Streckenposition. An dem Experiment nahmen sieben Versuchspersonen aus dem Institut für Psychologie teil. Der Versuch dauerte etwa eine halbe Stunde pro Versuchsperson.

Es zeigt sich eine deutliche Reduzierung der mittleren Geschwindigkeit mit zunehmender Sichtbeschränkung. Die resultierenden mittleren Geschwindigkeiten sind der jeweiligen Sichtbedingung angepasst. Betrachtet man den Verlauf der Geschwindigkeit über die Strecke, so zeigt sich, dass es am Kurveneingang zu einer Abnahme der Geschwindigkeit kommt. Diese schlägt sich jedoch nicht in der mittleren Geschwindigkeit nieder, da unmittelbar nach Kurveneingang wieder beschleunigt wird. Im Folgenden wird der Einfluss der Streckentopografie genauer untersucht.

Hierzu wurden zunächst zwei neue Strecken entwickelt. Die erste Strecke bestand aus einer 4.300 m langen Geraden mit vier, je 500 m langen Nebelbänken, in denen die Sichtweite 80 m betrug. Die zweite Strecke bestand aus einer sich abwechselnden Folge von sechs 1.000 m langen Geraden und engen Kurven. Die Sichtweite innerhalb der Kurven war durch eine Baumreihe an der Innenseite beschränkt. Dadurch ergab sich eine Sichtweite

	Mittelwert	St.-Abw.	Min	Max
Klar	91,85	30,64	40,01	157,15
Nebel	63,21	24,76	26,92	161,10
Gerade	125,4	33,87	52,39	191,84
Kurve	77,61	27,89	27,42	140,61

Tab. 3: Gefahrene Geschwindigkeit in km/h in Abhängigkeit des Streckenabschnittes oder der Sichtbedingung. Mittelwert, Standardabweichung, minimaler und maximaler Wert; Vorstudie 3

von 75 m für Rechts- und 105 m für Linkskurven. So konnten Nebelpassagen mit Kurvenpassagen verglichen werden, die eine vergleichbare Sichtbeschränkung hatten. Die Versuchspersonen sollten eine den Sichtbedingungen und den Streckenverhältnissen angepasste Geschwindigkeit wählen. Es gab wieder keine Geschwindigkeitsrückmeldung. Die Reihenfolge der beiden Testfahrten erfolgte zufällig. An dem Experiment nahmen fünf Versuchspersonen teil, von denen die meisten wie in der vorherigen Studie Studenten am Institut für Psychologie waren. Ausgewertet wurde jeweils nur die zweite Streckenhälfte.

Es zeigt sich, dass unter Klarsichtbedingungen schneller gefahren wird als im Nebel. Gleiches gilt für eine gerade Strecke im Vergleich zu einer Kurve (s. Tabelle 3). Das Fahrverhalten auf einer geraden Strecke bei klarer Sicht ist gleich, unabhängig davon, ob diese Strecke zwischen zwei Kurven liegt oder zwischen zwei Nebelbänken. Interessanterweise entspricht das Fahrverhalten in den Nebelbänken sehr gut dem in den Kurven. Die etwas höhere mittlere Geschwindigkeit in den Kurven ist im Wesentlichen dadurch zu erklären, dass nur die Rechtskurve mit einer Sichtweite von 75 m sehr gut der Sichtweite in den Nebelbänken (80 m) entsprach. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Beeinflussung des Fahrverhaltens durch die Nebelsituation im Wesentlichen auf eine Einschränkung der Sichtweite zurückgeführt werden kann.

3.1.5 Studie 4: Sichteinschränkung durch Nebel und Abstand zum Vordermann

In einer letzten Vorstudie sollte der Einfluss eines vorausfahrenden Pkw auf die Fahrgeschwindigkeit unter verschiedenen Sichtbedingungen untersucht werden. Hier ging es zum ersten Mal direkt um empirische Hinweise für den von SCHÖNBACH postulierten Sogeffekt durch ein vorausfahrendes Fahrzeug. Von den Ergebnissen wurden Spezifizierungsmöglichkeiten für die Konzeption der Modelluntersuchungen erwartet.

Fahrbedingung	Sichtbedingung			
	Klarsicht	Nebel 80 m	Nebel 55 m	Kurve
Einzelfahrt	151,6	82,7	59,6	98,0
Abstand 45 m	113,9	84,0	72,2	90,0
Abstand 30 m	108,0	86,7	65,1	86,6
Mittelwert über die Fahrbedingungen	124,5	84,5	65,6	91,5

Tab. 4: Gefahrene mittlere Geschwindigkeiten [km/h] in Vorstudie 4

Die Sichtbedingungen (bzw. Nebelbedingungen) variierten in den drei Stufen: klare Sicht, Sichtweite 80 m und Sichtweite 55 m. Die Versuchspersonen fuhren zum einen in Einzelfahrten ohne vorausfahrenden Pkw, zum anderen mit einem vorausfahrenden Pkw im Abstand von 45 m oder im Abstand von 30 m (das vorausfahrende Fahrzeug fuhr immer mit der gleichen Geschwindigkeit wie die Versuchsperson). Somit variierte die Fahrbedingung ebenfalls in drei Stufen. Die aus dem 3 x 3-Design resultierenden Versuchsbedingungen mussten von den Versuchspersonen in einer randomisierten Reihenfolge durchfahren werden.

Es gibt einen signifikanten Haupteffekt der Sichtweite ($p < 0.001$). Die Versuchspersonen fahren langsamer, je schlechter die Sicht ist. Es gibt keinen signifikanten Haupteffekt für die Fahrbedingung ($p > 0.1$). In der Klarsichtbedingung zeigt sich eine Tendenz, in Begleitung eines vorausfahrenden Pkw langsamer zu fahren als bei der Einzelfahrt.

Bei starkem Nebel (Sicht 55 m) fahren die Versuchspersonen schneller in der Begleitung eines Pkw als unter der Bedingung Einzelfahrt. Im Gegensatz dazu zeigt sich bei der schwachen Nebelbedingung (Sicht 80 m) kein Einfluss der Fahrbedingung auf die mittlere gefahrene Geschwindigkeit.

Ein besonders auffälliger Anstieg des gefahrenen mittleren Tempos zeigt sich bei der Kombination von einer Sichtweite von 55 m und einem vorausfahrenden Pkw im Abstand von 45 m. Hier fahren die Versuchspersonen mit einer mittleren Geschwindigkeit von 72,2 km/h deutlich schneller als in den beiden anderen Fahrbedingungen bei gleicher Sichtweite. Möglicherweise orientieren sich die Versuchspersonen bei starkem Nebel zunehmend an dem Bezugspunkt des vorausfahrenden Pkw. Droht das Auto mit dem weiten Abstand bei der hohen Nebeldichte permanent im Nebel zu verschwinden, versuchen die Fahrer ihm als einem ihrer wichtigsten Bezugspunkte zu folgen.

Die Ergebnisse dieser Vorstudien liefern erste Hinweise, worauf bei der Konzeption der Modelluntersuchungen geachtet werden muss und unter welchen Bedingungen Effekte der Sichtweitereinschränkung zu erwarten sind.

3.2 Replikationsstudien

3.2.1 Das Simulationsexperiment von SNOWDEN et al. (1998)

Zur Konzeption unserer Modelluntersuchungen zum Fahren im Nebel war es sinnvoll, von einem Untersuchungsansatz auf dem Fahr Simulator auszugehen, mit dem bereits bei einer Einzelfahrt ein Einfluss von Nebel auf das Fahrverhalten gezeigt wurde. Die Untersuchung von SNOWDEN et al. (1998) schien dazu geeignet, denn in ihr wurde mit zunehmender Sichtbehinderung schneller als die vorgegebene Richtgeschwindigkeit gefahren und die wahrgenommene Geschwindigkeit eines Fahrzeugs unterschätzt. SNOWDEN et al. zeigen dies anhand einer technisch einfachen Fahr Simulatorstudie. Die Versuchspersonen sollen zunächst eine vorgegebene Richtgeschwindigkeit bei klarer Sicht üben und sich den Geschwindigkeitseindruck einprägen. Dann sollen sie diese zuvor geübte Geschwindigkeit unter drei verschiedenen Sichtbedingungen, ohne Geschwindigkeitsrückmeldung, erneut einstellen. Insgesamt wurden 3 Geschwindigkeiten getestet: 30 m. p. h. (48 km/h) – 50 m. p. h. (80 km/h) – 70 m. p. h. (112 km/h). Das Ergebnis zeigt, dass bereits bei klarer Sicht die zuvor geübten Geschwindigkeiten um mindestens 15 % zu hoch eingestellt werden. Diese nach oben gerichtete Abweichung von der geübten Geschwindigkeit stieg mit zunehmendem Nebel auf bis zu 56 % an.

Bevor die Ergebnisse von SNOWDEN in die Konzeption der Modelluntersuchungen einfließen konnten, sollten sie zunächst mit Hilfe unserer, in den Vorstudien (Kapitel 3) vorgestellten, Versuchsanordnung repliziert werden. In diesem Zusammenhang sollten auch die Ursachen für den – im weiteren so genannten – SNOWDEN-Effekt genauer untersucht werden. Im Folgenden werden vier Replikationsversuche vorgestellt.

3.2.2 Replikationsstudie 1: „Bildschirm: Unstrukturierte Landschaft mit Seitenpfosten“

Wie bei SNOWDEN wurde unsere Simulation ebenfalls am Bildschirm durchgeführt. Die von SNOW-



Bild 4: Darstellung der von SNOWDEN et al. verwendeten Simulation; Original in Farbe

DEN verwendete Simulation zeichnet sich besonders durch eine sehr realistische und detaillierte Darstellung der Landschaftsszene aus (siehe Bild 4). Um den Einfluss der visuellen Darstellung der Simulation auf den beschriebenen Effekt genauer zu untersuchen, wurde von uns zunächst eine Darstellung gewählt, die möglichst einfach und unstrukturiert war. Lediglich Seitenpfosten am Straßenrand verstärkten den Geschwindigkeitseindruck.

Das experimentelle Design wurde von SNOWDEN übernommen. So wurden drei verschiedene Sichtbedingungen verwendet: Klarsicht (Sichtweite = 3.000 m), diesig (Sichtweite = 80 m) und neblig (Sichtweite = 30 m). Als Richtgeschwindigkeiten wurden 50 km/h, 80 km/h und 110 km/h verwendet. Es nahmen zwölf Versuchspersonen (7 männlich/5 weiblich) mit einem Alter von 22 bis 31 Jahren an dem Experiment teil. Die mittlere Fahrpraxis in Jahren betrug 5,8 mit durchschnittlich pro Jahr 10.091 gefahrenen Kilometern. Die Versuchspersonen absolvierten alle drei Richtgeschwindigkeiten unter allen drei Sichtbedingungen. Zunächst wurden die drei 50-km/h-Fahrten absolviert, danach die drei 80-km/h-Fahrten und anschließend die drei 110-km/h-Fahrten. Die Reihenfolge der Sichtbedingungen innerhalb dieser Blöcke war randomisiert über die Blöcke und über die Versuchspersonen. Ein Block begann mit einer dreiminütigen Übung der jeweiligen Geschwindigkeit. Daran schlossen sich die drei Testphasen an. Vor der zweiten und dritten Testphase fand nochmals eine 1,5-minütige Übung statt. Während der Übungsphasen war eine Geschwindigkeitsanzeige eingeblendet. In der Testphase fehlte diese Anzeige. Die Versuchspersonen sollten in den Testphasen die zuvor geübten Geschwindigkeiten ohne Zeitkontrolle herstellen.

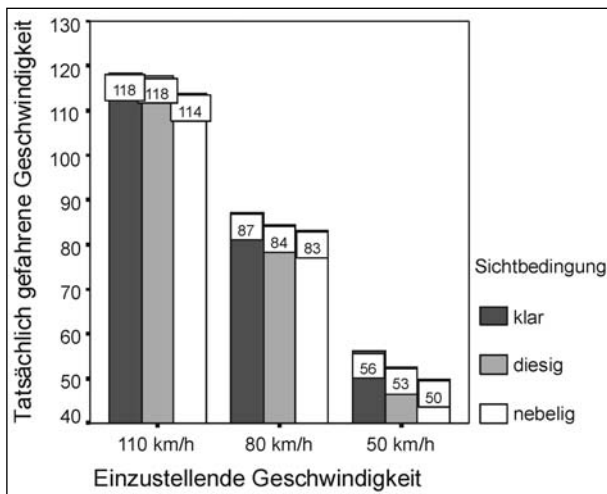


Bild 5: Mittelwerte der erreichten Endgeschwindigkeiten über alle Versuchspersonen in Abhängigkeit von den Sichtbedingungen (Replikationsstudie 1)

Wie Bild 5 verdeutlicht, ließ sich der „SNOWDEN-Effekt“ in dieser Versuchsanordnung nicht replizieren. Weder kommt es zu einer erhöhten Geschwindigkeitswahl bei klaren Sichtbedingungen noch zu einer darüber hinausgehenden Unterschätzung der Richtgeschwindigkeit (d. h. erhöhte tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit) mit zunehmender Sichtbehinderung durch Nebel. Die Versuchspersonen zeigen sich vielmehr sehr gut in der Lage, die zuvor geübten Geschwindigkeiten bei allen Sichtbedingungen erneut herzustellen.

3.2.3 Replikationsstudie 2: „Bildschirm: Unstrukturierte Landschaft ohne Seitenpfosten“

Die zweite Untersuchung unterscheidet sich von der ersten in zwei Punkten, die die Entwicklung des SNOWDEN-Effekts verhindert haben könnten. Zum einen wurde auf die Darstellung der Seitenpfosten verzichtet, da sie eine Geschwindigkeitsschätzung durch Zählen erlauben. Zum anderen wurde nun auch die Reihenfolge der einzelnen Blöcke (der Richtgeschwindigkeiten) über die Versuchspersonen randomisiert, um die Überlagerung durch einen Übungseffekt auszuschließen.

An der Untersuchung nahmen drei männliche und drei weibliche Probanden zwischen 22 und 27 Jahren teil, die eine mittlere Fahrpraxis von 6,7 Jahren mit durchschnittlich 21.200 gefahrenen Kilometern pro Jahr hatten. Auch mit der veränderten Versuchsanordnung lassen sich weder eine Überschätzung der Geschwindigkeit bei klarer Sicht noch eine Zunahme der gewählten Geschwindigkeiten mit zunehmender Sichteinschränkung nach-

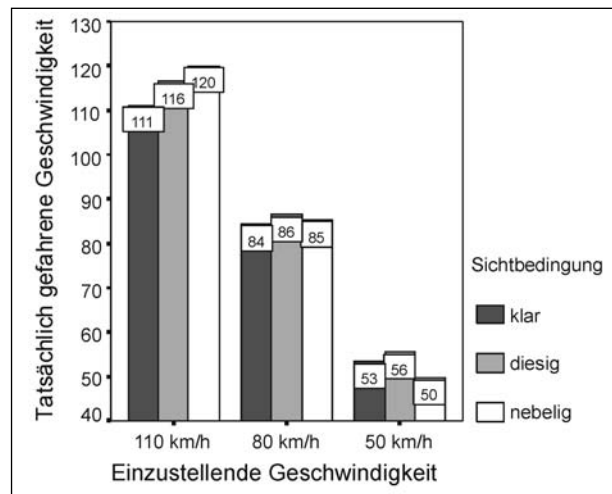


Bild 6: Mittelwerte der erreichten Endgeschwindigkeiten über alle Versuchspersonen in Abhängigkeit von der Sichtweite (Replikationsstudie 2)

weisen (Bild 6). Erneut waren die Versuchspersonen sehr gut in der Lage, im Mittel die geübte Geschwindigkeit unter allen Sichtbedingungen richtig einzustellen.

Allerdings deutet ein Anstieg der Standardabweichung der Geschwindigkeit auf individuelle Unterschiede in der Reaktion auf die Sichtbedingung hin. Dieser Befund legt die Vermutung nahe, dass der von SNOWDEN berichtete Effekt möglicherweise nur dann bei allen Probanden entsteht, wenn ein vergleichbar realistischer Landschaftshintergrund besteht. In der folgenden Untersuchung wurde deshalb versucht, sich noch stärker der SNOWDEN-Simulation anzunähern.

3.2.4 Replikationsstudie 3: „Bildschirm: Strukturierte Landschaft“

In der dritten Untersuchung wurde der Detailreichtum der dargestellten Landschaft stärker an die Simulation von SNOWDEN angepasst, da diese Details als visuelle Merkmale für die Geschwindigkeitswahrnehmung eine Rolle spielen können. Anstelle des bisher einfarbig blauen Himmels wurde ein bewölkter Himmel simuliert. Ebenso wurde der einfarbig grüne Rasen durch einen mehrfarbig strukturierten Rasen ersetzt. Darüber hinaus wurden links und rechts der Straße in unregelmäßigen Abständen Bäume platziert und die Mittellinie von der Darstellung der Straße entfernt. Schließlich wurde auch noch der Gaspedaldruck variiert, um Rückschlüsse auf die Geschwindigkeit über die Pedalstellung auszuschließen. Ansonsten war diese Untersuchung in methodischer und experi-

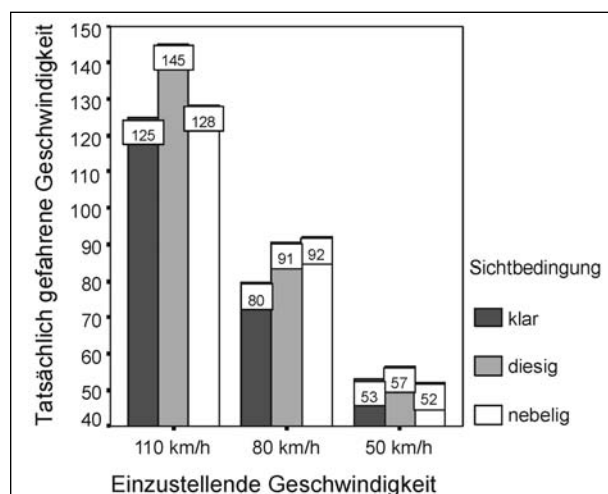


Bild 7: Mittelwerte der erreichten Endgeschwindigkeiten über alle Versuchspersonen in Abhängigkeit von der Sichtweite (Replikationsstudie 3)

menteller Hinsicht identisch mit den beiden vorausgegangen.

An diesem Experiment nahmen sieben männliche und drei weibliche Probanden zwischen 20 und 37 Jahren teil. Die mittlere Fahrpraxis in Jahren betrug 6,3 mit einer durchschnittlichen Kilometerleistung pro Jahr von 12291 km. Erneut zeigte sich keine signifikant erhöhte Geschwindigkeit bei klarer Sicht und ebenso kein signifikanter Anstieg bei zunehmender Sichtbehinderung (siehe Bild 7). Aber ein signifikanter Einfluss der Sichtbedingung auf die Standardabweichung der Geschwindigkeit zeigt sich auch in dieser Untersuchung. Auch wenn sich der SNOWDEN-Effekt nicht zeigt, so deutet der letzte Befund dennoch auf die mit zunehmender Sichtbehinderung ansteigende Variabilität in der Reaktion auf die Sichtbedingung hin.

Ein weiterer Replikationsversuch, bei dem die von uns verwendete als realistisch empfundene Nebeldarstellung durch eine einfache flächige Kontrastreduktion ersetzt worden war, wie SNOWDEN sie eingesetzt hatte, blieb ebenfalls ohne Erfolg.

3.2.5 Replikationsstudie 4: „Fahrsimulator“

Da alle Modifikationen und Varianten mit der in Aachen zur Verfügung stehenden Simulationsanordnung keine Replikations-Erfolge brachten, wurde eine Untersuchung am Simulator des Würzburger Interdisziplinären Zentrums für Verkehrswissenschaften (IZVW) geplant. Der Simulator, der auch für unsere Modelluntersuchungen eingesetzt wurde und in Kapitel 4 ausführlicher beschrieben wird, erlaubt eine realitätsnahe Darstellung: eine

180°-Präsentation der Fahrscene, ein realistisches Fahrumfeld in Form einer kompletten Fahrgastzelle eines 5er BMWs und letztendlich die Simulation der Fahrdynamik.

Die Verwendung des Würzburger Fahrsimulators erforderte einige experimentelle Veränderungen. Die neue Strecke, eine zweispurige, kurvige Landstraße (max. Länge 8.800 m), hatte eine Mittellinie, aber keine Seitenpfosten. Die Straße war rechts und links in unregelmäßigen Abständen mit Bäumen gesäumt. Es wurden keine Verkehrsschilder, Häuser, Fußgänger oder andere Autos dargestellt. Die Bewegungssimulation war aktiviert, die Fahr- und Motorgeräusche waren dagegen deaktiviert, da dies ein direkter Indikator für die gefahrene Geschwindigkeit gewesen wäre. Als Richtgeschwindigkeiten dienten wieder 50, 80 und 110 km/h. Die Sichtbedingungen wurden zwischen Klarsicht, Sichtweite 75 m und Sichtweite 30 m variiert. An der Untersuchung nahmen drei weibliche und fünf männliche Probanden mit einem Alter zwischen 25 und 39 Jahren, einer mittleren Fahrpraxis von 12,8 Jahren und einer durchschnittlichen Kilometerleistung von 13.166 km pro Jahr teil. Die Fahrer hatten zwar die gesamten 8 km der Strecke zur Verfügung, eine Testfahrt wurde jedoch beendet, sobald der Fahrer die Geschwindigkeit eingestellt hatte. Das war in der Regel nach spätestens einer Minute der Fall.

Die Durchführung entsprach den vorangegangenen Replikationsstudien. Den neun Testfahrten (drei Richtgeschwindigkeiten bei je drei Sichtbedingungen) ging jeweils eine Übungsfahrt mit eingeschaltetem Tacho voran. Dabei waren die drei Sichtbedingungen bei einer Geschwindigkeit geblockt, die Abfolge der Blöcke und die Reihenfolge innerhalb der Blöcke aber randomisiert. Zusätzlich zu den bisherigen Untersuchungen sollten die Versuchspersonen zusätzlich angeben, wann sie ihre subjektive sichtabhängige Sicherheitsgrenze der Geschwindigkeit erreicht hatten.

Ausgewertet wurden die mittlere Geschwindigkeit, die maximale Geschwindigkeit, die Varianz der Geschwindigkeit und die mittlere laterale Abweichung. Bei der lateralen Abweichung handelt es sich um ein Maß für das Spurhaltevermögen. Es ist die absolute Abweichung in Metern von der Fahrspurmitte. Die Varianz der Geschwindigkeit drückt aus, inwieweit die Geschwindigkeit konstant gehalten wird. Sie berechnet sich aus der Standardabweichung der Geschwindigkeit als prozentualer

	Klarsicht		Sichtweite 75 m		Sichtweite 30 m	
	Mittelwert	St.-Abw.	Mittelwert	St.-Abw.	Mittelwert	St.-Abw.
Mittlere Geschwindigkeit	124,2	15,4	94,5	18,4	59,9	17,3
Maximalgeschwindigkeit	137,4	16,3	104,6	19,4	71,5	18,4
Varianz (in % vom MW)	6,11	1,26	6,10	2,03	9,04	1,87
Mittlere laterale Abweichung	0,35	0,13	0,32	0,15	0,26	0,13

Tab. 5: Gefahrene Geschwindigkeit (km/h) und Spurhalteleistung (m) unter den drei Sichtbedingungen für die Fahrten mit freier Geschwindigkeitswahl. Erhobene Variablen waren Geschwindigkeit, Maximalgeschwindigkeit, Varianz der Geschwindigkeit sowie die mittlere laterale Abweichung, jeweils Mittelwerte und Standardabweichungen; Replikationsstudie 4

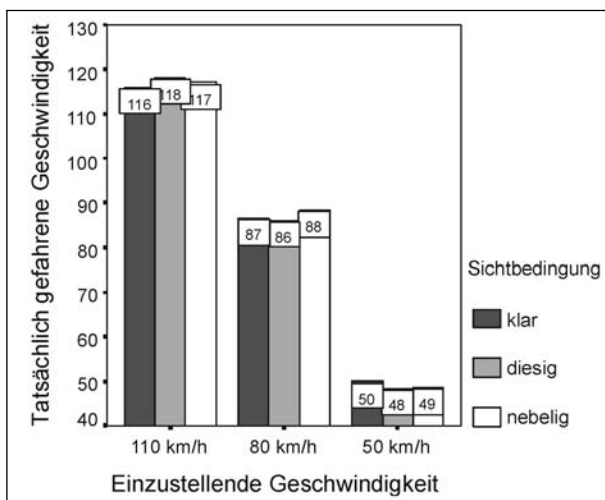


Bild 8: Mittelwerte der während der Testphase gefahrenen Geschwindigkeiten über alle Versuchspersonen in Abhängigkeit von der Sichtweite (Replikationsstudie 4)

Anteil vom Mittelwert der Geschwindigkeit innerhalb des ausgewerteten Zeitraumes. Tabelle 5 zeigt zunächst die Ergebnisse für die Fahrten mit freier Geschwindigkeitswahl.

Sowohl die resultierende mittlere Geschwindigkeit als auch die maximale Geschwindigkeit steigen signifikant mit zunehmender Sichtweite (jeweils $p < 0.001$). Am Fahrsimulator in Würzburg wurden höhere Geschwindigkeiten gewählt als bei vergleichbaren Sichtweiten in der Simulationsanordnung in Aachen. Allgemein lässt sich sagen, dass die gewählten Geschwindigkeiten für die entsprechenden Sichtverhältnisse im Nebel um ca. 15-20 km/h zu hoch sind.

Der leichte Abfall der lateralen Abweichung mit zunehmender Sichtbehinderung wird nicht signifikant ($p > 0.09$). Allerdings ergibt sich ein signifikanter Effekt für die Varianz der Geschwindigkeit ($p < 0.005$), der auf den erhöhten Wert bei starkem Nebel (Sichtweite 30 m) zurückzuführen ist. Mit zunehmender Sichtbehinderung kommt es wiederum zu einer verstärkten Varianz im Geschwindigkeitsverhalten.

Der SNOWDEN-Effekt zeigt sich auch bei dieser Untersuchung nicht, wie Bild 8 verdeutlicht. Es ergibt sich ein hochsignifikanter Einfluss des Faktors Richtgeschwindigkeit (jeweils $p < 0.001$). Wie zu erwarten, liegt die erreichte Geschwindigkeit umso höher, je höher die vorgegebene Richtgeschwindigkeit war. Allerdings gab es keinen signifikanten Einfluss der Sichtbedingung (jeweils $p > 0.9$). Wie bei den Versuchen in Aachen zeigt sich im Gegenteil erneut, dass die geübte Geschwindigkeit unter allen Sichtbedingungen mit hoher Genauigkeit reproduziert wird.

3.2.6 Zusammenfassung

Die von SNOWDEN berichteten Effekte der Sichteinschränkung durch Nebel auf die Reproduktion einer geübten Geschwindigkeit konnten in keiner der Untersuchungen gezeigt werden. Vielmehr war es den Versuchspersonen unter allen dargestellten Umständen jeweils möglich, die Geschwindigkeit in guter Übereinstimmung mit den geübten Geschwindigkeiten zu reproduzieren.

4 Modelluntersuchungen 1-3

4.1 Konzeption

4.1.1 Theoretischer Ansatz

Der sozialpsychologische Ansatz von SCHÖNBACH beschränkt sich auf die Annahme, dass die unangepasste Fahrgeschwindigkeit bei Nebel durch das Fahren in der Kolonne entsteht. Er bietet keine Erklärung für eventuell unangepasstes Fahren des Einzelfahrers. Nun zeigen die Vor- und Replikationsstudien, dass die frei gewählte Fahrgeschwindigkeit bei Einzelfahrt den Sichtbedingungen angemessen angepasst wird und eine vorgegebene Richtgeschwindigkeit – wider Erwarten – auch unter ungünstigen Sichtbedingungen (Nebel) vergleichbar wie unter Klarsichtbedingung zutref-

hend eingestellt wird. Die Hypothese, dass perzeptive Faktoren das Fahrverhalten des Einzelfahrers bei Nebel ungünstig beeinflussen, konnte – trotz der allgemeinen positiven Befundlage in der erfassten Literatur – in den vorliegenden Untersuchungen nicht bestätigt werden. Die fehlende Bestätigung in den eigenen Simulationsuntersuchungen darf jedoch nicht zu einer generellen Verwerfung der Hypothese führen. Die Einzelfahrtbedingung wird deshalb – schon aus untersuchungslogischen Gründen – in den folgenden Modelluntersuchungen als „Kontrollbedingung“ weitergeführt.

SCHÖNBACH nimmt an, dass unangepasste Fahrgeschwindigkeit in der Kombination Kolonne und Nebel auftritt. D. h., er erwartet nicht, dass Kolonnenfahren gegenüber Einzelfahren generell, bei Nebel und Klarsicht, zu unangepasster Fahrgeschwindigkeit führt. Ein solcher Effekt ist jedoch nicht auszuschließen. Deswegen ist es – wiederum aus untersuchungslogischen Gründen – erforderlich, eine Klarsichtbedingung immer als „Kontrollbedingung“ mitzuführen. Es ist zu kontrollieren, ob sich die Kolonnenfahrt bei klarer Sicht nicht vergleichbar wie bei Nebel abspielt: Werden bei Klarsicht Fahrzeugabstände gewählt, die bei einer plötzlichen Stockung des Verkehrs zu Unfällen führen würden, die sich aber dadurch vermeiden lassen, dass der vorausfahrende Verkehr über das unmittelbar vorangehende Fahrzeug hinaus überwacht werden kann? Die spezifische Wirkung des Nebels bestünde dann vor allem darin, dass die Überwachung des übrigen vorausfahrenden Verkehrs wegfällt.

Schließlich nimmt SCHÖNBACH an, dass bei Nebel und Kolonnenfahren eine dritte Bedingung hinzukommen muss, um eine unangepasste Fahrgeschwindigkeit zu bewirken, nämlich das Beschleunigen des vorausfahrenden bzw. das Drängeln des nachfolgenden Fahrzeugs der Kolonne.

Die nachfolgenden Untersuchungen überprüfen schrittweise die einzelnen Annahmen.

4.1.2 Fragestellungen

In drei Modelluntersuchungen werden folgende Fragestellungen untersucht.

1. Wie verhält sich ein Testfahrer bei Nebel als Einzelner und in der Gruppe, wenn der Abstand zum vorausfahrenden oder nachfolgenden Fahrzeug konstant bleibt, also die dritte notwendige Bedingung für unangepasstes Fahren

nach SCHÖNBACH – die Beschleunigung mitfahrender Fahrzeuge in der Kolonne – nicht gegeben ist? Es wird erwartet, dass der Fahrer seine frei gewählte Fahrgeschwindigkeit den Sichtbedingungen anpasst, vergleichbar in der Einzel- und Kolonnenfahrt. Die Alternativhypothese besagt, dass bei der Kombination von schlechter Sichtbedingung (Nebel) und Kolonnenfahrt die Fahrgeschwindigkeit überproportional erhöht wird.

2. Wie verhält sich der Testfahrer in der Gruppe unter verschiedenen Sichtbedingungen, wenn vorausfahrende bzw. nachfolgende Fahrzeuge beschleunigen? Nach SCHÖNBACH wird erwartet, dass die Fahrgeschwindigkeit mit Verschlechterung der Sichtbedingung und zunehmender Beschleunigung des mitfahrenden Fahrzeugs überproportional erhöht wird. Alternativhypothese ist, dass beide Bedingungsmerkmale keine oder unabhängige Effekte aufweisen.
3. Welche Zeitlücke stellen Testfahrer als für sie optimal ein, wenn sie in der Kolonne unter verschiedenen Sichtbedingungen die Möglichkeit haben, den Abstand zum mitfahrenden Fahrzeug zu regulieren? Sind es nach SCHÖNBACH nicht bewusste Anpassungen der Fahrgeschwindigkeit bei Nebel und Kolonnenfahrt, dann sollten die gewählten Zeitlücken überproportional unangepasst unter dieser Bedingungskombination sein.

4.1.3 Untersuchungsmethode

Die Untersuchungen fanden an dem Fahrsimulator des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften (WIVW) statt, der mit allen notwendigen Komponenten für ein realitätsnahes Bild des Realfahrzeugs und des Realverkehrs ausgestattet ist.

Die Bewegungssimulation der Firma Fokker Control Systems bietet sechs Freiheitsgrade und ist somit in der Lage, alle notwendigen Quer- und Längsbeschleunigungen zu simulieren. Das Sichtsystem bietet eine 180° x 40° Frontsicht auf einer sphärischen Leinwand. Für die Rückansicht werden TFT-Displays an den Positionen der Rück- und Außenspiegel verwendet. Sämtliche Fahr- und Verkehrsgeräusche werden über ein hochwertiges Soundsystem wiedergegeben. Die computergenerierte Darstellung der Verkehrsszene, des autonomen Verkehrs und, für unsere Untersuchung be-



Bild 9: Bilder des Simulators in Würzburg. Links eine Außenansicht mit dem Bewegungssystem, rechts das Fahrzeug und die sphärische Leinwand

sonders wichtig, der Umweltbedingungen ist realitätsnah und flexibel veränderbar. So ermöglicht der Simulator dem Versuchsleiter, die auf das Versuchsdesign zugeschnittene Konstruktion der erforderlichen Szenarien selbst vorzunehmen. Damit war es für uns möglich, notwendige Spezifikationen der Autobahnstrecke, wie zum Beispiel das Fehlen der Seitenpfosten und die Implementierung von Baumgruppen, durchzuführen. Auch das Verhalten nachfolgender und vorausfahrender Kolonnenfahrzeuge konnte so präzise und den Versuchsplänen entsprechend vorprogrammiert werden. Bild 9 zeigt Bilder des Simulators.

Der Simulator basiert auf mehreren vernetzten PC-Workstations, die für einzelne Bereiche (Bewegung, Akustik, Sicht usw.) zuständig sind, und einer Verwaltungsinstanz, die die unterschiedlichen Softwarekomponenten auf verschiedene Computer verteilt und in Echtzeit koordiniert.

Der Simulator erlaubt die Erfassung aller Fahrparameter (Geschwindigkeit, Bremsen, Beschleunigen usw.) und einer Reihe von Beanspruchungsparametern (Herzrate, Lidschluss u. a.).

Die Versuchspersonen stammen aus einem Versuchspersonenpool, die speziell für diesen Simulator ein umfangreiches Einführungsprogramm absolviert haben. Alle Teilnehmer sind somit an das Fahren in diesem Simulator gewöhnt und mit verschiedenen Untersuchungsmethoden vertraut.

4.2 Modelluntersuchung 1

Das Ziel der ersten Modelluntersuchung bestand zunächst darin, zu überprüfen, wie sich ein Testfahrer bei Nebel als Einzelner und in der Gruppe

verhält, wenn der Abstand zum vorausfahrenden oder nachfolgenden Fahrzeug konstant bleibt. Ausgehend von den Hypothesen von SCHÖNBACH wurde das Fahren in einer Kolonne repräsentiert durch zwei Fahrbedingungen mit einem vorausfahrenden oder einem nachfolgenden Fahrzeug. Darüber hinaus wurde aber auch das Fahrverhalten in einer Einzelfahrt, also ohne Führungs- oder Nachfolgefahrzeug, betrachtet. In dieser ersten Modelluntersuchung interessierten mögliche Verhaltensänderungen beim Beschleunigen des vorausfahrenden oder nachfolgenden Fahrzeugs nicht. Daher sollte der Abstand zwischen dem Fremdfahrzeug und dem Fahrzeug der Versuchsperson zunächst konstant gehalten werden.

4.2.1 Versuchsplan

Realisiert wurde eine sieben Kilometer lange Strecke auf einer Autobahn mit zwei Fahrspuren für jede Richtung, mit Mittellinie und Seitenlinien, allerdings ohne Mittelleitplanke und Seitenpfosten. Insgesamt gab es vier lang gezogene Kurven mit einem großen Kurvenradius. Das Durchfahren der Kurven erforderte auch bei hohen Geschwindigkeiten keine Geschwindigkeitsreduktion aufgrund der Fliehkräfte. Auf der Gegenfahrbahn fuhren in unregelmäßigen Abständen Fahrzeuge (verschiedene Pkw). Diese Fahrzeuge fuhren immer mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Testfahrzeug, sodass ein Rückschluss über die eigene Geschwindigkeit aufgrund der anderen Fahrzeuge nicht möglich war. Die Strecke war in unregelmäßigen Abständen von Bäumen und Baumgruppen gesäumt.

Obwohl sich die Ergebnisse von SNOWDEN nicht replizieren ließen, haben wir doch seine Methode

	Klare Sicht	Nebel 80 m	Nebel 50 m
Einzelfahrt	-	-	-
Kolonnenfahrt mit vorausfahrendem Kfz	125 m	70 m	40 m
Kolonnenfahrt mit nachfolgendem Kfz	125 m	70 m	40 m

Tab. 6: Fahrt- und Sichtbedingungen im Versuchsplan von Modelluntersuchung 1 mit Abstand des vorausfahrenden bzw. folgenden Fahrzeuges in Metern

des Fahrens ohne Geschwindigkeitsrückmeldung per Tacho weiterhin übernommen. Ebenfalls in Anlehnung an SNOWDEN et al. werden drei Witterungsbedingungen realisiert: eine Normalsichtbedingung ohne Sichteinschränkung, im Folgenden auch Klarsichtbedingung genannt, eine Nebelbedingung mit ca. 80 m Sichtweite und eine Nebelbedingung mit ca. 50 m Sichtweite. Zusammen mit den drei Fahrbedingungen (Einzelfahrt, Fahrt mit vorausfahrendem Fahrzeug und Fahrt mit nachfolgendem Fahrzeug) ergeben sich somit $3 \times 3 = 9$ Versuchsbedingungen.

Zwar sollten, wie bereits erwähnt, die Abstände der vorausfahrenden bzw. nachfolgenden Fahrzeuge zum Fahrzeug der Versuchsperson konstant gehalten werden, das war aber nur möglich, wenn in den einzelnen Sichtbedingungen unterschiedliche Abstände festgelegt werden. In der Nebelbedingung mit 50 m Sichtweite ist ein maximaler Abstand von 40-50 m möglich, da das andere Fahrzeug für den Fahrer sonst nicht mehr sichtbar ist. Dieser Abstand wäre aber in der Klarsichtbedingung aufgrund der viel höheren Geschwindigkeiten viel zu gering. Daher wurden Abstände von 40 m in der starken Nebelbedingung, 70 m in der mittleren Nebelbedingung und 125 m in der Klarsichtbedingung realisiert. Für die Nebelbedingungen bleiben die Fremdfahrzeuge somit immer im sichtbaren Bereich. Insgesamt liegen die Zeitlücken zum Fremdfahrzeug, bei zu erwartenden Geschwindigkeiten von ca. 50 km/h im starken Nebel, ca. 80 km/h im mittleren Nebel und ca. 140 km/h bei klarer Sicht, in allen Sichtbedingungen konstant im Bereich von ca. 3 Sekunden. Tabelle 6 verdeutlicht noch einmal den Versuchsplan

4.2.2 Durchführung und Auswertung

An der Untersuchung nahmen 24 Probanden teil. Die Versuchspersonen waren zwischen 20 und 61 Jahren alt, das Durchschnittsalter betrug 29 Jahre. Es nahmen zehn Frauen und 14 Männer an der Untersuchung teil.

Die Beschränkung auf die nach SCHÖNBACH besonders gefährdete Gruppe der männlichen Fahrer zwischen 18 und 29 Jahren wurde zunächst aufgegeben. Da die Voruntersuchungen gezeigt hatten, dass es sinnvoll ist, vor einer empirischen Überprüfung der SCHÖNBACHschen Annahmen grundlegende Verhaltensweisen beim Fahren im Nebel zu klären, wurde die Anzahl der Versuchspersonen erhöht und die Einschränkung auf die Gruppe der jungen Männer aufgehoben.

Die aus dem Versuchsplan (Tabelle 6) resultierenden neun Versuchsfahrten wurden von allen Versuchspersonen in einer zufälligen Reihenfolge auf der 7 km langen Teststrecke absolviert. Dabei wurde darauf geachtet, dass jede Versuchsperson mit einer Klarsichtbedingung starten konnte. Vor den Versuchsfahrten absolvierten die Versuchspersonen eine Eingewöhnungsfahrt. Nach den Versuchsfahrten wurde die erste Fahrt (Klarsichtfahrt) noch einmal wiederholt, um mögliche Übungseffekte zu überprüfen. Die Versuchspersonen wurden instruiert, mit gleichmäßigem Tempo sicht- und sicherheitsangemessen zu fahren. Nach jeder Fahrt wurden die Teilnehmer nach ihren subjektiven Eindrücken ihres Fahrverhaltens befragt. Jede Versuchsperson absolvierte die Teststrecke in allen Bedingungen komplett. Je nach Geschwindigkeit dauerte eine Fahrt zwischen vier und zehn Minuten.

Ausgewertet wurden Fahrgeschwindigkeit, Spurhalteverhalten und weitere Parameter der Fahrodynamik sowie die subjektiven Einschätzungen der Fahrer.

4.2.3 Ergebnisse

Geschwindigkeitsverhalten

Zur Auswertung der Geschwindigkeit wurde eine Varianzanalyse mit dem dreistufigen Faktor Nebel (50 m, 80 m, klar) und dem dreistufigen Faktor Fahrt (Einzelfahrt, mit nachfolgendem bzw. vorausfahrendem Fahrzeug) gerechnet.

Die mittleren Geschwindigkeiten sinken mit zunehmendem Nebel (siehe Bild 11), der Haupteffekt Nebel der Varianzanalyse wird signifikant [$F(2,69) = 23,48; p < 0,001$]. Bei klarer Sicht fahren die Versuchspersonen im Mittel 144 km/h, bei Nebel mit einer Sichtweite von 80 m fahren sie im Mittel mit 99 km/h und bei einer Sichtweite von 50 m fahren sie im Mittel 83 km/h schnell. Damit sind die Geschwindigkeiten im Nebel deutlich schneller, als es

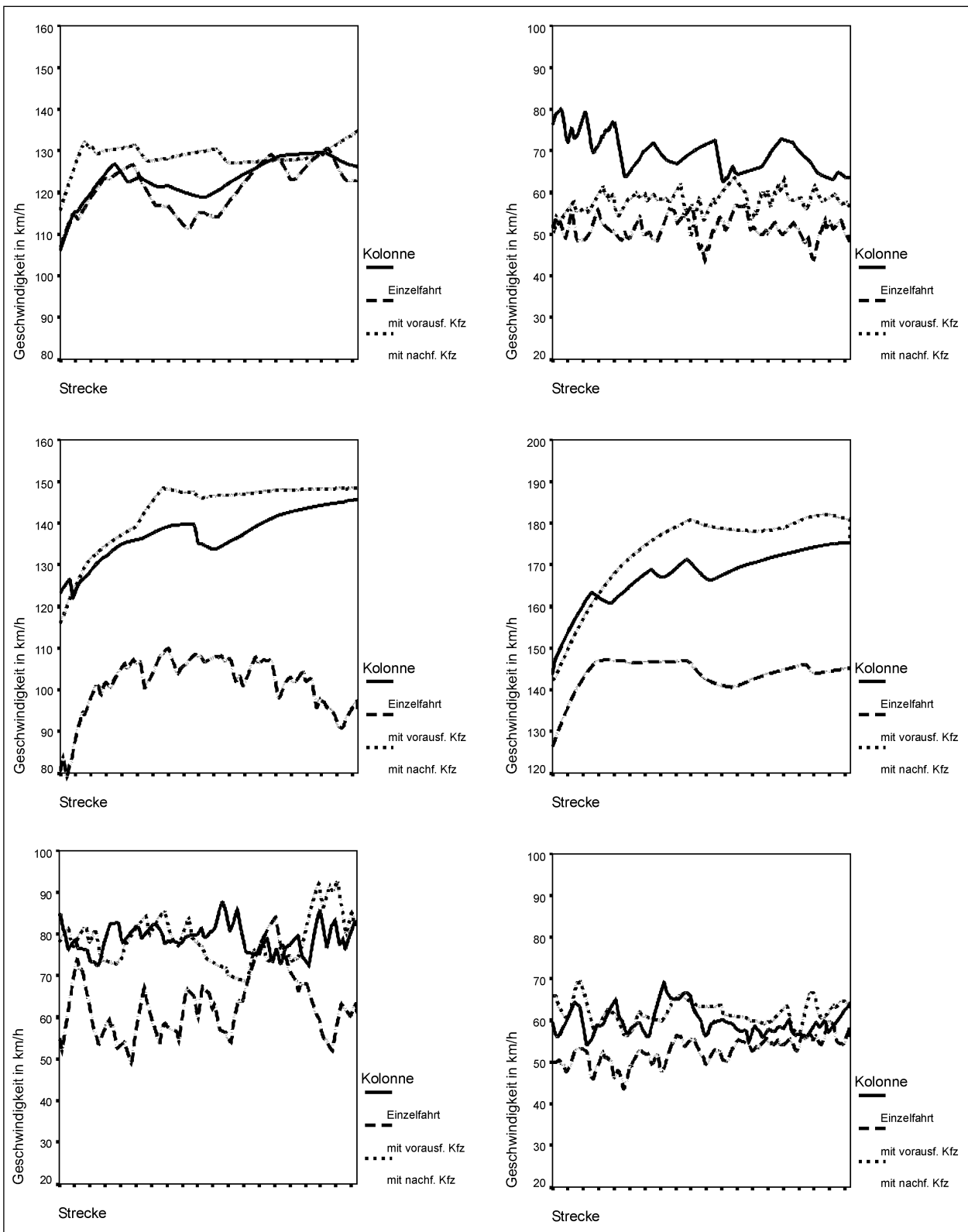


Bild 10: Geschwindigkeitsverläufe über die Fahrtstrecke am Beispiel von drei Versuchspersonen (Fahrten für jede Versuchsperson jeweils nebeneinander). Jedes Einzelbild enthält die Verläufe für eine Fahrt. Die linke Spalte zeigt Fahrten bei klarer Sicht, die rechte bei starkem Nebel (50 m)

die Sichtweite eigentlich erlaubt. Die Ursachen für diese überhöhte Geschwindigkeit im Nebel werden später näher beleuchtet.

Die mittlere Geschwindigkeit bei einem vorausfahrenden Pkw ist unter allen Sichtbedingungen niedriger als bei der Einzelfahrt und der Fahrt mit nach-

folgendem Kfz (Bild 11), der Haupteffekt Fahrt wird allerdings knapp nicht signifikant [$F(2,69) = 2,18$; $p = 0,077$]. Bezieht man nur die Einzelfahrten und die Kolonnenfahrten mit vorausfahrendem Fahrzeug in die Berechnung ein, wird die entsprechende Varianzanalyse aber signifikant [$F(1,46) = 4,32$; $p < 0,05$]. Bei Fahrten mit nachfolgendem Fahrzeug zeigen sich hingegen keine Effekte, die gefahrenen Geschwindigkeiten mit nachfolgendem Fahrzeug unterscheiden sich jeweils nicht von denen der Einzelfahrten. Die Geschwindigkeitsabnahme bei Nebel ist unabhängig von der Fahrbedingung, die entsprechende Interaktion wird nicht signifikant.

Die Geschwindigkeitsanalyse der Fahrten der einzelnen Probanden im Verlaufsprofil zeigt, dass ihr Fahrverhalten relativ variantenreich und interindividuell wenig homogen ist. Es lassen sich anhand der Geschwindigkeitsprofile verschiedene Fahrertypen unterscheiden, allerdings ist eine Abgrenzung nicht immer klar zu treffen.

Etwa die Hälfte der Versuchspersonen wählt im Mittel eine im Rahmen der StVO angemessene Geschwindigkeit, sodass sie innerhalb der Sichtweite hätten anhalten können. Diese Probanden werden streckenweise jedoch etwas schneller und auf anderen Streckenabschnitten wiederum langsamer. Bei anderen Fahrern wechseln leichte Beschleunigungen und Verzögerungen schneller ab, der Wechsel ist dabei aber hochfrequenter. Diese Fahrer, etwa ein Drittel der Versuchspersonen, haben im Nebel insgesamt ein leicht zu hohes Geschwindigkeitsniveau gemessen an den Bestimmungen der StVO. Die übrigen Fahrer (ca. 20 %) reduzieren ihre Geschwindigkeit im Nebel nicht ausreichend und fahren nicht den Sichtverhältnissen angemessen. Dafür sind bei ihnen die Geschwindigkeitsschwankungen am geringsten. Bild 10 zeigt beispielhaft die Geschwindigkeitsverläufe von drei Versuchspersonen jeweils bei klarer Sicht und im Nebel. Es fallen sofort die glatten Geschwindigkeitsverläufe bei klarer Sicht und die stärker oszillierenden Profile im Nebel auf. Lediglich bei der in der Mitte dargestellten Person variiert die Geschwindigkeit bei klarer Sicht auch in der Fahrt mit vorausfahrendem Fahrzeug stärker. Diese Fahrt ist auch deutlich langsamer als die anderen Fahrten dieser Person bei klarer Sicht. Offenbar ist der feste Abstand für diesen Fahrer unterhalb seines bevorzugten minimalen Folgeabstands, was er durch eine geringere Geschwindigkeit zu kompensieren versucht.

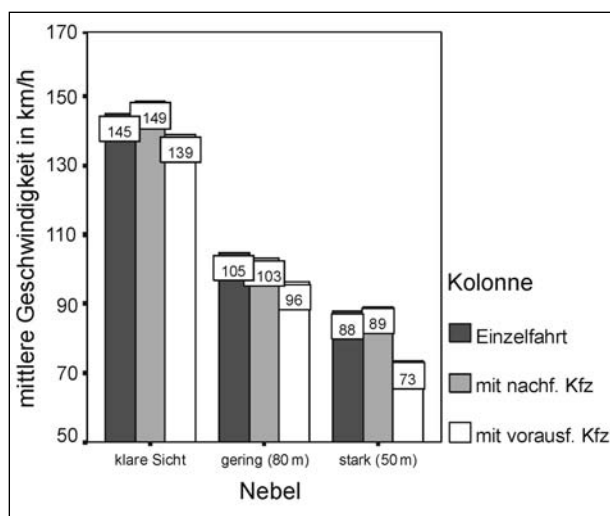


Bild 11: Mittlere Geschwindigkeit in Abhängigkeit von den Sichtbedingungen (Nebel) und den Fahrtbedingungen (Kolonne) in Modelluntersuchung 1

Insgesamt ist das Fahrverhalten also interindividuell verschieden und sehr variabel. Die Geschwindigkeit schwankt bei Nebel mit höherer Frequenz und höherer Amplitude um den Mittelwert. Die Frequenz dieser Oszillation scheint dabei mit zunehmendem Nebel anzusteigen. Bei Nebel ist der Geschwindigkeitsverlauf also weniger gleichmäßig als bei klarer Sicht. Eine genauere Diskussion des Oszillationsphänomens erfolgt im Abschnitt 4.4.4.

Subjektive Einschätzungen

Die Fahrer empfinden generell die Nebelbedingungen als realitätsgetreu und schätzen ihr eigenes Fahrverhalten als sicht- und sicherheitsangemessen ein. Die meisten Befragten empfinden das vorausfahrende Fahrzeug als Orientierungshilfe und merken nicht, dass dessen Geschwindigkeit an ihre eigene gekoppelt ist. An das nachfolgende Fahrzeug erinnern sich nur wenige der Befragten. Diese gaben an, es nur wenig beachtet zu haben.

Die subjektiv berichteten Geschwindigkeiten lagen deutlich unter den tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten. Die eigene Geschwindigkeit wurde also deutlich unterschätzt. Bild 12 verdeutlicht, dass das Ausmaß der Unterschätzung tendenziell mit zunehmendem Nebel steigt. Während die Geschwindigkeit in der Klarsichtbedingung im Mittel um 20 km/h unterschätzt wird, wird sie in den Nebelbedingungen um durchschnittlich 28 km/h unterschätzt. Allerdings werden weder Unterschiede zwischen den Nebelbedingungen noch zwischen den Kolonnenbedingungen statistisch signifikant.

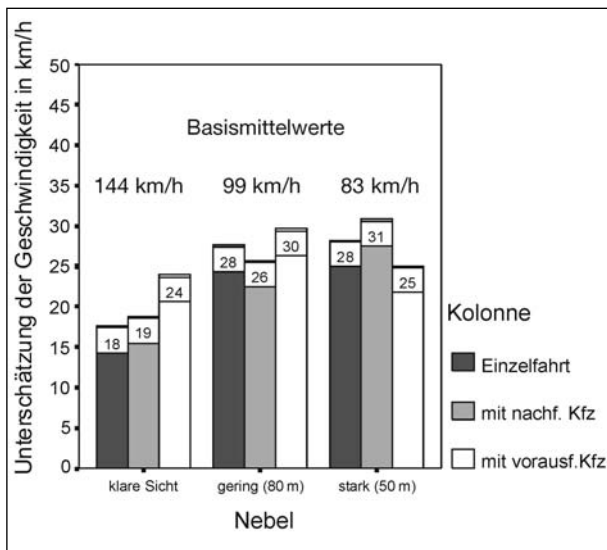


Bild 12: Unterschätzung der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit in km/h in Modelluntersuchung 1

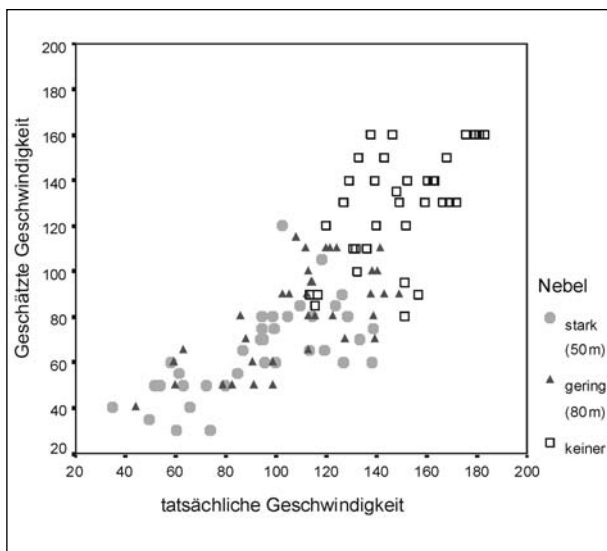


Bild 13: Tatsächliche und geschätzte Geschwindigkeiten im Vergleich; Modelluntersuchung 1

Angesichts dieser Unterschätzung der eigenen Geschwindigkeit gerade im Nebel erscheinen die tatsächlich zu hohen Geschwindigkeiten im Nebel in einem anderen Licht. Die Versuchspersonen sind also nicht bewusst schneller gefahren, als sie sollten, sondern sie sind nach ihrer Einschätzung sicht- und sicherheitsangemessen gefahren. Bild 13 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

Sind die tatsächlichen Geschwindigkeiten im Nebel häufig zu hoch, so bleiben die subjektiv empfundenen Geschwindigkeiten zumeist doch in einem Bereich, der für die jeweiligen Sichtbedingungen als noch angemessen erscheint.

4.2.4 Diskussion

Es zeigt sich in der ersten Modelluntersuchung, dass das Fahrverhalten bei Nebel im Simulator durchaus vergleichbar mit den Beobachtungen im realen Verkehr ist. Die Geschwindigkeit wird bei Nebel zwar vermindert, jedoch nicht so weit, wie es die Sichtverhältnisse eigentlich erfordern. Der von SCHÖNBACH postulierte Druck- und Sogeffekt konnte und sollte in der ersten Modelluntersuchung noch nicht evaluiert werden. Dennoch können die Ergebnisse bereits im Hinblick auf die SCHÖNBACHschen Hypothesen betrachtet werden:

Auf den ersten Blick scheint der Befund einer geringeren Geschwindigkeit bei einem vorausfahrenden Fahrzeug der Soghypothese von SCHÖNBACH zu widersprechen, da nach SCHÖNBACH die Geschwindigkeit steigen müsste. Allerdings sind in dieser Versuchsanordnung die Bedingungen hierzu auch gar nicht gegeben, da das Vorderfahrzeug mit festem Abstand an das Versuchsfahrzeug gekoppelt war, was die Probanden allerdings nicht bemerkten.

Es kann festgehalten werden, dass das Geschwindigkeitsverhalten überhaupt durch den vorausfahrenden Pkw beeinflusst worden ist. Da dieses immer die gleiche Geschwindigkeit einhält wie das Fahrzeug der Versuchsperson, bleibt es für die Versuchsperson immer im Sichtbereich, egal wie schnell die beiden Fahrzeuge fahren. Eine Geschwindigkeitserhöhung ist daher nicht zu erwarten. Die Geschwindigkeitsreduktion ist aus folgendem Grund plausibel: Aufgrund der insgesamt überhöhten Geschwindigkeit im Nebel und des gleichzeitig festen Abstandes zum Vorderfahrzeug entstehen im Nebel kürzere Zeitlücken zum Vorderfahrzeug als eigentlich vorgesehen. Die Versuchspersonen können diese geringeren Zeitlücken nur durch eine verminderte Geschwindigkeit ausgleichen. Auch in den Felduntersuchungen auf der Autobahn zeigt sich immer wieder, dass die Geschwindigkeit bei Einzelfahrern höher liegt als die Geschwindigkeit von Kolonnen (vgl. Kapitel 5), der Effekt kann daher nicht als Artefakt der Simulator-situation angesehen werden.

Neben den erhöhten mittleren Geschwindigkeiten ist in der Modelluntersuchung 1 insbesondere das variable Fahrverhalten der Versuchspersonen aufgefallen. Während bei klarer Sicht die Geschwindigkeit, unabhängig von der Kolonnenbedingung, gleichmäßig und ohne Schwankungen über die ge-

samte Fahrstrecke eingehalten wird, kommt es im Nebel zu Schwankungen in zweifacher Weise. Zum einen wählen einige Fahrer zunächst häufig eine Geschwindigkeit, die sie im Laufe der Fahrt zum Teil mehrmals korrigieren. Das heißt, sie probieren mehrere Geschwindigkeiten aus und überprüfen dann, welche wohl für sie den Sichtverhältnissen am angemessensten ist. Auf Nachfragen bei diesen Versuchspersonen bestätigten diese, dass sie tatsächlich verschiedene Geschwindigkeiten ausprobiert haben, um sicher zu sein, nicht zu schnell, aber auch nicht zu langsam zu fahren. Die verminderten Möglichkeiten der Geschwindigkeitswahrnehmung durch externe Faktoren im Nebel scheint dieses Suchverhalten mit zu verursachen. Darüber hinaus scheint dieser Effekt wohl auch durch die fehlende Geschwindigkeitskontrolle durch den Tacho determiniert zu sein und ist somit auch eine Folge der Versuchsdurchführung.

Die zweite Art der Geschwindigkeitsschwankungen im Nebel ist von kleiner Amplitude, aber höherer Frequenz und den Versuchspersonen überhaupt nicht bewusst. Sie schwanken mit einer Differenz von ca. 10 km/h um ihre mittlere Geschwindigkeit, und zwar in gleichmäßigen Abständen (etwa zwei Mal pro Kilometer). Fast alle Fahrer zeigen diese erhöhte Geschwindigkeitsvariabilität im Nebel. Die Fahrer werden geringfügig schneller, reduzieren dann ihre Geschwindigkeit wieder etwas und so weiter. Es hat den Anschein, als würden sie sich immer wieder an ihren persönlichen Grenzwert herantasten. Sie verhalten sich also so, wie in den Modellen zum Fahrverhalten in Kolonnen (vgl. DIEKAMP, 1995) für das Fahren hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug beschrieben. Das Erreichen eines minimalen Folgeabstands führt zu einer geringfügigen Geschwindigkeitsrücknahme, das Erreichen eines maximalen Folgeabstands führt zu einer kurzfristigen Geschwindigkeitserhöhung. Einige Fahrer (siehe auch Bild 11) zeigen dieses Verhalten auch bei klarer Sicht und vorausfahrendem Kolonnenfahrzeug. Die Sichteinschränkung durch Nebel hat also ähnliche Auswirkung wie ein vorausfahrendes Fahrzeug und führt zu einer erhöhten Oszillation der Geschwindigkeit. Grund hierfür ist möglicherweise das fahrerspezifische Abstandsverhalten. Die Fahrer variieren ihre Geschwindigkeit, genauso wie beim Folgen eines anderen Kraftfahrzeugs, infolge eines Pendelns zwischen minimalem und maximalem (Folge-)Abstand zur Sichtgrenze. Dieser Hypothese wird in den nachfolgenden Untersuchungen weiter nachgegangen werden.

Das schwankende, oszillierende Fahrverhalten im Nebel kann zu kritischen Differenzgeschwindigkeiten führen, die sich in Kolonnen verstärken und im Nebel zum Entstehen von Massenergebnissen entscheidend beitragen können. Auch ohne den Druck-Sog-Effekt von SCHÖNBACH lassen sich also aufgrund eines veränderten Fahrverhaltens, auch bei Einzelfahrern, bereits Hinweise für das Entstehen von Nebelunfällen finden. Diese Effekte sind auf die eingeschränkten Wahrnehmungsmöglichkeiten der Geschwindigkeit zurückzuführen und den Fahrern zumeist nicht bewusst.

Die Ergebnisse der Modelluntersuchung 1 geben Hinweise darauf, dass die Hypothese von SCHÖNBACH zumindest nicht umfassend und vollständig das Fehlverhalten im Nebel erklärt. Denn auch ohne eine Kolonne und das Drängen und Ziehen nachfolgender und vorausfahrender Fahrzeuge kommt es zu Verhaltensmustern, die das Entstehen von kritischen Situationen begünstigen können.

4.3 Modelluntersuchung 2

Die Ergebnisse der Modelluntersuchung 1 haben gezeigt, dass der eingesetzte Simulator des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften (WIVW) das Fahrverhalten bei Nebel realitätsgetreu abbildet und unterschiedliche Fahrsituationen des Kolonnenfahrens realisiert werden können. Es zeigte sich, dass sich beim Fahren hinter einem anderen Pkw in konstantem Abstand die Fahrgeschwindigkeit reduziert. In der zweiten Modelluntersuchung sollten nun explizit die Thesen von SCHÖNBACH untersucht werden. Es interessieren insbesondere die Verhaltensänderungen bezüglich Geschwindigkeit und Abstand, wenn das nachfolgende oder das vorausfahrende Fahrzeug in einer Kolonne beschleunigt und so im Sinne von SCHÖNBACH Druck bzw. Sog auf den Fahrer ausübt.

4.3.1 Versuchsplan

Die im Simulator programmierte Strecke entsprach in ihrem Aufbau der Strecke aus Modelluntersuchung 1. Wieder fehlten Mittel- und Seitenlinie, die Kurven waren lang gezogen, es gab Gegenverkehr und in unregelmäßigen Abständen Bäume und Baumgruppen. Um genügend Zeit für die notwendigen Beschleunigungsvorgänge zu haben, wurde die Strecke auf 9 km verlängert. Die Charakteristik der Strecke änderte sich dabei nicht.

	Klare Sicht		Nebel 80 m		Nebel 50 m	
Mit vorausfahrendem Fahrzeug	Beschl. 15 %	Beschl. 30 %	Beschl. 15 %	Beschl. 30 %	Beschl. 15 %	Beschl. 30 %
Mit nachfolgendem Fahrzeug	Beschl. 15 %	Beschl. 30 %	Beschl. 15 %	Beschl. 30 %	Beschl. 15 %	Beschl. 30 %

Tab. 7: Fahrt- und Sichtbedingungen im Versuchsplan von Modelluntersuchung 2. Angabe des Ausmaßes der Beschleunigung des vorausfahrenden bzw. folgenden Fahrzeuges in Prozent der jeweils aktuellen Geschwindigkeit

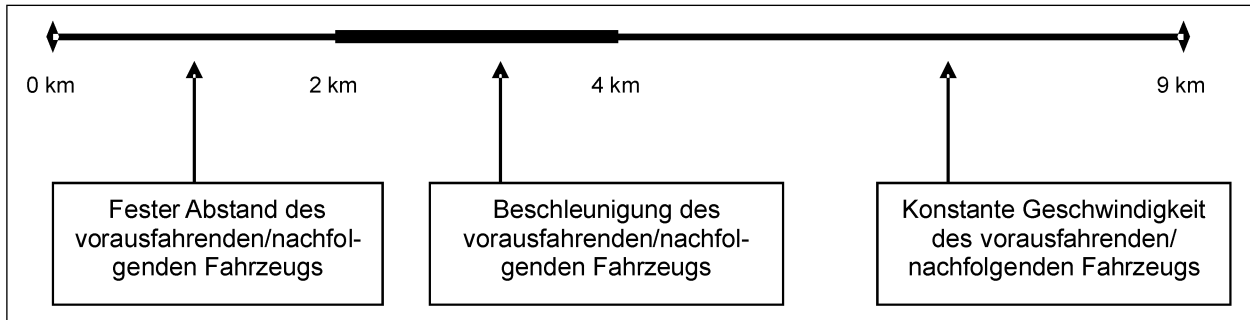


Bild 14: Ablauf einer Versuchsfahrt in der Modelluntersuchung 2

Auch in der Modelluntersuchung 2 mussten die Teilnehmer ohne Geschwindigkeitsrückmeldung per Tacho fahren. Die drei Sichtbedingungen, Normalsichtbedingung ohne Sichteinschränkung, Nebelbedingung mit ca. 80 m Sichtweite und Nebelbedingung mit ca. 50 m Sichtweite, blieben erhalten. Allerdings wurden von den drei Fahrbedingungen der Modelluntersuchung 1 nur noch die Kolonnenfahrten, also die Fahrten mit vorausfahrendem oder mit nachfolgendem Fahrzeug, realisiert. Die Einzelfahrt ohne begleitende Fahrzeuge interessierte zur Überprüfung des Sog- bzw. Druckeffektes nicht.

Um das Fahrverhalten bei unterschiedlichem Beschleunigungsverhalten der begleitenden Kolonnenfahrzeuge detailliert beleuchten zu können, wurde eine dritte unabhängige Variable eingeführt, der Grad der Beschleunigung des vorausfahrenden bzw. nachfolgenden Fahrzeuges. Die vorausfahrenden oder nachfolgenden Kolonnenfahrzeuge beschleunigen entweder mit $0,3 \text{ m/s}^2$ auf eine 15 % höhere Differenzgeschwindigkeit oder mit $0,1 \text{ m/s}^2$ auf eine 30 % höhere Differenzgeschwindigkeit. Die Basis für die Differenzgeschwindigkeit wurde nach zwei Kilometern Fahrt erhoben. Bis dahin waren Abstand und Geschwindigkeit des vorausfahrenden bzw. des nachfolgenden Fahrzeuges, wie in Modelluntersuchung 1, an das Fahrzeug der Versuchsperson gebunden. Das heißt, sie fuhren immer genauso schnell wie die Versuchsperson in konstantem Abstand vorweg oder hinterher. Ab km 2 beschleunigen die Kolonnenfahrzeuge unabhängig vom Fahrzeug der Versuchsperson auf die Differenzgeschwindigkeit. Wenn sie diese erreicht

haben, fahren sie konstant mit dieser höheren Geschwindigkeit weiter. Bild 14 verdeutlicht den Ablauf einer Versuchsfahrt.

Die Versuchsperson kann nun dem vorausfahrenden Fahrzeug folgen und ebenfalls ihre Geschwindigkeit erhöhen. Tut sie es nicht, wird das vorausfahrende Fahrzeug sich allmählich entfernen und in den Nebelbedingungen auch außer Sicht geraten. In den Fahrbedingungen mit nachfolgendem Fahrzeug beschleunigt dieses bis zu einer Mindestzeitlücke von einer Sekunde, lässt sich dann wieder etwas zurückfallen und läuft dann immer wieder auf das Testfahrzeug auf, überholt es aber nicht. So wird sicher maximaler Druck im Sinne von SCHÖNBACH ausgeübt.

Es ergab sich somit ein $3 \times 2 \times 2$ Versuchsplan mit drei Sicht-, zwei Fahrt- und zwei Beschleunigungsbedingungen (vgl. Tabelle 7).

4.3.2 Durchführung und Auswertung

An der Untersuchung nahmen dieselben 24 Versuchspersonen teil wie in der Modelluntersuchung 1. Die Fahrer kannten somit alle bereits die Versuchsstrecke und die verschiedenen Sicht- und Fahrbedingungen und die Instruktion, immer sichtbar und sicherheitsangemessen zu fahren.

Die aus dem Versuchsplan (Tabelle 7) resultierenden zwölf Versuchsfahrten wurden von allen Versuchspersonen in einer zufälligen Reihenfolge auf der 9 km langen Teststrecke absolviert. Dabei wurde wieder darauf geachtet, dass jede Versuchsperson mit einer Klarsichtbedingung starten

konnte. Vor den Versuchsfahrten absolvierten die Versuchspersonen eine Eingewöhnungsfahrt, auf der sie mehrmals ihre Geschwindigkeit schätzten oder eine vorgegebene Geschwindigkeit einstellen sollten. Nach jeder Fahrt wurden die Teilnehmer wieder nach den subjektiven Eindrücken ihres Fahrverhaltens befragt.

Die Fahrer wurden instruiert, in allen Fahrten zügig auf eine für sie sicht- und sicherheitsangemessene Geschwindigkeit zu beschleunigen und dann unter Berücksichtigung des Fahrverhaltens anderer Fahrzeuge weiterzufahren. Wieder mussten die Fahrer die Strecke jeweils komplett durchfahren. Die einzelnen Fahrten dauerten je nach gewählter Geschwindigkeit zwischen fünf und zwölf Minuten.

Ausgewertet wurden wieder Fahrgeschwindigkeit und weitere Parameter der Fahrdynamik sowie die subjektiven Einschätzungen der Fahrer.

4.3.3 Ergebnisse

Geschwindigkeiten

Zunächst werden wieder die mittleren Geschwindigkeiten betrachtet, anschließend die Geschwindigkeitsverläufe und die Definition und Klassifikation eines Verhaltens im Sinne der Druck-Sog Hypothese.

Nach den ersten zwei Kilometern Fahrt, die vom Ablauf her den Fahrten in der Modelluntersuchung 1 entsprechen, sind die Geschwindigkeiten auch weitgehend mit denen in der Modelluntersuchung 1 identisch (siehe Bild 15). Die Geschwindigkeit wird den Sichtverhältnissen entsprechend im Nebel reduziert, aber doch nicht so weit, wie es aus Sicherheitsgründen eigentlich notwendig wäre. In einer Kolonne mit vorausfahrendem Fahrzeug wird in allen Sichtbedingungen im Mittel um 5-10 km/h langsamer gefahren als in einer Kolonne mit nachfolgendem Fahrzeug. Auch dieses Ergebnis entspricht den Befunden aus der Modelluntersuchung 1 und aus den Analysen von Autobahndaten. In der entsprechenden Varianzanalyse mit Messwiederholung werden, bezogen auf die Geschwindigkeit bei zwei Kilometern, der Faktor Nebel [$F(2,69) = 209,67$; $p < 0,001$] und auch der Faktor Kolonnenfahrt [$F(1,46) = 12,75$; $p < 0,001$] signifikant.

Zwei Kilometer später haben die begleitenden Kolonnenfahrzeuge ihre Beschleunigung auf eine um 15 % bzw. 30 % höhere Differenzgeschwindigkeit nahezu abgeschlossen. Die Versuchspersonen sind dem vorausfahrenden Fahrzeug zumindest

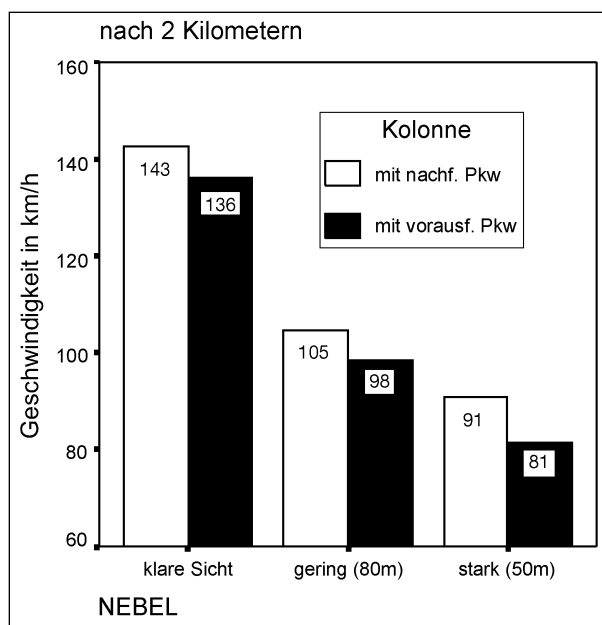


Bild 15: Mittlere Geschwindigkeit nach 2 Kilometern (dem Zeitpunkt des Entkoppelns des Kolonnenfahrzeugs), getrennt nach Sichtbedingung und Kolonnenfahrt in Modelluntersuchung 2

zum Teil gefolgt, denn im Sog des vorausfahrenden Kolonnenfahrzeugs sind die Fahrer im Nebel im Schnitt um 12 bzw. 14 km/h schneller geworden und fahren nun auch schneller als bei einem nachfolgenden Kolonnenfahrzeug, bei dem sie die Geschwindigkeit nicht erhöht haben. Aber auch in der Klarsichtbedingung haben sie ihre Geschwindigkeit erhöht. Bild 16 verdeutlicht die Entwicklung. In der Varianzanalyse bezogen auf die Geschwindigkeit bei 4 Kilometern ist nach wie vor der Faktor Nebel signifikant [Varianzanalyse $F(2,69) = 181,09$; $p < 0,001$]. Allerdings ist der Unterschied zwischen den Kolonnenbedingungen nicht signifikant [Varianzanalyse $F(1,46) = 0,27$; $p > 0,1$]. In der Bedingung mit vorausfahrendem Fahrzeug wird also, wenn nicht substanziell schneller, auch nicht langsamer gefahren als bei nachfolgendem Fahrzeug. Der Geschwindigkeitsdifferenz wurde also ausgeglichen.

Am Ende der Versuchsstrecke, nach sieben Kilometern, reduziert sich die Geschwindigkeit in Begleitung eines vorausfahrenden Fahrzeugs wieder leicht und ist dann bei allen Sichtbedingungen etwa gleich hoch wie in der Bedingung mit nachfolgendem Fahrzeug, in der sich die Geschwindigkeiten nach wie vor nicht geändert haben. Möglicherweise haben einige Fahrer den Anschluss an das schneller fahrende Fahrzeug vor ihnen nicht halten können oder wollen und sind dann, nachdem sie es haben ziehen lassen, wieder auf ihre

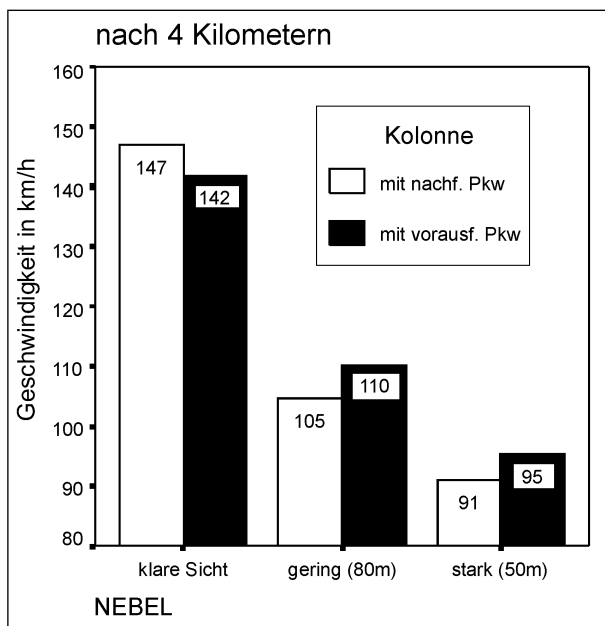


Bild 16: Mittlere Geschwindigkeit nach 4 Kilometern (zu diesem Zeitpunkt haben die begleitenden Kolonnenfahrzeuge ihre maximale Geschwindigkeit erreicht), getrennt nach Sichtbedingung und Kolonnenfahrt in Modelluntersuchung 2

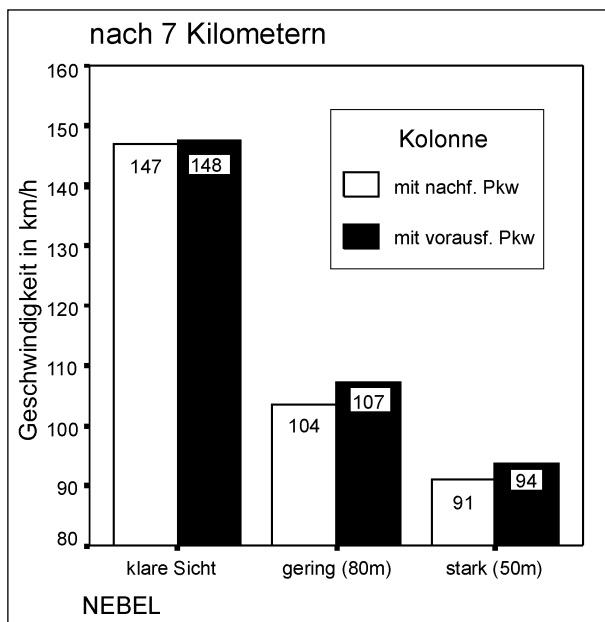


Bild 17: Mittlere Geschwindigkeit nach 7 Kilometern (zu diesem Zeitpunkt haben die Kolonnenfahrzeuge ihre maximale Geschwindigkeit erreicht), getrennt nach Sichtbedingung und Kolonnenfahrt in Modelluntersuchung 2

Ausgangsgeschwindigkeit zurückgekehrt. Bild 17 zeigt diesen Zusammenhang.

Auch bei km 7 ist in der entsprechenden Varianzanalyse nur der Haupteffekt Nebel signifikant [$F(2,69) = 167,55$; $p < 0,001$]. Es gibt keinen Geschwindigkeitsunterschied bezüglich der Kolonnenfahrt [$F(1,46) = 0,14$; $p > 0,1$].

Da es mit nachfolgendem Kolonnenfahrzeug zu keinerlei Veränderungen der Geschwindigkeit kam, konnte der Druckeffekt nicht evaluiert werden. Die folgenden Auswertungen und Betrachtungen beziehen sich daher ausschließlich auf die Kolonnenbedingung mit vorausfahrendem Fahrzeug und den damit verbundenen Sog-Effekt.

Fahrertypen

Ob und in welchem Ausmaß ein Fahrer auf einer Versuchsfahrt dem Sog-Effekt unterliegt, lässt sich anhand des Abstands, den er im Verlauf der Fahrt zum Vordermann einhält, feststellen. Folgt der Fahrer dem Vordermann nicht, so erhöht sich der Abstand infolge der Beschleunigung des Vordermanns in kurzer Zeit so stark, dass er in den Nebelbedingungen schnell außer Sichtweite gerät und auch in der Klarsichtbedingung so weit entfernt ist, dass er keinen Einfluss mehr auf die Versuchsperson haben kann. Bild 18 zeigt hierfür vier Beispiele:

Der Fahrer im Beispiel 1 (Bild 18) folgt bei keiner Sichtbedingung dem vorausfahrenden Fahrzeug. Der Abstand nimmt auf allen drei Fahrten nach der Entkopplung (bei 2.000 m) schnell und kontinuierlich zu, er fährt immer geschwindigkeitsorientiert. Der Fahrer in Beispiel 2 folgt bei allen Sichtbedingungen konsequent dem vorausfahrenden Fahrzeug. Der Abstand bleibt gering und in einem konstanten Bereich. Hierzu muss er seine Geschwindigkeit jeweils der Geschwindigkeit des vorausfahrenden Kolonnenfahrzeugs angepasst haben, er fährt abstandsorientiert. Die Fahrer in den Beispielen 3 und 4 folgen in einer bzw. zwei Nebelbedingungen dem vorausfahrenden Fahrzeug, nicht aber bei klarer Sicht. Ihr Fahrverhalten ist also abhängig von den Sichtbedingungen. Je mehr Nebel, desto eher folgen sie dem Führungsfahrzeug. Nur wenige Fahrer zeigen, wie in den Beispielen 1 und 2, entweder nie oder immer ein Sogverhalten. Die meisten Fahrer folgen in einigen Fahrten dem vorausfahrenden Fahrzeug und in anderen nicht (wie die Fahrer in den Beispielen 3 und 4).

Die Geschwindigkeitsprofile lassen darauf schließen, dass einige Fahrer, insbesondere diejenigen, die eine relativ hohe Anfangsgeschwindigkeit gewählt haben, kurzfristig versucht haben, dem Führungsfahrzeug zu folgen, dieses aber im Laufe der Fahrt wieder aufgegeben haben.

Hat sich der Abstand also am Ende der Versuchsfahrt maximal auf das Doppelte des Ausgangsab-

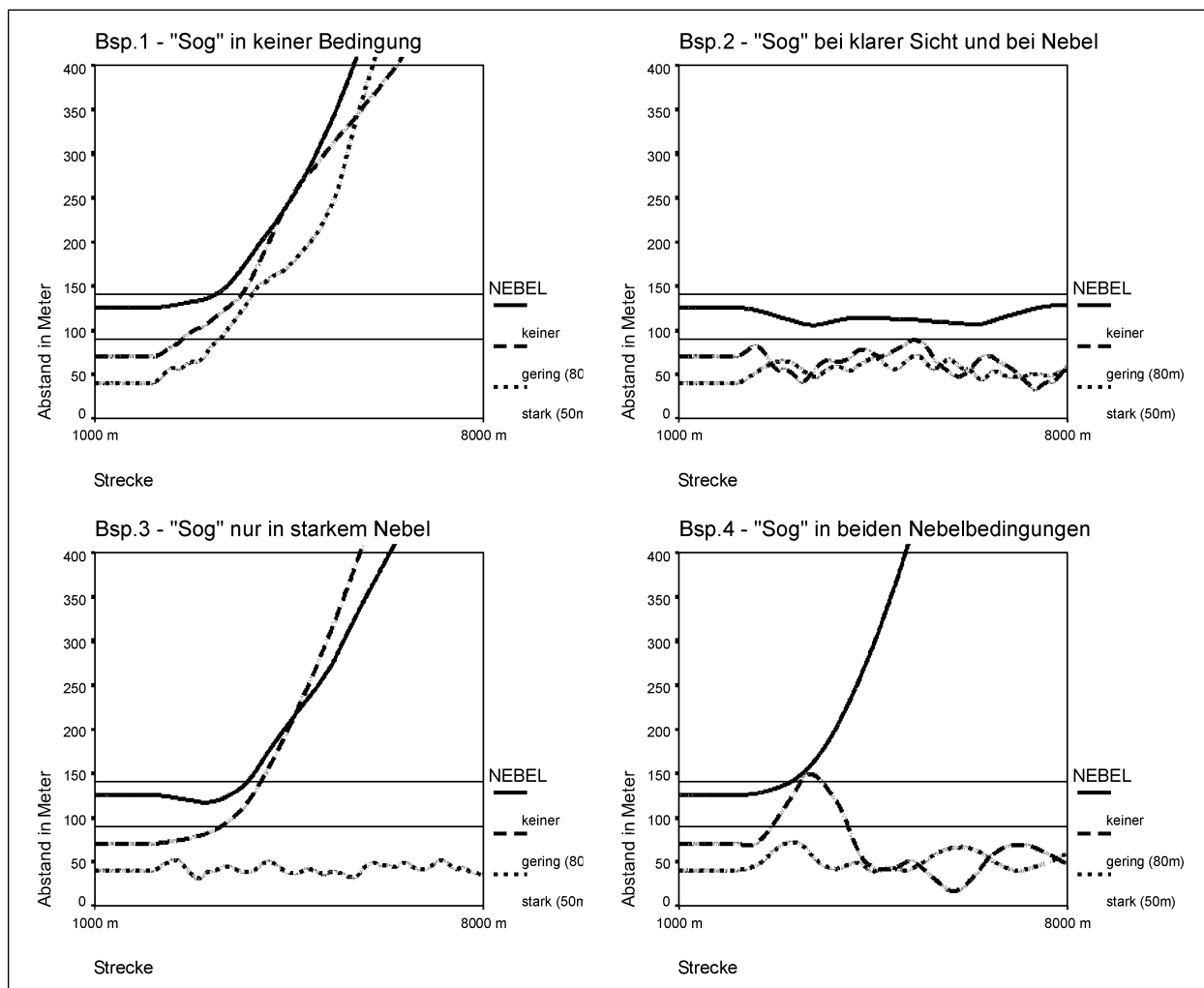


Bild 18: Beispiele für die Entwicklung des Abstands zum Vordermann. Dargestellt sind jeweils die Abstandsverläufe zum Vordermann auf drei Fahrten einer Versuchsperson. Eine Fahrt bei klarer Sicht (durchgezogene Linie), eine Fahrt bei geringem Nebel (gestrichelt) und eine Fahrt bei starkem Nebel (gepunktet); Modelluntersuchung 2

standes erhöht, so wird diese Fahrt im Folgenden als Sogfahrt definiert. Die Fahrt wurde entsprechend als „Vollsog“ klassifiziert. Der Fahrer hat seine Geschwindigkeit in diesen Fällen dem vorausfahrenden Kolonnenfahrzeug angepasst und ist nicht mehr geschwindigkeitsorientiert, sondern abstandsorientiert gefahren.

Da viele Fahrer ihre Geschwindigkeit zunächst dem Vorderfahrzeug angepasst haben, ihm dann aber nicht bis zum Ende der Fahrt gefolgt sind, sondern es irgendwann wieder haben wegziehen lassen, wurde eine Zwischenkategorie eingeführt. Wenn die Geschwindigkeitserhöhung bezogen auf die Basisgeschwindigkeit bei km 2 mindestens 8 % (bei 15 % Beschleunigung des Vordermanns) bzw. 16 % (bei 30 % Beschleunigung des Vordermanns) betrug und diese erhöhte Geschwindigkeit mindestens über eine Strecke von 2.500 m aufrechterhalten wurde, wurde die Fahrt als „Halbsog“ be-

zeichnet und entsprechend klassifiziert. War die Geschwindigkeitserhöhung geringer und/oder nur auf einer kürzeren Strecke vorhanden, wurde die Fahrt als „kein Sog“ bezeichnet.

Bild 19 zeigt verschiedene Geschwindigkeitsverläufe im Nebel (rechts) und bei klarer Sicht (links). In den beiden oberen Beispielen hält der Fahrer nach dem Entkoppeln des Vordermanns seine eigene Geschwindigkeit (durchgezogene Linie) jeweils weiter ein und erhöht sie nicht synchron zur Geschwindigkeit des Vorausfahrenden (gestrichelt). Diese Fahrer fahren also geschwindigkeitsorientiert. Die Nebelfahrt unterscheidet sich von der Fahrt bei klarer Sicht aber, wie in Modelluntersuchung 1, durch eine stärkere Oszillation der Geschwindigkeit. Der Effekt ist nur auf den Nebel zurückzuführen, da das vorausfahrende Fahrzeug bereits kurz nach dem Beschleunigen bei Kilometer zwei im Nebel verschwunden ist. In der Mitte

sind als Beispiel zwei Fahrten wiedergegeben, die als Halbsogfahrten klassifiziert wurden. Die Fahrer erhöhen kurzfristig synchron mit dem vorausfahrenden Kolonnenfahrzeug ihre Geschwindigkeit, lassen dann aber wieder den Sichtkontakt abreißen und fallen wieder auf ein niedrigeres Geschwindigkeitsniveau zurück. Wieder ist in der Nebelfahrt eine stärkere Variabilität der Geschwindigkeit zu

vermerken, obwohl das vorausfahrende Fahrzeug bereits nicht mehr zu sehen ist. Bei vollem Sog (die unteren Beispiele in Bild 19) wird die Geschwindigkeit synchron mit dem vorausfahrenden Fahrzeug erhöht. Anschließend korrigieren die Fahrer ihre Geschwindigkeit immer wieder in kurzen Intervallen, um Zeitlücke und Abstand zum Vordermann zu kontrollieren. Dieser Geschwindigkeitsverlauf ist ty-

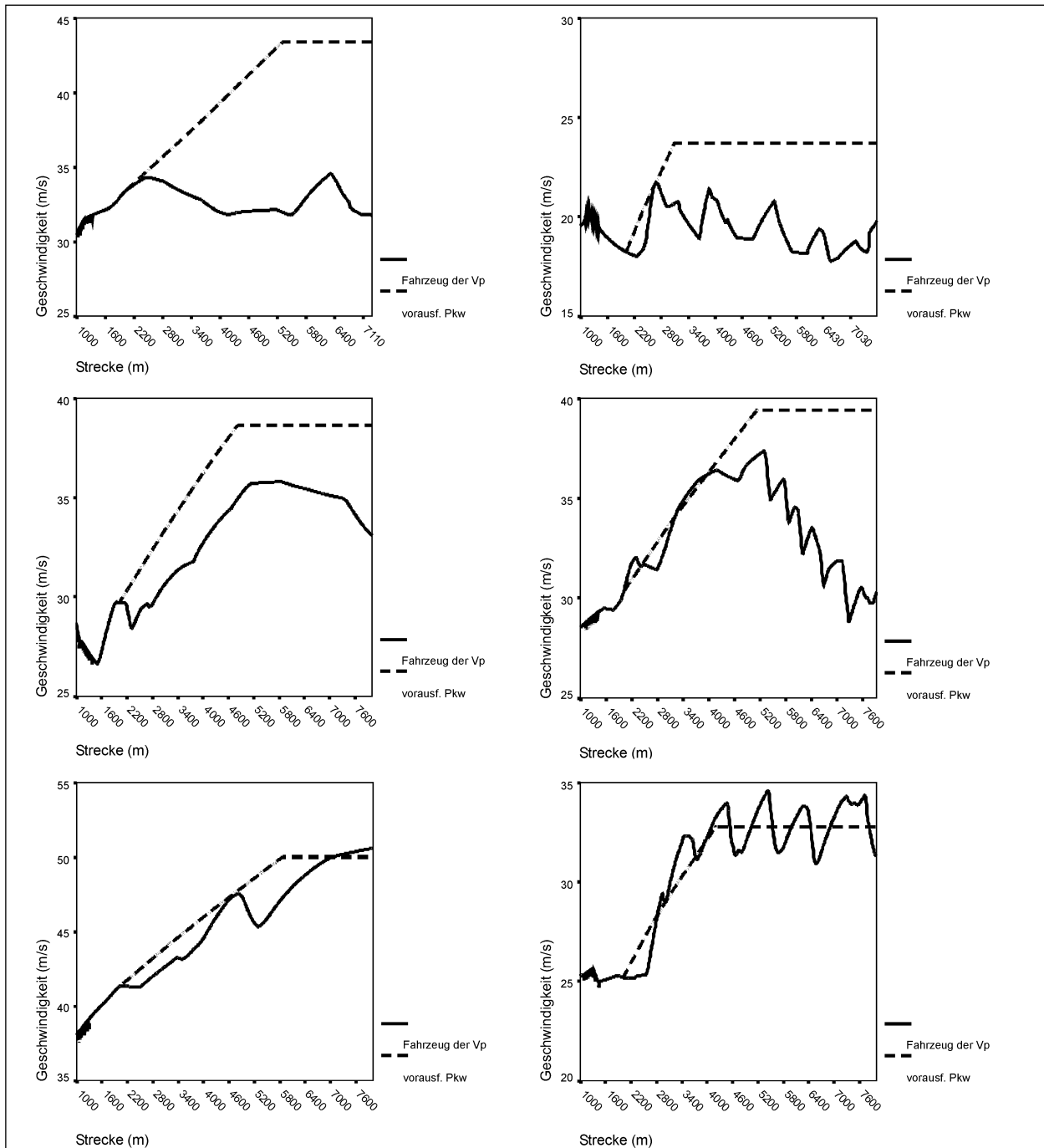


Bild 19: Beispiele für Geschwindigkeitsverläufe bei einzelnen Versuchspersonen aus Modelluntersuchung 2. Fahrten im Nebel sind rechts, Fahrten bei klarer Sicht links dargestellt. Die beiden oberen Fahrten wurden nicht als Sogfahrten klassifiziert, die mittleren als Halbsogfahrten und die unteren als Vollsog-Fahrten (durchgezogen: Geschwindigkeit der Versuchsperson über die Strecke; gestrichelt: Geschwindigkeitsverlauf des vorausfahrenden Fahrzeugs). Alle Abbildungen stammen aus Fahrten mit starker Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs

pisch für Sogfahrten. Das Oszillieren ist dabei im Nebel wiederum stärker als bei klarer Sicht. Die Abbildungen sind getrennt für die beiden Beschleunigungsbedingungen, da sich das Sogverhalten bei einer schnellen und deutlicheren Beschleunigung des Vordermanns weniger stark zeigt als bei einer langsameren und geringeren Beschleunigung.

Bei einer Geschwindigkeitserhöhung auf eine 15 % höhere Geschwindigkeit als die Ausgangsgeschwindigkeit fahren im Nebel mit 80 m Sichtweite die Hälfte, in der Nebelbedingung mit nur 50 m Sicht sogar 19 von 24 Versuchspersonen mit dem vorausfahrenden Kolonnenfahrzeug mit. Der Anteil der Versuchspersonen, die das Sogverhalten nicht oder nur teilweise zeigen, nimmt mit zunehmendem Nebel entsprechend ab. Aber entgegen der Hypothese von SCHÖNBACH zeigt sich auch bei klarer Sicht das Sogverhalten bei einem Drittel der Versuchspersonen. Darüber hinaus fallen die unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten der Fahrer, die ein Sogverhalten zeigen, und von denen, die es nicht oder nur teilweise zeigen, auf.

Beschleunigt das Führungsfahrzeug stärker und schneller, steigt der Anteil der Fahrer, die ihr Verhalten nicht nach der Geschwindigkeit des Vorausfahrenden richten, nimmt aber mit zunehmendem Nebel wieder ab. Bei klarer Sicht folgt keiner der Versuchspersonen dem stark beschleunigenden Fahrzeug, mit zunehmendem Nebel wird aber von einigen Versuchspersonen auch diesem Fahrzeug gefolgt. Unter allen Sichtbedingungen ist der Anteil

der Fahrer, die zwar versuchen, dem sich schnell entfernenden Fahrzeug zu folgen, es dann aber wieder aufgeben, höher als bei dem weniger stark beschleunigenden Fahrzeug (Tabellen 8 und 9). Aber auch hier sind die Anfangsgeschwindigkeiten sehr unterschiedlich. Die Fahrer, die dem vorausfahrenden Fahrzeug folgen, sind zu Beginn der Strecke deutlich langsamer als die Fahrer, die den vorausfahrenden Pkw ziehen lassen.

Die Verteilungen der Fahrer auf die Sogklassifizierungen wurden mit nonparametrischen Tests auf Verteilungsgleichheit überprüft. Die Tests wurden signifikant [Kruskal-Wallis-Test: Chi-Quadrat (df = 2) = 16,01], das heißt, die Verteilungen unterscheiden sich bei beiden Beschleunigungsbedingungen in Abhängigkeit von der Sichtweite voneinander.

Abschließend werden die Geschwindigkeitsverläufe getrennt nach dem Sogverhalten analysiert. Es zeigt sich, dass bei klarer Sicht (Bild 20) insgesamt im Verlauf der Strecke schneller gefahren wird. Die Fahrer, die später dem Führungsfahrzeug folgen (gepunktete Linie), haben bei 2.000 m aber eine geringere Ausgangsgeschwindigkeit als die Fahrer, die die Verfolgung wieder abbrechen (gestrichelte Linie), und diese sind ihrerseits zu Beginn langsamer als die Fahrer, die dem vorausfahrenden Pkw überhaupt nicht folgen (durchgezogene Linie). Das Sogverhalten bei klarer Sicht ist also abhängig von der Ausgangsgeschwindigkeit. Nur wenn die Fahrer noch genügend Spielraum in der Geschwindigkeitswahl haben, folgen sie dem vorausfahrenden Fahrzeug.

	Sogverhalten					
	kein Sog		halber Sog		voller Sog	
Nebel	Anzahl	Anfangsgeschw.	Anzahl	Anfangsgeschw.	Anzahl	Anfangsgeschw.
keiner	9	140 km/h	7	131 km/h	8	129 km/h
gering (80 m)	6	103 km/h	7	100 km/h	11	94 km/h
stark (50 m)	4	84 km/h	1	84 km/h	19	75 km/h

Tab. 8: Einteilung der Versuchspersonen nach ihrem Fahrverhalten bei einer Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs um 15 %. Anzahl und durchschnittliche Anfangsgeschwindigkeit von Fahrern, die keinen, halben und vollen Sog zeigen; Modelluntersuchung 2

	Sogverhalten					
	kein Sog		halber Sog		voller Sog	
Nebel	Anzahl	Anfangsgeschw.	Anzahl	Anfangsgeschw.	Anzahl	Anfangsgeschw.
keiner	15	138 km/h	9	130 km/h	0	127 km/h
gering (80 m)	11	104 km/h	10	99 km/h	3	96 km/h
stark (50 m)	5	86 km/h	9	89 km/h	10	73 km/h

Tab. 9: Einteilung der Versuchspersonen nach ihrem Fahrverhalten bei einer Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs um 30 %. Anzahl und durchschnittliche Anfangsgeschwindigkeit von Fahrern, die keinen, halben und vollen Sog zeigen; Modelluntersuchung 2

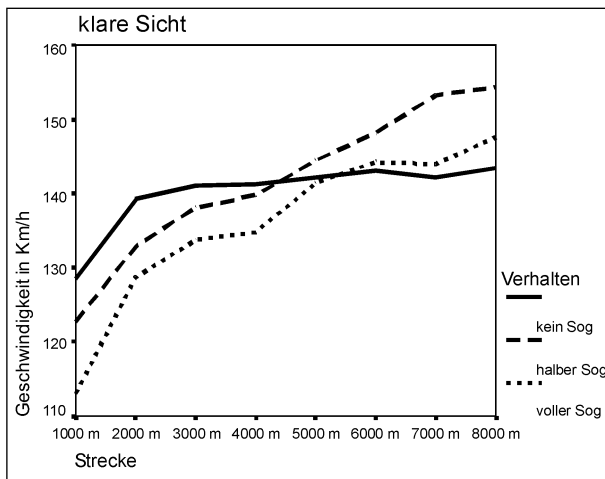


Bild 20: Geschwindigkeitsverläufe über die Strecke, getrennt nach Sogverhalten, bei klarer Sicht; Modelluntersuchung 2

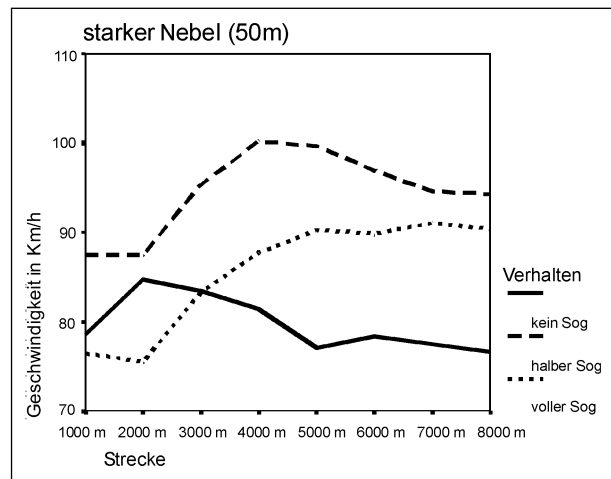


Bild 22: Geschwindigkeitsverläufe über die Strecke, getrennt nach Sogverhalten, bei starkem Nebel (50 m Sicht); Modelluntersuchung 2

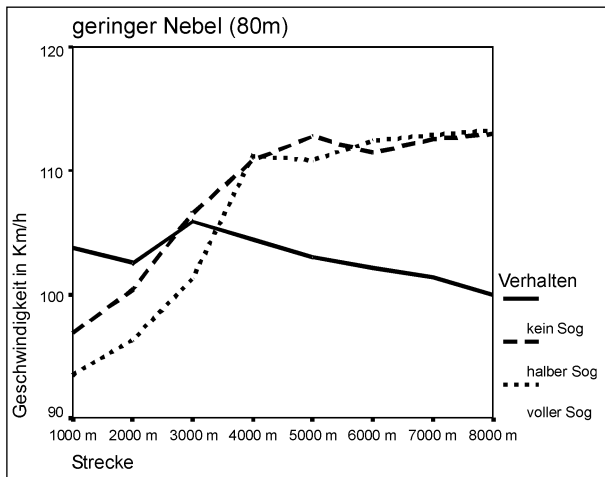


Bild 21: Geschwindigkeitsverläufe über die Strecke, getrennt nach Sogverhalten, bei geringem Nebel (80 m Sicht); Modelluntersuchung 2

Auch bei geringem Nebel (Bild 21) unterscheiden sich die Fahrer in ihren Ausgangsgeschwindigkeiten bei 2.000 m abhängig vom Sogverhalten. Am Ende der Strecke fahren die Fahrer, die dem Führungsfahrzeug folgen, aber um mehr als 10 km/h schneller als die Fahrer, die ihre Geschwindigkeit beibehalten.

Im starken Nebel (Bild 22) zeigt sich ein ähnliches Bild. Allerdings ist hier zu berücksichtigen, dass der Anteil der Fahrer, die dem vorausfahrenden Pkw folgen, wesentlich größer wird. Dies kann, im Sinne von SCHÖNBACH, daran liegen, dass im Nebel die Motivation, ein vorausfahrendes Fahrzeug in Sichtweite zu halten, höher ist. Andererseits ist aber – aufgrund der geringeren Geschwindigkeiten im Nebel – der Spielraum für Geschwindigkeitserhöhungen wesentlich höher, insbesondere

re, weil das vorausfahrende Fahrzeug ja auf eine prozentual höhere Endgeschwindigkeit beschleunigt und nicht auf eine absolut höhere Differenz. Dieser Frage wird in der dritten Modelluntersuchung weiter nachgegangen.

Die Auswertung der subjektiven Einschätzungen und Bewertungen der Fahrer zeigt wieder, dass die Geschwindigkeiten grundsätzlich unterschätzt werden. Die systematische Erfassung der Einschätzungen in der Einführungsfahrt zeigt, dass die Fahrer grundsätzlich niedrigere Geschwindigkeiten stärker unterschätzen als höhere (> 100 km/h). Da hier alle Geschwindigkeiten bei klarer Sicht eingeschätzt wurden, ist dieser Effekt unabhängig von der Sichtbedingung. Möglicherweise ist die starke Motorisierung des Simulatorfahrzeugs (BWM, 5er) im Vergleich zu den meisten Privatfahrzeugen der Versuchspersonen mitverantwortlich für diesen Effekt.

Die Geschwindigkeitserhöhung im Nebel wird von den meisten Fahrern durchaus wahrgenommen. Das Dranbleiben am schneller werdenden Kolonnenführer ist also durchaus eine bewusste Entscheidung der Fahrer und geschieht weniger, wie SCHÖNBACH es postuliert, unbewusst. Die erhöhte Variabilität der eigenen Geschwindigkeit beim Dranbleiben am Vordermann im Nebel wird von den Fahrern aber nicht wahrgenommen. Die Probanden berichten vielmehr, dass sie den Eindruck hatten, das vorausfahrende Fahrzeug würde immer wieder ein wenig schneller und langsamer werden, obwohl dieses objektiv nach der Beschleunigung mit konstanter Geschwindigkeit fährt. Diese Fehlinterpretation kann auf die verminderten Hinweisrei-

ze für die Distanzwahrnehmung im Nebel zurückgeführt werden.

4.3.4 Diskussion

In dieser zweiten Modelluntersuchung haben wir die Sog- und die Druckhypothese von SCHÖNBACH durch das Beschleunigen eines hinterherfahrenden oder vorausfahrenden Fahrzeugs getrennt voneinander analysiert.

Der Sogeffekt konnte bei einem Teil der Fahrer nachgewiesen werden. Diese Fahrer haben ihre Geschwindigkeit im Sinne der Sog-Theorie von SCHÖNBACH erhöht, wenn auch zum Teil nur kurzfristig. Allerdings lassen sich diese Verhaltensweisen auch bei klarer Sicht beobachten, was dafür spricht, dass der Sogeffekt nicht ausschließlich nebel-spezifisch ist. Es scheint vielmehr so, dass viele Fahrer grundsätzlich auf der Autobahn, wenn möglich, eher abstandsorientiert fahren und ihre Geschwindigkeit an die des vorausfahrenden Fahrzeugs anpassen. Im Nebel wird diese Verhaltensweise nicht aufgegeben, sondern eher noch verstärkt. Auch Fahrer, die bei klarer Sicht eher mit konstanter Geschwindigkeit fahren und sich nicht am Vordermann orientieren, haben nun die Tendenz, zumindest bis zu einer individuellen Grenze, Geschwindigkeitserhöhungen des vorausfahrenden Fahrzeugs mitzumachen. Dass es darüber hinaus auch im Nebel einen Anteil Fahrer gibt, die weiterhin geschwindigkeitsorientiert und nicht mit konstantem Abstand fahren, schmälert nicht die Relevanz dieses SCHÖNBACHschen Sogverhaltens einiger Fahrer. Im Gegenteil, die unterschiedlichen Verhaltensweisen der Fahrer erhöhen die bereits in Modelluntersuchung 1 festgestellten Differenzgeschwindigkeiten zwischen den Fahrzeugen weiter. Einige Fahrer hängen sich an schneller fahrende vorausfahrende Fahrzeuge an, wodurch sich auch die in Modelluntersuchung 1 festgestellte, und hier wieder bestätigte, Oszillation der Geschwindigkeit verstärkt, während andere ihre geringere Geschwindigkeit beibehalten. Die Auswirkungen dieser unterschiedlichen Verhaltensweisen auf den Verkehrsfluss wurden in einer Verkehrssimulation überprüft (siehe Kapitel 6). Möglicherweise ist gerade die Kombination von im Nebel verstärkt auftretender intra- und interindividueller Geschwindigkeitsvariabilität und dem Sogverhalten einiger Verkehrsteilnehmer ein entscheidende Faktor für Nebelunfälle.

Der entsprechende Druck-Effekt durch ein nachfolgendes Kolonnenfahrzeug konnte dagegen nicht

nachgewiesen werden. In keiner der beiden Untersuchungen hatte das nachfolgende Fahrzeug irgendeinen Einfluss auf das Fahrverhalten der Versuchspersonen. Sie fahren genauso schnell wie in der Einzelfahrt (Modelluntersuchung 1) und ändern ihre Geschwindigkeit auch nicht, wenn das nachfolgende Kolonnenfahrzeug Druck ausübt, indem es beschleunigt und näher kommt. Möglicherweise wird der Druck des computergenerierten Fahrzeugs im Simulator nicht als solcher erlebt. Darauf weisen die Aussagen der Fahrer hin, die sich schlichtweg nicht durch die Annäherungen des Hinterherfahrenden gestört fühlten. SCHÖNBACH weist darauf hin, dass gerade die Scheinwerfer des Hintermanns, die bei Nebel unangenehm von hinten ins Fahrzeug leuchten, zu dem Bedrängungsgefühl beitragen. Dieser Effekt konnte aber an dem Simulator so nicht nachgestellt werden.

Es bleibt zunächst dahingestellt, ob es den Druck-Effekt so nicht gibt oder ob es nur nicht gelungen ist, die Bedingungen in der Simulation so herzustellen, dass sich der Effekt zeigen kann. Für die nachfolgenden Auswertungen kann die Kolonnenbedingung mit nachfolgendem Fahrzeug also genauso als Kontrollbedingung herangezogen werden wie die Einzelfahrt.

Durch die sehr unterschiedlichen Anfangsgeschwindigkeiten, die die Fahrer gewählt haben, waren die Ausgangsbedingungen für das Sogverhalten sehr unterschiedlich. Fahrer, die eine relativ geringe Ausgangsgeschwindigkeit gewählt hatten, hatten es natürlich leichter, dem vorausfahrenden Fahrzeug zu folgen, da dieses auch auf eine relativ niedrige Zielgeschwindigkeit beschleunigt hat. Diese Zielgeschwindigkeit lag zum Teil nicht deutlich höher als manche Ausgangsgeschwindigkeit anderer Fahrer. Möglicherweise haben einige Fahrer also das Sogverhalten nur gezeigt, weil sie es sich leisten konnten, auch etwas schneller zu fahren. Andererseits wären andere Fahrer eventuell dem vorausfahrenden Fahrzeug gefolgt, wenn die Ausgangsgeschwindigkeit nicht bereits sehr hoch gewesen wäre. Dafür spricht die hohe Zahl derjenigen Fahrten, die als Halbsog klassifiziert werden mussten. Zur Klärung dieser Frage wird der Versuch in der Modelluntersuchung 3 mit fest vorgegebenen Anfangsgeschwindigkeiten wiederholt.

Abschließend sei noch einmal betont, dass die Entscheidung, dem Kolonnenfahrzeug zu folgen, in den meisten Fällen eine bewusste Entscheidung war. Die Fahrer berichteten überwiegend, dass es

aus ihrer Sicht besser sei, das nächste Hindernis noch zu sehen, als vor eine „weiße Wand“ zu fahren. Dass sie aber ihre eigene Geschwindigkeit stark variierten, war den Fahrern nicht bewusst.

4.4 Modelluntersuchung 3

Die Ergebnisse der Modelluntersuchung 2 haben gezeigt, dass es einen Sogeffekt gibt, der zumindest bei einem Teil der Versuchspersonen empirisch nachzuweisen ist. Allerdings findet er sich auch bei klarer Sicht und ist insgesamt nicht so deutlich wie von SCHÖNBACH vorhergesagt. Es bleibt also noch offen, ob der Sogeffekt spezifisch für Nebelsituationen oder ein allgemeines Phänomen des Fahrens auf Autobahnen ist und wie stark er von der Ausgangsgeschwindigkeit und dem daraus entstehenden Spielraum für Geschwindigkeitserhöhungen abhängt. Im ersten Teil der dritten Modelluntersuchung wird daher das Experiment der zweiten Modelluntersuchung wiederholt, allerdings mit festen Ausgangsgeschwindigkeiten pro Sichtbedingung. Auf die Kolonnenbedingungen mit nachfolgendem Fahrzeug wird dabei verzichtet, da der Druckeffekt nicht nachgewiesen werden konnte.

In den bisherigen Untersuchungen haben die Fahrer immer aus dem Stand bei bereits vorhandenen Sichteinschränkungen auf ihre Wunschgeschwindigkeit beschleunigt. In der Praxis fährt man jedoch mit hoher Geschwindigkeit in zunehmenden Nebel hinein und reduziert dann seine Geschwindigkeit auf die subjektiv sicht- und sicherheitsangemessene Geschwindigkeit. Im zweiten Teil der dritten Modelluntersuchung wurde eine Kontrollfahrt durchgeführt, bei der die Versuchspersonen zunächst bei klarer Sicht starten, die Sicht dann zunehmend nebliger wird und anschließend wieder klar ist. Ziel dieses Kontrollexperimentes ist es, Unterschiede in den Wunschgeschwindigkeiten zu erfassen, je nachdem, ob in den Nebel beschleunigt oder abgebremst wird.

Im dritten Teil der Modelluntersuchung 3 wird schließlich die von den Fahrern gewünschte Zeitlücke zum Vordermann bei unterschiedlichen Sichtbedingungen und Geschwindigkeiten analysiert.

4.4.1 Versuchsplan

Im ersten Teil der Modelluntersuchung 3 entsprach die im Simulator programmierte Strecke in ihrem

Aufbau genau der Strecke aus Modelluntersuchung 2. Wieder fehlten Mittel- und Seitenlinie, die Kurven waren lang gezogen, es gab Gegenverkehr, in unregelmäßigen Abständen Bäume und Baumgruppen. Die Strecke war 9 km lang und musste von den Versuchspersonen in jeder Versuchsbedingung komplett durchfahren werden. Im Vergleich zur Modelluntersuchung 2 fiel allerdings die Kolonnenbedingung mit nachfolgendem Fahrzeug weg. Es bleibt ein Versuchsplan mit den drei Sichtbedingungen und der zweifach gestuften Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs. Es ergeben sich damit $3 \times 2 = 6$ Versuchsfahrten (siehe Tabelle 10). Eine Versuchsfahrt dauerte zwischen fünf und zehn Minuten.

Die Ausgangsgeschwindigkeiten beim Entkoppeln des vorausfahrenden Fahrzeugs nach zwei Kilometern wurden jetzt für jede Sichtbedingung festgesetzt und waren somit nicht mehr von den doch sehr unterschiedlichen Individualgeschwindigkeiten abhängig.

Die Höhe der Ausgangsgeschwindigkeiten richtete sich nach den Durchschnittsgeschwindigkeiten bei den entsprechenden Sichtbedingungen mit vorausfahrendem Kolonnenfahrzeug aus Modelluntersuchung 1. Somit beschleunigt das vorausfahrende Fahrzeug jetzt nicht nur prozentual, sondern auch absolut auf eine fest definierte Differenzgeschwindigkeit. In Tabelle 10 sind diese Differenzgeschwindigkeiten aufgeführt. Die Versuchspersonen wurden zu Beginn der Fahrt per Tempomat automatisch auf die festgesetzte Ausgangsgeschwindigkeit beschleunigt und sollten das Fahrzeug dann bei Kilometer zwei übernehmen. Anschließend konnten sie ihre Geschwindigkeit wieder frei nach Sicht- und Sicherheitsaspekten wählen.

Bei der anschließenden Kontrollfahrt fuhren die Fahrer auf einer auf 12,5 km verlängerten Strecke mit ansonsten gleichen Spezifikationen (vgl. Modelluntersuchung 1). Es begann mit klarer Sicht, nach 2,5 Kilometern verringerte sich die Sichtweite durch Nebel auf 80 m und nach weiteren 2,5 Kilometern auf 50 m. Nach insgesamt 7,5 Kilometern stieg die Sichtweite wieder auf 80 m an, die letzten 2,5 Kilometer wurden wieder bei klarer Sicht befahren. Bild 23 zeigt ein Schema des Streckenaufbaus. Die Fahrt erfolgte mit freier Geschwindigkeitswahl und natürlich wie immer ohne Geschwindigkeitsrückmeldung per Tacho.

Im letzten Teil der Modelluntersuchung 3 hatten die Fahrer die Möglichkeit, die Zeitlücke zum Vorder-

Mit vorausfahrendem Fahrzeug	Klare Sicht	Nebel 80 m	Nebel 50 m
Beschleunigung um 15 %	130 km/h → 149,5 km/h	90 km/h → 103,5 km/h	70 km/h → 80,5 km/h
Beschleunigung um 30 %	130 km/h → 179 km/h	90 km/h → 117 km/h	70 km/h → 91 km/h

Tab. 10: Versuchsplan des ersten Teils von Modelluntersuchung 3

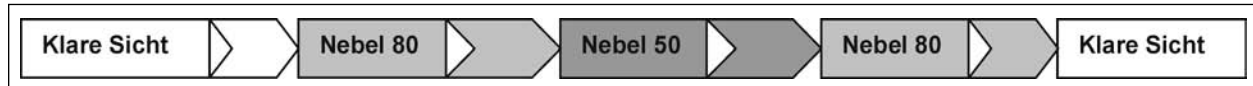


Bild 23: Streckenschema der Kontrollfahrt in Modelluntersuchung 3

	Klare Sicht	Nebel 80 m	Nebel 50 m
Mit vorausfahrendem Fahrzeug	Einstellen der optimalen Zeitlücke	Einstellen der optimalen Zeitlücke	Einstellen der optimalen Zeitlücke

Tab. 11: Versuchsplan für das Experiment zur Bestimmung der Wunschzeitlücke innerhalb von Modelluntersuchung 3

mann selbsttätig und direkt zu manipulieren und auf ein für sie selbst angemessenes und gewünschtes Maß einzustellen. Es wurden pro Versuchsperson drei Fahrten, unter jeder Sichtbedingung eine, auf der aus Modelluntersuchung 2 bekannten Strecke absolviert. Tabelle 11 zeigt den Aufbau des einfaktoriellen Versuchsplans.

Bei jeder Fahrt beschleunigten die Fahrer zunächst mit ihrer sichtspezifischen Wunschgeschwindigkeit (WG) und stellten den Tempomaten ein. Dann fuhren sie mit konstanter Geschwindigkeit allmählich auf ein vorausfahrendes Fahrzeug auf, da dieses mit einer Differenzgeschwindigkeit von $WG - 5$ km/h fuhr. Die Versuchsperson wurde bei einer Zeitlücke von einer Sekunde hinter dem Fahrzeug automatisch eingebremst. Beide Fahrzeuge fuhren nun mit konstanter Geschwindigkeit und konstantem Abstand. Jetzt konnte der Fahrer mit Hilfe zweier Tasten am Lenkrad die Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug nach seinen eigenen Vorstellungen korrigieren.

Wenn die Einstellung der Wunschzeitlücke abgeschlossen war, beschleunigte das vorausfahrende Fahrzeug auf eine um 15 % höhere Geschwindigkeit. Der Fahrer konnte nun dem vorausfahrenden Fahrzeug folgen oder zurückbleiben. Folgte er, so hatte er anschließend die Möglichkeit, erneut die Zeitlücke zum dann wieder mit konstanter Geschwindigkeit fahrenden Führungsfahrzeug einzustellen.

4.4.2 Durchführung und Auswertung

An der Untersuchung nahmen wiederum dieselben 24 Versuchspersonen teil wie an den vorangegangenen Untersuchungen. Die Fahrer kannten somit

alle bereits die Versuchsstrecke und die verschiedenen Sicht- und Fahrbedingungen und die Instruktion, immer sicht- und sicherheitsangemessen zu fahren.

Im ersten Teil wurden die aus dem Versuchsplan (Tabelle 10) resultierenden sechs Versuchsfahrten von allen Versuchspersonen in einer zufälligen Reihenfolge auf der 9 km langen Teststrecke absolviert. Dabei wurde wieder darauf geachtet, dass jede Versuchsperson mit einer Klarsichtbedingung starten konnte. Nach jeder Fahrt wurden die Teilnehmer wieder nach den subjektiven Eindrücken ihres Fahrverhaltens befragt. Die Fahrer wurden instruiert, nach Übernahme des Fahrzeugs eine für sie sicht- und sicherheitsangemessene Geschwindigkeit einzuhalten und unter Berücksichtigung des Fahrverhaltens anderer Fahrzeuge weiterzufahren.

Anschließend absolvierten die Teilnehmer die Kontrollfahrt und zum Abschluss die drei Fahrten zur Ermittlung der Wunschzeitlücke in festgelegter Reihenfolge: zunächst bei klarer Sicht, dann mit geringem Nebel und schließlich mit starkem Nebel.

Ausgewertet wurden wieder Fahrgeschwindigkeit und weitere Parameter der Fahrdynamik sowie die subjektiven Einschätzungen der Fahrer.

4.4.3 Ergebnisse

Replikation der Modelluntersuchung 2

Die einzelnen Fahrten der Versuchspersonen wurden mit den in Modelluntersuchung 2 erarbeiteten Definitionen für Sogverhalten analysiert und danach eingeteilt, ob sie Sogverhalten zeigen oder nicht. Bild 24 zeigt den Anteil der Fahrten (von ins-

gesamt 24 Fahrern), die in den einzelnen Versuchsbedingungen den Sogeffekt zeigen.

Unter allen Bedingungen gibt es Fahrer, die dem vorausfahrenden Fahrzeug folgen, und solche, die ihre Geschwindigkeit beibehalten und dem Fahrzeug nicht folgen. Wie in Modelluntersuchung 2 ist

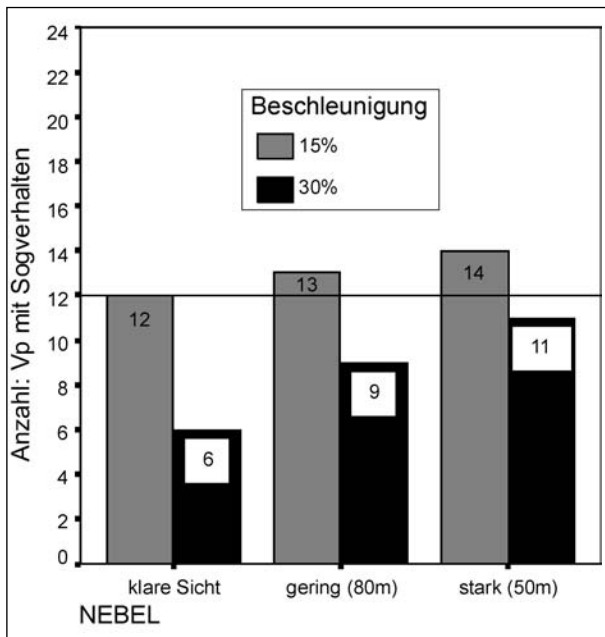


Bild 24: Anzahl der Fahrer pro Bedingung, die dem vorausfahrenden Fahrzeug folgen („Sogeffekt“); Modelluntersuchung 3

die Anzahl der Fahrten mit Sog-Effekt bei der starken Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs geringer, als wenn das vorausfahrende Fahrzeug weniger stark beschleunigt. Gleichzeitig steigt die Anzahl der Fahrten, die den Sog-Effekt aufweisen, mit zunehmender Nebeldichte leicht an.

Anders als in Modelluntersuchung 2, bei der viele Fahrer den Sogeffekt nur teilweise zeigen, können die Fahrer hier mit den definierten Kriterien für Sog eindeutig den Gruppen „voller Sog“ und „kein Sog“ zugeordnet werden. Bei der vorgegebenen und für jeden Fahrer gleichen Ausgangsgeschwindigkeit hatten alle Fahrer die Möglichkeit, entweder dem Fahrzeug zu folgen oder sich aber für Zurückbleiben zu entscheiden.

Die mittlere Geschwindigkeit der Fahrer, die dem vorausfahrenden Fahrzeug folgen, liegt definitionsgemäß höher als die Geschwindigkeit der Fahrer, die dem Kolonnenfahrzeug nicht folgen. Der Haupteffekt Kolonne wird, ebenso wie der Haupteffekt Nebel, signifikant [Kolonne: $F(1,46) = 53,47$; $p < 0,001$] [Nebel: $F(2,69) = 773,76$; $p < 0,001$]. Aber auch die Fahrer, die kein Sogverhalten zeigen, fahren im Mittel eine höhere Geschwindigkeit als die Ausgangsgeschwindigkeit bei 2.000 m (139 km/h > 130 km/h, 96 km/h > 90 km/h, 75 km/h > 70 km/h). Es handelt sich also bei diesen Versuchspersonen nicht um solche, denen die aufge-

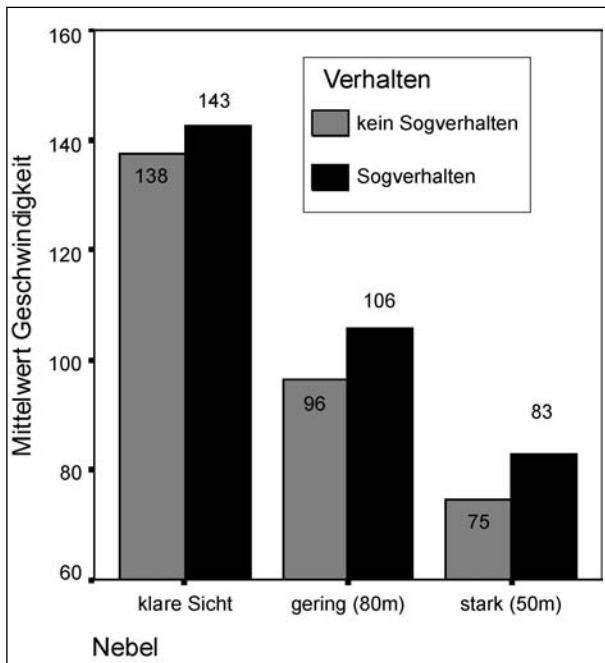


Bild 25: Mittlere Geschwindigkeit auf der Versuchsstrecke, eingeteilt nach Fahrern, die Sogverhalten zeigen (dunkel), und Fahrern, die kein Sogverhalten zeigen (hell); Modelluntersuchung 3

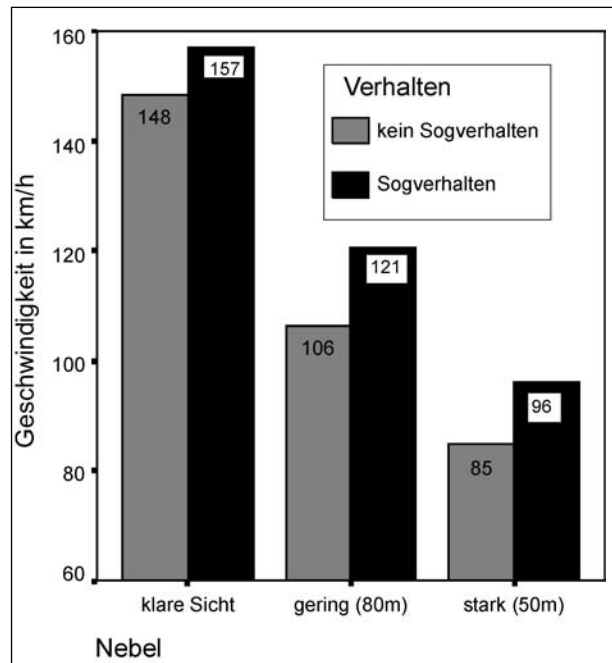


Bild 26: Maximale Geschwindigkeit auf der Versuchsstrecke gemittelt über Versuchspersonen, eingeteilt nach Fahrern, die Sogverhalten zeigen (dunkel), und Fahrern, die kein Sogverhalten zeigen (hell); Modelluntersuchung 3

zwungene Ausgangsgeschwindigkeit generell zu hoch war und die deshalb dem vorausfahrenden Wagen nicht folgen. Sie behalten ihre Ausgangsgeschwindigkeit bei, werden sogar etwas schneller und fallen nicht auf eine Geschwindigkeit unterhalb der Ausgangsgeschwindigkeit zurück.

Dies zeigt sich auch bei der Betrachtung der Maximalgeschwindigkeiten, die von allen Fahrern in allen Bedingungen jeweils erst im letzten Viertel der Strecke erreicht werden. Die maximalen Geschwindigkeiten liegen bei den Sogfahrern in allen Sichtbedingungen um mehr als 20 km/h höher als die Ausgangsgeschwindigkeiten bei 2.000 m. Aber auch die Fahrer, die kein Sogverhalten zeigen, fahren maximal um ca. 15 km/h schneller als die Ausgangsgeschwindigkeit. Auch hier sind die beiden Haupteffekte signifikant [Nebel: $F(2,69) = 489,44$; $p < 0,001$] [Sog: $F(1,46) = 66,02$; $p < 0,001$].

Im Folgenden werden die Geschwindigkeitsverläufe für alle Nebel- und Beschleunigungsbedingungen noch einmal im Detail betrachtet. Bild 27 zeigt zunächst die Geschwindigkeitsverläufe für die beiden Beschleunigungsbedingungen bei klarer Sicht.

Bei klarer Sicht erhöhen die wenigen Fahrer (sechs von 24 Personen), die auch dem stark beschleunigenden Fahrzeug folgen, ihre Geschwindigkeit im Sog dieses Fahrers auf über 160 km/h. Aber auch alle anderen Fahrer erhöhen im Laufe der Strecke ihre Geschwindigkeit. Bei 15 % Beschleunigung des Vordermanns folgt die Hälfte der Versuchspersonen (zwölf Personen) dem Führungsfahrzeug und erreicht dabei eine Geschwindigkeit von ca.

150 km/h. Aber die andere Hälfte, die den Sogeffekt nicht zeigt, ist in dieser Bedingung kaum langsamer.

Im geringen Nebel mit 80 m Sichtweite beschleunigen neun Fahrer, die dem stark beschleunigenden Fahrzeug folgen, von einer Ausgangsgeschwindigkeit von 90 km/h auf ca. 120 km/h (siehe Bild 28). Aber auch die anderen Fahrer erhöhen ihre Geschwindigkeit. Beschleunigt das vorausfahrende Fahrzeug nur auf eine Differenzgeschwindigkeit von 15 %, erhöhen nur die 13 Fahrer, die den Sogeffekt zeigen, ihre Geschwindigkeit, die übrigen elf Fahrer behalten die Ausgangsgeschwindigkeit von 90 km/h im Verlauf der Strecke im Mittel bei.

Auch im starken Nebel erhöhen nur bei starker Beschleunigung des Kolonnenführers auch die Versuchspersonen, die dem vorausfahrenden Fahrzeug nicht folgen ($n = 13$), ihre Geschwindigkeit. Beschleunigt das vorausfahrende Fahrzeug nur auf eine 15 % höhere Ausgangsgeschwindigkeit, bleibt die Geschwindigkeit der Fahrer ohne Sogverhalten ($n = 10$) im Verlauf der Strecke konstant. Bild 29 zeigt die Geschwindigkeitsverläufe bei starkem Nebel.

Betrachtet man also, zusammengefasst, nur die Fahrten, bei denen das vorausfahrende Kolonnenfahrzeug langsam auf eine nicht zu hohe Endgeschwindigkeit beschleunigt, so kann festgestellt werden, dass etwa die Hälfte der Versuchspersonen den Sogeffekt zeigt, dem Führungsfahrzeug folgt und ihre Geschwindigkeit entsprechend erhöht. Die andere Hälfte lässt das vorausfahrende

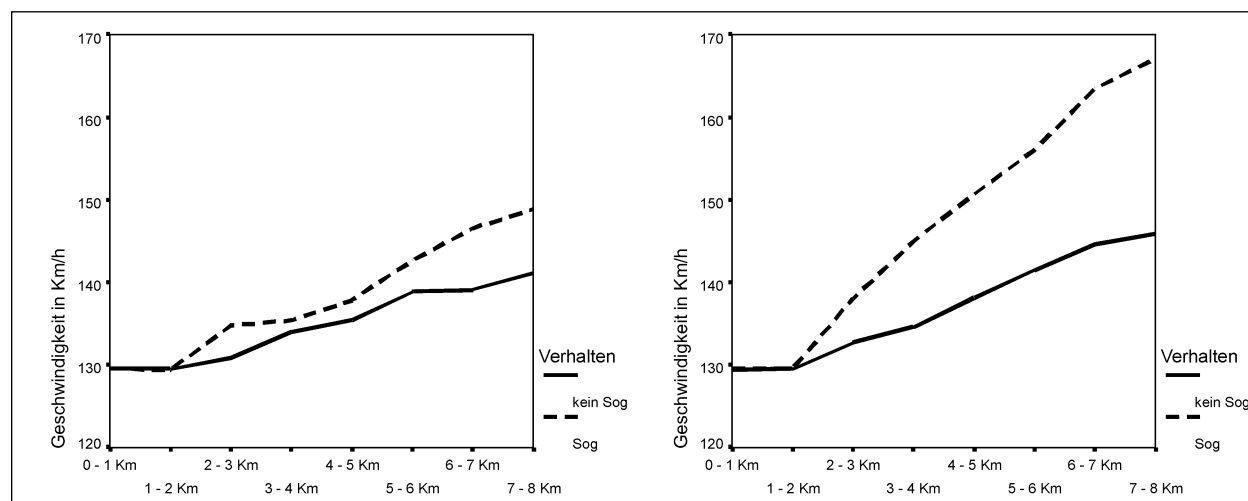


Bild 27: Geschwindigkeitsverlauf auf der Versuchsstrecke bei klarer Sicht. Links bei 15 % Beschleunigung des Vordermanns, rechts bei 30 % Beschleunigung des Vordermanns. Geglättet, gemittelt über Versuchspersonen und eingeteilt nach dem Sogverhalten; Modelluntersuchung 3

Fahrzeug nicht nur davonfahren, sondern behält im Nebel auch im Verlauf der Strecke die Ausgangsgeschwindigkeit bei.

Wenn das vorausfahrende Fahrzeug stärker beschleunigt, folgen ihm weniger Fahrer. Unter denen, die den Sogeffekt in dieser Bedingung nicht zeigen, sind aber einige, die dennoch schneller werden und ihre Geschwindigkeit, auch im Nebel, im Verlauf der Strecke erhöhen.

Auch in dieser Untersuchung findet sich wieder eine zunehmende Oszillation der Geschwindigkeit mit zunehmendem Nebel. Bei Fahrten, in denen die Fahrer dem vorausfahrenden Fahrzeug folgen (Sogfahrten), ist diese Oszillation der Geschwindigkeit ausgeprägter als bei Fahrten ohne Sogverhalten. Bild 30 gibt einen Überblick über die Geschwindig-

keitsverläufe aller Fahrten des Replikationsexperiments in Modelluntersuchung 3, bei denen das vorausfahrende Fahrzeug um 15 % beschleunigt hat. Die Anzahl der Fahrer, die gefolgt sind, und der Fahrer, die ihre Geschwindigkeit beibehalten haben, ist hier bei allen Fahrten etwa gleich (vgl. Bild 24). Es fällt auf, dass die Stärke der Geschwindigkeitsvariabilitäten in den Abbildungen von links nach rechts und von oben nach unten zunimmt, also mit zunehmendem Nebel und bei Sogverhalten.

Dabei nehmen sowohl die Amplitude als auch die Frequenz der Oszillation zu. Fahrer, die in keiner Sichtbedingung ein Sogverhalten zeigen, schwanken in ihren Geschwindigkeiten insgesamt weniger stark. Aber auch bei ihnen nehmen Amplitude und Frequenzen der Geschwindigkeitsänderungen im

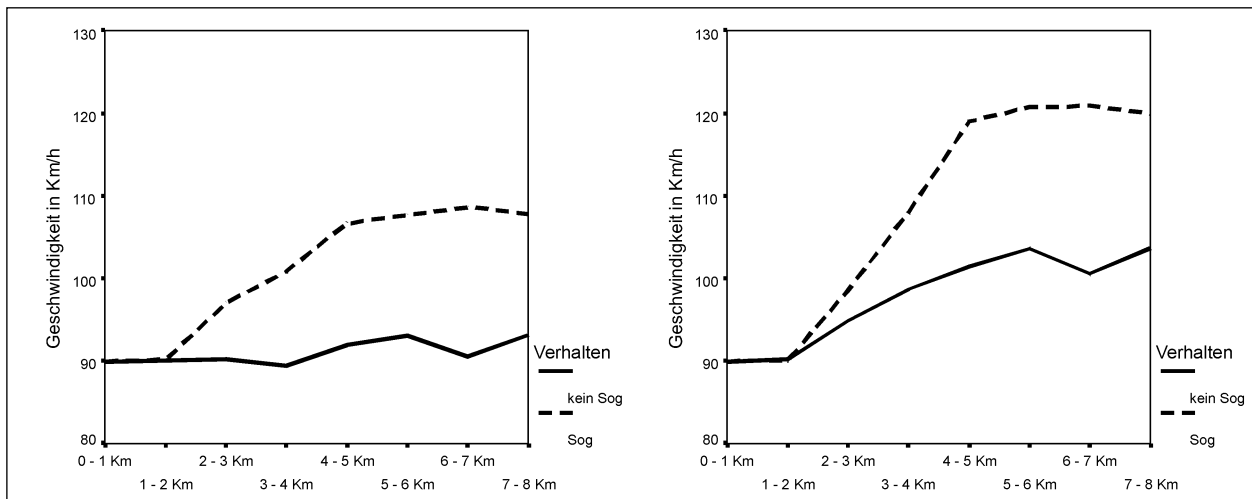


Bild 28: Geschwindigkeitsverlauf auf der Versuchsstrecke bei geringem Nebel mit 80 m Sichtweite. Links bei 15 % Beschleunigung des Vordermanns, rechts bei 30 % Beschleunigung des Vordermanns. Geglättet, über Versuchspersonen gemittelt und eingeteilt nach dem Sogverhalten; Modelluntersuchung 3

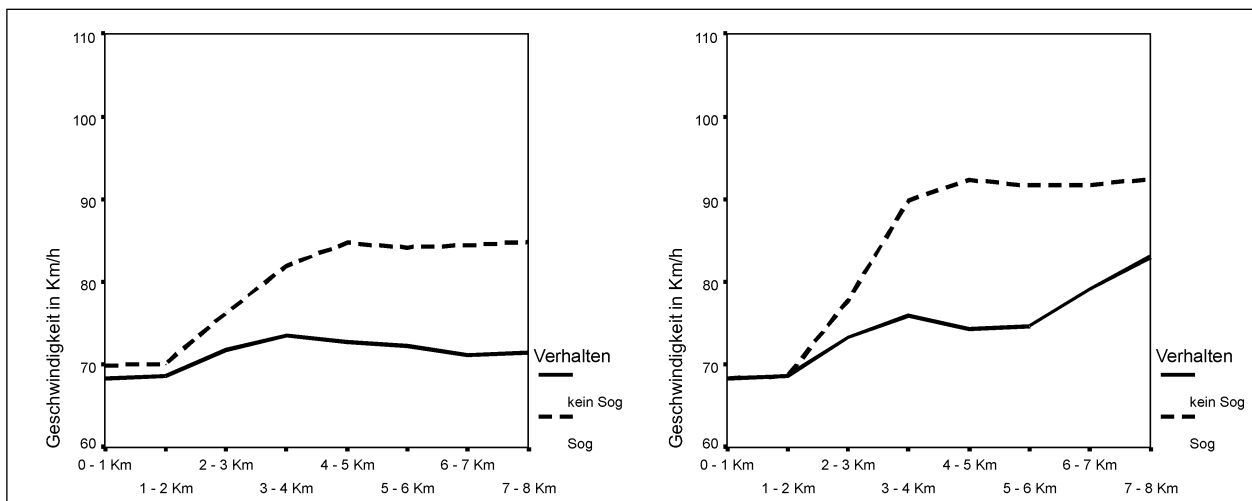


Bild 29: Geschwindigkeitsverlauf auf der Versuchsstrecke bei starkem Nebel mit 50 m Sichtweite. Links bei 15 % Beschleunigung des Vordermanns, rechts bei 30 % Beschleunigung des Vordermanns. Geglättet, über Versuchspersonen gemittelt und eingeteilt nach dem Sogverhalten; Modelluntersuchung 3

Nebel zu. Fahrer, die in allen Sichtbedingungen dem vorausfahrenden Fahrzeug folgen, haben bereits bei klarer Sicht ein leicht oszillierendes Fahrverhalten, das durch das vorausfahrende Fahrzeug hervorgerufen wird. Im Nebel verstärken sich die

Oszillationen stark (Bild 30, unten rechts und Abschnitt 4.4.4).

Im Folgenden werden die Zeitlücken, die die Fahrer zum Vordermann einhalten, genauer analysiert.

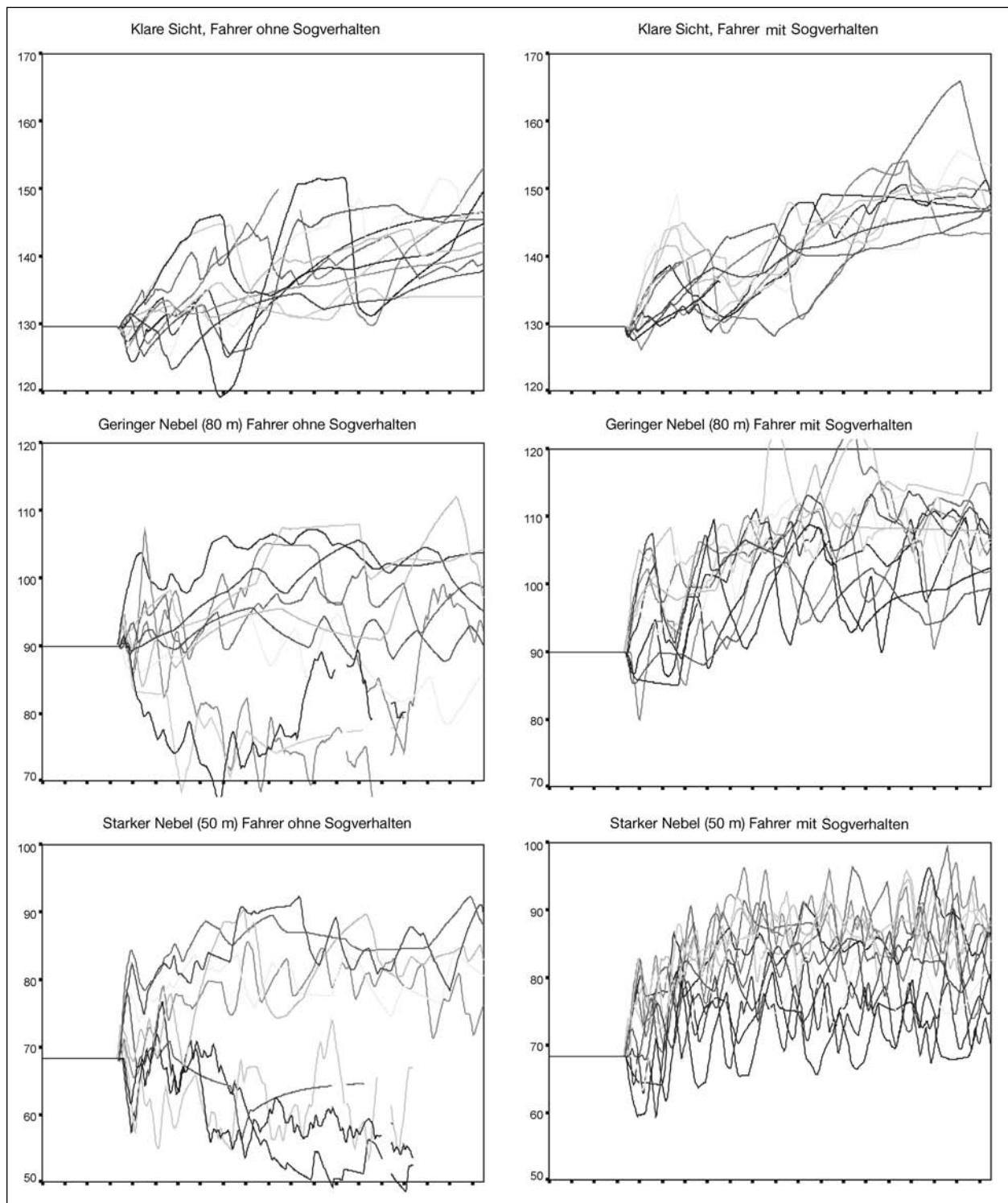


Bild 30: Geschwindigkeitsverläufe für alle Fahrten mit 15 % Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs. Links jeweils die Fahrten von Fahrern, die kein Sogverhalten gezeigt haben, und rechts die Fahrten von Versuchspersonen, die dem vorausfahrenden Fahrzeug gefolgt sind. Die oberen beiden Abbildungen zeigen die Fahrten bei klarer Sicht, in der Mitte bei geringem Nebel und unten bei starkem Nebel; Modelluntersuchung 3

Sinnvollerweise werden dabei nur die Zeitlücken für Fahrten betrachtet, in denen die Fahrer dem vorausfahrenden Fahrzeug folgen, also den Sogeffekt zeigen.

Bild 31 zeigt den Verlauf der Zeitlücken über die Versuchsstrecke getrennt nach Sichtbedingungen. Dabei fällt zunächst auf, dass die Ausgangszeitlücke auf den ersten zwei Kilometern der Strecke bei den Sichtbedingungen sehr unterschiedlich ist. Bei klarer Sicht ergibt sich bei einer Geschwindigkeit von 130 km/h und einem Abstand von 125 m eine Zeitlücke von 3,4 Sekunden. Im geringen Nebel liegt die Ausgangszeitlücke, bei einer Geschwindigkeit von 90 km/h und einem Abstand von 70 m, mit 2,8 Sekunden deutlich niedri-

ger und bei starkem Nebel ist die Zeitlücke zu Beginn bei einer Geschwindigkeit von 70 km/h und einem Abstand von 40 m mit 2,1 Sekunden noch geringer.

Nach dem Entkoppeln des vorausfahrenden Fahrzeugs nach 2.000 Metern ändern sich die Zeitlücken sehr schnell. Während die Fahrer bei klarer Sicht und im geringen Nebel die Zeitlücken verringern, also näher an das vorausfahrende Fahrzeug heranfahren, wird die Zeitlücke im starken Nebel leicht erhöht, der Abstand zum Vordermann also vergrößert. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Ausgangswerte sind die Zeitlücken nach ca. 3.000 Metern in allen Sichtbedingungen mit 2,5 Sekunden wieder etwa gleich groß. In diesem Bereich scheint also die gewünschte Zeitlücke zu liegen.

Die Zeitlücke fällt während der Sogfahrt im Mittel unter keiner Sichtbedingung unter einen Wert von 2,4 Sekunden ab und bleibt somit auch bei starkem Nebel in einem sicheren Bereich. Die Vergrößerung der Zeitlücke unter Klarsicht ist darauf zurückzuführen, dass der Fahrer dem Vorderfahrzeug – das nicht überholt werden durfte – hier aufgrund der guten Sicht auch weiter entfernt folgen konnte.

Die Größenordnungen, in denen sich die Zeitlücken bewegen, sind im Hinblick auf die Entstehung von Nebelunfällen nicht im kritischen Bereich gemäß StVO. Im realen Verkehr sind Zeitlücken unter 2 Sekunden eher die Regel als die Ausnahme. Bild 32 zeigt daher den zeitlichen Anteil der Zeitlücken, die

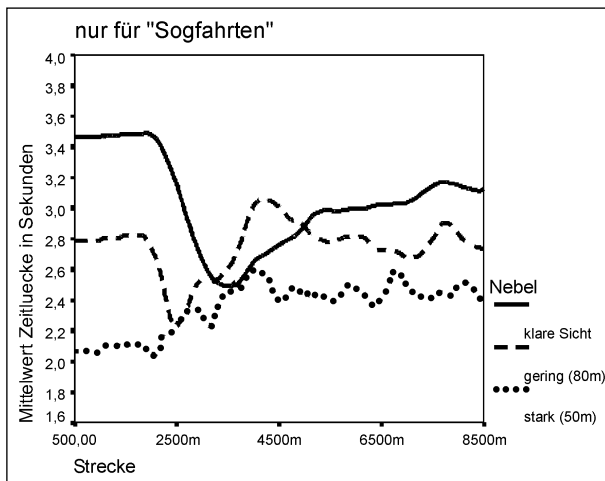


Bild 31: Mittlere Zeitlückenverläufe über die Versuchsstrecke für die Sogfahrten, getrennt nach Nebelbedingungen; Modelluntersuchung 3

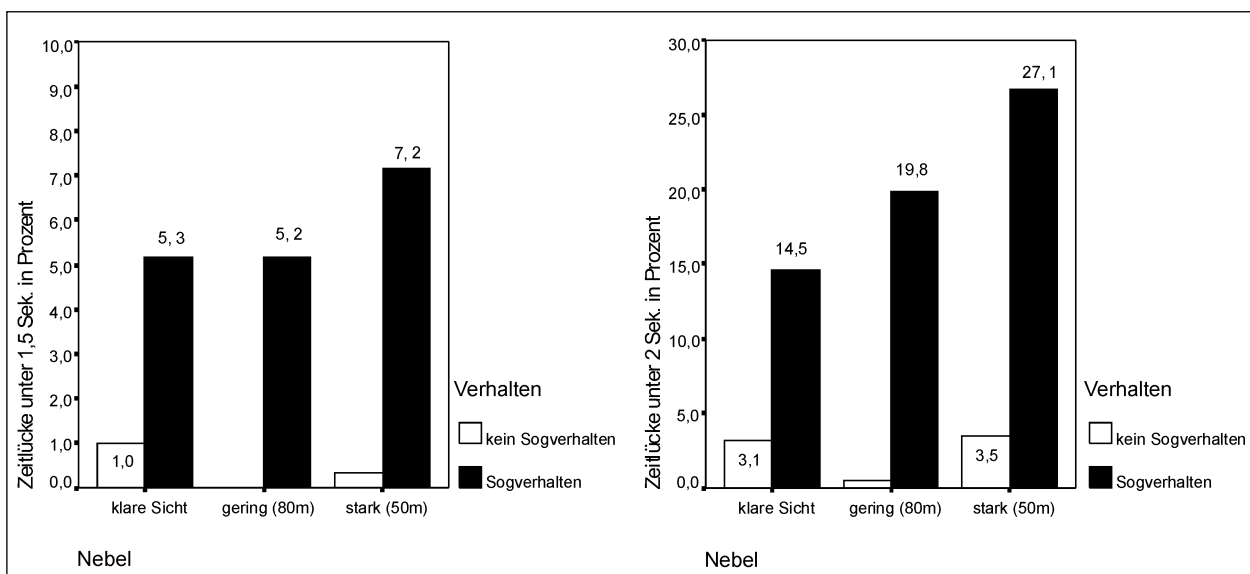


Bild 32: Zeitlicher Anteil von Zeitlücken unter 1,5 Sekunden (links) bzw. unter 2 Sekunden (rechts); Modelluntersuchung 3

unter 2 Sekunden bzw. unter 1,5 Sekunden liegen. Bei Fahrern, die kein Sogverhalten zeigen, ist der Anteil kleiner Zeitlücken natürlich zu vernachlässigen, denn sie können ja nur in dem kurzen Zeitabschnitt entstehen, bis sich das vorausfahrende Fahrzeug entfernt. Bei Fahrern, die das Sogverhalten zeigen, liegt bei klarer Sicht der Anteil an Zeitlücken unter 2 Sekunden bei 14,6 %. Im Nebel nimmt der Anteil zu und liegt bei Nebel mit 50 m Sichtweite mit 27,1 % fast doppelt so hoch. Der Anteil an Zeitlücken unter 1,5 Sekunden unterscheidet sich hingegen nicht bei unterschiedlichen Sichtbedingungen. In allen Sichtbedingungen liegt er bei 5 bis 7 %.

Ergebnisse der Kontrollfahrt

Die Geschwindigkeiten, die während der Kontrollfahrt im Nebel und bei klarer Sicht gefahren werden, unterscheiden sich nicht signifikant von den Geschwindigkeiten, die bei gleichen Sichtbedingungen in den Modelluntersuchungen gefahren wurden. Auch innerhalb der Kontrollfahrt unterscheiden sich die Geschwindigkeiten vor und nach der Nebelbank bei gleichen Sichtverhältnissen nicht voneinander (vgl. Bild 33).

Die in den Modelluntersuchungen angewandte Methode des Hineinbeschleunigens in den Nebel führt somit nicht zu anderen Geschwindigkeiten als das im Alltag häufiger auftretende Hineinbremsen in eine Nebelbank.

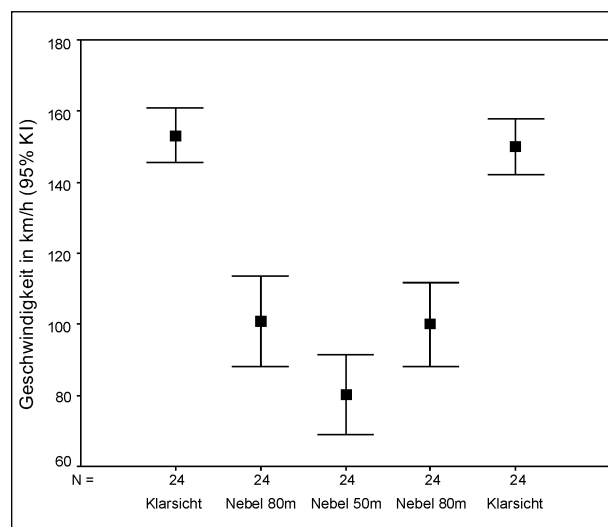


Bild 33: Mittelwerte und Standardabweichungen der Geschwindigkeiten auf den Abschnitten mit unterschiedlichen Sichtverhältnissen der Kontrollfahrt; Modelluntersuchung 3

Ergebnisse des Experiments zur Einstellung der Wunschzeitlücke

Die im Versuchsplan vorgesehene Einstellungsmöglichkeit der Zeitlücke zu zwei verschiedenen Zeitpunkten, zum einen nach Annäherung an das vorausfahrende Fahrzeug und zum Zweiten nach der Beschleunigung des Führungsfahrzeugs, hat nicht zu den gewünschten Daten geführt. Viele Fahrer sind nach dem Beschleunigen des Vordermanns diesem nicht so konsequent gefolgt wie vorgesehen, andere hatten nach der Beschleunigung nur noch entfernten Kontakt zum Führungsfahrzeug. Ein Vergleich der Einstellung der Zeitlücke zum zweiten Zeitpunkt ist daher nicht möglich. Bild 34 bezieht sich somit nur auf den ersten Zeitpunkt, nach Annäherung an das Fahrzeug.

Die eingestellten Zeitlücken sind abhängig von der Sichtbedingung. Bei klarer Sicht wird eine signifikant niedrigere Zeitlücke von den Versuchspersonen hergestellt als in den Nebelfahrten [Varianzanalyse $F(2,69) = 6,73$; $p < 0,01$]. Die Einteilung der Fahrer nach ihrem Sogverhalten bei klarer Sicht in dem Replikationsexperiment (Teil 1 von Modelluntersuchung 3) hatte jedoch keinen signifikanten Einfluss auf die eingestellte Zeitlücke. Tendenziell stellen aber die Fahrer, die kein Sogverhalten zeigten, eine höhere Zeitlücke ein als Fahrer, die ihre Geschwindigkeit dem Kolonnenfahrzeug anpassen. Fahrer, die eher abstandsorientiert fahren, benötigen eine kleinere Zeitlücke zum Vordermann als Fahrer, die eher geschwindigkeitsorientiert fahren.

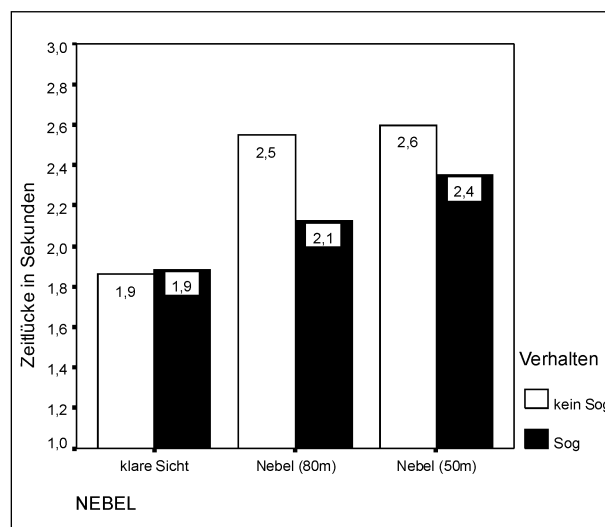


Bild 34: Mittelwert der eingestellten Zeitlücke nach der Annäherung an das vorausfahrende Fahrzeug. Eingeteilt der Fahrer, nach Sogverhalten in der Replikationsstudie; Modelluntersuchung 3

Die eingestellten Zeitlücken im Nebel sind so gewählt, dass das Fahrzeug bei der jeweiligen Geschwindigkeit gerade noch gut gesehen werden kann. Die Zeitlücken liegen damit bei Nebel in dem Bereich, in dem sie auch im Experiment des ersten Teils der Modelluntersuchung 3 lagen. Bei klarer Sicht sind sie hingegen deutlich niedriger.

4.4.4 Oszillationen im Fahrverhalten

Um die beobachtete Zunahme von Oszillationen in der Geschwindigkeitsregulation unter Nebelbedingung auch mathematisch erfassbar zu machen, wurde ein Verfahren angewendet, das den Geschwindigkeitsverlauf über die ganze Fahrtstrecke in seine einzelnen Schwingungen aufteilt. Hierzu wurde die Differenz der Folgewerte der Geschwindigkeit herangezogen.¹ Solange die Geschwindigkeit steigt, ist die Differenz der Folgewerte naturgemäß negativ. Fällt die Geschwindigkeit ab, so ist die Differenz der Folgewerte positiv. An den Umkehrpunkten – den oberen und unteren Kuppen einer Schwingung im Geschwindigkeitsverlauf, die im weiteren als „Berg“ bzw. „Tal“ bezeichnet werden – kehrt sich somit das Vorzeichen der Differenz der Geschwindigkeitswerte um: Bei einem „Berg“, der eine einsetzende Verlangsamung der Geschwindigkeit repräsentiert, ändert sich das Vorzeichen der Differenz der Folgewerte vom Negativen zum Positiven (lokales Maximum). Bei einem „Tal“, das eine einsetzende Beschleunigung wiedergibt, wechselt das Vorzeichen vom Positiven zum Negativen (lokales Minimum). Somit können die Kuppen der Oszillation markiert werden, und es ist möglich, den Abstand zwischen „Berg“ und „Tal“ und damit die zwischenzeitlich vergangene Zeit (= Periode der Schwingung) als auch die Größe der Geschwindigkeitsschwankung zu errechnen (= Amplitude).

Mittels dieses Verfahrens wurden die Geschwindigkeitsverläufe in Modelluntersuchung 3 reanalysiert. Da Modelluntersuchung 3 nicht zum Zwecke der Analyse von Oszillationen im Fahrverhalten konzipiert worden war, sondern dazu das Folgeverhalten bei verschiedenen Sichtbedingungen zu untersuchen war, ergaben sich methodische Probleme für die Auswertung der Oszillationen:

- Die für eine Auswertung zugrunde liegenden Streckenabschnitte sind nicht gleich lang über alle Versuchsbedingungen.

Ausgewertet wurde der Streckenabschnitt im Anschluss nach der Beschleunigung des Vorderfahrzeuges, nachdem dieses seine neue Endgeschwindigkeit erreicht hat. Die Beschleunigung des Vorderfahrzeuges dauert aber in den unterschiedlichen Versuchsbedingungen unterschiedlich lang, sodass der verbleibende Rest der Strecke, der in die Analyse mit einging, ebenfalls nicht gleich lang war.

- Der Faktor Sogfahrer/Nicht-Sogfahrer und der Faktor Vorderfahrzeug/Kein Vorderfahrzeug sind miteinander konfundiert.

Bei der Analyse von Oszillationen in der Geschwindigkeitwahl ist es wichtig, zwischen den Bedingungen zu trennen. Bei vorhandenem Vorderfahrzeug untersucht man die Regulation bei einer Folgefahrt, während man bei nicht vorhandenem Vorderfahrzeug die Regulation bei freier Fahrt analysiert. Beide Bedingungen unterscheiden sich von den Anforderungen an den Fahrer grundlegend und so mit großer Wahrscheinlichkeit auch in der Regulationshandlung. In der hier vorgelegten Analyse ist der Bedingungsfaktor Vorderfahrzeug/Kein Vorderfahrzeug aber stets gekoppelt mit dem fahrer- und situationsspezifischen Faktor Sogfahrt/Keine Sogfahrt. Denn Probanden, die Sogverhalten zeigten, hatten in den untersuchten Streckenabschnitten immer ein Vorderfahrzeug (sie waren diesem ja gefolgt), und Probanden ohne Sogverhalten hatten nie ein Vorderfahrzeug, da sie dieses bereits in der davor liegenden Beschleunigungsphase aus den Augen verloren hatten. Wenn man davon ausgeht, dass das Regulationsverhalten nicht nur von der Bedingung (Vorderfahrzeug ja/nein), sondern auch von dem situativen Sogverhalten des Fahrers abhängt, so sind diese beiden Faktoren hier immer konfundiert. Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu beachten.

- Eine inferenzstatistische Auswertung ist nicht möglich, da die Zellbesetzung unterschiedlich ist.

Versuchsbedingung	Streckenabschnitt
Klarsicht 15 % Beschleunigung	1.000 m (8.000-9.000)
Nebel 80 m 15 % Beschleunigung	3.500 m (5.500-9.000)
Nebel 50 m 15 % Beschleunigung	4.500 m (4.500-9.000)
Klarsicht 30 % Beschleunigung	2.000 m (7.000-9.000)
Nebel 80 m 30 % Beschleunigung	4.000 m (5.000-9.000)
Nebel 50 m 30 % Beschleunigung	5.000 m (4.000-9.000)

Tab. 12: Länge der in die Analyse der Oszillationen von Modelluntersuchung 3 eingegangenen Abschnitte und ihre Position auf der Gesamtstrecke, in Klammern nach Versuchsbedingung

¹ Die Geschwindigkeit wurde mit 20 HZ aufgezeichnet.

Da das Sogverhalten individuell nicht über alle Versuchsbedingungen stabil ist, ist auch die Zellbesetzung für Sog- bzw. Nicht-Sogfahrer in den Versuchsbedingungen höchst unterschiedlich. Da manche Zellen sehr gering besetzt sind, ist von der sonst üblichen inferenzstatistischen Auswertung über eine Varianzanalyse abzuraten. Die unterschiedliche Länge der untersuchten Streckenabschnitte führt weiterhin dazu, dass unter Klarsichtbedingung nur um zwanzig Oszillationen über alle Probanden ausgewertet werden konnten, während es im Nebel um 200 Oszillationen sind.

Trotz dieser Probleme können die folgenden Ergebnisse einen ersten Einblick in das Oszillationsverhalten unter verschiedenen Sichtbedingungen geben und auch als Grundlage zur Eingabe in eine Verkehrssimulation genutzt werden (siehe Kapitel 6). Für eine genauere Analyse des Oszillationsverhaltens in der Geschwindigkeitsregulation sind weitere Untersuchungen, die die oben erwähnten Probleme lösen, derzeit am Institut für Psychologie der RWTH Aachen in Planung.

Bei der Ergebnisbetrachtung sollte beachtet werden, auf welche Basis sich die Kennwerte beziehen. So ist es bei der Amplitude (dem Ausmaß der Geschwindigkeitsvariation) sinnvoll, diese nicht nur als Absolutwerte in km/h aufzuzeigen, sondern sie auch auf die mittlere gefahrene Geschwindigkeit zu beziehen und in Prozent von dieser wiederzugeben. Denn eine Schwankung von 4 km/h ist bei einer Durchschnittsgeschwindigkeit von 140 km/h anders zu bewerten als bei einer mittleren Geschwindigkeit von 80 km/h. Bei der Periode (die Dauer einer Geschwindigkeitsschwankung) sollte man sich auf die Zeitachse und nicht auf die vergangenen Streckenmeter beziehen, denn die Zeitachse gibt die Handlungsebene des Fahrers wieder. Dieser hat unter allen Sichtbedingungen und über alle Geschwindigkeiten immer dieselbe Zeit, um regulierend auf die Geschwindigkeit einzuwirken. Die zurückgelegten Streckenmeter hingegen sind geschwindigkeitsabhängig und entsprechen der Perspektive eines externen Beobachters.

Betrachten wir zunächst die Sogfahrer, die ein Vorderfahrzeug vor sich hatten: Wie Bild 35 zeigt, nimmt die Periode der Schwingung im Nebel ab – es wird schneller oszilliert. Dies ist sowohl in den Versuchsbedingungen der Fall, in denen das Vorderfahrzeug vorher mit 15 % beschleunigt hatte, als auch, wenn es mit 30 % beschleunigt hatte. Da sich der ausgewertete Streckenabschnitt nach der

Beschleunigung befand, sind die beiden Bedingungen 15 % Beschleunigung und 30 % Beschleunigung als Replikationen anzusehen.

Das Ausmaß der Geschwindigkeitsschwankung wird in Bild 36 zunächst in Absolutwerten (km/h) und in Bild 37 in Prozent der mittleren gefahrenen Geschwindigkeit wiedergegeben. Während sich die Absolutwerte in den Sichtbedingungen kaum unterscheiden und das Ausmaß einer Schwankung stets um die 5 km/h liegt, so ist der Unterschied der Schwankungsamplitude in Prozent der durchschnittlich gefahrenen Geschwindigkeit deutlich unterschiedlich in den einzelnen Sichtbedingungen. Bei Nebel wird relativ zur Ausgangsgeschwin-

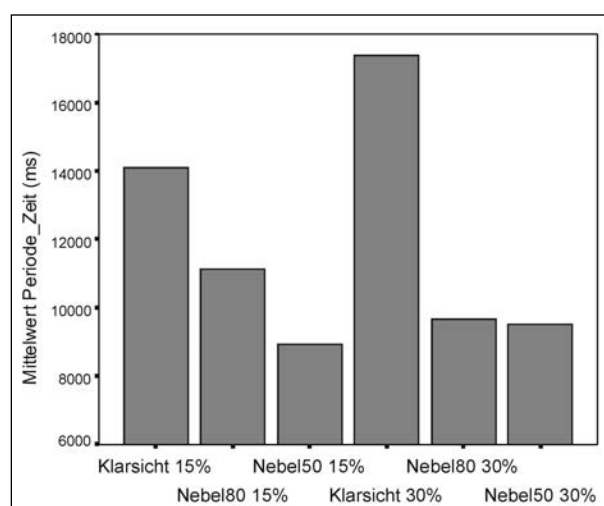


Bild 35: Dauer einer Halbschwingung im Geschwindigkeitsverlauf (Berg → Tal oder Tal → Berg) unter verschiedenen Sichtbedingungen in Modelluntersuchung 3 für Sogfahrer (= mit Vorderfahrzeug)

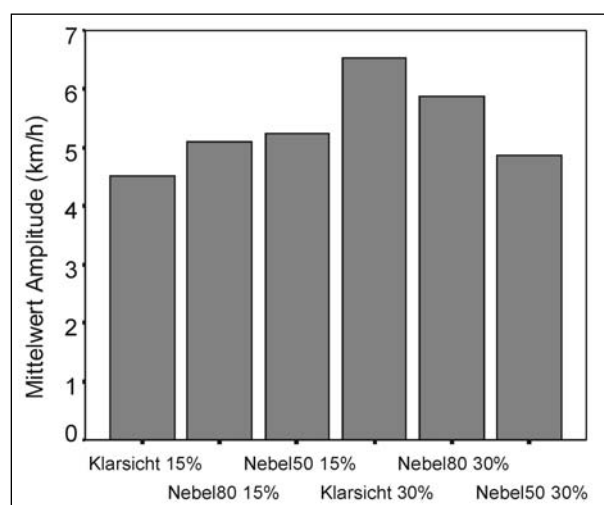


Bild 36: Ausmaß einer Halbschwingung (Berg → Tal oder Tal → Berg) in Absolutwerten (km/h) unter verschiedenen Sichtbedingungen in Modelluntersuchung 3 für Sogfahrer (= mit Vorderfahrzeug)

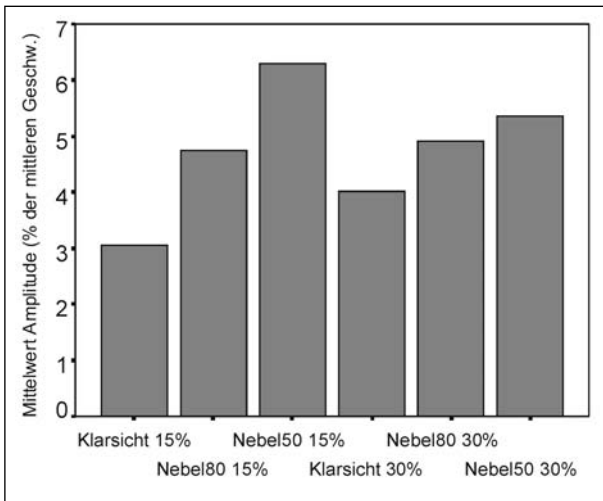


Bild 37: Ausmaß einer Halbschwingung (Berg → Tal oder Tal → Berg) in Prozent der mittleren gefahrenen Geschwindigkeit unter verschiedenen Sichtbedingungen in Modelluntersuchung 3 für Sogfahrer (= mit Vorderfahrzeug)

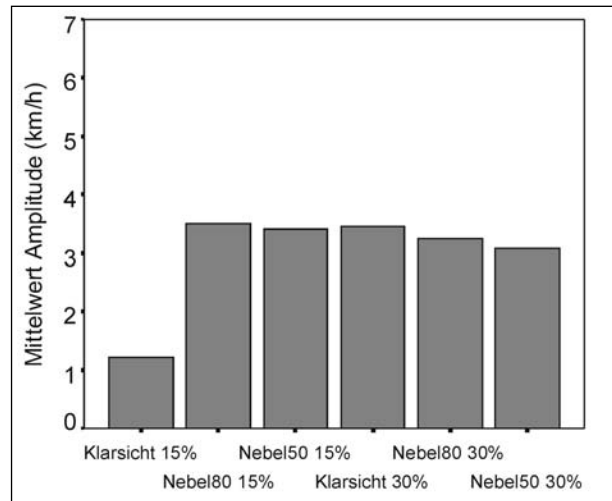


Bild 39: Ausmaß einer Halbschwingung (Berg → Tal oder Tal → Berg) in Absolutwerten (km/h) unter verschiedenen Sichtbedingungen in Modelluntersuchung 3 für Nicht-Sogfahrer (= ohne Vorderfahrzeug)

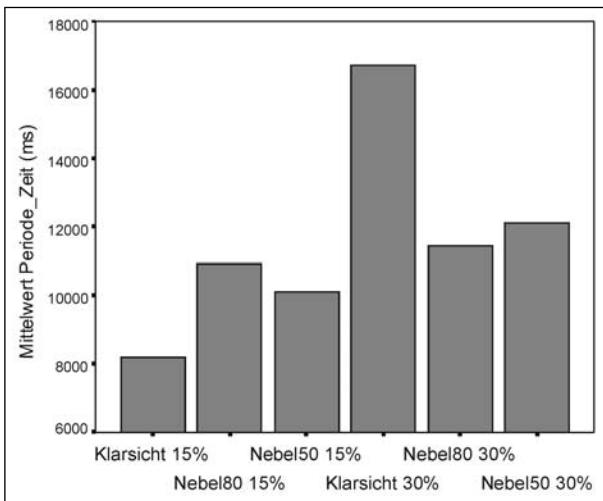


Bild 38: Dauer einer Halbschwingung im Geschwindigkeitsverlauf (Berg → Tal oder Tal → Berg) unter verschiedenen Sichtbedingungen in Modelluntersuchung 3 für Nicht-Sogfahrer (= ohne Vorderfahrzeug)

digkeit stärker geschwankt als unter Klarsicht. Dies erklärt sich durch ähnliche Absolutwerte der Amplitude bei niedrigerer Geschwindigkeit unter Nebel.

In Fahrsituationen mit Vorderfahrzeug kommt es also im Nebel zu einer schnelleren Oszillation – es wird in derselben Zeit mehr nachgeregelt – und einer stärkeren Oszillation im Ausmaß bezogen auf die mittlere gefahrene Geschwindigkeit.

In Fahrsituationen ohne Vorderfahrzeug sieht es nicht ganz so deutlich aus: Wie Bild 38 zeigt, lässt sich bei der mittleren Dauer der Geschwindigkeitsschwankung kein eindeutiger Trend ausmachen. Auffällig sind die mittleren Perioden bei Klarsicht,

die mal ganz kurz (unter Klarsicht 15 % Beschleunigung), mal sehr lang sind (unter Klarsicht 30 % Beschleunigung). Da sich beide Bedingungen aber für die hier durchgeführte Auswertung nicht wesentlich unterscheiden und als Replikationen anzusehen sind, zeigen sich an dieser Stelle die oben beschriebenen Probleme in der Auswertung. Unter Klarsicht 15 % wurden insgesamt nur 14 Oszillationen erhoben und unter Klarsicht 30 % nur 61 Oszillationen über alle Versuchspersonen. Bei Nebel ist die Anzahl der den Kennwerten zugrunde liegenden Oszillationen weit über 100. Somit sind die Ergebnisse hier nur schwer interpretierbar.

Das Problem der ungleichen Zellbesetzung gilt natürlich auch für das Ausmaß der Geschwindigkeitsschwankung. Hier zeigt sich in den Absolutwerten ein ähnlicher Effekt wie bei den Probanden mit Vorderfahrzeug. Die Absolutwerte des Ausmaßes der Oszillation verändern sich nicht über die Sichtbedingungen (Bild 39). Da die Geschwindigkeiten im Nebel aber abnehmen, nimmt der prozentuale Anteil der Amplitude an der mittleren gefahrenen Geschwindigkeit im Nebel zu (Bild 40).

Fahrsituationen ohne Vorderfahrzeug können hier nur unzureichend ausgewertet werden, da die Anzahl der in die Analyse eingehenden Oszillationen unter Klarsicht zu gering ist. Bei einem Vergleich der Nebelbedingungen, die von der zugrunde liegenden Anzahl der Kennwerte her gleich sind, zeigt sich auch keine eindeutige Tendenz. Vergleicht man aber die Amplitude der Geschwindigkeitsschwankung in den Nebelbedingungen mit und

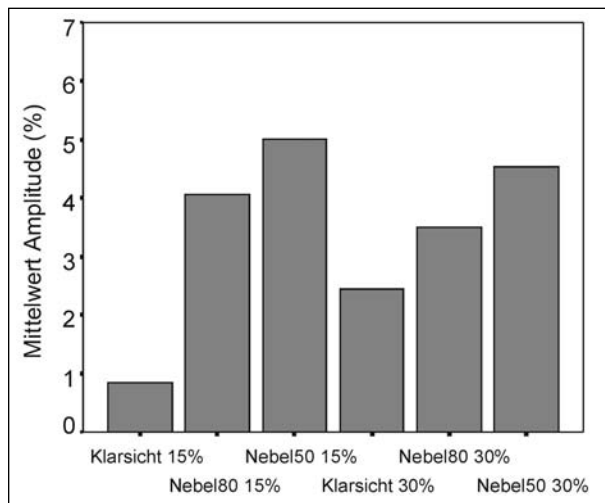


Bild 40: Ausmaß einer Halbschwungung (Berg → Tal oder Tal → Berg) in Prozent der mittleren gefahrenen Geschwindigkeit unter verschiedenen Sichtbedingungen in Modelluntersuchung 3 für Nicht-Sogfahrer (= ohne Vorderfahrzeug)

ohne Vorderfahrzeug (Bild 36 und Bild 39), so fällt auf, dass ohne Vorderfahrzeug im Schnitt weniger stark geschwankt wird (Amplitude ca. 3,5 km/h) als bei vorhandenem Vorderfahrzeug (Amplitude ca. 5 km/h). Da die Anzahl der Werte unter den Nebelbedingungen recht hoch und die Streckenlänge vergleichbar ist, ist diese Aussage als reliabel anzusehen.

Um eine genauere Analyse der Geschwindigkeitsschwankungen beim Autofahren zu geben, ist aber weitere Forschungsarbeit nötig.

4.4.5 Diskussion

Die Replikation des Experiments aus Modelluntersuchung 2 mit festen Ausgangsgeschwindigkeiten hat gezeigt, dass bei moderater Beschleunigung des Vordermanns etwa die Hälfte der Versuchspersonen ihre Geschwindigkeit ebenfalls erhöht und dem Kolonnenfahrzeug folgt. Die andere Hälfte behält die Geschwindigkeit bei, wird aber auch nicht langsamer, was der Fall wäre, wenn diesen Fahrern die Ausgangsgeschwindigkeit bereits zu hoch gewesen wäre. Das Sogverhalten zeigt sich unabhängig von den Sichtbedingungen. Die Anzahl der Fahrer, die dieses Verhalten zeigen, steigt bei zunehmendem Nebel nur geringfügig.

Bei stärkerer Beschleunigung des Vordermanns machen weniger Fahrer diese Geschwindigkeitserhöhung mit. Im Nebel steigt die Zahl aber etwas deutlicher an. Die Mehrheit der Fahrer folgt dem sich schnell entfernenden Fahrzeug nicht, erhöht

aber in allen Bedingungen dennoch im Laufe der Fahrt die Geschwindigkeit. Einige der Fahrer wählen also, nachdem das vorausfahrende Fahrzeug sich entfernt hat, eine höhere Geschwindigkeit als die Ausgangsgeschwindigkeit.

Bei den Fahrten mit festen Ausgangsgeschwindigkeiten werden von den Fahrern, die dem Kolonnenfahrzeug folgen, Geschwindigkeiten erreicht, die deutlich über den unter Sicherheitsaspekten empfehlenswerten Geschwindigkeiten liegen, denn bereits die Ausgangsgeschwindigkeiten waren für die Sichtbedingungen bereits an der oberen Grenze. Wieder sind die Fahrer dem vorausfahrenden Fahrzeug bewusst gefolgt, weil sie glaubten, es sei sicherer, das nächste Hindernis zu sehen, und dafür etwas zu schnell zu fahren, als langsamer allein vor eine weiße Wand zu fahren. Diejenigen, die den Sogeffekt gezeigt haben, haben also nicht fahrlässig gegen die Empfehlung verstoßen, im Nebel nicht schneller zu fahren, sondern sie haben sich vielmehr aus Sicherheitsüberlegungen für ein solches Verhalten entschieden. Es erschien ihnen sicherer, auch an einem etwas zu schnellen Fahrzeug dranzubleiben, als alleine durch den Nebel zu fahren. Dieses Ergebnis ist für die Entwicklung von Maßnahmeempfehlungen von Bedeutung und wird in der Gesamtdiskussion noch einmal aufgegriffen.

In dem Replikationsexperiment führen im Nebel diejenigen, die das Sogverhalten gezeigt haben, mit Zeitlücken im nicht sicherheitskritischen Bereich von 2,5 s. Wenn sie die Möglichkeit hatten, die Zeitlücke frei einzustellen, wählten sie im Nebel eine deutlich höhere Zeitlücke als bei klarer Sicht. Fahrer, die kein Sogverhalten gezeigt haben, stellten im Nebel eine höhere Zeitlücke ein. Hier zeigt sich möglicherweise, dass Fahrer, die eher abstandsorientiert fahren und eher bereit sind, sich der Geschwindigkeit eines vorausfahrenden Fahrzeugs anzupassen, einen niedrigeren minimalen Folgeabstand haben als Fahrer, die eher geschwindigkeitsorientiert fahren.

5 Analyse von Autobahndaten

5.1 Reanalyse der Daten von RICHTER und SCHLAG

In der Studie „Psychologische Untersuchungen zu Nebelunfällen“ von Susan RICHTER und Bernhard SCHLAG (2000) wurden Verkehrsdaten ausgewertet, die an der BAB A 13 zwischen Berlin und Dres-

den an einer Induktionsschleife bei der Anschlussstelle Schönborn erhoben wurden. In die Auswertung gingen fünf Tage ein, an denen die Sichtweite mindestens einmal unter 400 m sank. Die in der Studie dargestellten Analysen lassen jedoch eine Reihe von Fragen offen und sind unter methodischen Gesichtspunkten nicht eindeutig zu interpretieren. Deshalb wurden die Daten von uns erneut analysiert. Die Rohdaten stellten die Autoren der Originalstudie zur Verfügung.

5.1.1 Der Datensatz

Bei den vorliegenden Daten handelt es sich um die Messdaten von fünf Tagen (30.11.1995-01.12.1995-29.02.1996-06.04.1996-10.04.1996) à 24 Stunden. Es wurden jeweils beide Fahrtrichtungen und beide Fahrspuren aufgenommen. Darüber hinaus wurde in 5-Minuten-Intervallen die Sichtweite mit einem transportablen Sichtweiten-Messgerät gemessen.

Die Datensätze geben Auskunft über die Geschwindigkeit des jeweiligen Fahrzeugs, den Zeitpunkt, zu dem es die Messschleife passierte, die Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug, die Fahrspur, die Fahrtrichtung, den Tag sowie die Sichtweite. Es ist nicht bekannt, nach welchem Schema die Umrechnung der aufgezeichneten Achsdaten in Autos erfolgte. Ferner gab es keine Unterscheidung von Pkw, Pkw mit Anhänger oder Lkw etc.

Eine nähere Betrachtung der Rohdaten zeigte Probleme bezüglich der Verwertbarkeit der erhobenen Daten. Lediglich an zwei der fünf Tage sank die Sichteinschränkung in den Bereich unter 250 m. Auch die Wetterdaten zeigen nur für diese Tage ein Nebelaufkommen. Daher wurden in der erneuten Analyse lediglich der 29.02.96 und der 06.04.96 als Nebeltage berücksichtigt. Die beiden Tage sind jedoch aus anderen Gründen ebenfalls kritisch: Zum einen herrschte laut Wetterbericht am 29. Februar nicht nur Nebel, sondern auch Glatteis. Zum anderen handelte es sich bei dem 6. April um einen Samstag. Diese Umstände konnten bei der Analyse nicht berücksichtigt werden, da sonst keine Nebeltage für eine Auswertung zur Verfügung gestanden hätten.

In der ursprünglichen Studie wurden in der Auswertung jeweils alle Fahrzeuge im Nebel mit allen anderen Fahrzeugen (d. h. alle Fahrzeuge bei Klarsicht) verglichen. Dies führt zu erheblichen Differenzen in der Stichprobengröße. Außerdem lagen

für beide Gruppen unterschiedliche Uhrzeiten, Helligkeiten und Verkehrsstärken vor. Um diese methodische Problematik bei der Reanalyse zu umgehen, wurden Kontrollgruppen aus nebelfreien Messungen gebildet, die in Uhrzeit, Helligkeit, Anzahl der Fahrzeuge und anderen Variablen mit den jeweiligen Nebelfahrtgruppen übereinstimmen.

In der folgenden Analyse werden lediglich die Nebelgruppen und ihre entsprechenden Vergleichsgruppen analysiert. Für eine detaillierte Auswertung der gesamten Autobahndaten sei auf die Originalstudie verwiesen. Dort finden sich auch Informationen zur Verkehrsstärke und anderen Faktoren bezüglich der gemessenen Tage.

5.1.2 Ergebnisse

Nebeltage

Die beiden verwendeten Nebeltage (29. Februar & 6. April) lassen sich hinsichtlich der Verkehrsstärke und der gefahrenen Geschwindigkeiten folgendermaßen beschreiben: Es zeigt sich für den 29. Februar eine zweigipflige Verteilung, die aufgrund der Stoßzeiten des Berufs- und Feierabendverkehrs zu erklären ist. Für den 6. April ergibt sich keine solche charakteristische Verteilung, da es sich hier um einen Samstag handelte. An beiden Tagen zusammen wurden insgesamt 33.766 Fahrzeuge registriert (29. Februar: 15.399 und 6. April: 18.367). Bezogen auf die Einzeltage kann man von einem ähnlich hohen Verkehrsaufkommen sprechen.

Tabelle 13 gibt die mittlere Geschwindigkeit und die mittlere Verkehrsstärke für die beiden Tage bei vorherrschendem Nebel und die beiden Vergleichstage bei klarer Sicht an. Die etwas höheren Verkehrsstärken bei Nebel lassen sich zum einen mit den leicht niedrigeren Geschwindigkeiten, zum größeren Teil aber mit dem Auftreten des Nebels in den frühen Morgenstunden zur Zeit des Berufsverkehrs (Einkaufsverkehrs) erklären. Auffällig ist die nur wenig geringere mittlere Geschwindigkeit im Nebel bezogen auf Zeiten ohne Nebel. Hierbei ist zu bedenken, dass bei dieser Auswertung über verschiedene Nebelkategorien gemittelt worden ist (Sichtweiten unter 50 m bis 400 m). Insgesamt können beide Tage als vergleichbar betrachtet werden.

Wie zu erwarten, lag die mittlere Geschwindigkeit auf der linken Spur, sowohl im Nebel als auch ohne Nebel, deutlich höher als auf der rechten. Damit einhergehend war die Verkehrsstärke niedriger.

Datum	Eckdaten	Nebel	kein Nebel
29.02.96	mittlere Geschwindigkeit [km/h]	94,8	97,7
	mittlere Verkehrsstärke [N/h]	547,7	426,9
06.04.96	mittlere Geschwindigkeit [km/h]	93,1	99,6
	mittlere Verkehrsstärke [N/h]	636,6	539,4

Tab. 13: Vergleich von Zeiten mit und ohne Sichtbehinderung durch Nebel. Mittlere Geschwindigkeit und Verkehrsstärke für beide Tage; Reanalyse

Deshalb müssen die beiden Fahrspuren einer separaten Analyse unterzogen werden.

Bezüglich des Verkehrsaufkommens sind beide Fahrtrichtungen vergleichbar. Unterschiede ergeben sich allerdings hinsichtlich der mittleren Geschwindigkeiten. So sind die Geschwindigkeiten in Richtung Berlin allgemein niedriger, zeigen jedoch gleichermaßen eine verringerte Geschwindigkeit bei Nebel, deren Ursache sich aus den Daten heraus nicht klären lässt. Möglicherweise liegt im Bereich der Messschleife eine Steigung in Richtung Berlin. Daher ist es notwendig, auch hinsichtlich der Fahrtrichtung separate Analysen vorzunehmen.

Klartage

Als Klartage für die Auswahl der entsprechenden Vergleichsgruppen wurden der 30. November, der 1. Dezember und der 10. April ausgewählt. Insgesamt wurden 65.323 Fahrzeuge ausgewertet (30. November: 18.805, 1. Dezember: 24.825, 10. April: 21.693). Die zeitliche Verteilung der Verkehrsstärken ergab für den 30. November (Donnerstag) zwei getrennte Maxima zur Zeit des Berufs- und des Feierabendverkehrs. Die Verkehrsdichte am 1. Dezember (Freitag) ist charakterisiert durch eine sehr hohe Verkehrsstärke am späten Nachmittag. Der Verlauf der Verkehrsstärken am 10. April (Mittwoch) zeigt wieder den typischen zweigipfligen Verlauf, obwohl das Verkehrsaufkommen durchweg hoch war und es nur zu einer geringen Ausprägung von Maxima kam.

Ähnlich wie an den beiden Nebeltagen unterscheiden sich die beiden Fahrspuren (gemittelt über die drei Klartage) hinsichtlich der mittleren Geschwindigkeit. Die Betrachtung der mittleren Geschwindigkeit und Verkehrsstärke pro Fahrtrichtung zeigt erneut unterschiedlich hohe Geschwindigkeiten bezogen auf die beiden Fahrtrichtungen.

Analyse des Fahrverhaltens im Nebel

Aufgrund der Erkenntnisse, die aus der allgemeinen Analyse der Messdaten gewonnen worden

sind, müsste die Analyse nach einer mehrfaktoriellen Varianzanalyse erfolgen. So müssten aufgrund des Einflusses des Tageslichts Helligkeitskategorien als Faktor eingehen. Ferner wäre die Uhrzeit (z. B. in Abschnitten von einer Stunde) zu berücksichtigen, ebenso die Fahrspur und besonders die Fahrtrichtung und nicht zuletzt das Datum. Dies würde zu einer nicht mehr zu überblickenden Anzahl von Wechselwirkungen führen. Zudem würden bei dieser Aufspaltung viele der Untergruppen aus weniger als fünfzig Fahrzeugen bestehen. Aus diesen Gründen sind zunächst einfache T-Tests berechnet worden. Diese wurden sowohl über alle Daten ausgeführt als auch nach bestimmten Faktoren (z. B. Fahrtrichtung, Fahrspur oder Tag) getrennt. Ferner wurde eine Auswahl von ein- und mehrfaktoriellen Varianzanalysen berechnet. Die ersten T-Tests berücksichtigten die abhängigen Variablen „Geschwindigkeit“, „Zeitlücke zum Vordermann“, „Abstand zum Vordermann“ und „Verkehrsstärke“.

Überraschend ist das Ergebnis für die Zeitlücken und den Abstand zum Vordermann. Beide sind bei Nebel signifikant größer. Man hätte eher geringere Abstände erwartet. Eine Erklärung für diesen überraschenden Befund liefert die Auswertung der Verkehrsstärke. Diese ist während der ausgewerteten Fahrten ohne Nebel signifikant größer. Zudem ist sie generell niedrig. Bei ca. 600 Fahrzeugen pro Stunde ergeben sich lediglich zehn Fahrzeuge pro Minute. Daraus lässt sich folgern, dass, generell betrachtet, die Verkehrsstärke in Nebelabschnitten nicht so hoch war, dass eine gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Verkehrsteilnehmer im Nebel für alle Fahrer vorlag. Die Tatsache, dass die Verkehrsstärke ohne Nebel höher war, erklärt sich aus den allgemein höheren Verkehrsstärken während der Klartage (1. Dezember und 10. April), die bei der Bildung der Vergleichsgruppen herangezogen wurden. Diese Probleme bei der Vergleichbarkeit der einzelnen Tage lässt sich innerhalb des Datensatzes nicht beheben. Wünschenswert wären jedoch Vergleichstage mit ähnlichen Verkehrsstärken.

Nebeffekt und Fahrtrichtung

Da sich die beiden Fahrtrichtungen in dem zu beobachtenden Fahrverhalten deutlich unterscheiden, wurde das Fahrverhalten im Nebel getrennt für die jeweilige Fahrtrichtung ausgewertet. Es fällt auf, dass die Geschwindigkeiten in Richtung Berlin deutlich geringer sind. Dennoch wird die Geschwindigkeit im Nebel sowohl in Richtung Berlin (um 3,9 km/h) als auch in Richtung Dresden (um 5 km/h) gesenkt.

Nebeffekt und Fahrspur

Leider lassen es die Daten nicht zu, eine eindeutige Analyse bezüglich des Fahrzeugtyps auszuführen. Die Analyse bezogen auf die Fahrspur berücksichtigt dies aber ansatzweise mit, da sich der Lkw-Verkehr auf die rechte Fahrspur konzentriert und diese dominiert.

Natürlich ist die mittlere Geschwindigkeit auf der linken Spur höher. Jedoch kommt es während des Nebels auch zu einer stärkeren absoluten Verringerung der Geschwindigkeit (rechte Spur: 3,6 km/h – linke Spur: 7,1 km/h). Bezüglich der rechten Fahrspur lässt sich sagen, dass der Nebel hier nur geringe Effekte verursacht. Dies kann an dem höheren Anteil des Lkw-Verkehrs liegen, der sich aufgrund der langsameren Normalgeschwindigkeit und der gleichmäßigeren Fahrweise weniger auf die unterschiedlicheren Sichtbedingungen einstellen muss.

Nebeffekt in Abhängigkeit von der Nebelstärke

Im Folgenden werden nur noch die Messdaten betrachtet, die zu Zeiten mit Nebel aufgenommen worden sind.

Die Nebeldata wurden in vier Kategorien unterschiedlicher Nebelstärke eingeteilt: Kategorie 1 bis 50 m Sichtweite, Kategorie 2 von 51 bis 100 m

Sichtweite, Kategorie 3 von 101 bis 250 m Sichtweite und Kategorie 4 von 251 bis 400 m Sichtweite.

Unter Verwendung der Kategorien wurde mit vierstufigem Faktor Nebelstärke eine Varianzanalyse für die verschiedenen erhobenen Daten als abhängige Variablen gerechnet (vgl. Tabelle 14).

Es zeigt sich, dass die Geschwindigkeit mit zunehmender Sichtweite zunimmt. Dieser Effekt ist hochsignifikant ($p < .001$). Die Zeitlücke ($p > .2$) und der Abstand zum Vordermann unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Nebelstärke jedoch nicht signifikant. Die Nebelstärke hat also lediglich einen Einfluss auf die Geschwindigkeit.

Jedoch ist die Verringerung der Geschwindigkeit in Bezug auf die Sichtweite nicht ausreichend. Die Anpassung des Fahrverhaltens erfolgt somit nicht in ausreichendem Maße, wie auch die folgende Analyse zeigt.

Es wurde eine Unterteilung in angepasstes und unangepasstes Verhalten vorgenommen. Ein angepasstes Fahrverhalten lag vor, wenn die Geschwindigkeit kleiner als die aktuell vorherrschende Sichtweite plus maximal 10 km/h war. Ein unangepasstes Fahrverhalten lag vor, wenn die Geschwindigkeit größer als die Sichtweite plus 10 km/h war. Für diese Einteilung werden nur die Daten für die beiden Sichtweitenkategorien „bis 50 m“ und „51 bis 100 m“ berücksichtigt.

Ausgewertet über beide Fahrspuren zeigt sich, dass in der starken Nebelkategorie durchweg ein unangepasstes Fahrverhalten zu beobachten ist. Bei Sichtweiten bis 100 m fährt ungefähr die Hälfte aller Verkehrsteilnehmer unangepasst.

Wertet man beide Fahrspuren getrennt aus, so zeigt sich, dass bei Sichtweiten unter 50 m auf beiden Spuren durchweg unangepasst gefahren wird. Auf der linken Spur findet sich gar kein Verkehrs-

	Sichtweite							
	bis 50 m		51 – 100 m		101 – 250 m		251 – 400 m	
	MW	St.-A.	MW	St.-A.	MW	St.-A.	MW	St.-A.
Geschwindigkeit [km/h]	89,7	20,8	87,8	18,5	94,0	19,1	98,1	20,2
Zeitlücke zum VM [sec.]	11,9	19,0	13,4	27,7	14,6	44,2	14,2	32,8
Abstand zum VM [m]	318,2	542,6	355,4	780,6	394,5	1260	398,7	964,4
Verkehrsstärke [N/h]	608,9	153,7	596,2	169,2	617,3	222,7	600,4	219,6
Ausgewertete Fahrzeuge	1.106		506		2.012		1.482	

Tab. 14: Effekt des Nebels auf die Fahrweise unter verschieden starker Einschränkung der Sichtweite. Mittelwerte (MW) sowie Standardabweichungen (St.-A.) für Geschwindigkeit, Zeitlücke, Abstand und Verkehrsstärke. Angegeben ist ferner die Anzahl der ausgewerteten Fahrzeuge. Ausgewertet wurde nur über Fahrten im Nebel; Reanalyse

teilnehmer mit angepasstem Verhalten. Bei Sichtweiten bis 100 m ändert sich das Bild. Während auf der linken Spur fast nur unangepasst gefahren wird, zeigt sich für die rechte Spur, dass die Hälfte der Verkehrsteilnehmer angepasst fährt.

Eine Diskussion von Abstand und Zeitlücken ist angesichts der geringen Verkehrsstärke und der dadurch entstehenden riesigen Zeitlücken nicht interessant.

Nebeneffekt und Zeitlücke zum Vordermann

In der Originalstudie wurde bezüglich der Kolonnen-Fahrweise eine Einteilung in drei Kategorien getroffen:

Kolonne: Zeitlücke kleiner 2 sec.

Lockerer Verbund: Zeitlücke von 2 sec. bis 20 sec.

Einzelfahrer: Zeitlücke größer 20 sec.

Diese Einteilung ist jedoch weder üblich noch zweckmäßig. In anderen Arbeiten zur Auswertung von Autobahnmessdaten (z. B. Elbtunnelprojekt der fka Aachen) wird die Zeitlücke in drei andere Kategorien gegliedert, die sich auf die gesetzlich vorgeschriebene Zeitlücke (1,8 sec. = halber Tachoabstand) und den Grenzwert, ab dem man vom „freien Fahren“ spricht (3 sec.), beziehen. Eine Unterteilung bei einem Wert von 20 sec. erscheint zu hoch. Bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h wäre ein vorausfahrendes Auto, welches 15 sec. Vorsprung hat, knapp 420 m entfernt. Hier kann nicht von einem Einfluss auf die eigene Fahrweise ausgegangen werden.

Ein zusätzlicher Grenzwert bei 5 sec. kann eingeführt werden, um extrem große Lücken abzutrennen. Dadurch gibt es zwei Gruppen der Einzelfahrer, von denen die eine Gruppe noch direkte Sicht zum Vordermann hat, während die andere völlig selbstständig fährt. Somit ergeben sich für unsere Analyse der Daten folgende Kategorien:

Drängler: Zeitlücke $\geq 1,8$ sec.

Kolonne: Zeitlücke $> 1,8$ sec. und ≤ 3 sec.

Einzelfahrer mit Sicht zum Vordermann:
Zeitlücke > 3 sec. und ≤ 5 sec.

Einzelfahrer ohne Sicht zum Vordermann:
Zeitlücke > 5 sec.

Da davon ausgegangen wird, dass bereits zwischen zwei Fahrern eine Interaktion zustande kom-

men kann, wurde bei der Kategorisierung nicht berücksichtigt, ob lediglich zwei Fahrzeuge eng hintereinander herfahren oder ob es sich um einen größeren Pulk handelte.

Erneut wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit einem vierstufigen Faktor gerechnet. Ausgewertet wurde wieder nur über die Fahrzeuge, die im Nebel fuhren.

Die Geschwindigkeit ist hochsignifikant ($p < 0.001$) abhängig von der Kategorisierung der Zeitlücke. Dabei zeigt sich die höchste Geschwindigkeit, wenn man quasi „ganz alleine“ auf der Autobahn ist (Zeitlücke > 5 sec.). Alle anderen Geschwindigkeiten sind nahezu identisch. Alle Einzelvergleiche mit Kategorie 4 werden signifikant ($p < 0.001$), allerdings keiner zwischen den restlichen Kategorien. Die Zeitlücke und der Abstand hängen natürlich direkt von der hier vorgenommenen Kategorisierung ab.

Es zeigt sich über alle Sichtweiten, dass Fahrzeuge mit Zeitlücken über 5 sec. (Kat. 4) durchweg schneller fahren als die übrigen, zwischen denen es keine Unterschiede gibt. Dieses Ergebnis stimmt mit unseren Beobachtungen am Simulator in der Modelluntersuchung 1 überein, nicht jedoch mit den Ergebnissen aus den eigenen Autobahndaten, wie im Kapitel 5 ausgeführt wird.

Auch unter Berücksichtigung der Klarsichtfahrten (Bild 41) ändert sich nichts an den beiden Haupteffekten. Es kommt zu einer Abnahme der Geschwindigkeit mit zunehmender Nebelstärke (87,5 – 85,5 – 92,9 – 96,0 – 97,1 km/h – $p < 0.001$). Verglichen mit der Originalstudie zeigt sich weder die

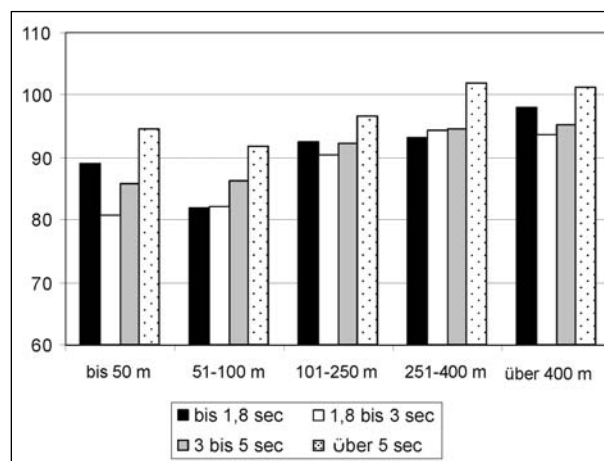


Bild 41: Darstellung der mittleren Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Sichtweite. Getrennt nach den einzelnen Fahrzeugverbänden; Reanalyse

	Kategorien							
	< 1,8 sec. Drängler		1,8 sec.-3,0 sec. Kolonne		3,0 sec.-5,0 sec. Einzelfahrer 1		> 5,0 sec. Einzelfahrer 2	
	MW	St.-A.	MW	St.-A.	MW	St.-A.	MW	St.-A.
Geschwindigkeit [km/h]	90,8	19,9	89,1	19,0	90,7	19,0	97,2	20,2
Zeitlücke zum VM [sec.]	1,1	0,2	2,4	0,5	4,3	0,6	24,5	47,0
Abstand zum VM [m]	27,9	8,1	61,0	18,3	109,6	27,9	673,5	135,4
Verkehrsstärke [N/h]	645,1	174,7	648,0	196,4	620,5	191,2	579,0	211,8
Ausgewertete Fahrzeuge	523		1.194		804		2.585	
prozentuale Anteile	10,2 %		23,4 %		15,7 %		50,6 %	

Tab. 15: Fahrverhalten der einzelnen Fahrzeugverbände. Mittelwerte (MW) sowie Standardabweichungen (St. -A.). Angegeben sind ferner die Anzahl der ausgewerteten Fahrzeuge und die prozentualen Anteile der Kategorien. Ausgewertet wurde nur über Fahrten im Nebel; Reanalyse

Kategorien		Sichtbedingungen				
		bis 50 m	51-100 m	101-250 m	251-400 m	über 400 m
Drängler (< 1,8 sec.)	Mittelwert	30,3	26,1	26,3	28,6	27,3
	St. -Abw.	10,9	7,7	5,9	7,2	6,1
Kolonne (1,8 bis 3 sec.)	Mittelwert	55,5	56,5	60,7	65,8	65,4
	St. -Abw.	15,9	15,3	17,7	19,8	19,9
Einzelfahrer mit Sicht (3 bis 5 sec.)	Mittelwert	98,5	100,5	114,3	115,9	120,5
	St. -Abw.	23,2	25,5	27,8	28,9	29,2
Einzelfahrer ohne Sicht (> 5 sec.)	Mittelwert	555,0	619,0	726,6	712,4	607,0
	St. -Abw.	673,5	1.006	1.731	1.274	1.116

Tab. 16: Abstand zum Vordermann (Meter) in Abhängigkeit von der Sichtweite für die einzelnen Kategorien an Fahrzeugverbänden unter den verschiedenen Sichtbedingungen. Die grau unterlegten Werte bezeichnen Abstände, die außerhalb der Sichtweite liegen; Reanalyse

wesentlich geringere Geschwindigkeit des Einzelfahrers noch die generelle Erhöhung der Geschwindigkeit bei Sichtweiten zwischen 250 und 400 m verglichen mit Sichtweiten über 400 m.

Zum Abschluss soll noch ein Blick auf die Abstände (in m) zum Vordermann geworfen werden, dies allerdings separat für die einzelnen Fahrzeugverbände.

Der Einfluss der Nebelstärke auf die gefahrenen Abstände ist bei nahezu allen Fahrzeugverbänden nur äußerst gering, obwohl er für jeden Fahrzeugverband separat signifikant wird ($p < .02$). Bei der Interpretation sollte man nur diejenigen Abstände berücksichtigen, die auch innerhalb der Sichtweite liegen (weiß hinterlegte Zahlen). Unter diesem Aspekt ergibt sich lediglich ein geringer Anstieg für die Gruppe „Kolonne“, der sich aber bei der geringsten Sichtweite nicht fortsetzt (siehe Tabelle 16). Hier könnte man erwarten, dass der Abstand noch um einige Meter verkürzt wird, um den Vordermann nicht im Nebel zu verlieren. Dies wäre auch unter Berücksichtigung der sich ergebenden Geschwindigkeit möglich: Es wären Geschwindigkeiten von 60 bis 100 km/h nötig, um den Vordermann bei Sichtweiten unter 50 m noch zu sehen, ohne in eine

andere Zeitlücken-Kategorie zu rutschen. In der Gruppe der „Einzelfahrer mit Sicht“ fällt der Wert bei einer Sichtweite zwischen 51 und 101 m besonders heraus. Hier könnte es sich um den Effekt handeln, dass ein kürzerer Abstand gehalten wird, um den Vordermann besser im Blick zu behalten. Allgemein zeigt diese Gruppe auch die stärkste Tendenz eines verringerten Abstandes mit zunehmender Nebelstärke. Es ist allerdings zu beachten, dass alle Fahrzeuge innerhalb dieser Gruppe mehr als 3 sec. Abstand zu ihrem Vordermann hatten und damit bereits im Bereich des „freien Fahrens“ sind. Diese Gruppe ist nicht mit der Gruppe des „lockeren Verbundes“ aus der Originalstudie zu vergleichen. Dort fanden die Autoren eine starke Verringerung des Abstandes mit zunehmendem Nebel. Allerdings waren von den fünf Mittelwerten (es wurden die gleichen Nebelkategorien verwendet) die ersten beiden außerhalb der Sichtweite und für die letzten drei ergab sich keine klare Tendenz. Angesichts dieser Daten lässt sich sagen, dass im Nebel im Wesentlichen die gleichen Abstände gefahren werden wie unter klarer Sicht. Allenfalls gibt es eine leichte Tendenz zu kürzeren Abständen bei dichtem Nebel, die möglicherweise durch Fälle hervorgerufen werden, in denen der

Vordermann im Nebel zu verschwinden droht. Es lässt sich somit nur ein schwacher Hinweis für die Sog-Hypothese nach SCHÖNBACH finden. Die im Gesamtmittel größeren Abstände werden im Wesentlichen durch die Gruppe der „Einzelfahrer ohne Sicht“, also die Fahrzeuge mit Abständen über 5 sec., hervorgerufen. Da dies auch die Gruppe mit den absolut meisten Fahrzeugen ist (s. Tabelle 16), kommt es bei der Gesamtbetrachtung zu diesem verfälschten Bild. Denn die in dieser Gruppe gemessenen Abstände beruhen nahezu alle auf dem Zufallsprinzip, da sie fast alle größer als die Sichtweite sind.

Kolonnenbildung

Bisher wurden lediglich zwei Fahrzeuge und die Zeitlücke zwischen beiden betrachtet, um eine Kategorisierung nach Fahrzeugverbänden vorzunehmen. Es soll nun untersucht werden, ob unter gewissen Umständen eine größere Pulkbildung (mehr als zwei Fahrzeuge) verstärkt auftritt und/oder innerhalb solcher Kolonnen ein spezifisches Fahrverhalten zu beobachten ist. Dabei wird als Kolonne eine Anzahl von mindestens vier Fahrzeugen definiert, wobei die Zeitabstände zum Vordermann (mit Ausnahme des ersten Fahrzeuges) nicht größer als 3 sec. sein dürfen. Da allerdings das erste Fahrzeug in dieser Reihe zwar eine Anzahl anderer Fahrzeuge hinter sich hat, aber keines vor sich, wird das erste Fahrzeug in der Kolonne nicht ausgewertet. Das bedeutet, dass die kleinste Kolonne aus fünf Fahrzeugen bestehen kann, wobei alle Zeitlücken kleiner als 3 sec. sind und das Führungsfahrzeug nicht ausgewertet wird.

Es zeigt sich, dass generell in Richtung Berlin mehr Kolonnen zu beobachten sind als in der Gegenrichtung. Dies deutet erneut darauf hin, dass in Richtung Berlin eine Steigung vorliegen muss. Insbesondere, wenn man die hohe Anzahl an Kolonnen auf der rechten Spur betrachtet (wahrscheinlich Lkw-Kolonnen, die den Berg eng aneinander hinauffahren). Während in Richtung Berlin die meisten Kolonnen rechts fahren (Berg – Lkw-Verkehr) ist dies in Richtung Dresden anders. Die größere Anzahl an Kolonnen auf der Überholspur kann auch hier mit der Steigung zusammenhängen. Es könnte sein, dass aufgrund des Gefälles viele zu überholen versuchen. Dies führt dann zu einem Rückstau der schnelleren Fahrzeuge.

Vergleicht man Kolonnen im Nebel (alle Sichtweiten-Kategorien) und solche bei freier Sicht, so fällt

auf, dass zwar die Gesamtanzahl relativ konstant bleibt (81 im Nebel vs. 88 ohne Nebel), dass es aber unter Nebelbedingungen eine Tendenz zu größeren Kolonnen gibt. Berechnet man die Gesamtzahl der Fahrzeuge in allen Kolonnen so ergeben sich 466 Fahrzeuge in Kolonnen, die ohne Nebel gefahren sind, dem gegenüber stehen 447 Fahrzeuge in Kolonnen unter Nebelbedingungen. Obwohl die Gesamtanzahl der Fahrzeuge in Kolonnen im Nebel sinkt, zeigt sich, dass der Anteil besonders großer Kolonnen im Nebel steigt. Da dies speziell für die rechte Spur gilt, ist dieser Effekt darauf zurückzuführen, dass im Nebel mehr Verkehrsteilnehmer auf die rechte Spur ausweichen (z. B. weil sie langsamer fahren).

Die mittlere Kolonnengröße ist jedoch unabhängig vom Nebel, ebenso die mittlere Zeitlücke innerhalb der Kolonnen. Interessant ist, dass die mittlere Geschwindigkeit, die man auch als Kolonnengeschwindigkeit bezeichnen könnte, im Nebel signifikant geringer ($p < .02$) ist als unter klarer Sicht (Tabelle 13). Die Ergebnisse zeigen erneut, dass das Fahrverhalten im Nebel durchaus angepasst wird, nur nicht hinreichend.

5.1.3 Zusammenfassung

Allgemein ist der vorliegende Datensatz grundsätzlich für die Ziele der Untersuchung nicht geeignet. Es sei hier nur an die Probleme bezüglich der Wochentage oder die fehlende Fahrzeugklassifizierung erinnert. Auch die Einwirkung weiterer Wetterbedingungen erschwert die Interpretation. Ein weiteres Problem ergab sich aus der Wahl der Strecke, die zum einen ein unterschiedliches Fahrverhalten in beiden Fahrtrichtungen aufwies, und zum anderen keine sehr hohe Verkehrsstärke zeigt. Gerade ein hohes Verkehrsaufkommen wäre aber im Sinne der Untersuchungsziele von Nutzen. Dann würde sich das Problem der großen Abstände relativieren, welche die Mittelwerte verzerren. Auch wären dann mehr und größere Fahrzeugverbände zu erwarten, und Effekte der gegenseitigen Interaktion könnten besser beobachtet werden. So ließe sich die Tendenz der Bildung längerer Kolonnen im Nebel näher untersuchen.

Über die Ergebnisse lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Geschwindigkeit im Nebel zwar reduziert wird, aber dies nicht in der entsprechenden Relation zur Sichtweite passiert. Die im Nebel gemessenen Abstände zeigen insgesamt keinen Unterschied zu den Abständen bei Klarsicht.

In Bezug auf die beobachteten Geschwindigkeiten innerhalb der verschiedenen Nebelkategorien gab es keine besonderen Unterschiede zwischen den verschiedenen Fahrzeugverbänden, die mit Zeitlücken bis 5 sec. fuhren. Diejenigen Fahrer mit Zeitlücken über 5 sec. zum Vordermann fuhren jedoch schneller als die Fahrer im Verbund. Dies widerspricht den Ergebnissen der Originalstudie und bestätigt die Befunde aus den Modelluntersuchungen.

5.2 Eigene Erhebung

Ziel der Erhebung ist es, neue Daten über den Verkehrsfluss bei Nebel zu sammeln. Diese Daten sollen nicht die eben diskutierten Schwächen der Erhebung von RICHTER und SCHLAG aufweisen.

5.2.1 Umsetzung der Datenerhebung

Die Datenerhebung fand an der Bundesautobahn BAB 61 statt. Es erfolgt eine Langzeitmessung über mehrere Monate, um möglichst viele Nebelereignisse und einen großen Datensatz für die Kontrollbedingung (freie Sicht) zu erhalten.

Die Auswahl der Messstrecke bzw. Messstelle geschah nach folgenden Kriterien:

- keine verkehrsbeeinflussende Wirkung unter topografischen/bautechnischen Gesichtspunkten (z. B. Gefälle, Einfahrten etc.),
- zuverlässige Messung der Sichtweite in unmittelbarer Nähe zur Messstelle
- Messung liefert fahrspurspezifische Daten über Einzelfahrzeuge mit einer zeitlichen Auflösung von ≤ 0.1 sec. sowie die Trennung verschiedener Fahrzeugtypen (Pkw vs. Lkw),
- Informationen zu verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen stehen zur Verfügung (z. B. Geschwindigkeitsbegrenzung, Überholverbot, Baustellenbetrieb etc.).

Die ausgewählte Messstelle AQ103 befindet sich kurz hinter der Anschlussstelle Miel in Fahrtrichtung Süden (Richtung Koblenz) bei Kilometer 164. Der Vorteil dieser Messstelle besteht auch darin, dass parallel zu der Verkehrsmessung eine Erhebung der Sichtweiten erfolgt. Diese Sichtweitemessanlage ist jedoch an ein Wechselverkehrszeichen zur Verkehrssteuerung gebunden, welches sich 200 m vor der Messstelle befindet. Eine genauere Diskussion des Einflusses des Wechselver-

kehrszeichens auf die erhobenen Daten erfolgt im Abschnitt 5.2.3.

Messzeitraum

Die Erhebung erstreckte sich bisher über drei Spannen, jeweils in Monaten des Winterhalbjahres der Jahre 2001 und 2002. Auf Messungen in den Sommermonaten wurde verzichtet, da in dieser Jahreszeit kein Nebel zu erwarten ist. Die Messungen wurden erstmals am 20.02.2001 aufgenommen und bis zum 06.06.2001 – mit zweimaligen Unterbrechungen von mehreren Tagen aus technischen Gründen – fortgeführt. Die Erhebung wurde Anfang Oktober 2001 wieder aufgenommen und bis Mai 2002 weitergeführt. Da der Laptop an der Autobahn Anfang November durch Diebstahl abhanden gekommen ist, liegen allerdings erst ab dem 15.11.2001 Daten vor. (Eine Datenerhebung an der Messstelle wird derzeit weiterhin durchgeführt.) In dieser Zeitspanne traten jedoch erhebliche technische Probleme auf, sodass aus diesem Winter nur von wenigen Wochen Daten vorliegen. Die Messung über den Februar 2002 hinaus erfolgte in der Hoffnung, dass weitere Nebelereignisse dokumentiert werden können. Da dies jedoch nicht gelang, sind im Folgenden nur die Daten bis Februar 2002 näher ausgewertet.

Datensätze

Neben den Daten der Induktionsschleife zur Aufzeichnung des Verkehrs wurden die jeweilige Anzeige der Verkehrsbeeinflussungsanlage, die Ergebnisse der Sichtweitemessung sowie die Wetterdaten der nächstliegenden Wetterstation Nörvenich erhoben. Bei der Messung durch die Induktionsschleifen werden je Fahrzeug, das die Schleifen überquert, folgende Daten erhoben:

- Datum (des Laptops),
- Uhrzeit (des Laptops),
- Fahrspur (Hauptfahr- bzw. Überholspur),
- Fahrzeugtyp (Lkw vs. Pkw),
- Geschwindigkeit in km/h,
- Fahrzeuglänge in cm,
- Zeitmarke (für Berechnung der Zeitlücke).

Die Sichtweitemessung erfolgt über eine Anlage aus vier Sensoren. Der Hauptsensor befindet sich

direkt an der Messstelle. Die Nebensensoren liegen 400 Meter vor bzw. hinter der Messstelle, ein dritter Nebensensor 800 Meter weiter in Fahrtrichtung. Die Sichtweite wird längs zur Fahrbahn gemessen. Der Wert 630 m ist die maximale Sichtweite im Sinne der Messelektronik und damit gleichbedeutend mit dem Zustand der freien Sicht. Die Erhebung der Sichtweitendaten umfasst den gesamten Zeitraum der Datenerhebung.

Zusätzlich wurden die Daten einer elektronischen Verkehrsbeeinflussungsanlage erhoben, die sich unmittelbar vor der Messschleife (ca. 200 m) befindet. Die Anzeigendaten liegen für den gesamten Zeitraum vor.

Die Datensätze für die Wetterdaten erstellte das Lehr- und Forschungsgebiet Physische Geografie der RWTH Aachen. Als relevante Wetterstation wurde die Messstelle Nörvenich ausgewählt. Die Erhebung der Wetterdaten dient zum einen der Kontrolle der Sichtweitendaten und zum anderen der Möglichkeit, auch andere verkehrsbeeinflussende Witterungsverhältnisse zu berücksichtigen (z. B. Regen, Schnee oder Eisglätte etc.).

Es werden den Datensätzen weiterhin die Zeiten des Sonnenauf- bzw. -untergangs des jeweiligen Tages hinzugefügt.

Beschreibung der erhobenen Daten

Bisher wurden an 290 Tagen Messdaten aufgenommen. Die folgenden Auswertungen beziehen sich jedoch nur auf die Erhebungen bis einschließlich Februar 2002, d. h. die ersten 148 Tage der Messung. In dieser Zeit wurden 4.004.693 Ereignisse aufgezeichnet. Täglich zählte die Induktionsschleife somit im Mittel 27.900 Fahrzeuge.

Die Daten der manuellen Verkehrszählung (SVZ) 2000 geben mit einer durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke (DTV) von 48.600 (Güterverkehr 27,1 %, Schwerverkehr: 24,6 %) für beide Fahrtrichtung einen etwas niedrigeren Wert an (LENSING, 2003). Da der Zählung von LENSING (2003) jedoch ein kürzerer Zeitraum zu Grunde liegt als unserer Messreihe, dienen unsere Daten im Folgenden als Bezugspunkt.

Von der Gesamtzahl der Fahrzeuge entfielen insgesamt 28.476 (0,7 %) auf so genannte Pseudofahrzeuge, also Messereignisse, die von der Elektronik nicht zu einer bestimmten Fahrzeugklasse zugeordnet werden konnten. Eine weitere Reduzierung

Messereignisse Rohdaten 4.004.693			
Pseudofahrzeuge 28.476	Fahrzeuge unmittelbar hinter Pseudofahrzeugen 19.183	restliche Fahrzeuge 3.957.034	
		Unbekannte Fahrzeugklasse 24.399	Bekannte Fahrzeugklasse 3.932.635
		Fahrzeuge unmittelbar hinter der unbekanntenen Klasse 46.256	
		Pkw 2.861.219	Lkw 1.047.394

Bild 42: Übersicht der aufgenommenen Ereignisse bzw. Fahrzeuge. Die unterlegten Felder beinhalten die Fahrzeuge, die aus den Datensätzen gelöscht wurden; eigene Erhebung

der Datensätze ergab sich durch die Beschränkung der gemessenen Fahrzeuglängen für die jeweilige Fahrzeugklasse². Aufgrund dieser Kontrolle wurden von den restlichen 3.957.034 Fahrzeugen 48.399 (1,2 %) ermittelt, die der jeweils anderen Fahrzeugklasse zugeordnet worden sind. Auch die den beiden Gruppen problematischer Fahrzeuge jeweils folgenden Fahrzeuge sind kritisch. Das liegt daran, dass die Abstände bzw. die Zeitlücke zwischen den Fahrzeugen nicht direkt gemessen, sondern berechnet werden. Von allen registrierten Fahrzeugen können 97,6 % bezüglich der Fahrzeugklasse eindeutig eingestuft und auch sonst problemfrei verarbeitet werden (siehe Bild 42).

In Bezug auf die Klassifizierung der Fahrzeuge nach Pkw und Lkw muss berücksichtigt werden, dass die Kategorie Lkw eine Mischkategorie darstellt, die nicht nur Lkw, sondern beispielsweise auch Busse oder große Lieferwagen enthält. Zweiräder oder Pkw mit Anhänger konnten nicht automatisch identifiziert werden und fielen aufgrund ihrer Länge entweder in eine der beiden vorhandenen Kategorien oder sind Bestandteil der unbekanntenen Fahrzeugklasse.

5.2.2 Nebelereignisse

Von einem Nebelereignis wird ausgegangen, wenn innerhalb eines Zeitraumes alle vier Sensoren von eingeschränkter Sichtweite ausgehen und die

² Als Pkw werden Fahrzeuge mit einer Länge von 2,5 bis 6,5 m akzeptiert. Als Lkw werden Fahrzeuge mit einer Länge von 6,5 bis 22 m akzeptiert. Voraussetzung für eine Klassifizierung war allerdings, dass die Messelektronik bereits das Fahrzeug in dieselbe Kategorie eingeordnet hatte.

Sichtweiten unter 300 m fallen, da erst dann eine verkehrsbeeinflussende Wirkung zu erwarten ist.

Die Sichtweiten, die die einzelnen Sensoren anzeigen, weichen häufig um mehrere zehn Meter voneinander ab, was messtechnische Gründe hat, aber auch an den unterschiedlichen Standorten liegt.

Im Messzeitraum vom 20. Februar bis zum 6. Juni 2001 sank die Sichtweite zu keinem Zeitpunkt unter 300 m. Der niedrigste Wert lag bei 320 m am 4. April, und auch dieser Wert wurde nur für eine Zeit von drei Minuten gemessen. Nach der Wiederaufnahme der Messungen im November 2001 kam es zu verschiedenen Zeitpunkten zu Sichteinschränkungen, die auf Nebel zurückzuführen sind. Eine Übersicht gibt Tabelle 17.

Bei der Wiederaufnahme der Messungen im Winter 2002/03 lag die niedrigste Sichtweite bei 227 m auf einem der Sensoren. Die Daten dieser Erhebung ergaben somit keine Nebelereignisse, die von der Dichte des Nebels über die früher aufgezeichneten hinausgehen oder ihnen entsprechen.

Am interessantesten sind die am längsten andauernden Ereignisse und diejenigen mit der am meisten eingeschränkten Sichtweite. Folglich werden im folgenden Abschnitt die Nebelereignisse vom 17.-18. Dezember 2001 und vom 6.-7. Januar 2002 näher diskutiert. In den beiden folgenden Abschnitten werden nun zuerst die beiden Nebelzeiträume genauer dargestellt, danach erfolgt die Analyse des Fahrverhaltens im Verbund für beide Erhebungen im Vergleich.

³ Die Punkte Verkehrsaufkommen und -zusammensetzung zeigen sich deutlich in Unterschieden zwischen den Wochentagen: Während Montag bis Donnerstag vergleichbar sind, bilden Freitage, Samstage und Sonntage eigene Einheiten. Ein verändertes Verkehrsaufkommen und eine spezifische Zusammensetzung sind ebenso an Feiertagen zu beobachten.

Rahmenbedingungen der Datenanalyse

Die Datenanalyse soll zeigen, ob und inwieweit sich bei eingeschränkter Sicht der Verkehrsfluss verändert. Eine solche Analyse ist nur möglich, wenn zu den Zeiträumen mit eingeschränkter Sichtweite Kontrollzeiträume gefunden werden, die sich in ihren Rahmenbedingungen nur bezüglich der Sichtverhältnisse unterscheiden.

Als passender Kontrollzeitraum werden solche Zeiträume festgehalten, bei denen die Ausprägungen folgender Variablen mit der Phase des Nebelereignisses so weit als möglich übereinstimmen:

- Zeitpunkt von Sonnenaufgang und -untergang bzw. Dauer der Helligkeit,
- gesamtes Verkehrsaufkommen am Tag und im kritischen Zeitraum,³
- Zusammensetzung des Verkehrs (Verhältnis Pkw – Lkw),
- kein Stau/Unfall,
- keine Beeinträchtigungen durch andere Wetterverhältnisse (z. B. Eisglätte).

Das Nebelereignis vom 17.-18. Dezember 2001

Das erste Nebelereignis, das im Folgenden näher untersucht wird, geschah in der Nacht vom Montag, 17., auf Dienstag, 18. Dezember 2001. Die Sichtweite fiel erstmals um 20.12 Uhr des 17. Dezembers unter 300 m und blieb dort bis 0.58 Uhr des folgenden Tages. Die Gesamtdauer betrug somit 4 Stunden 46 Minuten.

Während des gesamten Zeitraumes des Nebelereignisses war es dunkel. Das Verkehrsaufkommen lag an beiden Tagen bei rund 24.000 Fahrzeugen je Tag, etwa bei 40 Prozent handelte es sich um Lkw, rund 1 Prozent konnte nicht eindeutig zugeordnet werden. Diese Zahlen bilden damit die Eckdaten für die Suche nach Vergleichstagen. Zu keinem Zeitpunkt an den beiden Tagen kam es zu einem Stau.

Das Verkehrsaufkommen an den Tagen des Nebelereignisses liegt um über 3.000 Fahrzeuge unter

Datum	Uhrzeit	Dauer	minimale Sichtweite
17. November 2001	4.12 bis 5.12 Uhr	60 min	186 m
7. Dezember 2001	9.21 bis 9.38 Uhr	17 min	105 m
12. Dezember 2001	8.36 bis 9.17 Uhr	41 min	150 m
17.-18. Dezember 2001	20.12 bis 0.58 Uhr	4 h 46 min	120 m
30. Dezember 2001	19.10 bis 19.27 Uhr	17 min	220 m
6.-7. Januar 2002	21.09 bis 20.50 Uhr	23 h 41 min	100 m

Tab. 17: Übersicht über registrierte Sichteinschränkungen. Markierung der ausgewerteten Nebelereignisse; eigene Erhebung

dem mittleren Tageswert unserer Messreihe (27.900). Es handelt sich somit um Tage mit eher geringem Verkehrsaufkommen. Während des Nebelereignisses selbst überquerten insgesamt 2.868 Fahrzeuge die Induktionsschleife, was einer Verkehrsdichte von zehn Fahrzeugen pro Minute entspricht. Davon waren 1.720 (60 %) Lkw, bei 1.101 (38,4 %) handelte es sich um Pkw (s. Tabelle 18).

Anhand der oben angegebenen Punkte konnten für dieses Nebelereignis mehrere passende Vergleichstage gefunden werden. Mit einem davon (27. auf 28. November 2001) soll nun im Folgenden nach Unterschieden im Verkehrsfluss gesucht werden.

Den Daten der Wetterstation Nörvenich ist zu entnehmen, dass zur kritischen Zeit in Nörvenich Nebel bzw. feuchter Dunst in der Luft lag, zeitweise starker Sprühregen und Schnee fielen. Die Wetterdaten bestätigen somit die Angaben der Sensoren für die Sichtweitenmessung, jedoch herrschte durch den Regen evtl. eine weitere Einschränkung durch das Wetter über den Nebel hinaus.

Am Nebeltag liegen die gefahrenen Geschwindigkeiten im Mittel (98,4 km/h vs. 103,4 km/h) etwas niedriger und streuen weniger stark als am Kontroll-

tag. Insbesondere fahren mehr Fahrzeuge am Kontrolltag besonders schnell. Abstände und Zeitlücken sind angesichts der geringen Verkehrsdichten sehr hoch (s. Tabellen 19 und 20). Insofern ist es nicht sinnvoll, Unterschiede zwischen Nebel und Klarsicht anhand der Mittelwerte zu interpretieren. Eine Analyse der Auswirkung des Nebels auf die erhobenen Variablen für Fahrzeuge, die im Verbund mit anderen fahren, erfolgt im weiter unten diesem Kapitel.

Da die Wechselverkehrszeichenanlage während der Hälfte der Dauer des Nebelereignisses die Geschwindigkeit begrenzte, kann die etwas niedrigere mittlere Geschwindigkeit während des Nebelereignisses nicht eindeutig auf den Nebel zurückgeführt werden.

	Nebeltag		Kontrolltag	
	Häufigkeit	Prozent	Häufigkeit	Prozent
Unbekannt	47	1,6	48	1,8
Lkw	1.720	60,0	1.535	58,2
Pkw	1.101	38,4	1.056	41,8
Gesamt	2.868	100,0	2.639	100,0

Tab. 18: Verkehrsaufkommen sowie Zusammensetzung des Verkehrs während des Nebelereignisses (17.-18.12.01) und im gleichen Zeitraum am Kontrolltag (27.-28.11.01); eigene Erhebung

	Geschwindigkeit		Abstand zum Vordermann		Zeitlücke	
	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag
Mittelwert	98,4	103,4	329,6	384,7	11,2	12,2
Standardabweichung	20,0	25,8	648,7	748,5	18,9	20,2
Minimum	66,0	56,0	4,4	2,1	0,19	0,10
Maximum	180,0	218,0	16.313,7	11.515,8	459,7	307,0

Tab. 19: Geschwindigkeit (km/h), Abstand zum Vordermann (m), Zeitlücke (sec.) im Nebel und am Kontrolltag. Angabe von Mittelwert, Standardabweichung, Minimum, Maximum. Stichprobe am Nebeltag N = 2.868, Kontrolltag N = 2.639. Daten vom 17.-18.12.2001 und 27.-28.11.2001; eigene Erhebung

	Geschwindigkeit		Abstand zum Vordermann		Zeitlücke	
	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag
Pkw, n = 1.101 bei Nebel, n = 1.056 bei Kontrolle						
Mittelwert	117,2	127,5	506,8	601,0	15,0	15,9
Standardabweichung	19,1	23,4	827,2	1.078,2	24,5	27,3
Minimum	68,0	56,0	7,4	2,1	0,29	0,10
Maximum	180,0	218,0	13.407,6	11.515,8	459,7	307,0
	Geschwindigkeit		Abstand zum Vordermann		Zeitlücke	
	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag
Lkw, n = 1.720 bei Nebel, n = 1.535 bei Kontrolle						
Mittelwert	86,1	86,4	212,9	235,5	8,6	9,7
Standardabweichung	6,1	6,0	466,7	312,3	13,5	12,6
Minimum	66,0	66,0	4,4	4,2	0,19	0,18
Maximum	158,0	139,0	16.313,7	3.085,8	371,7	129,2

Tab. 20: Aufspaltung der Fahrzeuggruppen (Pkw, Lkw) in Geschwindigkeit (km/h), Abstand zum Vordermann (m), Zeitlücke (sec.) im Nebel und am Kontrolltag. Angabe von Mittelwert, Standardabweichung, Minimum, Maximum. n gibt die Größe der Substichprobe an. Daten vom 17.-18.12.2001 und 27.-28.11.2001; eigene Erhebung

Tabelle 20 zeigt die Unterschiede in Geschwindigkeit, Abstand und Zeitlücke getrennt nach Lkw und Pkw: Die Lkw fahren insgesamt langsamer und haben geringere Zeitlücken zum Vordermann. Hier zeigt sich auch in der Geschwindigkeit kein bedeutsamer Unterschied zwischen den beiden Nächten. Jedoch resultieren die kürzeren Abstände während des Nebels in entsprechend kürzeren Zeitlücken. Bei den Pkw ist eine um 10 km/h niedrigere Geschwindigkeit zu beobachten, die vor allem auf das Fehlen der sehr hohen Geschwindigkeiten zurückgeführt werden kann. Jedoch kann hier – wie bereits angemerkt – der Einfluss von Verkehrszeichen und Sichtverhältnissen nicht getrennt werden.

Als Fazit kann aus der ersten Beschreibung dieses Nebelereignisses gezogen werden, dass der Nebel keinen Einfluss auf das Fahrverhalten der Lkw-Fahrer hat. Dies ist angesichts von minimalen Sichtweiten von 120 m und einer mittleren Geschwindigkeit der Lkw von 86 km/h nicht verwunderlich. Die Pkw fahren während des Nebels deutlich langsamer (um 10 km/h), allerdings besteht hier das Problem des ungeklärten Einflusses der Verkehrszeichen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass auch die verringerte Sichtweite sich auswirkt; eine genauere Analyse dieses Problems erfolgt im Rahmen der Diskussion im Abschnitt 5.2.3.

Das Nebelereignis vom 6.-7. Januar 2002

Das längste bisher erhobene Nebelereignis zog sich vom Abend des Sonntags, 6. Januar, bis zum Montag, 7. Januar 2002. Bei der Suche nach Vergleichstagen muss berücksichtigt werden, dass der 6. Januar nicht nur ein Sonntag, sondern auch das Ende der Weihnachtsferien und der Dreikönigstag war. Innerhalb der 23 Stunden 41 Minuten des Nebelereignisses fiel die Sichtweite laut Hauptsensor auf minimal 120 m.

Obwohl die Sicht viele Stunden immer wieder eingeschränkt war, war es längere Zeit auch klar. Die Sichtverhältnisse während dieses Nebelereignisses sind somit heterogen.

Die Sonne ging am Sonntag um 16.43 Uhr unter, die Nacht brach um 17.25 Uhr an. Tagesanbruch am Montag war um 7.50 Uhr, der Sonnenaufgang ab 8.32. Am Montag ging die Sonne eine Minute später unter als am Vortag, die Nacht brach ebenfalls eine Minute später an. Während des Nebelereignisses fuhren 21.552 Fahrzeuge über die Mess-

schleife, was einer Dichte von 15 Fahrzeugen pro Minute entspricht. Aufgrund des geringen Verkehrsaufkommens an beiden Tagen (über 12.000 bzw. 7.000 Ereignisse weniger als der Mittelwert des Messzeitraums, 27.900) ist ein gut übereinstimmender Vergleichstag schwer zu finden. Am passendsten sind die Verkehrsverhältnisse vom 1. auf den 2. Januar (Dienstag und Neujahr bzw. Mittwoch), wobei hier jedoch der Anteil der Lkw deutlich niedriger liegt (13,3 Prozent).

Die Messungen der Wetterstation Nörvenich geben für die fragliche Zeit Lufttemperaturen für den 6. Januar um 6 ° Celsius, für den 7. Januar um den Gefrierpunkt an. Tagsüber schien am Sonntag die Sonne, an beiden Tagen wehte kaum Wind. Es fiel so gut wie kein Niederschlag. Zusätzlich ist den Daten der Wetterstation zu entnehmen, dass ab dem Abend des 6. Januar Regen und Sprühregen sowie Nebel und feuchter Dunst auftraten. Dies bestätigt die Angaben der Sichtweitenmessanlage.

Die mittlere Geschwindigkeit liegt im Zeitraum des Nebels um 13 km/h niedriger. Gleichzeitig sind Abstände und Zeitlücken geringer als am Kontrolltag (im Mittel um 36 m). In diesem Zusammenhang muss jedoch berücksichtigt werden, dass während des Nebelereignisses eine Beeinflussung des Verkehrs durch die Anzeige der Wechselverkehrszeichenanlage bzw. andere entsprechende Tafeln auf dem Streckenabschnitt vorliegt. Außerdem müssen die Fahrzeugtypen aufgrund ihrer unterschiedlichen Anteile in den beiden Zeiträumen getrennt betrachtet werden. Aufgrund des sehr häufigen Wechsels der Geschwindigkeitsbegrenzung – häufig im Minutentakt – ist es wiederum nicht möglich, den spezifischen Einfluss der Anzeige herauszurechnen.

Während sich auch bei diesem Nebelereignis keine Auswirkung auf das Geschwindigkeitsverhalten der Lkw-Fahrer zeigt, ist zu beobachten, dass die Pkw-Fahrer ihre Geschwindigkeit im Mittel um 12 km/h verringern (Tabelle 22). Aufgrund der zeitweise niedrigen Verkehrsdichte sind die mittleren Abstände und Zeitlücken jedoch sehr hoch und damit kaum interpretierbar.

Eine Trennung nach den Fahrspuren zeigt den Einfluss eines hohen Lkw-Anteils auf der Hauptverkehrsspur und die dadurch dort niedrigere mittlere Geschwindigkeit. Bei Nebel wird im Vergleich zum Kontrolltag die Geschwindigkeit auf beiden Spuren verringert, jeweils um rund 12 km/h. Der Effekt, dass auf der Überholspur die Geschwindigkeit bei beeinträchtigter Sicht absolut sogar stärker verrin-

	Geschwindigkeit		Abstand zum Vordermann		Zeitlücke	
	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag
Mittelwert	101,7	114,6	218,9	254,5	7,4	7,8
Standardabweichung	21,2	24,4	484,6	627,2	15,6	17,6
Minimum	48,0	31,0	1,9	3,0	0,12	0,11
Maximum	214,0	228,0	15.784,3	23.381,6	660,7	634,5

Tab. 21: Geschwindigkeit (km/h), Abstand zum Vordermann (m), Zeitlücke (sec.) im Nebel und am Kontrolltag. Angabe von Mittelwert, Standardabweichung, Minimum, Maximum. Stichprobe am Nebeltag N = 21.552, Kontrolltag N = 20.886. Daten vom 6.-7.1.2002 und 1.-2.1.2002; eigene Erhebung

	Geschwindigkeit		Abstand zum Vordermann		Zeitlücke	
	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag
Pkw, n = 12.338 bei Nebel, n = 14.761 bei Kontrolle						
Mittelwert	114,5	126,4	265,0	280,7	8,1	7,7
Standardabweichung	18,9	18,2	571,9	706,0	17,1	18,7
Minimum	48,0	31,0	1,9	3,4	0,12	0,11
Maximum	205,0	225,0	13.984,3	23.381,6	474,9	634,5
	Geschwindigkeit		Abstand zum Vordermann		Zeitlücke	
	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag
Lkw, n = 8.976 bei Nebel, n = 5.913 bei Kontrolle						
Mittelwert	83,9	85,2	153,6	188,6	6,5	7,9
Standardabweichung	6,1	6,4	311,9	364,7	13,0	14,7
Minimum	51,0	56,0	2,8	3,8	0,12	0,13
Maximum	160,0	154,0	15.784,3	10.587,7	660,7	448,4

Tab. 22: Aufspaltung der Fahrzeuggruppen (Pkw, Lkw) in Geschwindigkeit (km/h), Abstand zum Vordermann (m), Zeitlücke (sec.) im Nebel und am Kontrolltag. Angabe von Mittelwert, Standardabweichung, Minimum, Maximum. n gibt die Größe der Substichprobe an. Daten vom 6.-7.1.2002 und 1.-2.1.2002; eigene Erhebung

	Geschwindigkeit		Abstand zum Vordermann		Zeitlücke	
	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag
Dunkel/Nacht, n = 11.656 bei Nebel, n = 9.843 bei Kontrolle						
Mittelwert	95,5	110,2	253,2	370,4	9,1	11,5
Standardabweichung	16,8	24,5	614,2	895,2	20,0	25,1
Minimum	48,0	31,0	1,9	3,5	0,12	0,13
Maximum	192,0	225,0	15.784,3	23.881,6	660,7	634,5
	Geschwindigkeit		Abstand zum Vordermann		Zeitlücke	
	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag	Nebeltag	Kontrolltag
Hell/Tag, n = 9.896 bei Nebel, n = 11.543 bei Kontrolle						
Mittelwert	108,9	118,2	178,6	160,6	5,6	4,8
Standardabweichung	23,5	24,5	253,1	208,6	7,1	5,5
Minimum	51,0	56,0	2,9	2,9	0,12	0,11
Maximum	214,0	228,0	3.229,6	3.003,6	84,6	75,1

Tab. 23: Aufspaltung der Daten nach Tageszeit (hell, dunkel) in Geschwindigkeit (km/h), Abstand zum Vordermann (m), Zeitlücke (sec.) im Nebel und am Kontrolltag. Angabe von Mittelwert, Standardabweichung, Minimum, Maximum. n gibt die Größe der Substichprobe an. Daten vom 6.-7.1.2002 und 1.-2.1.2002; eigene Erhebung

gert wird als in der Reanalyse von RICHTER und SCHLAG, trat somit hier nicht auf.

Im Hellen sind für Pkw und Lkw deutlich kürzere Zeitlücken als im Dunkeln zu beobachten. Dieser Effekt kann nicht auf eine generell geringere Auslastung während der Nacht zurückgeführt werden, wie die Angabe der Stichprobengröße in Tabelle 23 zeigt. Jedoch liegen in der Nacht (zwei-

	Nebeltag		Kontrolltag	
	Häufigkeit	Prozent	Häufigkeit	Prozent
Unbekannt	238	1,1	212	1,0
Lkw	8.976	41,6	5.913	28,3
Pkw	12.338	57,2	14.761	70,7
Gesamt	21.552	100,0	20.886	100,0

Tab. 24: Verkehrsaufkommen sowie Zusammensetzung des Verkehrs (Pkw, Lkw, unbekannt) während des Nebelereignisses (6.-7.1.2002) und im gleichen Zeitraum am Kontrolltag (1.-2.1.2002); eigene Erhebung

schen 0-5 Uhr) Zeiten mit extrem niedrigem Verkehrsaufkommen vor, was trotz der höheren Auslastung am Morgen und am Abend zu den sehr hohen Zeitlücken während der Dunkelheit führt.

Eine genauere Analyse von Fahrzeugen im Verbund mit anderen Fahrzeugen erfolgt im nächsten Absatz.

Kolonnenfahrten in den Nebelereignissen vom 17./18.12.2001 und vom 6./7.1.2002

In der bisherigen Ergebnisdarstellung wurde grundsätzlich über alle Messereignisse hinweg gemittelt, dabei gingen auch die Zeiträume ein, in denen nur eine geringe Verkehrsdichte vorlag. In Bezug auf die Sog-Hypothese bzw. die Entstehung von Massenunfällen interessieren jedoch die Fahrzeuge besonders, die in einem engen Verbund mit anderen Fahrzeugen fahren. Hierzu wurden zuerst alle so genannten Einzelfahrer ausgefiltert, die eine Zeitlücke über drei Sekunden auf das ihnen vorausfahrende Fahrzeug haben.

Die Tabelle 25 zeigt, dass die Geschwindigkeit als Anpassung an die eingeschränkte Sicht von den Pkw-Fahrern mit Zeitlücken unter 3 Sekunden bei beiden Nebelereignissen verringert wird, während bei den Lkw-Fahrern keine Veränderung eintritt. Zeitlücken und Abstände zeigen keine Anpassungen an die Wetterverhältnisse und liegen für die Pkw im Mittel klar unter der gesetzlich vorgeschriebenen Marke von 1,8 sec.

Im Folgenden werden nun vier Kategorien auf Grundlage der Zeitlücke unterschieden. Die Einteilung orientierte sich an der Reanalyse der Daten von RICHTER und SCHLAG. Eine weitere Kategorie wurde bei der Grenze von 1 sec. gesetzt, um so diejenigen Fahrer in einer Gruppe zu haben, die gefährlich nahe aufgefahren sind. Dafür wurde auf eine weitere Unterscheidung der Einzelfahrer verzichtet (Tabelle 26).

Die Anteile der jeweiligen Kategorien sind an dem jeweiligen Nebeltag und zugehörigen Kontrolltag sehr ähnlich. Im Nebel erfolgt bei beiden Nebelzeiträumen eine Verkleinerung der beiden Randkategorien zugunsten der beiden mittleren Kategorien. Jedoch ist diese Verschiebung nur gering. Zu beachten ist, dass bei beiden Ereignissen eine sehr große Gruppe von Fahrern – 19,5 % bzw. 27,3 % – die vorgeschriebene Zeitlücke von 1,8 sec. unterschreitet. D. h., dass trotz verringerter Geschwindigkeit bei Nebel nicht sicherer gefahren wird, was die Einhaltung des Mindestabstandes betrifft.

Eine Anpassung der Geschwindigkeit an die eingeschränkten Sichtverhältnisse zeigt sich in allen vier Zeitlückenkategorien im gleichen Ausmaß (für das Nebelereignis vom 6.-7.1.2002 siehe Tabelle 27). Der Effekt geht in erster Linie auf die Pkw-Fahrer zurück, während die Lkw unberührt von den Wetterverhältnissen bei Nebel und Kontrolle gleich schnell fahren. Deshalb zeigt Bild 43 nur die mittlere Geschwindigkeit für die Pkw.

Bedingung	Datum		Geschw. (km/h)		Abstand (m)		Zeitlücke (sec.)	
			Pkw	Lkw	Pkw	Lkw	Pkw	Lkw
Nebel	17.-18.12.01	Mittelwert	112,3	85,4	45,3	39,6	1,42	1,67
		St.-Abw.	19,8	5,1	25,3	17,1	0,72	0,71
Kontrolle	27.-28.11.02	Mittelwert	119,8	86,2	45,5	39,8	1,33	1,66
		St.-Abw.	22,8	5,8	28,9	17,8	0,76	0,73
Nebel	6.-7.1.02	Mittelwert	111,4	83,1	46,7	40,8	1,50	1,77
		St.-Abw.	17,9	5,8	23,6	1,8	0,70	0,67
Kontrolle	1.-2.1.02	Mittelwert	124,1	84,2	50,3	42,0	1,46	1,79
		St.-Abw.	17,4	6,4	26,4	16,3	0,72	0,67

Tab. 25: Fahrzeuge mit Zeitlücken unter 3 sec., getrennt für Pkw und Lkw. Mittelwerte und Standardabweichung von Geschwindigkeit (km/h), Abstand (m) und Zeitlücke (sec.) für beide Nebelereignisse mit Kontrollzeiträumen; eigene Erhebung

Bedingung	Datum	Kategorien				gesamt
		< 1 sec.	1,0-1,8 sec.	1,8-3,0 sec.	> 3 se.c	
Nebel	17.-18.12.01	8,3 %	11,2 %	12,3 %	68,8 %	100 %
Kontrolle	27.-28.11.02	9,4 %	9,4 %	11,1 %	70,0 %	100 %
Nebel	6.-7.1.02	10,3 %	17,0 %	17,8 %	54,9 %	100 %
Kontrolle	1.-2.1.02	12,4 %	15,4 %	15,5 %	56,7 %	100 %

Tab. 26: Einteilung der Fahrzeuge in Kategorien anhand der Zeitlücken. Prozentuale Anteile der Kategorien; eigene Erhebung

Eine Analyse der Kolonnen (Fahrzeugverbände von mindestens fünf Fahrzeugen) erbrachte anhand der vorliegenden Daten keine Unterschiede zwischen Nebel und Klarsicht. Zu beiden Nebelereignissen fahren gleich viele Fahrer (prozentual und absolut) in Kolonnen wie in den jeweiligen Kontrollbedingungen. Auch haben die Kolonnen jeweils die gleiche Länge (im Mittel und als Verteilung). Auch eine

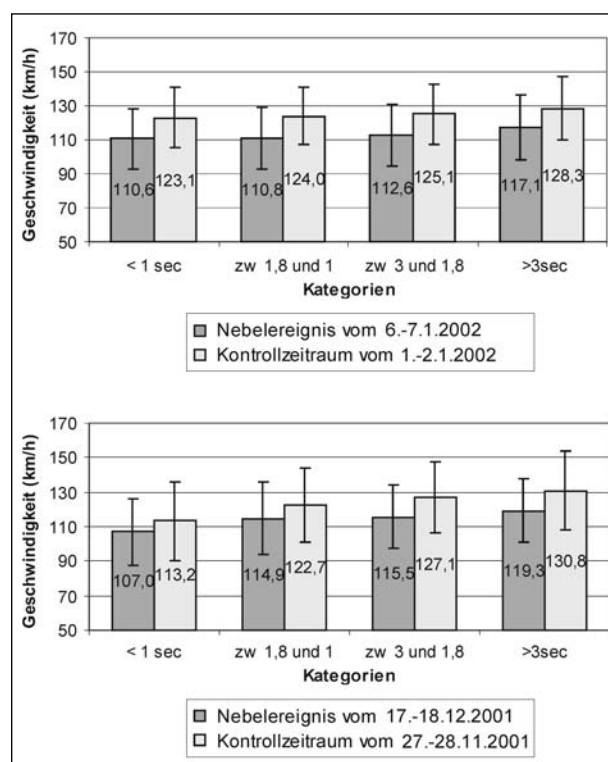


Bild 43: Mittelwert und Standardabweichung der Geschwindigkeit in den Kategorien nach Zeitlücken während des Nebelereignisses und am Kontrolltag für Pkw; eigene Erhebung

Aufteilung nach Pkw und Lkw erbringt keine Unterschiede zwischen Nebel und Klarsicht.

Zu allen Beobachtungszeiträumen zeigt sich, dass bei eingeschränkter Sicht die Geschwindigkeit reduziert wird. Während des kürzeren Nebelereignisses aus 2001 liegen die Geschwindigkeiten niedriger als in dem Nebelereignis aus 2002, dieser Effekt gilt auch für die jeweils zugehörigen Kontrollzeiträume. Die Ursache ist darin zu suchen, dass das Nebelereignis von 2001 sich während des Abends in vollständiger Dunkelheit abspielte, während der die Geschwindigkeiten generell niedriger sind. So fahren auch die Fahrzeuge während des langen Nebelereignisses in der Dunkelheit langsamer als tagsüber.

Unter allen Bedingungen fahren die so genannten Einzelfahrer (Zeitlücke > 3 sec.) am schnellsten, was sich mit dem Ergebnis der Reanalyse deckt. Bei dem Nebelereignis aus 2002 fällt das Ausmaß der Geschwindigkeitsreduktion über alle Kategorien gleich stark aus. Bei dem Nebelereignis vom 17.-18.12.2001 wird die Geschwindigkeit umso weniger stark reduziert, je näher das vorausfahrende Fahrzeug ist.

Trotz reduzierter Geschwindigkeit auch in der Gruppe, die im Nebel mit einer Zeitlücke von < 1 sec. fährt, kann hier nicht von angepasstem Fahrverhalten gesprochen werden, da eine mittlere Geschwindigkeit von 110 km/h und mittlere Abstände von 22 m vorliegen.

5.2.3 Diskussion

Es ist mit dieser Studie gelungen, einen sehr umfangreichen und auch hochwertigen Datensatz zu

Pkw		Nebel		Kontrolle	
		Mittelwert	Standardabweichung	Mittelwert	Standardabweichung
> 3 sec.	Geschwindigkeit	117,1	19,4	128,3	18,7
	Abstand	445,6	724,6	474,7	913,9
	Zeitlücke	13,6	21,7	13,0	24,2
zw 3 und 1,8 sec.	Geschwindigkeit	112,6	18,1	125,1	17,6
	Abstand	73,1	16,2	82,2	16,7
	Zeitlücke	2,3	0,3	2,4	0,3
zw 1,8 und 1 sec.	Geschwindigkeit	110,8	17,8	124,0	17,2
	Abstand	42,2	9,9	46,9	10,1
	Zeitlücke	1,4	0,2	1,4	0,2
< 1 sec.	Geschwindigkeit	110,6	17,6	123,1	17,4
	Abstand	22,1	6,7	23,9	7,2
	Zeitlücke	0,7	0,2	0,7	0,2

Tab. 27: Fahrzeuge gruppiert getrennt nach Größe der Zeitlücke. Lkw. Mittelwerte und Standardabweichung von Geschwindigkeit (km/h), Abstand (m) und Zeitlücke (sec.) Nebelereignis vom 6.-7.1.2002; eigene Erhebung

sammeln, der den Ansprüchen an eine solche Erhebung gerecht wird, soweit dies die Aufzeichnung der Verkehrsdaten selbst angeht. Leider sind die Auswertungen dennoch weniger aufschlussreich, als es zu erwarten war.

Dies liegt in erster Linie daran, dass nur sehr wenige Nebelereignisse aufgezeichnet werden konnten. Zudem sind die Sichtweiten dabei nicht so niedrig, wie dies wünschenswert gewesen wäre. Auch traten die einzigen länger dauernden Nebelereignisse in Zeiträumen mit nur geringer Verkehrsbelastung auf bzw. in der besonderen Verkehrssituation nach den Weihnachtsferien.

Ein weiteres Problem stellt die zeitweise Konfundierung des Auftretens von Nebel gleichzeitig mit der Geschwindigkeitsbegrenzung durch das Verkehrswechselzeichen dar. Die Ursache für die Reduktion der Geschwindigkeit kann somit nicht eindeutig geklärt werden bzw. umgekehrt nicht eindeutig auf das Verhalten von Fahrern im Nebel geschlossen werden, die keiner Geschwindigkeitsbegrenzung unterliegen.

Als Argument für eine Generalisierbarkeit spricht die Übereinstimmung der Richtung der Ergebnisse mit der Reanalyse. Andererseits haben sich Streckenbeeinflussungsanlagen erfahrungsgemäß bewährt, um die Zahl von Unfällen insbesondere bei widrigen Witterungsverhältnissen zu reduzieren. In einer Befragung des Deutschen Verkehrssicherheitsrates (DVR) aus dem Jahr 2000 geben drei Viertel der befragten Autofahrer an, sich immer oder meistens an die Geschwindigkeitshinweise solcher Anlagen zu halten. Um den Einfluss in der vorliegenden Stichprobe genauer zu bestimmen, wurde eine Substichprobe aus den Pkw gebildet, bei denen die Streckenbeeinflussungsanlage eine Geschwindigkeitsbegrenzung von 80 km/h anzeigte. Anschließend wurde diese Gruppe in die Sichtweitenkategorien über 600 m und unter 300 m geteilt (annähernd klare Sicht und eingeschränkte Sicht). Eine Varianzanalyse mit der Geschwindigkeit als abhängiger Variable zeigt, dass diejenigen Pkw-Fahrer mit eingeschränkter Sicht hochsignifikant langsamer fahren als diejenigen mit freier Sicht (104,7 km/h vs. 108,6 km/h). Diese Berechnung kann nicht als Beleg dafür verwandt werden, dass die Streckenbeeinflussungsanlage keinen Einfluss auf den Verkehr hat, jedoch als Hinweis darauf, dass auch dem Nebel eindeutig eine Bedeutung im Rahmen der gezeigten Effekte zukommt.

Zusammenfassend zeigt die Erhebung, dass es während der Nebelereignisse im Vergleich zu ent-

sprechenden Kontrollzeiträumen zu einer Verringerung der Geschwindigkeit kommt. Die veränderte Geschwindigkeit zeigt sich nur bei den Pkw, was angesichts von minimalen Sichtweiten von 100 m und einer Durchschnittsgeschwindigkeit der Lkw von etwa 85 km/h auch zu erwarten ist.

Die im Mittel über alle Fahrzeuge berechneten geringeren Abstände sind im Rahmen der betrachteten Daten ein Resultat der verringerten Geschwindigkeiten. Pkw-Fahrer, die im Verbund fahren, passen jedoch bei eingeschränkter Sicht nicht in der Form Abstand und Geschwindigkeit an, wie es zur Vermeidung von Unfällen wünschenswert wäre. Das zeigt die Auswertung in Kategorien der Zeitlücke.

Die Ergebnisse unserer Erhebung decken sich insgesamt mit den Ergebnissen der Reanalyse. In beiden Studien zeigte sich eine Verringerung der Geschwindigkeit bei Nebel, jedoch keine insgesamt sicherere Fahrweise, wenn Zeitlücken und Abstände ebenfalls einbezogen werden. Deckungsgleich mit der Reanalyse und den Modelluntersuchungen sind die Ergebnisse in Bezug darauf, dass es die Einzelfahrer sind, die schneller fahren, und nicht die Fahrer im Verbund.

6 Verkehrssimulation der gewonnenen Daten in PELOPS

Von: Henning Wallentowitz, Dirk Neunzig, Ahmed Benmimoun, Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen

6.1 Einleitung und Aufgabenstellung

Mittels der Untersuchungen im Fahr Simulator lässt sich das Fahrerverhalten bei veränderter Sichtweite in seinen wesentlichen Aspekten, die sich von denen bei klarer Sicht unterscheiden, beschreiben. Die Effekte dieses geänderten Fahrerverhaltens auf die Gesamtverkehrssituation, insbesondere hinsichtlich der Verkehrssicherheit, lassen sich jedoch mit diesen Untersuchungen nur begrenzt feststellen. Eine Möglichkeit, diese Aspekte zu berücksichtigen, bietet die Verkehrsflusssimulation. Im Rahmen dieses Projektes wurden daher Veränderungen des Fahrerverhaltens im Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS abgebildet und anhand von Messdaten verifiziert. Mit diesem modifizierten Fahrerverhalten werden relevante Nebelszenarien simuliert und hinsichtlich der Kriterien Verkehrssicherheit und Effizienz ausgewertet.

Die Erweiterungen und Anpassungen des PELOPS-Fahrermodells basieren auf den Ergebnissen der in Kapitel 4 beschriebenen Fahrsimulatoruntersuchungen. Hierbei werden das Annäherungsverhalten an vorausfahrende Fahrzeuge und die gefahrenen Wunschgeschwindigkeiten entsprechend dem gemessenen und beobachteten Verhalten bei Nebel angepasst. Durch diese Modifizierung soll auch der so genannte Sogeffekt modelliert werden. Hierzu wird die Sichtweite entsprechend variiert. Auswertungskriterien für die Simulation sind Verkehrssicherheit und Verkehrseffizienz. Im Detail bedeutet dies beispielsweise die Auswertung der Häufigkeit von kleinen TTC (Time to Collision), der Häufigkeit von hohen Verzögerungen, von Unfällen, des Durchsatzes und der mittleren Durchschnittsgeschwindigkeiten.

6.2 Modell des Fahrerverhaltens im Nebel

Zur Bewertung der verkehrlichen Wirkung des analysierten Fahrerverhaltens im Nebel wird das Verkehrssimulationsprogramm PELOPS genutzt. Hierfür muss zunächst das Fahrermodell um die gewonnenen Erkenntnisse aus den Fahrsimulatorun-

tersuchungen erweitert werden. Im Folgenden werden PELOPS und seine Funktionen erläutert und das an verkürzte Sichtweite angepasste Fahrermodell beschrieben. Die Vorgehensweise bei der Auswahl für die Untersuchung geeigneter Szenarien, deren Simulation und Auswertung wird anschließend detailliert vorgestellt.

6.2.1 Das Verkehrssimulationsprogramm PELOPS

Im Rahmen der Studie steht das mikroskopische Verkehrsflusssimulationsprogramm PELOPS (Programm zur Entwicklung längsdynamischer, mikroskopischer Prozesse in systemrelevanter Umgebung) zur Verfügung, welches am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen (ika) in Zusammenarbeit mit der BMW AG entwickelt worden ist (DIEKAMP, 1995; LUDMANN, 1998).

Das Konzept von PELOPS besteht in der Verknüpfung detaillierter submikroskopischer Fahrzeugmit mikroskopischen verkehrstechnischen Modellen, die sowohl eine Untersuchung des längsdynamischen Fahrzeugverhaltens wie auch eine Analyse des Verkehrsablaufs ermöglichen (Bild 44). Der Vorteil dieser Methode liegt darin, alle Wechselwir-

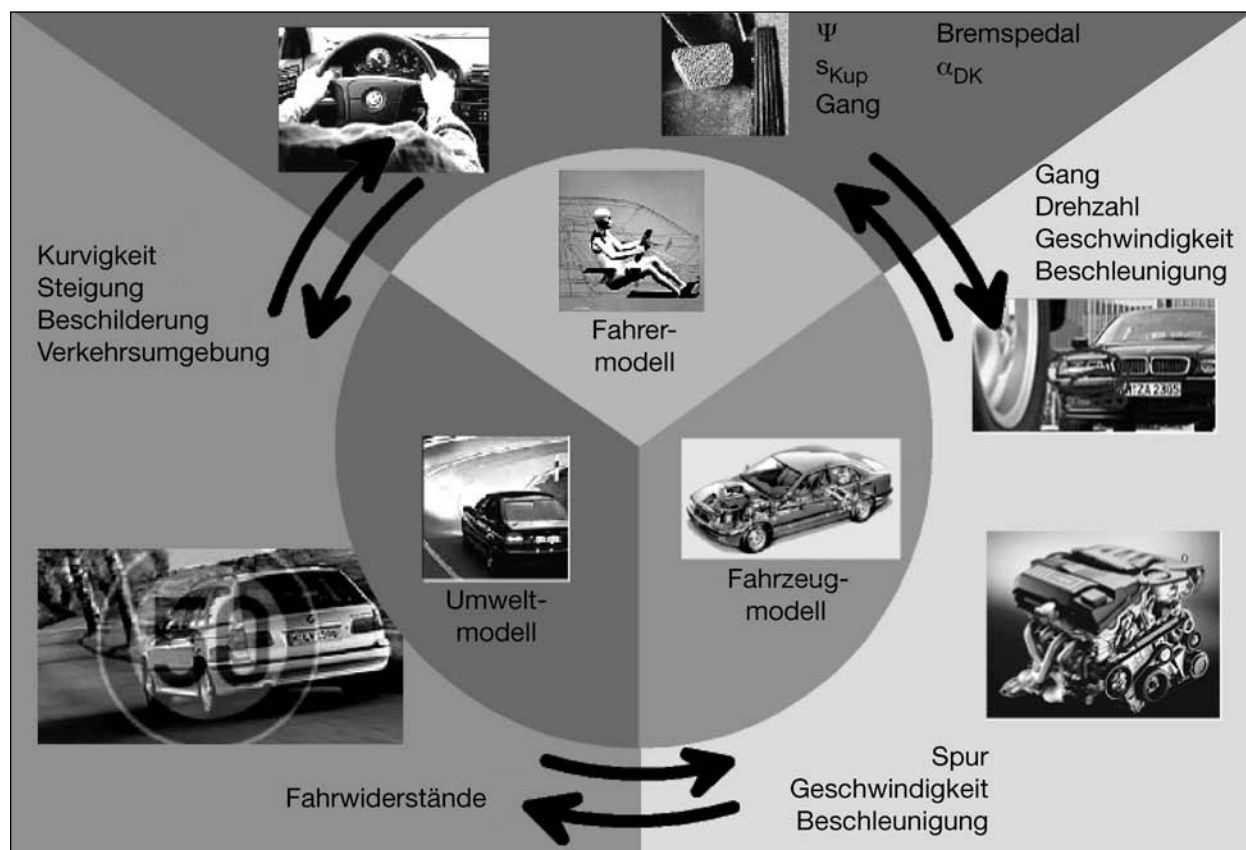


Bild 44: PELOPS-Struktur

kungen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Verkehr berücksichtigen zu können. Im Aufbau orientiert sich PELOPS an den wesentlichen Elementen des Verkehrssystems – Strecke/Umwelt, Fahrer und Fahrzeug. In einer modularen Programmstruktur werden die genannten Elemente modelliert und durch Schnittstellen abgegrenzt.

Das Umweltmodell erlaubt bei Bedarf eine detaillierte Beschreibung der Einflüsse einer stationären Verkehrsumgebung. Sowohl der Verlauf der Straße in horizontaler und vertikaler Richtung über Radien und Übergänge wie auch die Anzahl und die Breite der Spuren werden angegeben. Zusätzlich zu diesen geometrischen Daten können Verkehrszeichen sowie Umweltbedingungen über Parameter wie Nässe, Glätte etc. vorgegeben werden. Die aktuellen Verkehrsbedingungen für ein Fahrzeug ergeben sich dann aus der Anzahl der umgebenden Fahrzeuge sowie deren Abständen und Geschwindigkeiten. Um bestimmte Verhaltensweisen im Verkehr zu provozieren oder vorgegebene Fahrzyklen nachzufahren, können einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten wahlweise auch bestimmte Geschwindigkeitsprofile vorgegeben werden.

Das Fahrzeugmodell basiert auf dem ‘Ursache-Wirkungs-Prinzip’, bei dem eine Berechnung der Antriebskraft ausgehend vom Motorbetriebspunkt über Kupplung, Getriebe und Differential zu den Rädern erfolgt, wo die Antriebskraft dann mit den Fahrwiderständen bilanziert wird. Der Betriebspunkt wird über die Änderung des Motormomentes (Ursache) gewechselt. Aus der dadurch verursachten Beschleunigung und Geschwindigkeitsänderung resultiert unter Berücksichtigung der Elemente des Antriebsstranges die Motordrehzahl (Wirkung). Als Getriebearten sind das konventionelle Handschalt- sowie Automatikgetriebe implementiert. Weiterhin lässt dieses detaillierte Bild des Fahrzeugs die Simulation von Fahrerassistenzsystemen wie etwa des ACC (Adaptive Cruise Control; intelligenter Tempomat) zu.

Die Verbindung zwischen der Fahrzeug- und der Verkehrssimulation stellt das Fahrermodell dar. Es ist in ein Verhaltens- und ein Handlungsmodell gegliedert. Im Verhaltensmodell werden die Parameter der lokalen Fahrstrategie aus dem aktuellen Fahrzustand und der Fahrzeugumgebung bestimmt. Die Parameter der lokalen Fahrstrategie sind eine vom Fahrer gewünschte Beschleunigung, die Fahrspur und ggf. der einzulegende Fahrgang. Im Handlungsmodell schließlich werden diese Pa-

rameter in fahrzeugseitige Stellgrößen wie Gaspedal, Bremse etc. umgesetzt.

Zur Ermittlung des Fahrerverhaltens arbeitet PELOPS mit einem psycho-physischen Folgemodell, das auf den Arbeiten von WIEDEMANN (1974) beruht. Für die Anwendung in PELOPS wurde dieses Modell angepasst und bedeutend weiterentwickelt (EHMANN, 2000; LUDMANN, 1998; NEUNZIG, 1996; WEILKES, 2000). Da das ursprüngliche Folgemodell nur die Reaktion auf Fahrzeuge berücksichtigt, die auf derselben Spur fahren, wurde zusätzlich ein taktisches Verhaltensmodell entwickelt, das ein realistisches Fahrerverhalten in Bezug auf den Streckenverlauf und bei mehrspurigen Strecken abbildet. Dieses taktische Verhalten beinhaltet beispielsweise die Reaktion auf langsame Fahrzeuge auf den Nachbarspuren, auf die verschiedenen Schilder und Knotenpunktformen und ein situationsabhängiges Spurwechselmodell, das auf der Betrachtung der Zufriedenheit eines Fahrers auf den einzelnen Spuren beruht. Fahrerabhängige Einflussgrößen für das Verhaltensmodell sind beispielsweise das Sicherheitsbedürfnis oder das Schätzvermögen von Abständen und Geschwindigkeiten (Bild 45). Durch diese Parameter ist es bereits möglich, verschiedene Fahrercharaktere (z. B. „sportlicher Fahrer“) abzubilden. Das „Sicherheitsbedürfnis“ ist der wichtigste Parameter des Fahrermodells: Es beeinflusst alle abstandsabhängigen Verhaltensweisen. Ein hohes

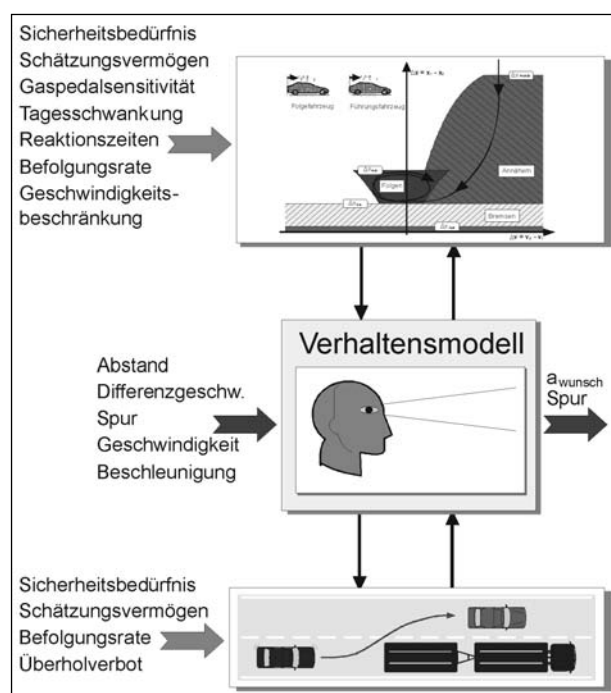


Bild 45: Verhaltensmodell von PELOPS

Sicherheitsbedürfnis bedeutet einen größeren Folgeabstand. Die Größe der Lücke auf der Nachbarspur, welche für einen Überhol- oder Spurwechsellvorgang erforderlich ist, steigt ebenfalls mit höherem Sicherheitsbedürfnis. Zusätzlich wird die Geschwindigkeitswahl beeinflusst. Die Parameter Schätzungsvermögen, Gaspedalsensibilität und Tagesschwankungen dienen als Modelleingangsgrößen zur Beschreibung von Unzulänglichkeiten des Fahrers bei der Einschätzung von Abständen bzw. Differenzgeschwindigkeiten und bei der Bedienung der Fahrzeugstellgrößen Gaspedal, Bremse und Lenkung. Reaktionszeiten werden für die vier Kategorien Normalfahrt, Reaktion auf potenziell gefährliche Bremsmanöver, Spurwechsel und Anfahren des Vorfahrenden unterschieden. Zusätzlich verarbeitet das Fahrermodell individuelle Befolgungsgrade für Überholverbote (z. B. für das Rechtsüberholen) und Geschwindigkeitsbeschränkungen (um wie viel km/h wird diese maximal überschritten?).

Ein sportlicher Fahrer kann in der Simulation mit PELOPS beispielsweise durch ein niedriges Sicherheitsbedürfnis, gutes Schätzvermögen und hohe Gaspedalsensibilität bei niedrigen Tagesschwankungen beschrieben werden. Ein niedriges Sicherheitsbedürfnis bedeutet bei einem sportlichen Fahrer, dass grundsätzlich niedrigere Abstände gefahren werden und Lücken, die der Fahrer für seinen Spurwechsel nutzt, erheblich kleiner sind als bei einem durchschnittlichen Fahrer. Gleichzeitig ist der so parametrisierte sportliche Fahrer bereit, kleine Abstände und Lücken, die ihm durch den umgebenden Verkehr aufgeprägt werden, zu akzeptieren. Gutes Schätzvermögen und hohe Gaspedalsensibilität bedeuten in diesem Zusammenhang eine gute Kontrollierbarkeit der eigenen Aktionen. Diese beiden Parameter haben aber nur einen geringen Einfluss auf das modellierte Fahrverhalten und sind im Vergleich zum Sicherheitsbedürfnis nur wenig bedeutsam. Weiterhin wird der sportliche Fahrer durch eine entsprechende Parametrisierung der Größen „Reaktionszeit“ und „Befolgungsrate“ beschrieben. Seine Reaktionszeiten sind möglicherweise niedrig, ebenso seine Befolgungsrate für Geschwindigkeitsbeschränkungen (d. h., er fährt sehr viel schneller als erlaubt). Analog zu diesem Beispiel können andere „Fahrertypen“ (sicherheitsbetont, sparsam etc.) durch eine geeignete Wahl der Fahrerparameter „eingestellt“ werden. Insgesamt steht für die Simulation ein validierter Satz von mehreren hundert Standardfah-

rertypen in statistischer Verteilung zur Verfügung (WEILKES, 2000).

Insgesamt verfügt das PELOPS-Fahrermodell über die folgenden Parameter zur Anpassung des Fahrverhaltens:

- Wunschgeschwindigkeit,
- Sicherheitsbedürfnis,
- Schätzvermögen,
- Gaspedalsensibilität,
- Tagesschwankung,
- Überholverbotsbefolgung,
- Tempolimitbefolgung,
- geschätzte maximal realisierbare Verzögerung,
- maximale Ausnutzung der Fahrzeugbeschleunigung,
- Präferenzspur,
- normale Reaktionszeit,
- Bremsreaktionszeit,
- Spurwechselreaktionszeit,
- Anfahrreaktionszeit.

Für eine detaillierte Beschreibung dieser Parameter und deren Eingang in die Berechnungsvorschriften des Fahrermodells sei hier auf die Quellen EHMANN (2000), LUDMANN (1998) und NEUNZIG (1996) verwiesen.

Das Fahrermodell verfügt über die folgenden wesentlichen Ausgangsgrößen:

- die aktuelle Wunschbeschleunigung bzw. -verzögerung,
- die aktuelle Wunschgeschwindigkeit als ein an die aktuellen Umgebungsbedingungen angepasster, gegenüber der maximalen Wunschgeschwindigkeit des betreffenden Fahrers reduzierter Wert,
- die momentane, durch die Fahrfähigkeiten bestimmte Sichtweite und die für die aktuelle Situation geltenden Parameter des Fahrermodells wie etwa Folgeabstände oder Wahrnehmungsschwellen,
- gewünschte Blinker-, Licht- und Hupsignalbetätigungen.

Die grundsätzliche Funktionsweise des PELOPS-Fahrermodells bei der Ermittlung dieser Ausgangsgrößen wird im Folgenden am Beispiel des Spurwechsels verdeutlicht. Dabei ist zunächst der grundlegende Ablauf des Spurwechsels von der Wunschbildung hin zur Durchführung näher zu betrachten. Typische Verhaltensmuster sind, analog zum hier vorliegenden Projekt, anhand von Fahreruntersuchungen identifiziert worden. Der Spurwechselvorgang lässt sich in drei Phasen unterteilen. Zunächst wird ein Spurwechselwunsch abhängig von der Zufriedenheit auf der Fahrspur gebildet. Anschließend wird die Durchführbarkeit überprüft. Schließlich beginnt bei positivem Ergebnis der Spurwechsel. Bild 46 fasst diese Phasen zusammen.

Einem Spurwechsel kann eine Vielzahl von Beweggründen zugrunde liegen. Das Verfolgen einer bestimmten Route und das Überholen sind zwei wichtige Motivationen. Aber auch taktische Erwägungen führen zu einem Spurwechsel. Nähert sich ein schnelleres Fahrzeug von hinten, so kann dies unter Umständen einen Spurwechsel auf die rechte Spur motivieren. Um die Art und Zahl der abbildbaren Spurwechselmotivationen flexibel zu halten, wurde eine Struktur für das Spurwechselmodell gewählt, bei der alle Beweggründe in einen Faktor münden. Ferner sollen verschiedene Fahrertypen auch im Spurwechselverhalten abgebildet werden können. Der Faktor, der die Spurwechselmotivationen zusammenfasst, lässt sich als Zufriedenheit interpretieren. In jedem Zeitschritt wird diese Zufriedenheit für jeden Fahrer bestimmt. Einflussgrößen sind die fahrerindividuelle Wunschgeschwindigkeit im Vergleich zur aktuellen eigenen Geschwindigkeit und der Geschwindigkeit auf den Nachbarspuren. Das zu Beginn beschriebene schnellere Fahrzeug, das sich von hinten nähert, reduziert die Zufriedenheit auf der eigenen Spur und erhöht die Zufriedenheit auf der rechten Spur. Die Summierung der einzelnen Zufriedenheiten mündet in einen Wert, der die Gesamtsituation beschreibt. Die Zufriedenheit ist fahrerabhängig, da die Wunschgeschwindigkeit eine fahrerabhängige Größe ist.

Die Zufriedenheitswerte werden über der Zeit aufsummiert und mit einem „Vergessensfaktor“ gewichtet, was einen hypothetischen Vergessensprozess simuliert, der in ähnlicher Weise beim Fahrer angenommen werden kann. Je länger die Fahrsituation zurückliegt, desto kleiner ist der Einfluss auf das aktuelle Verhalten. Die Zufriedenheitswerte für

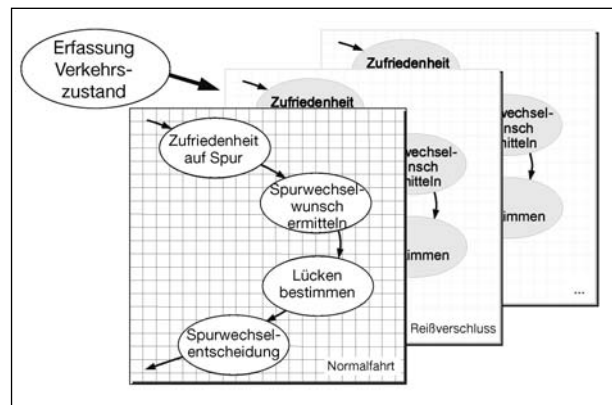


Bild 46: Struktur des Spurwechsels

die aktuelle Spur und die beiden Nachbarspuren werden miteinander verglichen. Dabei werden variable Schaltstufen bei Zustandsänderungen zur Vermeidung von ständigem Hin- und Herschalten berücksichtigt, um instabiles Spurwechselverhalten zu verhindern. Instabiles Spurwechselverhalten zeigt sich z. B., wenn die Verkehrssituation auf allen Spuren annähernd identisch ist. Eine marginale Änderung auf der Nachbarspur würde zu einem Spurwechsel führen. Wird eine Hysterese eingeführt, so muss die Situation auf der Nachbarspur um den Wert der Hysterese besser sein, um beim Fahrer einen Spurwechselwunsch auszulösen. Ist die Situation über einen längeren Zeitraum geringfügig besser, so führt das Aufsummieren der Zufriedenheiten dazu, dass die Hystereseschwelle nach einer gewissen Zeit überschritten wird und der Fahrer die Spur wechseln will.

Zur Umsetzung des Spurwechselwunsches wurde ein mehrstufiges Beschleunigungsverhalten mit dem Ziel auf eine Lücke realisiert. Es wird also zusätzlich zu der Querführung die Längsdynamik betrachtet. Dabei ist bereits eine Beschleunigungsphase vor dem Ausscheren dem Spurwechselvorgang zuzuordnen, wenn sie zum Erreichen einer geeigneten Lücke bzw. zur Geschwindigkeitsanpassung an die relevanten Fahrzeuge auf der Zielspur dient. Insgesamt wird also die herkömmliche Betrachtung des reinen Spurwechselvorgangs um das taktische Fahrerverhalten, beschrieben durch den Beschleunigungsverlauf, ergänzt (EHMANN, 2000).

6.2.2 Nebelmodell

Das oben beschriebene Fahrermodell weist für alle Sichtweiten das gleiche Fahrverhalten auf. Da in der Realität jedoch bei verkürzter Sichtweite ein

anderes Fahrerverhalten zu beobachten ist, wird das Fahrermodell um dieses Verhalten erweitert. Grundlage für das angepasste Modell sind hierbei die vorliegenden Untersuchungen aus dem Fahrsimulator. Im Folgenden werden die einzelnen Modellerweiterungen und -anpassungen detailliert beschrieben.

Sichtweite

Für die Anpassung der Sichtweite sind keine Änderungen in PELOPS nötig, da dies bereits implementiert ist. Für jedes Szenario wird in PELOPS eine Sichtweite definiert, innerhalb derer die Fahrer ihre Umwelt wahrnehmen können. Alle Einflussfaktoren außerhalb der Sichtweite, wie beispielsweise Fahrzeuge, Beschilderung, Streckenverlauf etc., werden für die Berechnung des Fahrerverhaltens nicht berücksichtigt. Die maximale Sichtweite beträgt in PELOPS 5.000 m für klare Sicht. Diese stellt jedoch nur eine theoretisch mögliche Sichtweite dar. Für jeden Fahrer wird abhängig von seiner aktuellen Fahrsituation eine tatsächliche Sichtweite berechnet, die in der Größenordnung von 200 bis 400 m liegt. Auf Objekte, die außerhalb dieses Bereiches liegen, wird in der Regel nicht reagiert.

Wunschgeschwindigkeit

Die erste Modelluntersuchung im Fahrsimulator hat ergeben, dass die Wunschgeschwindigkeit, die bei Nebel gefahren wird, sich von der bei klarer Sicht unterscheidet. Bei verkürzter Sichtweite wird in der Regel langsamer gefahren als bei klarer Sicht, wobei die Höhe der Geschwindigkeitsreduktion von individuellen Fahrereigenschaften abhängig ist. Für die Umsetzung dieses Verhaltens in PELOPS wird ein Faktor definiert, der die im Nebel gefahrene Geschwindigkeit im Vergleich zur Geschwindigkeit bei klarer Sicht beschreibt. Bild 47 zeigt die Mittelwerte dieser Faktoren über alle Probanden der Fahrsimulatoruntersuchung bei freier Fahrt ohne jegliche umgebenden Fahrzeuge für die Sichtweiten von 50 m, 80 m und 5.000 m (klare Sicht in PELOPS). In PELOPS wird eine Regressionskurve implementiert, die diese Werte enthält, damit auch mit anderen Sichtweiten als die untersuchten Werte simuliert werden kann.

Um die individuellen Eigenschaften der einzelnen Fahrer zu berücksichtigen, wird bei der Berechnung der Wunschgeschwindigkeit im Nebel nicht

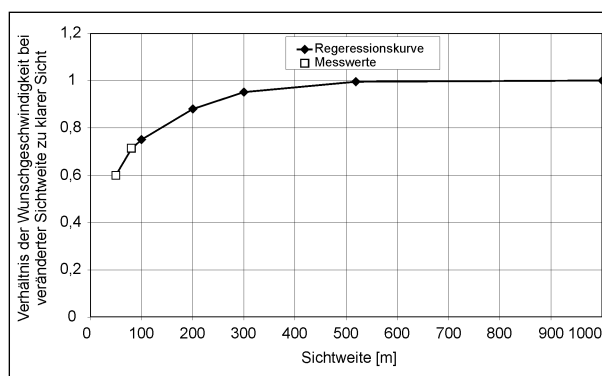


Bild 47: Verhältnis der Wunschgeschwindigkeiten bei Nebel und klarer Sicht

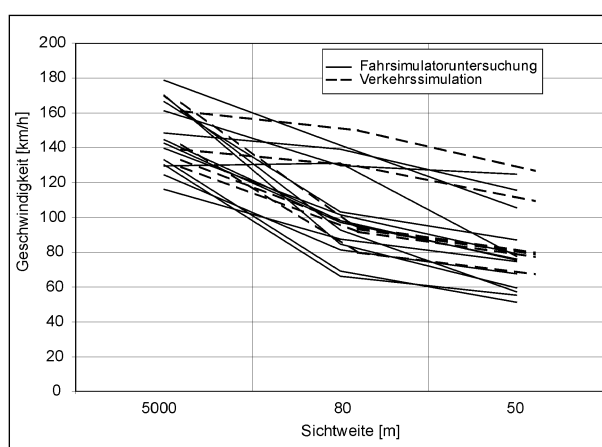


Bild 48: Vergleich der individuellen Wunschgeschwindigkeiten bei unterschiedlicher Sichtweite im Fahrsimulator und in der Verkehrssimulation

nur die Sichtweite, sondern auch der PELOPS-Parameter Sicherheitsbedürfnis berücksichtigt, sodass die in den Untersuchungen festgestellte Standardabweichung auch in der Simulation realisiert wird. In Bild 48 sind die Wunschgeschwindigkeiten für unterschiedliche Probanden angegeben (durchgezogene Linien, exemplarisch für 13 Probanden, um die unterschiedlichen Charakteristiken abzubilden). Diese Darstellung zeigt, dass die Art und Weise, wie die Geschwindigkeit im Nebel reduziert wird, sehr stark vom Fahrertyp abhängen. Während einige Fahrer ihre Geschwindigkeit beim Übergang von klarer Sicht auf 80 m Sichtweite nur wenig, dafür aber beim Übergang von 80 m auf 50 m Sichtweite stark reduzieren, verhält es sich bei anderen genau umgekehrt. Ein Teil der Fahrer reduziert seine Geschwindigkeit mit abnehmender Sichtweite gleichmäßig. Mit Hilfe des Parameters Sicherheitsbedürfnis wird auch in der Simulation dieses unterschiedliche Verhalten abgebildet, wie die gestrichelten Linien für sechs exemplarisch ausgewählte Simulationen zeigen.

Sogeffekt

Die Modelluntersuchungen zwei und drei (siehe Kapitel 4) haben gezeigt, dass einige Fahrer im Falle eines beschleunigenden Vorderfahrzeuges diesem folgen, auch wenn es schneller fährt als ihre eigene Wunschgeschwindigkeit. Der Fahrer erhöht so lange seine Geschwindigkeit und folgt dem Vorderfahrzeug, bis ein bestimmter Schwellwert erreicht ist. Dieser Schwellwert ist abhängig von den individuellen Fahrereigenschaften, der Sichtweite und der Beschleunigung des Vordermanns. Ist dieser Schwellwert erreicht, bremst der Fahrer wieder auf seine sichtangepasste Wunschgeschwindigkeit.

Bild 49 zeigt den Mittelwert des prozentualen Anteils der Wunschgeschwindigkeit für die jeweilige Sichtweite, ab der der Sogeffekt abgebrochen wird. Es sind wiederum Regressionskurven dargestellt, damit auch andere Sichtweiten abgedeckt werden können. Vergleicht man diese Mittelwerte für die beiden untersuchten Beschleunigungen des Vorderfahrzeuges (0,1 m/s² und 0,3 m/s²), zeigt sich, dass sich diese für alle Sichtweiten lediglich um einen konstanten Faktor unterscheiden, der etwa 0,982 beträgt. D. h., je höher die Beschleunigung des Vordermanns, desto niedriger ist die Sogabbruchsgeschwindigkeit des folgenden Fahrers.

In den Untersuchungen wurden nur zwei verschiedene Beschleunigungen des Vordermanns (0,1 m/s² und 0,3 m/s²) betrachtet. Da aber die Beschleunigung des Vorderfahrzeuges in der Verkehrssimulation nahezu beliebige Werte annehmen kann, muss eine Funktion für den gesamten Beschleunigungsbereich eines Fahrzeuges definiert werden. Zu diesem Zweck wird ein Skalierungsfaktor genutzt (siehe Tabelle 28), der sich auf die Abbruchsgeschwindigkeit bei 0,1 m/s² bezieht (Skalierungsfaktor bei 0,1 m/s² ist 1). Dieser Skalierungsfaktor wird mit dem Mittelwert der Abbruchsgeschwindigkeit multipliziert, um die der Beschleunigung des Vorderfahrzeuges entsprechende Sogabbruchsgeschwindigkeit zu erhalten.

Die Abbruchsgeschwindigkeit beträgt beispielsweise bei 0,1 m/s² Beschleunigung des Vorderfahrzeuges bei klarer Sicht im Mittel 108,74 % der Wunschgeschwindigkeit. Um die Abbruchsgeschwindigkeit bei 0,3 m/s² zu erhalten, multipliziert man den entsprechenden Skalierungsfaktor (0,9823) mit der Abbruchsgeschwindigkeit bei 0,1 m/s² und erhält 106,78 % der Wunschgeschwindigkeit als Sogabbruchsgeschwindigkeit bei 0,3

m/s² Beschleunigung des Vorderfahrzeuges. Die restlichen Werte der Skalierungsfaktoren sind sinnvoll extrapoliert. Damit in der Simulation alle Beschleunigungsbereiche sinnvoll abgedeckt sind, wird ein Punkt mit der Beschleunigung von 10 m/s² im Kennfeld abgelegt, so dass zwischen 2,87 m/s² und 10 m/s² interpoliert werden kann.

Die Sogabbruchsgeschwindigkeit ist zusätzlich vom PELOPS-Parameter „Tagesform“ abhängig. Damit lassen sich die Standardabweichungen der Abbruchsgeschwindigkeiten abbilden.

Befindet sich ein Vorderfahrzeug im Sichtbereich des Fahrers und fährt dieses schneller, versucht nun der Fahrer in PELOPS, den Anschluss an dieses Fahrzeug zu halten, und fährt eventuell schneller, als seine Wunschgeschwindigkeit es erlaubt. Er fährt erst dann wieder seine niedrigere Wunschgeschwindigkeit, wenn das Vorderfahrzeug außer Sicht ist bzw. er die Sogabbruchsgeschwindigkeit überschreitet. Da aber nicht alle Fahrer dieses Sogverhalten in jeder Situation aufweisen, wird zu Be-

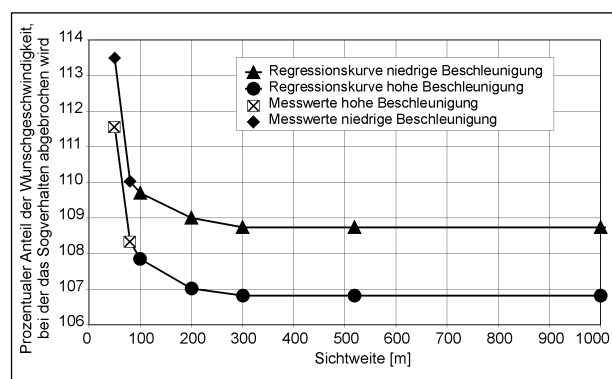


Bild 49: Prozentualer Anteil der Wunschgeschwindigkeit, bei der der Sogeffekt abgebrochen wird

Beschleunigung des Vorderfahrzeuges	Skalierungsfaktor
0	1,015
0,1	1,000
0,2	0,990
0,3	0,982
0,4	0,975
0,5	0,968
0,6	0,960
0,7	0,955
1,33	0,944
2,87	0,936
10	0,920

Tab. 28: Abhängigkeit des Skalierungsfaktors von der Beschleunigung des Vorderfahrzeuges; Simulationsstudien

ginn der Simulation jedem Fahrer eine Eigenschaft zugeordnet, die angibt, ob dieser hier Sogverhalten zeigt oder nicht. Auf diese Weise wird ein statischer Anteil an Fahrern definiert, die das Sogverhalten aufweisen. Diese Populationsanteile basieren auf der Modelluntersuchung 3 (Abschnitt 4.4) und sind in Tabelle 29 dargestellt.

Bei einer Folgefahrt weisen die gefahrenen Geschwindigkeitsverläufe der Probanden ein Schwingungsverhalten auf, dessen Frequenz und Amplitude sichtweitenabhängig sind. Ein solches Schwingungsverhalten ist bei Folgefahrten ebenfalls in PELOPS festzustellen, allerdings sind hierbei Frequenz und Amplitude nicht so ausgeprägt wie bei den Untersuchungen mit starker Sichtverkürzung. Das PELOPS-Fahrermodell liefert eine Sollbeschleunigung als Ergebnis an das Handlungsmodell. Zur Abbildung des Schwingungsverhaltens bei verkürzter Sichtweite wird diese Sollbeschleunigung als Ausgangsgröße eines PI-Reglers⁴ definiert, der versucht, die Eigengeschwindigkeit an die des Vorderfahrzeuges heranzuführen. Mittels der beiden Reglerkoeffizienten K_R und K_I und dem PELOPS-Parameter Schätzvermögen (der Fahrer kann die Vorderfahrzeuggeschwindigkeit nie exakt einschätzen) lässt sich das Schwingungsverhalten bis zu einem gewissen Grad bestimmen. Da PELOPS nach dem

Sichtweite (m)	Sogfahrer (%)
50	52,08
80	45,84
5.000	37,50

Tab. 29: Anteile an Sogfahrern nach Sichtweite laut Modelluntersuchungen

Ursache-Wirkungs-Prinzip arbeitet und mehrere Parameter eine Ausgangsgröße beeinflussen, kann das Schwingungsverhalten nicht exakt dem im Fahrsimulator nachgebildet werden. Da sich das Schwingungsverhalten bei 50 m und 80 m Sichtweite nicht signifikant voneinander unterscheidet, wird für beide Fälle in PELOPS ein Schwingungsverhalten mit einer mittleren Frequenz von rund 9 sec. und einer Geschwindigkeitsamplitude von etwa 5 % implementiert (s. Bild 50).

Die Bilder 51 und 52 zeigen das implementierte Sogverhalten in PELOPS. In Bild 51 beschleunigt

- 4 Ein Regler mit einem Proportionalanteil und einem integrierenden Anteil. Der Proportionalanteil sorgt dafür, dass der gewünschte Sollwert schnell erreicht wird. Der Integralanteil bewirkt eine exakte Einstellung des Sollwertes.

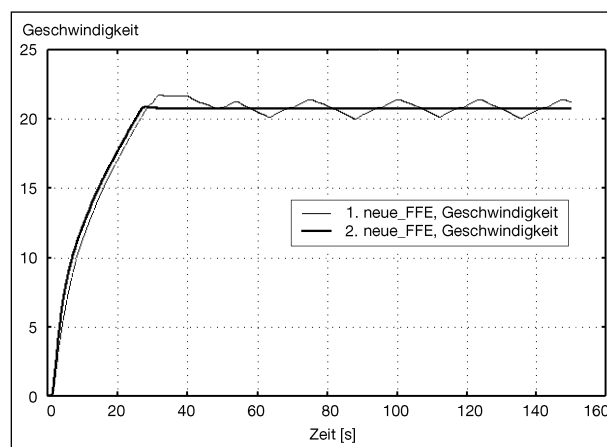


Bild 51: Sogverhalten bei zweistufiger Beschleunigung des Vorderfahrzeuges

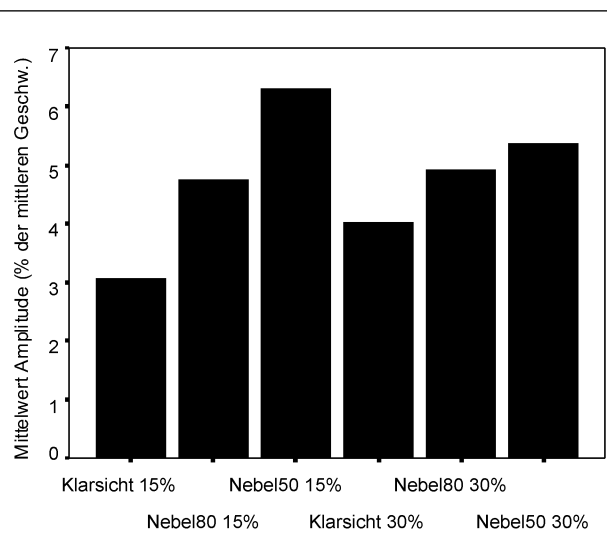
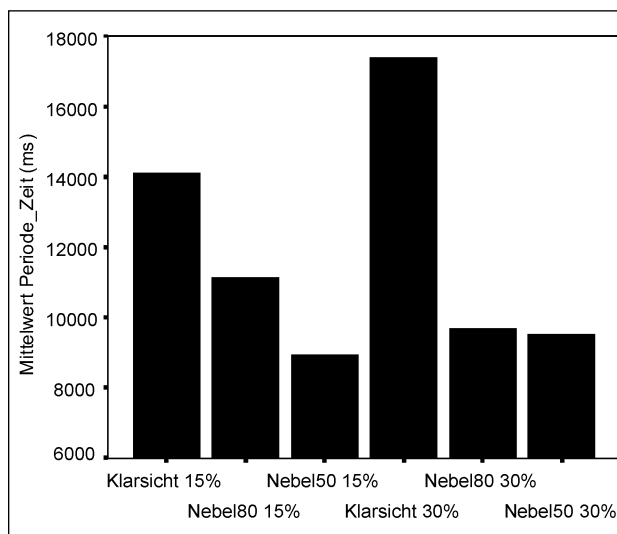


Bild 50: Ergebnisse der Fahrsimulatoruntersuchung (unterteilt nach Sichtbedingung und Beschleunigungsgrad): Schwingungsverhalten (rechts: Amplitude in % der mittleren Geschwindigkeit, links: mittlere Frequenz in ms) (vgl. Modelluntersuchung 3; Kap 4.4)

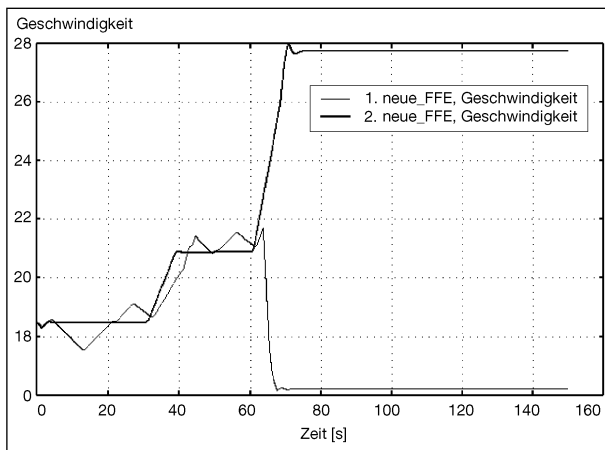


Bild 52: Sogverhalten bei zweistufiger Beschleunigung des Vorderfahrzeuges

das Vorderfahrzeug bei einer Sichtweite von 50 m auf seine Wunschgeschwindigkeit. Der Fahrer des Folgefahrzeuges, das zu Beginn der Simulation in kurzem Abstand hinter dem Vorderfahrzeug steht, hat eine geringere Wunschgeschwindigkeit als der Fahrer des Vorderfahrzeuges, beschleunigt aber aufgrund des Sogeffektes auf die Wunschgeschwindigkeit des anderen Fahrers.

In Bild 52 fährt das Vorderfahrzeug einen festen, vorgegebenen Geschwindigkeitszyklus. Zunächst fahren beide Fahrzeuge mit einer ähnlichen Geschwindigkeit. Das Vorderfahrzeug erhöht dann seine Geschwindigkeit in zwei Phasen. In der ersten Phase fährt das Folgefahrzeug aufgrund des Sogeffektes hinterher. Die zweite Phase erfolgt mit einer höheren Beschleunigung, so dass die Sogabbruchgeschwindigkeit des Fahrers im Folgefahrzeug erreicht wird und dieser wieder zurück auf seine Wunschgeschwindigkeit fällt.

6.2.3 Verkehrliche Wirkung des Fahrerverhaltens bei verkürzter Sichtweite

Um die wesentlichen verkehrlichen Effekte des bei verkürzter Sichtweite geänderten Fahrverhaltens zu bewerten, werden verschiedene Szenarien simuliert, um alle relevanten Verkehrssituationen abzubilden. Hierfür werden zunächst die Wirkungen der Nebelfahrt auf den Verkehr auf einem zweispurigen Autobahnabschnitt untersucht. Dabei werden die im Fahrsimulator untersuchten Sichtweiten berücksichtigt (klare Sicht, 80 m und 50 m Sichtweite). Die Verkehrsstärke wird in zwei Stufen variiert, sodass die Wirkung sowohl im dichten als auch freien Verkehr analysiert wird. Aus dieser Überlegung heraus resultieren sechs zu simulierende Szenarien. Im nächsten Schritt wird ein dreispu-

riger Autobahnabschnitt betrachtet, bei dem aber nach 5.500 m eine Spur wegfällt. Der Spurwegfall bringt eine Störung in den Verkehr, welche sich in Form von Stauwellen, die sich nach hinten fortpflanzen, äußert. Da die Geschwindigkeit innerhalb dieser Stauwellen teilweise bis auf null sinkt, entstehen hier besonders viele potenziell gefährliche Situationen. Hierbei werden ebenfalls die drei untersuchten Sichtweiten und zwei verschiedene Verkehrsstärken berücksichtigt, sodass auch hier sechs Simulationsszenarien entstehen. Ein weiterer interessanter Aspekt bei verkürzter Sichtweite ist das Verhalten bei Kolonnenfahrten. Deshalb wird für die drei Sichtweiten jeweils ein Szenario mit einer Kolonne von zehn Fahrzeugen simuliert.

Szenario Autobahn

Das Szenario Autobahn stellt einen sechs Kilometer langen zweispurigen Autobahnabschnitt ohne Geschwindigkeitsbeschränkung dar. Die Simulationsdauer beträgt 1.200 sec. Dieses Szenario soll den Einfluss des sichtangepassten Fahrerverhaltens auf den Verkehr ohne äußerliche Störfaktoren verdeutlichen. Bei den beiden simulierten Verkehrsstärken freier und dichter Verkehr wird zum einen eine Eingangsverkehrsstärke auf etwa 10 Fzge/min und Spur bzw. eine mit der Simulationsdauer immer weiter ansteigenden Verkehrsstärke (20-35 Fzge/min und Spur) realisiert. Auf der Strecke sind ab Kilometer zwei jeweils im Abstand von 1.000 m vier Messschleifen angelegt, die für die Auswertung des Verkehrszustandes herangezogen werden können.

Bild 53 zeigt, in welchen Bereichen des Fundamentaldiagramms sich der Verkehrszustand beim freien Verkehr für die jeweiligen Sichtweiten befindet. Im Fundamentaldiagramm ist die Geschwindigkeit über der Verkehrsstärke aufgetragen. Jeder einzelne Punkt stellt einen über eine Minute gemittelten Wert dar. Die Rauten, Dreiecke, Quadrate und Kreise stellen dabei die einzelnen Messschleifen dar. Es zeigt sich, dass es bei klarer Sicht (weiße Kreise) in einigen Fällen zu einigen Störungen kommt und die Durchschnittsgeschwindigkeit für wenige Minuten sinkt, aber die Durchschnittsgeschwindigkeit im Allgemeinen zwischen etwa 90 bis 140 km/h pendelt. Bei 80 m und 50 m Sichtweite hingegen liegt diese aufgrund sichtangepasster Wunschgeschwindigkeiten deutlich niedriger. Teilweise kommt es auch hier zu dichteren Verkehrsabschnitten, ohne dass hierbei allerdings die Durchschnittsgeschwindigkeit weiter sinkt. Die Durchschnittsgeschwindigkeiten

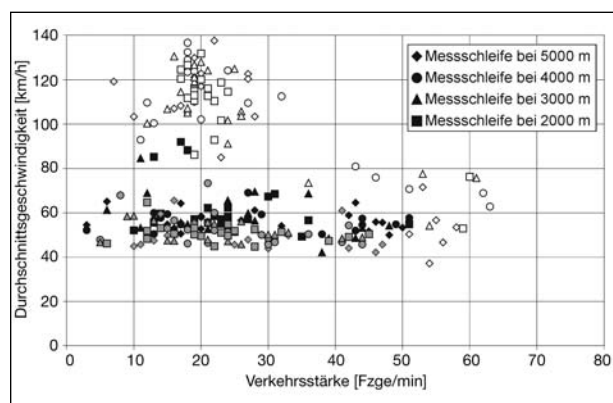


Bild 53: Fundamentaldiagramm Szenario Autobahn, freier Verkehr (weiß: klare Sicht, schwarz: 80 m Sichtweite, grau: 50 m Sichtweite)

fallen hierbei aber niedriger aus, als durch die sichtangepassten Wunschgeschwindigkeiten zu erwarten wäre. Der Effekt unterschiedlich geringer Sichtweiten (50 m und 80 m) auf die Verkehrseffizienz unterscheidet sich nicht wesentlich und entspricht nicht dem Verhältnis der sichtangepassten Wunschgeschwindigkeiten bei diesen beiden Sichtweiten. Dies lässt sich dadurch erklären, dass aufgrund der geringen Sichtweiten Fahrzeuge mit deutlich geringerer Wunschgeschwindigkeit, wie beispielsweise Lkw, zu einer Behinderung der schnelleren Fahrzeuge führen. Die nachfolgenden Fahrzeuge können wegen der verkürzten Sichtweite nicht frühzeitig genug reagieren, um beispielsweise die Spur zu wechseln. So sind sie gezwungen zu bremsen, wenn der Abstand zum Vorderfahrzeug nicht mehr ausreicht, um sich eine Lücke auf den Nachbarspuren zu suchen und den Spurwechsel durchzuführen.

Da im Zusammenhang mit Nebel und verkürzter Sichtweite besonders der Aspekt der Verkehrssicherheit eine wichtige Rolle spielt, wird zur Bewertung des Fahrverhaltens im Nebel die Häufigkeit von niedrigen TTC und hohen Verzögerungen herangezogen. Die TTC (Time to Collision) beschreibt unter der Annahme, dass die momentane Bewegungssituation konstant bleibt, die Zeitdauer, bis sich eine Kollision zwischen zwei betrachteten Fahrzeugen ereignen würde. Die TTC ist als Quotient aus dem Nettoabstand zwischen zwei Fahrzeugen und deren Differenzgeschwindigkeit definiert. Je kleiner die TTC zwischen zwei Fahrzeugen ist, desto gefährlicher ist die Verkehrssituation, weil weniger Zeit verbleibt, eine Kollision zu vermeiden. Spätestens wenn die TTC kleiner als die Reaktionszeit des Fahrers ist, wird die Situation kritisch und endet häufig in einem Unfall.

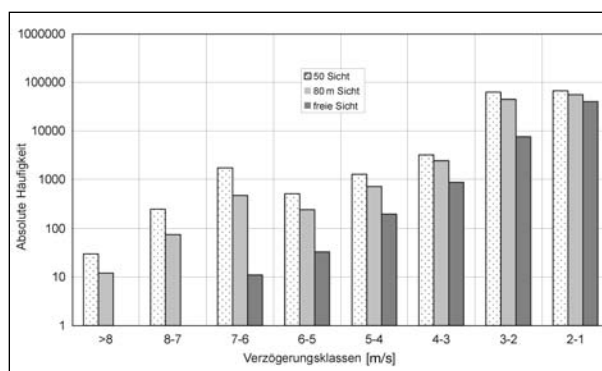


Bild 54: Häufigkeit von hohen Verzögerungen im Szenario Autobahn, freier Verkehr, für alle Verzögerungen ab 1 m/s^2

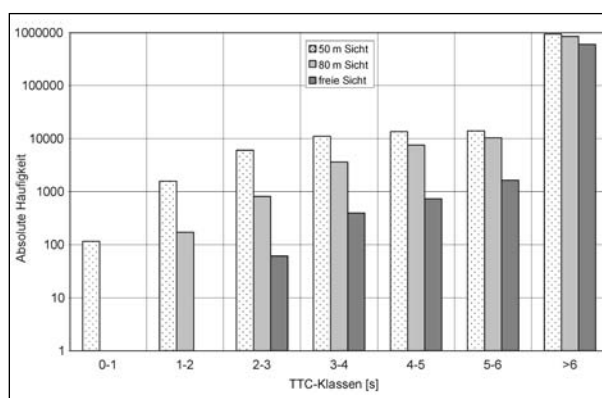


Bild 55: Häufigkeit von kleinen TTC im Szenario Autobahn, freier Verkehr, für alle Annäherungsvorgänge (positive TTC)

Bild 54 zeigt die Verteilung der absoluten Häufigkeit von hohen Verzögerungen bei diesem Szenario im Verkehr für die drei simulierten Sichtweiten. In den PELOPS-Simulationen wird zu jedem Rechenzeitschritt ein Wert für die TTC und für die Beschleunigung je Fahrzeug ausgegeben. Bei der Analyse der Verteilung wird jeder dieser Werte berücksichtigt. Auf diese Art werden alle Fahrsituationen jedes Fahrzeugs für die gesamte simulierte Strecke und für die gesamte Simulationszeit erfasst. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Häufigkeit logarithmisch aufgetragen ist.

Es zeigt sich, dass insbesondere bei 50 m und 80 m Sichtweite Verzögerungen höher als 7 m/s^2 auftreten. Prinzipiell nimmt die Häufigkeit höherer Verzögerungen mit abnehmender Sichtweite zu. Auch die Verteilung der Häufigkeit von niedrigen TTC (Bild 55) weist ein ähnliches Ergebnis auf. Mit abnehmender Sichtweite steigen die Häufigkeit kleiner TTC und somit auch die Anzahl kritischer Verkehrssituationen. Es treten bei einer Sichtweite von 50 m auch TTC kleiner als eine Sekunde auf. Diese sind besonders kritisch. Dass es hierbei zu keiner Kollision kommt, kann nur darauf zurückgeführt

werden, dass der Fahrer bereits reagiert hat und versucht, die Kollision zu vermeiden. Würde der Fahrer erst in dieser Situation reagieren, wäre ein Unfall aufgrund der Reaktionszeit, die bei einem durchschnittlichen Fahrer bei etwa einer Sekunde liegt, unvermeidbar.

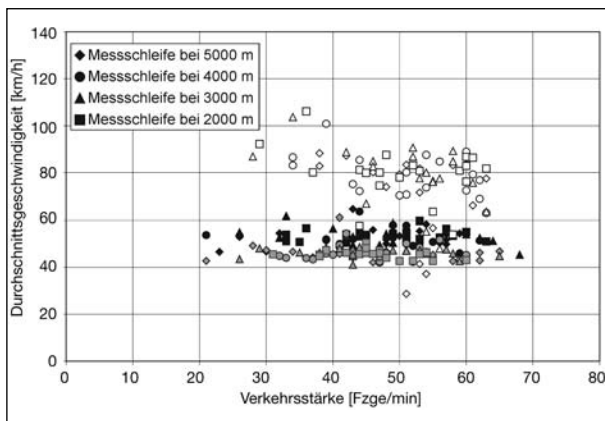


Bild 56: Fundamentaldiagramm Szenario Autobahn, dichter Verkehr (weiß: klare Sicht, schwarz: 80 m Sichtweite, grau: 50 m Sichtweite)

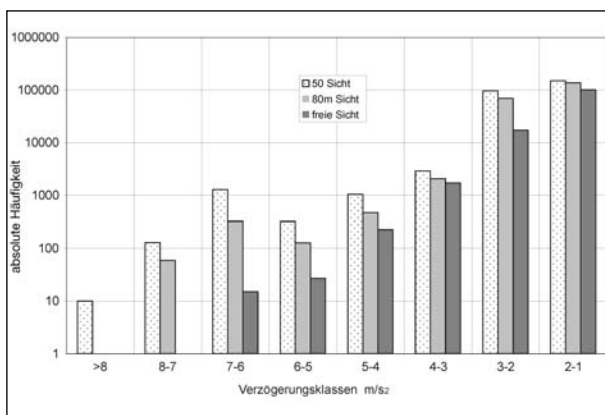


Bild 57: Häufigkeit von hohen Verzögerungen im Szenario Autobahn, dichter Verkehr, für alle Verzögerungen ab 1 m/s²

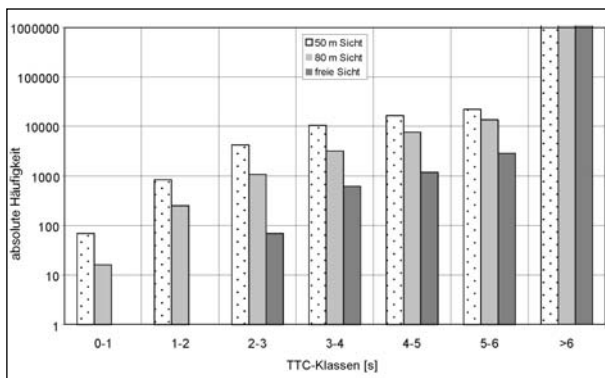


Bild 58: Häufigkeit von kleinen TTC im Szenario Autobahn, dichter Verkehr, für alle Annäherungsvorgänge (positive TTC)

Bild 56 zeigt das Fundamentaldiagramm für das Szenario Autobahn bei dichtem Verkehr. Im Vergleich zum freien Verkehr ist die Durchschnittsgeschwindigkeit bei klarer Sicht deutlich niedriger. Bei 50 m und 80 m Sichtweite verschieben sich die Punkte zwar in Richtung höherer Verkehrsstärken, aber die Durchschnittsgeschwindigkeit ist vergleichbar mit der bei freiem Verkehr. Auch hier fällt der Unterschied in der Durchschnittsgeschwindigkeit bei 50 m Sicht und 80 m Sichtweite gering aus und ist deutlich niedriger, als anhand der angepassten Wunschgeschwindigkeiten zu erwarten wäre.

Die Häufigkeiten hoher Verzögerungen (Bild 57) und niedriger TTC (Bild 58) nehmen zwar auch hier mit abnehmender Sichtweite zu. Es zeigt sich aber, dass insbesondere die kritischen Fälle (TTC kleiner als eine Sekunde, Verzögerungen höher als 8 m/s²) hierbei niedriger ausfallen als beim freien Verkehr. Dies liegt daran, dass bei dichtem Verkehr aufgrund des fehlenden Freiraumes nicht mehr so schnell gefahren werden kann. Besonders bei geringen Sichtweiten fahren die Fahrer mit höheren Wunschgeschwindigkeiten langsamer als im freien Verkehr, was zu einem Rückgang von kritischen Situationen führt.

Tabelle 30 zeigt abschließend für das Szenario Autobahn die Häufigkeit aller TTC niedriger als drei Sekunden und alle Verzögerungen höher als 5 m/s² für die simulierten Verkehrsstärken und Sichtweiten. Zieht man alle TTC kleiner als drei Sekunden als Kriterium für potenziell gefährliche Verkehrssituationen heran, lässt sich die Gefährdung im Nebel quantifizieren. Daraus würde bei 80 m Sichtweite eine 15 bis 20 Mal und bei 50 m Sichtweite eine 70 bis 120 Mal höhere Gefährdung resultieren als bei vergleichbaren Randbedingungen bei klarer Sicht.

TTC-Häufigkeit		
Sichtweite	freier Verkehr	dichter Verkehr
freie Sicht	61	69
80 m Sichtweite	980	1.339
50 m Sichtweite	7.710	5.131
Verzögerungshäufigkeit		
Sichtweite	freier Verkehr	dichter Verkehr
freie Sicht	44	42
80 m Sichtweite	794	512
50 m Sichtweite	1.416	2.513

Tab. 30: Zusammenfassung der TTC kleiner als 3 sec. und der Verzögerungen größer als 5 m/s² für das Szenario Autobahn; Simulationsstudien

6.2.4 Szenario Spurwegfall auf der Autobahn

Die oben beschriebenen Simulationen beinhalteten keinerlei Einfluss von äußeren Störungen. Um den zusätzlichen Effekt von äußeren Störungen im Nebel auf den Verkehr zu erfassen, wird ein dreispuriger Autobahnabschnitt simuliert, bei dem nach etwa 5.500 m eine Spur wegfällt. Die Variation der Verkehrsstärke und der Sichtweite erfolgt genauso wie beim Szenario Autobahn. Auch hierbei können Messschleifen im Abstand von einem Kilometer voneinander zur Auswertung herangezogen werden. Die Simulationsdauer beträgt wieder 1.200 Sekunden.

Bild 59 zeigt das Fundamentaldiagramm für den freien Verkehr in diesem Szenario. Es fällt zunächst auf, dass keine Werte für die Simulation bei 50 m Sichtweite angegeben sind. Dies liegt daran, dass es bei den Szenarien mit 50 m Sichtweite sowohl im freien Verkehr als auch im dichten Verkehr zu Unfällen kommt. Gl. 1 beschreibt die Beschleunigung, die benötigt wird, um von einer bestimmten Geschwindigkeit innerhalb eines definierten Weges in den Stillstand zu bremsen. Bei einer Sichtweite von 50 m ergibt sich hieraus für eine Geschwindigkeit von 80 km/h und einer durchschnittlichen Reaktionszeit von einer Sekunde eine Verzögerung von $8,9 \text{ m/s}^2$. D. h., der Fahrer müsste von Anfang an mit dieser Verzögerung bremsen, um noch eine Kollision zu vermeiden. Da es Fahrer gibt, die auch bei 50 m Sichtweite schneller fahren als 80 km/h, außerdem die Fahrer zunächst die Situation einschätzen müssen und nur die Wenigsten in einem solchen Fall direkt eine Vollbremsung ausführen, kommt es in diesem Spurwegfall-Szenario bei 50 m Sichtweite unvermeidbar zu Unfällen.

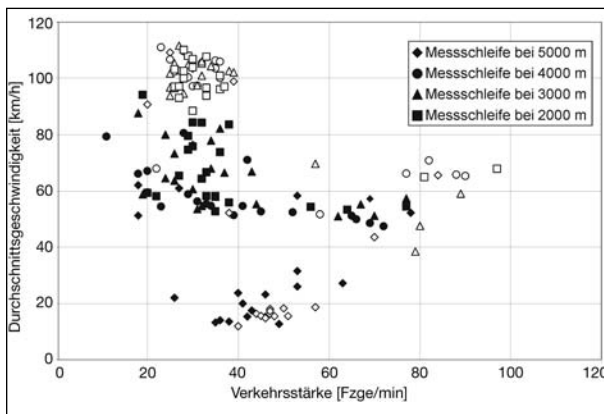


Bild 59: Fundamentaldiagramm Szenario Spurwegfall auf der Autobahn, freier Verkehr (weiß: klare Sicht, schwarz: 80 m Sichtweite)

$$a = \frac{v^2}{2(s - v \cdot t_R)}$$

Gl. 1

a: Beschleunigung [m/s^2]

v: Anfangsgeschwindigkeit [m/s]

s: zur Verfügung stehender Weg [m]

t_R : Reaktionszeit

Da bei Unfällen in PELOPS die Unfallfahrzeuge auf der Spur bleiben, wird somit die jeweilige Spur blockiert und eine Auswertung wird hiermit nicht mehr sinnvoll, da die Randbedingungen nicht mehr vergleichbar sind. Die Unfälle können damit erklärt werden, dass aufgrund der Störung durch den Spurwegfall sich auf der gesamten Simulationsstrecke Stauwellen bilden, die oftmals bis in den Stillstand gehen.

Die Störungen werden durch Fahrzeuge verursacht, die versuchen, die wegfallende Spur zu verlassen, und beim Spurwechsel nachfolgende Fahrzeuge zum Abbremsen zwingen. Das Spurende ist zwar auch bei niedrigen Sichtweiten aufgrund von Hinweisschildern früh erkennbar, der Spurwechsel stellt für den nachfolgenden Verkehr aber in den meisten Fällen auch bei klarer Sicht eine Störung bzw. Behinderung dar. Die Fahrzeuge, die aufgrund der Störungen am Stauende zum Stehen kommen, stellen eine erhebliche Gefahr für nachfolgende Fahrzeuge dar.

Um festzustellen, ob es eine Korrelation zwischen der Fahrercharakteristik und den Unfallverursachern gibt, wird der PELOPS-Parameter Sicherheitsbedürfnis der Fahrer untersucht, die entweder einen Unfall bzw. eine kritische Situation verursacht haben, und mit der gesamten Fahrerpopulation verglichen.

Als kritische Situationen gelten in diesem Falle solche, bei denen die TTC zum Vorderfahrzeug kleiner als eine Sekunde, die Verzögerung größer als 7 m/s^2 und der Abstand zum Vordermann unterhalb von 4 m ist. In den beiden Szenarien frei und dicht bei einer Sichtweite von 50 m treten insgesamt dreißig solche Situationen mit unterschiedlichen Fahrern auf. Bild 60 vergleicht den Mittelwert des Sicherheitsbedürfnisses dieser Fahrer mit dem Mittelwert über alle in der Simulation eingesetzten 500 Fahrer. Die Standardabweichungen sind zusätzlich angegeben. Der Unterschied zwischen den beiden Werten ist minimal. Daraus folgt, dass eine Korrelation zwischen der Fahrercharakteristik und

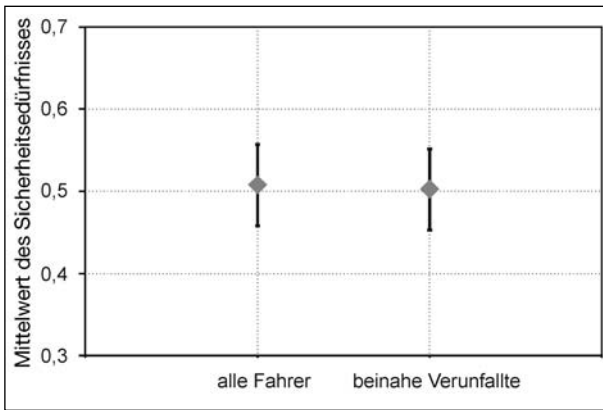


Bild 60: Vergleich des Mittelwertes des Sicherheitsbedürfnisses von Fahrern, die kritische Situationen verursachen, mit dem Mittelwert des Sicherheitsbedürfnisses aller Fahrer

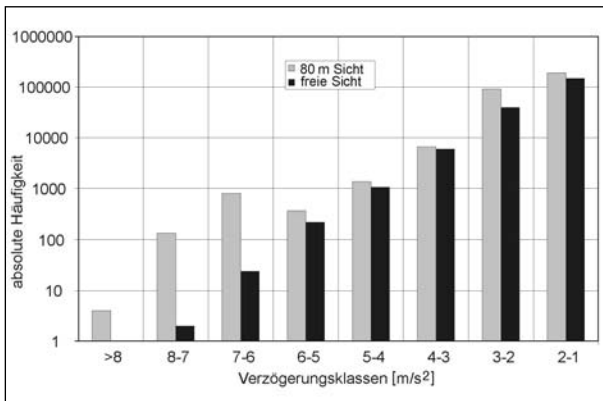


Bild 61: Häufigkeit von hohen Verzögerungen im Szenario Spurwegfall auf der Autobahn, freier Verkehr, für alle Verzögerungen ab 1 m/s²

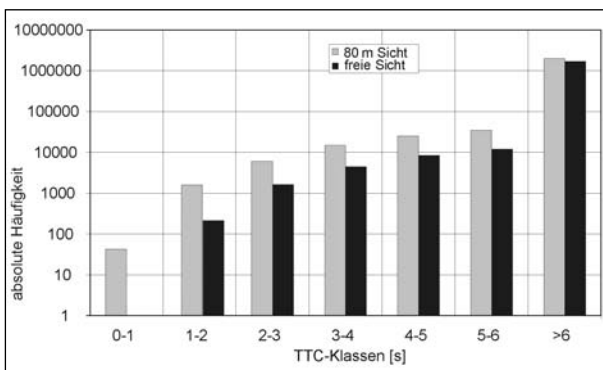


Bild 62: Häufigkeit von kleinen TTC im Szenario Spurwegfall auf der Autobahn, freier Verkehr, für alle Verzögerungen ab 1 m/s²

den Unfallverursachern in der Simulation nicht gegeben ist. Die kritischen Situationen werden sowohl von Fahrern mit niedrigem als auch mit höherem Sicherheitsbedürfnis verursacht.

Das Fundamentaldiagramm (Bild 59) zeigt, dass auch im freien Verkehr kurz vor dem Spurende der Verkehr zusammenbricht, unabhängig von der Sichtweite. Aber auch bei den Messschleifen bei 2.000 m, 3.000 m und 4.000 m sind kurzzeitige Geschwindigkeitseinbrüche zu erkennen, die auf die sich nach hinten fortpflanzenden Stauwellen zurückzuführen sind.

Bei Betrachtung der Häufigkeit von niedrigen TTC und hohen Verzögerungen (Bilder 61 und 62) zeigt sich ein ähnliches Ergebnis zu dem Szenario Autobahn. Die TTC niedriger als eine Sekunde fallen hierbei allerdings deutlich höher aus als im Szenario Autobahn.

Die Simulationsergebnisse des Szenarios Spurwegfall bei dichtem Verkehr unterscheiden sich nur quantitativ von denen bei freiem Verkehr. Die dargestellten Effekte sind ebenso zu beobachten. Das Fundamentaldiagramm und die Verteilung der Häufigkeiten niedriger TTC und hoher Verzögerungen sind im Anhang zu finden. Tabelle 31 zeigt abschließend für das Szenario Spurwegfall auf der Autobahn die Häufigkeit aller TTC niedriger als drei Sekunden und alle Verzögerungen höher als 5 m/s² für die simulierten Verkehrsstärken und Sichtweiten. Zieht man auch hier wiederum alle TTC kleiner als drei Sekunden als Kriterium für potenziell gefährliche Verkehrssituationen heran, lässt sich die Gefährdung im Nebel bei 80 m Sichtweite mit einer drei bis vier Mal höheren Gefährdung quantifizieren als bei vergleichbaren Randbedingungen bei klarer Sicht. Allerdings ist die potenzielle Gefährdung unter solchen auch bereits bei klarer Sicht sehr hoch und wird durch die niedrigere Sichtweite noch weiter gesteigert. Bei einer Sichtweite von 50 m führt nicht genügend an die Sichtweite angepasste Geschwindigkeit in Kombination mit den Unzulänglichkeiten des Fahrers bei diesem Szenario in allen Fällen zu Unfällen.

TTC-Häufigkeit			Verzögerungshäufigkeit		
Sichtweite	freier Verkehr	dichter Verkehr	Sichtweite	freier Verkehr	dichter Verkehr
freie Sicht	1.842	3.108	freie Sicht	247	941
80 m Sichtweite	7.714	9.021	80 m Sichtweite	1.299	1.281
50 m Sichtweite	Unfall	Unfall	50 m Sichtweite	Unfall	Unfall

Tab. 31: Zusammenfassung der TTC kleiner als 3 sec. und der Verzögerungen größer als 5 m/s² für das Szenario nach Spurwegfall auf der Autobahn; Simulationsstudien

Kolonnenverhalten

Neben den nicht genügend an die Sichtweite angepassten Geschwindigkeiten der Fahrer kann auch schwingendes Fahrverhalten zu einer höheren Gefährdung im Nebel führen. Zu diesem Zweck wird für die unterschiedlichen Sichtweiten das Kolonnenverhalten in der Simulation untersucht. Hierbei wird eine Kolonne von zehn gleichen Fahrzeugen betrachtet, die allerdings von unterschiedlich parametrisierten Fahrern gelenkt werden. Das erste Fahrzeug fährt hierbei mit einer konstanten Geschwindigkeit von 70 km/h, d. h., es gibt keine zusätzliche Schwingungsanregung. Die Simulationsdauer beträgt 500 s.

Die Bilder 63-65 geben die Geschwindigkeitsverläufe der einzelnen Fahrzeuge für die unterschiedlichen Sichtweiten wieder. Es zeigt sich, dass die Fahrzeuge zunächst verzögern, um ihre jeweiligen Sicherheitsabstände einzustellen, da diese zu Beginn noch zu niedrig sind. Vergleicht man die Amplituden der Schwingungen gegen Ende der Simulation, lässt sich bei klarer Sicht eine Amplitude von maximal 3 m/s, bei 80 m Sichtweite eine Amplitude von rund 7 m/s und bei 50 m Sichtweite eine Amplitude von etwa 9 m/s feststellen. Das Kolonnenverhalten bei geringer Sichtweite ist anscheinend nicht stabil, wenn man zusätzlich berücksichtigt, dass die Kolonne nicht angeregt wird.

In PELOPS reagiert der Fahrer nicht nur auf sein direktes Vorderfahrzeug, sondern auch auf den Vor-Vorausfahrenden. In der Realität wird sogar teilweise auf die Fahrzeuge davor reagiert. So wird ein Fahrer in der Realität sich anders verhalten, wenn in seiner Kolonne lediglich sein direktes Vorderfahrzeug verzögert im Vergleich zu einer Verzögerung der gesamten Kolonne. In einigen Fällen reagieren sowohl das Folgefahrzeug als auch das Vorderfahrzeug gleichzeitig auf eine Situation, die sich weiter vorne ereignet. Damit entfällt in diesem Fall die Reaktionszeit. Bei geringer Sichtweite kann die parallele Reaktion nicht immer erfolgen, da der Fahrer das Vorvorderfahrzeug nicht sieht und nicht auf dieses reagieren kann. In diesem Fall kann der Fahrer lediglich auf die Reaktion des Vordermanns reagieren. Damit wird die Totzeit in diesem Schwingungssystem aufgrund der sich addierenden Reaktionszeiten aller Fahrer größer. Im Extremfall reagiert der letzte Fahrer völlig unangemessen, weil sich die Situation vorne längst verändert hat. In den Bildern 66-68 sind die relativen Abstände der einzelnen Fahrzeuge zum ersten Fahrzeug über die

Zeit aufgetragen. Es zeigt sich, dass das letzte Fahrzeug sowohl bei 80 m Sichtweite als auch 50 m Sichtweite lediglich das Vorderfahrzeug sehen kann und nicht mehr auf den Vor-Vorausfahrenden reagieren kann, wie man anhand der Diffe-

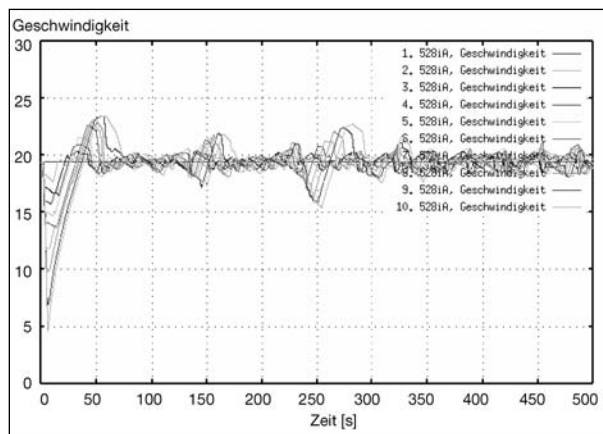


Bild 63: Geschwindigkeitsverläufe der einzelnen Fahrzeuge in einer Kolonne aus zehn Fahrzeugen bei klarer Sicht

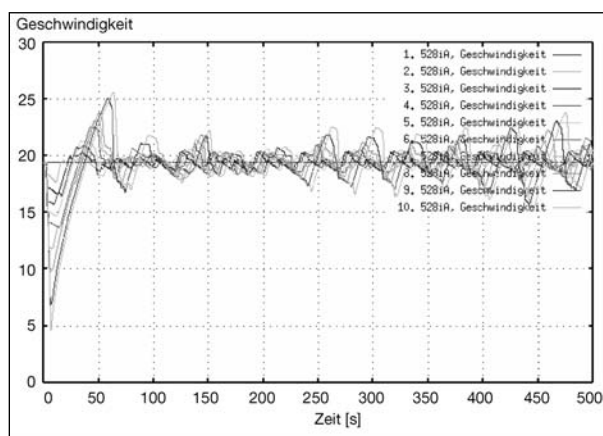


Bild 64: Geschwindigkeitsverläufe der einzelnen Fahrzeuge in einer Kolonne aus zehn Fahrzeugen bei einer Sichtweite von 50 m

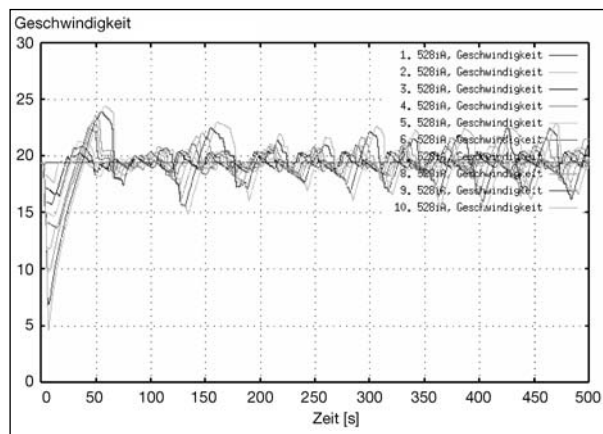


Bild 65: Geschwindigkeitsverläufe der einzelnen Fahrzeuge in einer Kolonne aus zehn Fahrzeugen bei einer Sichtweite von 80 m

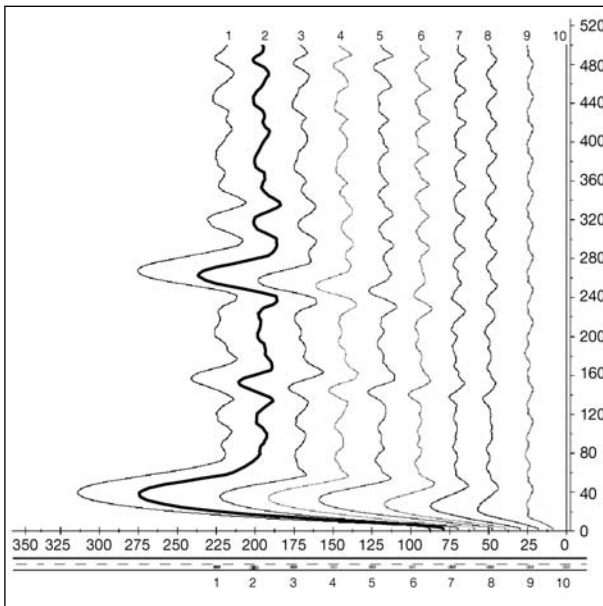


Bild 66: Relativer Abstand zum ersten Fahrzeug in einer Kolonne aus zehn Fahrzeugen bei klarer Sicht

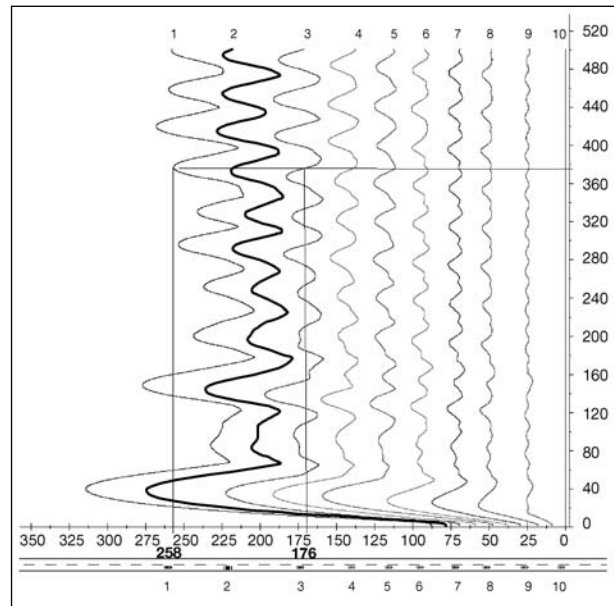


Bild 68: Relativer Abstand zum ersten Fahrzeug in einer Kolonne aus zehn Fahrzeugen bei einer Sichtweite von 80 m

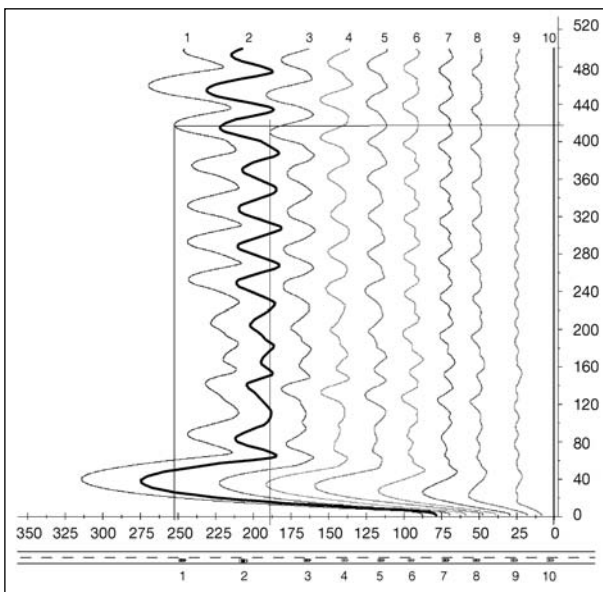


Bild 67: Relativer Abstand zum ersten Fahrzeug in einer Kolonne aus zehn Fahrzeugen bei einer Sichtweite von 50 m

renz der Abstände zum ersten Fahrzeug erkennen kann. Beispielsweise hat das letzte Fahrzeug bei einer Sichtweite von 80 m bei der Simulationszeit von etwa 375 sec. einen Abstand von rund 258 m Sichtweite zum ersten Fahrzeug. Das achte Fahrzeug dagegen weist einen Abstand von rund 170 m auf. Damit beträgt der Abstand zwischen beiden Fahrzeugen 88 m, und für den Fahrer des letzten Fahrzeuges ist somit das achte Fahrzeug nicht mehr sichtbar. Die Verstärkung der Totzeiten durch die verzögerte Reaktion auf die Ereignisse voraus führt zu einer Phasenverschiebung in der Schwingung, wie das beispielsweise bei einer Sichtweite

von 80 m bei der Simulationszeit von 375 sec. auftritt. Während das siebte Fahrzeug zu diesem Zeitpunkt den kürzesten Abstand zum ersten Fahrzeug aufweist und anfängt, sich von diesem weiter zu entfernen, hat das letzte Fahrzeug gerade seinen maximalen Abstand zum ersten Fahrzeug erreicht und kommt ihm jetzt näher.

Neben der nicht genügend an die Sichtweite angepassten Geschwindigkeit führt sicherlich auch das instabile Kolonnenverhalten zu einer höheren Gefährdung und zu potenziell gefährlichen Situationen im Verkehr.

6.3 Zusammenfassung

Die Auswirkungen des Fahrerverhaltens bei Nebel werden in PELOPS untersucht. Zu diesem Zweck werden die Ergebnisse der Modelluntersuchungen in PELOPS implementiert. Diese Implementierung beinhaltet unter Berücksichtigung der fahrerindividuellen Unterschiede die sichtweitenangepasste Wunschgeschwindigkeit, das so genannte Sogverhalten und die Oszillationseffekte im Geschwindigkeitsverlauf.

Mit diesen Erweiterungen und Ergänzungen des Fahrermodells werden zur Bewertung des geänderten Fahrerverhaltens verschiedene Szenarien simuliert. Es werden ein zweispuriger Autobahnabschnitt ohne externe Störungen und ein Spurwegfall von zwei- auf einspurig simuliert, bei dem durch die externe Störung Stauwellen initiiert werden, die

sich nach hinten fortpflanzen. Die Verkehrsstärke wird hierbei jeweils in zwei Stufen variiert, sodass sowohl dichter als auch freier Verkehr berücksichtigt wird. Zur Bewertung des Kolonnenverhaltens wird ein Szenario mit einer Fahrzeugkolonne aus 10 Fahrzeugen betrachtet. Die Sichtweite wird für jede betrachtete Variante in drei Schritten untersucht (klare Sicht, 80 m und 50 m Sichtweite). Daraus ergeben sich fünfzehn Simulationsszenarien.

Die Auswertung von niedrigen TTC und hohen Verzögerungen als Kriterien für die verkehrliche Sicherheit zeigt in beiden Szenarien mit und ohne externe Störung, dass mit abnehmender Sichtweite sowohl die Häufigkeit von niedrigen TTC als auch die Häufigkeit von hohen Verzögerungen steigen und damit auch die Anzahl an potenziell gefährlichen Situationen. Bei einer Sichtweite von 50 m kommt es beim Szenario mit dem Spurwegfall sowohl im freien als auch im dichten Verkehr zu Unfällen. Aufgrund der Störungen durch den Spurwegfall bilden sich Stauwellen, die bis in den Stillstand reichen und sich nach hinten fortbewegen. Hierbei reicht die Sichtweite in einigen Fällen nicht mehr aus, um aus der vollen Wunschgeschwindigkeit einiger Fahrer auf ein stehendes Stauende zu bremsen. Dies wird noch durch den Sogeffekt weiter verstärkt, weil auch Fahrer mit einer niedrigeren Wunschgeschwindigkeit schneller fahren. Damit wird der Anteil der Fahrer erhöht, die ihre Geschwindigkeit nicht genügend an die veränderten Sichtverhältnisse anpassen.

Ein weiterer Effekt, der zu einer höheren potenziellen Gefährdung führt, ist das instabile Kolonnenverhalten. Bei dem Szenario der Fahrzeugkolonne zeigt sich, dass mit abnehmender Sichtweite das Kolonnenverhalten instabiler wird und die Amplituden im Geschwindigkeitsverlauf größer werden. Dies liegt hauptsächlich daran, dass nur auf das Vorderfahrzeug reagiert wird. Das Vor-Vorderfahrzeug befindet sich meistens außerhalb der Sichtweite. Dies führt dazu, dass die Fahrzeuge sich teilweise phasenverschoben verhalten, d. h., dass ein Fahrzeug beschleunigt, während das andere Fahrzeug ihm voraus verzögert. Die Kolonneninstabilität führt in Kombinationen mit dem Sogeffekt zu einer höheren Dynamik, die besonders im Nebel gefährlich ist.

7 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

7.1 Stellungnahme zur SCHÖNBACH-Hypothese

7.1.1 Die Befundlage

Nach den theoretischen Überlegungen von SCHÖNBACH wurde erwartet, dass Fahrer im Nebel zu schnell und mit zu geringem Abstand – und damit auch zu kleiner Zeitlücke – fahren, weil sie motiviert sind, einerseits Anschluss an das vorausfahrende Fahrzeug zu halten und andererseits Abstand zum drängelnden nachfolgenden Fahrzeug zu wahren. Die Hypothese wurde von uns, wie von SCHÖNBACH selbst angeregt, in mehreren experimentellen Untersuchungen am Fahrsimulator und anhand von Daten aus dem realen Verkehr geprüft.

Unsere Überprüfung der SCHÖNBACH-Hypothese an realen Verkehrsdaten muss als vorläufig betrachtet werden. Nach unserer Reanalyse der Daten von RICHTER und SCHLAG (1998, 1999) konnten wir deren Schlussfolgerung, in den Daten das von SCHÖNBACH vorhergesagte Verhaltensmuster gefunden zu haben, nicht bestätigen. Der Datensatz ist unserer Auffassung nach nicht geeignet, diese Hypothese zu überprüfen, denn für die interessierenden Daten unter Nebel lassen sich keine adäquaten Kontrolldaten zusammenstellen. Die eigene Erhebung von Daten lässt methodisch angemessene Auswertungen zu, wie die ersten Analysen bestätigen. Bislang konnte jedoch kein hinreichend langer Zeitraum mit deutlicher Sichtbehinderung durch Nebel erfasst werden. Lediglich eine Phase mit mäßiger Sichtbehinderung konnte mit einem geeigneten Kontrollzeitraum verglichen werden. Deswegen sind die Befunde dieses Untersuchungsansatzes als vorläufig zu betrachten. Die Untersuchungen werden über den jetzigen Abschluss des Berichts hinaus weitergeführt werden. Die vorläufigen Befunde zeigen allerdings, dass sich die mittlere gefahrene Zeitlücke zum Vordermann im Nebel eher erhöht im Vergleich zur Klarsicht-Bedingung, was im klaren Gegensatz zur SCHÖNBACH-Hypothese steht. Bei Nebel ist auch der Prozentsatz von Zeitlücken unter 1 Sekunde – die im Rahmen der StVO als bedenklich geringe Abstände gelten – geringer als bei Klarsicht. Das bedeutet im Gegensatz zur SCHÖNBACH-Hypothese, dass unter Klarsicht und nicht unter Nebel dichter aufgefahren wird. Bei Nebel wählen aber

mehr Fahrer eine Zeitlücke zwischen 1 und 3 Sekunden als unter Klarsicht, was in Übereinstimmung mit SCHÖNBACH für eine verstärkte Kettenbildung spricht, die aber eben nicht einhergeht mit zu geringen Abständen.

Die Hypothesenprüfung am Fahrsimulator erfolgte letztlich nur für den Zusammenhang mit dem vorausfahrenden Fahrzeug, weil die Simulation für das nachfolgende Fahrzeug nur ansatzweise realisiert werden konnte. Für das nachfolgende Fahrzeug entsteht nach SCHÖNBACH die Beeinflussung des Fahrers vor allem über dessen Fern- und Ablendlicht, das im Rückspiegel und Innenraum des Fahrzeugs zu einer Beeinträchtigung der Sicht führt. Die Simulation dieser Sichtbehinderung konnte technisch nicht realisiert werden. Implementiert wurde nur die Erkennung eines nachfolgenden „drängelnden“ Fahrzeugs im Rückspiegel, was das Fahrverhalten jedoch nicht beeinflusste. Für die Überprüfung der SCHÖNBACH-Hypothese konnte somit nur die Teilhypothese „Sog“, die sich auf das Fahrverhalten in Abhängigkeit von dem vorausfahrenden Fahrzeug bezieht, geprüft werden. Ihre Überprüfung alleine erscheint hinreichend, um zu zeigen, ob der vorgeschlagene Erklärungsansatz prinzipiell geeignet ist, Fahrverhaltensdaten bei Nebel zu erklären. Unserer Einschätzung nach entsprechen die vorliegenden Befunde der Fahrsimulationsuntersuchungen teilweise den Erwartungen nach SCHÖNBACH, bei genauerer Analyse stützen sie den Erklärungsansatz – zumindest in seinem globalen Gültigkeitsanspruch – jedoch nicht.

Im Sinne der SCHÖNBACH-Hypothese gibt es Hinweise in den Modelluntersuchungen 2 und 3. In diesen Untersuchungen war aus der Sicht der Sog-Hypothese überprüft worden, ob Fahrer einem vorausfahrenden beschleunigenden Fahrer folgen. Im Mittel zeigte sich folgendes Ergebnis: Einzelfahrer und Kolonnenfahrer fahren mit zunehmender Sichtbehinderung langsamer. Die Einzelfahrer – wozu hier auch die Fahrer mit nachfolgendem Fahrzeug gezählt werden – fahren vor der Beschleunigungsphase unter allen Witterungsbedingungen schneller als die Kolonnenfahrer. Dieser Unterschied hebt sich in der Beschleunigungsphase unter Nebelbedingungen auf: Kolonnenfahrer fahren jetzt im Mittel vergleichbar schnell wie Einzelfahrer. Varianzanalytisch ist diese Wechselwirkung statistisch signifikant. So erhöhen Kolonnenfahrer ihre Geschwindigkeit, wenn sie dem beschleunigenden Fahrzeug folgen, unter starkem Nebel nach zwei Kilometern von 81 auf 95 km/h, während die Ge-

schwindigkeit bei Einzelfahrern konstant bei 91 km/h liegt (Modelluntersuchung 2). Nicht nachweisbar ist, dass Kolonnenfahrer im Nebel schneller fahren als Einzelfahrer, wie nach SCHÖNBACH erwartet.

In Übereinstimmung mit der SCHÖNBACH-Hypothese ist der Befund, dass ein Teil der Fahrer einem beschleunigenden vorausfahrenden Fahrzeug folgt: Einige Fahrer erhöhen ihre Geschwindigkeit, sobald das vorausfahrende Fahrzeug beschleunigt. Eine mäßige Beschleunigung (15 %) veranlasst mehr Fahrer zur Geschwindigkeitserhöhung als eine starke Beschleunigung (30 %). Jedoch ist festzustellen, dass dieses Phänomen unter allen Sichtbedingungen auftritt, nicht nur bei Nebel, sondern auch bei Klarsicht. Dies ist im Erklärungsansatz von SCHÖNBACH nicht vorgesehen. Erwartungsgemäß zeigt sich aber in Modelluntersuchung 2, dass in beiden Beschleunigungsbedingungen (15 und 30 %) zwar numerisch die Anzahl der Sogfahrer mit zunehmender Sichtbehinderung durch Nebel steigt, dieser Effekt aber weit ab von statistischer Signifikanz liegt. Kritisch ist hier jedoch der Zusammenhang der Ausgangsgeschwindigkeit mit der Gruppenbildung (Bild 16). Die Gruppe der beschleunigenden Probanden fuhr eine niedrigere Ausgangsgeschwindigkeit als die Gruppe der nicht-beschleunigenden Probanden. Die Ausgangsgeschwindigkeit konnte frei gewählt werden, weil die Probanden instruiert waren, „mit gleichmäßigem Tempo sicht- und sicherheitsangemessen zu fahren“. Bei einer eher hohen Ausgangsgeschwindigkeit hätten einzelne Probanden auf eine sehr hohe Geschwindigkeit beschleunigen müssen, um dem vorausfahrenden Fahrzeug zu folgen. Bei niedriger Ausgangsgeschwindigkeit besteht ein größerer Spielraum für Beschleunigung und somit Sogverhalten. Deshalb wurde in Modelluntersuchung 3 eine konstante Ausgangsgeschwindigkeit herbeigeführt. Das Ergebnis zeigt einen leichten Trend im Sinne der SCHÖNBACH-Hypothese: Mit zunehmender Sichtbehinderung reagieren mehr Fahrer auf ein beschleunigendes Vorderfahrzeug mit Geschwindigkeitserhöhung, statistisch signifikant wird dieser Effekt jedoch nicht. Der Befund besagt vielmehr, dass es unter den drei Witterungsbedingungen eine etwa gleich große Fahrergruppe gibt (bei 15 % Beschleunigung die Hälfte, bei 30 % Beschleunigung ein Drittel), die dem Führungsfahrzeug folgt (Bild 25). Betrachtet man die mittleren oder maximalen Geschwindigkeiten (Bild 23 und 26), dann zeigt sich in der Beschleuni-

gungsphase, dass Fahrer mit Sogverhalten vergleichbar unter jeder der drei Sichtbedingungen schneller fahren als Fahrer ohne Sogverhalten. Es gibt nur wenige Fahrer, die in allen Situationen (Witterung und Beschleunigung) durchweg dem vorausfahrenden Fahrzeug folgen. Überwiegend variiert das Folgeverhalten ohne erkennbare Systematik. Deshalb sprechen die Befunde nicht für eine Kategorisierung von Fahrertypen. Der Anteil von Zeitlücken unter zwei Sekunden an der Gesamtheit der Zeitlücken steigt im Nebel von 14 auf 28 Prozent, ein Ergebnis, das die SCHÖNBACH-Hypothese zu bestätigen scheint. Allerdings liegt der Anteil von Zeitlücken unter 1,5 Sekunden – und erst unterhalb dieses Werts beginnt der für Auffahrunfälle kritische Bereich – bei Fahrern mit Sogverhalten unter allen drei Sichtbedingungen vergleichbar niedrig um 6 % der Fahrzeit. So bleibt auch für die Betrachtung von Teilgruppen nur die Schlussfolgerung, dass es für die SCHÖNBACH-Hypothese zwar vereinzelte Hinweise in die erwartete Richtung gibt, aber keine generelle Bestätigung. Vielmehr regen die Befunde zur Feststellung an: Trotz Nebels zeigen Fahrer ein Folgeverhalten wie bei Klarsicht.

Das von SCHÖNBACH postulierte riskantere Fahren bei Nebel aufgrund des nicht bewussten Akzeptierens einer unangemessen geringen Zeitlücke konnte nicht bestätigt werden, denn mit zunehmender Sichtbehinderung wird, wie in der Modelluntersuchung 3 beobachtet, bewusst eine größere Zeitlücke gewählt. Ursprünglich war geplant, aber technisch nicht umsetzbar, dass die Zeitlückenschwelle bestimmt wird, bei der die Fahrer aktiv regulierend eingreifen. Die Schwelle hätte angezeigt, bis auf welche Zeitlücke (oder Abstand) nicht bewusst einem beschleunigenden oder verlangsamenden Fahrzeug gefolgt wird. Die hier bestimmte Einstellung der Wunsch-Zeitlücke kennzeichnet einen bewussten Einschätzungsvorgang bei vorgegebener kurzer Zeitlücke (1 sec.). Wendet man die Gruppendifferenzierung aus den Fahrten mit Beschleunigung des Führungsfahrzeugs auf die Befunde an, so zeigt sich ein plausibler (statistisch nicht signifikanter) Trend: Bei Fahrten ohne Sogverhalten erhöht sich die Wunsch-Zeitlücke unter Nebel stärker als bei Fahrten mit Sogverhalten. Jedoch auch die Fahrer, die einem beschleunigenden vorausfahrenden Fahrzeug in einer bestimmten Situation folgen, reagieren mit Erhöhung der Wunsch-Zeitlücke unter Nebel, was nicht SCHÖNBACHs Hypothesen entspricht. Vertreter von Fahrertypologien (s. RICHTER, 2002) würden Fahrstile

verantwortlich machen. Nahe liegend ist jedoch, zunächst die Rolle perceptiver Faktoren abzuklären. Beispielsweise könnte ein Zusammenhang mit Fehleinschätzungen von Sichtweiten, Abständen, Zeitlücken und Geschwindigkeiten bestehen.

7.1.2 Der Untersuchungsplan

Die durchgeführten Simulationsexperimente waren, von uns explizit begründet, nicht so durchgeführt worden, wie von SCHÖNBACH, dem gedanklichen Initiator des Projektes, vorgeschlagen. Es soll deshalb an dieser Stelle die Diskussion des Untersuchungsplanes noch einmal aufgegriffen werden, um festzustellen, ob die eigenen Befunde die Abweichungen in der Untersuchungsplanung tatsächlich rechtfertigen. In der von SCHÖNBACH vorgeschlagenen Untersuchung am Simulator fährt der Testfahrer zwischen einem vorausfahrenden und nachfolgenden Fahrzeug. Als Orientierungspunkte werden die Rücklichter und Nebelleuchten des vorausfahrenden Fahrzeugs und die Scheinwerfer des nachfolgenden Fahrzeugs besonders hervorgehoben. Im ursprünglichen Plan SCHÖNBACHs wird der Einfluss von vier Faktoren auf die Fahrgeschwindigkeit des Testfahrers und damit auf den Fahrabstand zum vorausgehenden bzw. nachfolgenden Fahrzeug thematisiert: (1) ob das vorausfahrende oder nachfolgende Fahrzeug beschleunigt, (2) ob das vorausfahrende Fahrzeug mit oder ohne Nebelschlussleuchte fährt, (3) ob der Testfahrer erstmalig fährt oder nach einer Schulungsphase unmittelbar anschließend oder im Abstand von zwei bis sechs Monaten und (4) ob der Testfahrer ein Training mit nebelspezifischem Training (Nebelunfallerfahrung und Aufklärung über sozialpsychologische Prozesse bei Fahrten im Nebel) oder ein nebelunspezifisches Kurvenfahrtraining erhält. Demnach bezieht sich nur ein Faktor auf den Erklärungsansatz für Nebelunfälle: Beschleunigung des vorausfahrenden oder nachfolgenden Fahrzeugs. Demgegenüber stehen drei Faktoren zur Evaluation von Maßnahmen (Nebelschlussleuchte am Führungsauto: ohne-mit; Training: ja-nein; Art des Trainings: Nebelerfahrung – Aufklärung). In unseren Untersuchungen wird der Schwerpunkt auf die Prüfung der Grundannahmen SCHÖNBACHs zur Entstehung von Unfällen bei Nebel gelegt, nämlich die Wirkung eines nachfolgenden und vorausfahrenden Fahrzeugs.

Unter letzterem Aspekt waren als Nachteile des Untersuchungsplanes von SCHÖNBACH folgende Punkte benannt worden:

- Kontrollbedingung „Klarsicht“: Das Fahrverhalten wird nur bei Nebel – und dies nur für eine Nebelbedingung – untersucht und nicht vergleichend bei „klarer Sicht“ als Kontrollbedingung. Die Phase 1 im Schema „Einübung und Testfahrt bei klarer Sicht“ ist nicht als Kontrollbedingung konzipiert. Ohne eine Kontrollbedingung klare Sicht – so unsere Argumentation – wird mit dem vorgeschlagenen Plan wider die Logik eine Abhängigkeit des Fahrverhaltens von den variierten Faktoren nur bei Nebel unterstellt. Die Befundlage unserer Simulationsexperimente bestätigt voll die methodischen Bedenken. Die Fahrer folgten dem beschleunigenden vorausfahrenden Fahrzeug bei Nebel und bei Klarsicht. Insofern haben wir es – zumindest auch – mit einem sichtunspezifischen Effekt zu tun.
- Kontrollbedingung „Einzelfahrt“: Im Plan SCHÖNBACHs wird das Fahrverhalten des Testfahrers nur in der Kolonne und nicht auch als Einzelfahrer untersucht. Wenn, so unsere Bedenken, auch Einzelfahrer unangepasste Fahrgeschwindigkeit bei Nebel entwickeln, dann geht der Plan fälschlicherweise von einem gruppenspezifischen Phänomen aus. Nach unseren Befunden ist bemerkenswert, dass Einzelfahrer sowohl auf der Straße (BAB-Daten) als auch am Simulator höhere Fahrgeschwindigkeiten wählen als Kolonnenfahrer und dies unabhängig von der Wetterlage (Klarsicht – Nebel). Damit unterstreichen die Ergebnisse die Notwendigkeit, Einzelfahrten zur Kontrolle mit zu untersuchen.
- Druck-Sog-Wirkung: Die eigentliche sozialpsychologische Hypothese der Verursachung von Nebelunfällen, die den Zusammenhang zwischen Kognition (Sicherheitsgefühl, Bedrängung) und Fahrverhalten betrifft, wird im Plan SCHÖNBACH nicht explizit geprüft. Es wird nur den Vorhersagen nach beobachtet, dass Testfahrer auf die Beschleunigung des vorausfahrenden oder nachfolgenden Fahrers schneller werden. Der Plan erlaubt keine Schlussfolgerung auf die Vermittlungsfunktion der Kognitionen (Druck-Sog-Wirkung). Das von uns ursprünglich konzipierte dritte Simulationsexperiment sollte diese Annahmen annäherungsweise durch Schwellenbestimmung klären, was technisch jedoch nicht umsetzbar war. Untersucht werden konnte, welche Wunsch-Zeitlücke die Fahrer einstellen, wenn sie sich unfreiwillig einem Führungsfahrzeug annähern, dann bei

einer Zeitlücke von einer Sekunde automatisch abgebremst werden und mit konstanter kurzer Zeitlücke folgen. Die Befunde zeigen, dass – wie auch aus den Aussagen der Probanden zu entnehmen – unter Nebel aktiv eine größere Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug eingestellt wird als bei Klarsicht. Unser Experiment kann – aus technischen Gründen – jedoch nicht zeigen, ob und ab welcher Abstands/Zeitlücken-Schwelle das nichtbewusste Folgeverhalten von einem bewussten aktiven Eingreifen abgelöst wird.

- Individuelle Motivationsstruktur: Der Plan SCHÖNBACHs hätte mit acht Bedingungen mindestens – bei 10 Pbn pro Bedingung – 80 Probanden für Fahr Simulatorversuche erfordert. Die nach SCHÖNBACH zusätzlich zu berücksichtigenden Unterschiede bezüglich Alter, Geschlecht, Nebelunfallerfahrung etc. hätten eine Vervielfachung der Probandenzahlen erfordert.

Zusammenfassend bestätigt die eigene Befundlage die Begründung für die gegenüber SCHÖNBACH veränderte Untersuchungsplanung.

7.1.3 Simulator- und Realdaten

Die empirische Basis der SCHÖNBACH-Hypothese waren Interview-Daten. Probanden gaben an, bei Nebel Anschluss an das vorausfahrende im Nebel verschwindende Fahrzeug zu halten und von dem dicht auffahrenden drängenden nachfolgenden Fahrzeug Abstand zu gewinnen. SCHÖNBACH selbst regte an, seine Hypothese anhand von Real- und Simulatordaten zu prüfen. Angesichts der Befundlage ist zu diskutieren, ob die erhobenen Real- und Simulatordaten zur Hypothesenprüfung geeignet sind.

Ein empirischer Beleg für seine These sah SCHÖNBACH in den Autobahn-Daten von RICHTER und SCHLAG: Kolonnenfahrer (definiert über kleine Zeitlücken) fuhren bei Nebel schneller als bei Klarsicht. Dieser Befund kann, wie ausführlich im Bericht über die Reanalyse dargestellt, so nicht bestätigt werden. Die Daten von RICHTER und SCHLAG – deren Eignung wir prinzipiell in Frage stellen – zeigen vielmehr bei Kontrolle konfundierender Variablen, dass zwischen Nebel und Klarsichtfahrten kein Unterschied besteht. Auch eine jüngst veröffentlichte Neuanalyse der Daten (RICHTER, 2002) – die nach wie vor die Konfundierung enthält – erbringt keinen Unterschied zwischen Nebel und Klarsicht für Parameter des Fahrverhal-

tens, Time to collision (TTC) und Bremszeit. Während in die TTC nur die Fahrgeschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge eingehen, gehen in die Bremszeit neben der Anfangsgeschwindigkeit die Verzögerungszeit und die Reaktionszeit ein. Erst wenn man eine (in Termini der Autorin) „realistische“ statt „optimistische“ niedrige Bremsverzögerung ($4,7 \text{ m/sec}^2$ statt 7 m/sec^2) und lange Reaktionszeit (113 % bei Nebel statt 100 % bei Klarsicht) in die Formel eingibt, erhält man eine höhere theoretische Kollisionshäufigkeit unter Nebel (bis 100 m) im Vergleich zu Klarsicht (über 100 m). Konkret (s. Tabelle 11.5 in RICHTER, 2002), für 77 von 743 Fahrzeugen (11,4 %) werden Kollisionen bei Nebel berechnet, während es bei Klarsicht 5.600 von 45.653 Fahrzeugen (9,7 %) sind. Das statistisch signifikante Mehr von 1,7 % wird als Beleg für die These gewertet: „Fahrer unterschätzen bei Nebel mehr als bei klarer Sicht den zum gefahrlosen Halten notwendigen Abstand zum Vorausfahrenden“ (S. 115). Eine Schlussfolgerung, die weit über das hinausgeht, was auf der Basis dieser Untersuchung ausgesagt werden kann. Was man aus den Daten schließen kann, ist, dass Fahrer bei Nebel vergleichbar fahren wie bei Klarsicht; nach RICHTER wird nur bei Berücksichtigung einer unterstellten verlängerten Bremszeit unter Nebel die Kollisionswahrscheinlichkeit erhöht. RICHTER müsste ihre Hypothese „Nebel bewirkt spezifische soziale Interaktionsprozesse zwischen Kraftfahrern“ (S. 116) aufgrund ihrer eigenen Daten zurückweisen (was nicht explizit geschieht).

Die Fahrsimulation erwies sich insgesamt als geeignetes Medium für die Analyse des Fahrverhaltens bei Nebel. Sie kann deshalb nicht als Grund für die fehlende Bestätigung der SCHÖNBACH-Hypothese angeführt werden. Beim Vergleich mit Daten aus dem Realverkehr ergibt sich eine Reihe von Übereinstimmungen. Auch die Angaben der Probanden lassen darauf schließen, dass die Fahrsimulation als annähernd real erlebt wurde. Die Nebeldarstellung wurde als wirklichkeitsnah empfunden und die resultierenden Sichteinschränkungen wie bei echtem Nebel erlebt. Auch das vorausfahrende Kolonnenfahrzeug wurde als relevant für das eigene Fahrverhalten angesehen. Die Versuchspersonen gaben häufig an, sich an dem vorausfahrenden Fahrzeug orientiert zu haben, allerdings bei klarer Sicht genauso wie im Nebel. Insoweit trifft die Annahme SCHÖNBACHs zu, dass das Verhalten anderer Fahrer als relevant für die eigene Orientierung erlebt wird. Möglicherweise wird die ei-

gene Orientierung in Abhängigkeit von anderen Fahrern unter Nebel nur bewusster als bei Klarsicht. Lediglich das nachfolgende Kolonnenfahrzeug erwies sich als nicht handlungsrelevant. Die Teilnehmer beachtetten es kaum und gaben zu meist an, dass es keinen Einfluss auf ihr Fahrverhalten hatte. Bezüglich des nachfolgenden Fahrzeugs lässt sich also keine Aussage hinsichtlich der SCHÖNBACH-Hypothese machen. Die gefundenen Sogeffekte bei einem vorausfahrenden Fahrzeug stehen dagegen mit den Vorhersagen der SCHÖNBACH-Hypothese in Zusammenhang. Die Tatsache, dass der Sogeffekt auch bei klarer Sicht und kaum mit zunehmendem Nebel verstärkt auftritt, stellt die von SCHÖNBACH gelieferte Begründung in Frage.

Die parallele Erhebung von Simulator- und Realdaten erwies sich als besonders aufschlussreich. Hervorgehoben sei der übereinstimmende Befund beider Datenquellen, dass Einzelfahrer höhere Fahrgeschwindigkeiten aufweisen als Fahrer mit vorausfahrendem Fahrzeug. Was am Simulator zunächst als Artefakt erscheinen mag, stellt sich bei Kenntnis der Befunde für den Fahrer auf der Autobahn als real heraus. Dies spricht für die Validität der Simulationsanordnung. Vergleichbar sind ebenfalls die absoluten Fahrgeschwindigkeiten. Beobachtete Abweichungen sind erklärbar. Die durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeiten für Einzelfahrten unter Klarsichtbedingung liegen im Fahrsimulator etwas höher als bei vergleichbaren Realbedingungen: um 145 km/h im Fahrsimulator und 126 km/h auf der Autobahn (Pkw, Kontrolltag, siehe Tabelle 24). Der Grund dafür mag in der reiz- und ereignisärmeren Simulationsdarstellung und in dem für viele Versuchspersonen ungewöhnlich stark motorisierten Versuchsfahrzeug gesehen werden.

Im Fahrsimulator, wie im realen Verkehr, wird die Geschwindigkeit unter Nebel deutlich gesenkt und dies (weit gehend) unabhängig von der Fahrtbedingung, ob Einzelfahrt oder Kolonnenfahrt. Die Geschwindigkeitsreduktion bei Nebel ist unter dem Aspekt der Sicherheit allerdings nicht ausreichend. Was die Daten aus dem realen Verkehr auf Autobahnen mit einer Messinduktionsschleife nicht offen legen, sind die aus den Fahrsimulatordaten erkennbaren Oszillationen der Fahrgeschwindigkeit mit zunehmendem Nebel, die sich bei einem vorausfahrenden Fahrzeug noch verstärken. Anhand der eigenen Daten lässt sich eine Reihe von Alternativ-Hypothesen diskutieren.

7.1.4 Verkehrssimulation

Die von SCHÖNBACH angeregten und von uns durchgeführten Simulatoruntersuchungen sind zunächst darauf angelegt, das Verhalten einzelner Fahrer im verkehrlichen Kontext bei Nebel zu untersuchen. Die Auswirkungen dieses Verhaltens auf den gesamten Verkehrsfluss sind damit noch nicht bekannt. Darauf zielt jedoch letztlich die Frage nach der Ursache von Massenanfällen ab. Insofern war es konsequent, in einem weiteren methodischen Schritt die Verkehrssimulation mit Eingabe der Simulatordaten vorzusehen.

In dem Fahrermodell PELOPS reagiert der Fahrer bei Klarsicht nicht nur auf das unmittelbar vorausfahrende Fahrzeug, sondern auch auf den Vor-Vorausfahrenden. Die Reaktion auf das Vor-Vorderfahrzeug ist bei geringer Sichtweite ausgeschlossen, sodass Reaktionen nur auf das Vorderfahrzeug möglich sind und wegen der sich addierenden Reaktionszeiten zeitlich verzögert auf vorausgehende Ereignisse in der Kolonne erfolgen. Dadurch entsteht eine Phasenverschiebung der Schwingung der Geschwindigkeit in der Kolonne und damit kommt es zu einer Instabilität der Kolonne: Geringfügige Reaktionen auf das Vorderfahrzeug am Anfang der Kolonne haben große Reaktionen am Ende der Kolonne zur Folge.

Hinzu kommt, dass die Fahrer unter Nebel die Geschwindigkeit deutlich stärker variieren als unter Klarsicht. Die Häufigkeit der Geschwindigkeitsvariation (Periode) bleibt hierbei gleich, das Ausmaß der Geschwindigkeitsvariation nimmt aber signifikant zu. Somit ist unter Nebel zum einen der Reaktionshorizont durch mangelnde Voraussicht eingeschränkt und zum anderen nehmen die Störungen im Verkehrsfluss zu.

In das Verkehrsflussmodell wurden nun zentrale Parameter des Fahrverhaltens im Simulator eingegeben und geprüft, inwieweit in ausgewählten Verkehrsszenarien mit abnehmender Sichtweite sicherheitskritische Situationen – niedrige Time to Collision und hohe Verzögerung – oder sogar Unfälle auftreten. Wie vorhergesagt, erhöht sich bei Nebel die Unfallgefahr aufgrund der Merkmale des im Fahr Simulator beobachteten Fahrverhaltens. Die Häufigkeit sicherheitskritischer Situationen ist erhöht und Unfälle treten ein, wenn es zu einer Störung am Anfang der Kolonne kommt: Es bilden sich Stauwellen, sodass es am Ende der Kolonne bei der beobachteten Wunschgeschwindigkeit

unter Nebel und dem generellen Nachfolgeverhalten der Fahrer unvermeidlich zu Unfällen kommt. Aufschlussreich ist, dass Unfälle nicht durch Fahrer mit „geringem Sicherheitsbedürfnis“ verursacht werden, sondern es sind die allgemeinen Parameter des Fahrverhaltens wie Wunschgeschwindigkeit und Anschlussverhalten, die zusammen mit Zufallsfaktoren im System des Verkehrsflusses zur Unfallgefährdung beitragen.

7.2 Alternativ-Hypothesen

7.2.1 Fehleinschätzung der Fahrgeschwindigkeit bei Nebel

Die eigene Untersuchungsplanung war von einer die SCHÖNBACH-Hypothese ergänzenden Annahme ausgegangen, nämlich dass unter Nebel eine intern repräsentierte Zielgeschwindigkeit aufgrund perceptiver Täuschung nicht eingehalten wird. Das Fahren unter Nebel wird vielfach charakterisiert durch reduzierte Wahrnehmung von Geschwindigkeitshinweisen (insbesondere im peripheren visuellen Feld), erhöhte Aufmerksamkeitsfokussierung auf den zentralen Verkehrsraum und eine damit einhergehende Unterdrückung von ablenkenden Blicken zum Tachometer. Die Untersuchung von SNOWDEN et al. (1998) schien den Einfluss dieser Faktoren auf die Fahrgeschwindigkeit voll zu bestätigen. Die Autoren untersuchten explizit das Fahren einer vorgegebenen Richtgeschwindigkeit (ohne Tachokontrolle) bei Klarsicht und zwei Nebelbedingungen. Die von ihnen verwendete Fahrsimulation mit Lenkrad und Pedalerie vor einer Bildschirmdarstellung entsprach zwar nicht den heutigen Möglichkeiten der Fahrsimulationstechnik. Der Befund allerdings, dass mit abnehmender Sichtweite anstelle der eingeübten Richtgeschwindigkeit zunehmend schneller gefahren wird, konnte durch einen Parallelbefund zur Schätzung der Fahrgeschwindigkeit eines Fremdfahrzeuges unter verschiedenen Sichtbedingungen erhärtet werden. Die Geschwindigkeit des Fremdfahrzeuges wurde mit abnehmender Sichtweite unterschätzt. Die sinnvoll aufeinander bezogenen Befunde waren auch deshalb überzeugende Belege für die Hypothese der Fehleinschätzung der Zielgeschwindigkeit, weil sie in gleicher Weise für drei unterschiedliche Richtgeschwindigkeiten gefunden wurden. So hätte man nach den Befunden von SNOWDEN et al. erwartet, dass auch in unseren Untersuchungen – relativ unabhängig von der konkreten Operationalisierung – die nach Abstellen der Tachokontrolle

zu fahrende Richtgeschwindigkeit unter Nebel ansteigt. Alle Bemühungen, den Befund zu replizieren, waren erfolglos. In den eigenen Replikationsuntersuchungen mit verschiedenen vergleichbar einfachen Simulationsanordnungen wie bei SNOWDEN et al. als auch im Fahrsimulator von Würzburg ließ sich der Effekt für keine der vorgegebenen Richtgeschwindigkeiten (48 km/h, 80 km/h und 112 km/h) zeigen. Im Gegenteil, die Fahrer konnten ziemlich genau die vorgegebene Richtgeschwindigkeit einstellen. Dies ist wahrscheinlich auf die zusätzliche kinästhetische Rückmeldung von Beschleunigungen im Würzburger Fahrsimulator zurückzuführen, die bei der Versuchsanordnung von SNOWDEN nicht realisiert wurde.

Das bedeutet nun nicht, dass die genannten perceptiven Faktoren, wie Geschwindigkeitswahrnehmung, Aufmerksamkeitsfokussierung und Tachokontrolle, keine Rolle beim Fahren mit frei gewählter Geschwindigkeit spielen.

Die Tatsache, dass Fahrer im Fahrsimulator ihre frei gewählte Fahrgeschwindigkeit der Sichtbedingung anpassen, unterstreicht zunächst einmal, dass während des Fahrens perceptiv Faktoren beim Abgleich von Regel- und Stellgrößen sehr wohl wirksam sind. Es ist dann nahe liegend, auch die Abweichungen der frei gewählten von der sicherheitsangemessenen Fahrgeschwindigkeit zunächst hinsichtlich perceptiver Faktoren zu analysieren. Die Höhe der frei gewählten Fahrgeschwindigkeit wurde, ähnlich wie von SNOWDEN et al. postuliert, systematisch um 20-30 km/h unterschätzt. Das Ausmaß dieser Unterschätzung war, ebenfalls in Übereinstimmung mit SNOWDEN, im Nebel tendenziell (statistisch nicht signifikant) höher als bei klarer Sicht.

7.2.2 Generelle sichtbezogene Fehlanpassung der Geschwindigkeit

Bewusst wurde in den eigenen Untersuchungen das Fahren in der Kolonne, wie von SCHÖNBACH thematisiert, kontrolliert durch die Einzelfahrt. Damit wird unterstellt, dass es zu generellen Fehlanpassungen bei Nebel kommen kann, unabhängig davon, ob man alleine oder zusammen mit vorausfahrenden und/oder nachfolgenden Fahrzeugen fährt.

Die Befunde bestätigen die Richtigkeit dieses Ansatzes. Zunächst ist festzustellen, dass Einzel- und Kolonnenfahrer ihre Geschwindigkeit bei

Sichteinschränkung durch Nebel vergleichbar vermindern. Das Ausmaß dieser Verminderung scheint bei beiden Gruppen jedoch nicht hinreichend. Die mittleren Fahrgeschwindigkeiten liegen bei Nebel immer höher als für die Sichtweiten angemessen. Die Beurteilung dieses Sachverhalts ist jedoch in der Fahrsimulation – wie auch in der Realsituation – äußerst problematisch, weil die Grenze der Erkennbarkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs schwer zu bestimmen ist. Zum einen kann die Erkennungsschwelle für das vorausfahrende Fahrzeug wesentlich niedriger liegen als mit den experimentell definierten Sichtweiten unterstellt. Das heißt, die Fahrer – oder einige der Fahrer – sehen das vorausfahrende Fahrzeug noch mit einem größeren Abstand als 80 oder 50 m. Zum anderen könnte eine eindeutige Aussage über sicherheitsunangemessene Fahrgeschwindigkeit dann gemacht werden, wenn in der Fahrsimulation der genaue Zeitpunkt des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs festgelegt würde. In nachfolgenden Untersuchungen sollte deshalb der Fahrtverlauf so programmiert werden, dass das vorausfahrende Fahrzeug – in der Nebelsimulation glaubhaft – faktisch verschwindet und bei Annäherung faktisch wieder dargeboten wird. Damit wäre ein eindeutiges On/off-Kriterium gegeben.

In den Modellexperimenten wurden die Fahrten immer bei vorgegebener Sichtweite begonnen und beendet. Das heißt, die Testfahrt wurde entweder ganz bei Klarsicht oder ganz bei Nebel durchgeführt. Es könnte unterstellt werden, dass die unter diesen Bedingungen beobachteten Fahrgeschwindigkeiten nicht vergleichbar sind mit denen, die man beim Hineinfahren in den Nebel oder Herauskommen aus dem Nebel beobachtet. Deshalb wurde in einem Kontrolleexperiment geprüft, wie schnell Einzelfahrer aus der Klarsicht in den Nebel hineinfahren, wie sehr sie ihr Fahrzeug im Nebel verlangsamen und auf welche Geschwindigkeit sie bei Austritt aus dem Nebel beschleunigen. Die Daten belegen, dass Ausgangs- und Endgeschwindigkeiten im Nebel vergleichbar mit denen sind, die man in den vergleichenden Untersuchungen mit konstanten Sichtbedingungen findet. Allerdings ist noch nicht untersucht, ob dies auch für Kolonnenfahrer gilt. Da die SCHÖNBACH-Hypothese, deren Überprüfung das vorrangige Ziel der Untersuchungen war, sich auf das Verhalten bei konstanter Sichtbedingung bezieht, wurde dieser Aspekt zunächst ausgeklammert.

7.2.3 Generelle kolonnenbezogene Fehlanpassung der Fahrgeschwindigkeit

Die vorliegenden Befunde können als Beleg dafür gewertet werden, dass – unabhängig von der Sichtbedingung und damit im Gegensatz zur SCHÖNBACH-Hypothese – das eigene Fahrverhalten durch das anderer Fahrzeuge beeinflusst wird. Konkret belegt ist dies für das Nachfolgen bei Beschleunigung des vorausfahrenden Fahrzeugs. Bei Nebel oder Klarsicht gibt es Fahrer, die dem davonfahrenden Fahrzeug in einzelnen Situationen folgen. Die Ursache dafür kann in der Unsicherheit über die Konstanz der eigenen Fahrgeschwindigkeit vermutet werden. Wenn der Abstand sich vergrößert, scheint ungewiss zu sein, durch wen die Abstandsvergrößerung herbeigeführt wurde. Zumindest bei der geringeren Beschleunigung um 15 % haben die Fahrer häufig – nach ihren eigenen Aussagen – die Geschwindigkeitserhöhung des Vordermanns nicht bemerkt.

7.2.4 Oszillation der Fahrgeschwindigkeit bei Sichtbehinderung

Der markanteste Befund der Untersuchung betrifft die zunehmende Oszillation der Fahrgeschwindigkeit bei stärker werdendem Nebel, dies sowohl bei Einzel- als auch bei Kolonnenfahrern, bei Kolonnenfahrern aber stärker. Hierin kann eine wesentliche Ursache für das Entstehen kritischer Auffahrsituationen im Nebel gesehen werden.

Offensichtlich wirkt die Sichtbeschränkung durch den Nebel ähnlich wie ein vorausfahrendes Fahrzeug. Die Fahrer regulieren ihren Abstand zur Sichtgrenze so wie in den Modellen für das Kolonnenfahren (vgl. DIEKAMP, 1995) beschrieben, wobei die Sichtgrenze unter Nebelbedingungen schwer zu bestimmen ist. Die Tatsache, dass das Oszillieren bei einem vorausfahrenden Fahrzeug zunimmt, spricht dafür, dass die Distanzwahrnehmung unter Nebel labiler ist. Wenn das Pendeln der Geschwindigkeit schon bei konstanter eingeschränkter Sichtweite in Einzelfahrten auftritt, dann muss es verstärkt unter realen Verkehrsbedingungen mit wechselnder Sichtweite bei Nebel (aufziehende Nebelschwaden) erwartet werden. Kommt dann noch das Fahren in einer Kolonne hinzu, addieren sich die Effekte und das Pendeln der Geschwindigkeiten schaukelt sich weiter auf.

Die Verkehrssimulation mit dem Fahrermodell PELOPS hat die Bedeutung des Oszillierens für die Kolonneninstabilität besonders klar herausgestellt.

An dieser Stelle muss hervorgehoben werden, dass unseres Wissens zum ersten Mal das unter Nebel verstärkt oszillierende Verhalten beobachtet und seine Auswirkung auf den Verkehrsfluss in einem Modell simuliert wurde. Weitere Untersuchungen mit methodisch eigens auf die Beobachtung der Oszillationen konzipierten Untersuchungsanordnungen scheinen geboten.

7.2.5 Fahrertypbezogenes Fehlverhalten

Es gibt in der Literatur eine Reihe von Fahrertypenklassifizierungen für unterschiedliches Fahrverhalten. RICHTER (2002) hat eine nebel-spezifische Klassifizierung vorgenommen, die hier aufgegriffen werden soll. RICHTER unterscheidet aufgrund von Selbsteinstufungen zum Fahrverhalten und statistischen Analysen (Faktoren- und Clusteranalysen) vier Fahrergruppen, den nebelunsicheren Fahrer, den offensiven Fahrer, den autonomen Fahrer und den vorausschauenden Fahrer. Die ersten beiden Gruppen sind dabei größer als die letzteren beiden Gruppen. In unserer Modelluntersuchung 1 und 2 haben wir festgestellt, dass die gewählten Anfangsgeschwindigkeiten stark variieren. Darüber hinaus zeigte sich, dass nur wenige Fahrer sich in ihrem Nachfolgeverhalten konsistent über die Fahrten verhalten. Das Nachfolgen variiert über Personen und Situationen. Die eigenen Daten rechtfertigen nicht eine Fahrerstiltypisierung. Generell sind solche Typisierungen und Verallgemeinerungen auf Persönlichkeitskonstrukte nur bedingt geeignet, Verhalten in konkreten Situationen vorherzusagen. Die Ergebnisse der Verkehrssimulation haben gezeigt, dass die unter „Sicherheitsbedürfnis“ definierte Variation des Fahrverhaltens keinen Erklärungsbeitrag für das Auftreten sicherheitskritischer Ereignisse und Unfälle hat. Deshalb ist es zielführender, jeweils die das Verhalten bedingenden situativen Faktoren – Sichtweite, Verkehrsstärke, Fahrverhalten anderer – zum Ausgangspunkt der Vorhersage zu machen.

7.3 Bedingungsfaktoren von Massenfällen bei Nebel

7.3.1 Erklärungsmuster für das Fehlverhalten

Es findet sich keine empirische Bestätigung für die Annahme, dass Nebelunfälle vorrangig entsprechend der Druck-Sog-Hypothese von SCHÖNBACH zustande kommen, wonach Fahrer zu schnell fahren und zu dicht auffahren, weil sie dem

vorausfahrenden Fahrzeug (Sog) als Orientierungshilfe im Nebel folgen und sich von dem nachfolgenden drängenden und mit dessen Scheinwerferlicht lästigen Fahrzeug (Druck) entfernen wollen.

Die eigenen Befunde zum Fahrverhalten im Fahrsimulator, zum Fahrverhalten auf der Autobahn und zum Verkehrsfluss im Simulationsmodell machen deutlich, dass es sinnvoll ist, von einem insgesamt breiteren als dem von SCHÖNBACH vorgeschlagenen Erklärungsansatz auszugehen. Unsere Untersuchungen schließen nicht aus, dass die von SCHÖNBACH postulierten Wirkzusammenhänge unter bestimmten Bedingungen und bei bestimmten Personen zum Tragen kommen können. Im Gesamtkomplex scheinen sie jedoch eine untergeordnete Rolle zu spielen.

Die Befunde unserer Untersuchungen stellen vielmehr den Sachverhalt heraus, dass das Muster der Kombination von Verhaltensanpassungen im Nebel sicherheitsgefährdend ist. Was wir beobachten, sind weit gehend automatisierte Verhaltensanpassungen an Behinderungen vorausschauenden Fahrens (Sichtweite) und an das Verhalten anderer (bei Nebel und Klarsicht). Die Fahrer reagieren – vernünftigerweise – im Nebel mit Geschwindigkeitsreduktion und Abstandsvergrößerung. Sie reagieren im Nebel wie bei Klarsicht auf das Fahrverhalten anderer. Beschleunigt der vorausfahrende Fahrer, besteht – abhängig vom Geschwindigkeitsbereich – die Tendenz, ihm zu folgen. Die Verhaltensanpassungen sind unter dem Sicherheitsaspekt unzureichend. Dies bestätigt sich in der Verkehrssimulation, gibt man die Parameter des Fahrverhaltens – statistische Verteilung von Geschwindigkeit und Abstand – bei verschiedenen Sichtweiten für Einzel- oder Kolonnenfahrten und über die Fahrstrecke/-zeit ein. Warum wird sicherheitsunangemessen gefahren? Auf diese Frage gibt es zwei einfache, durch die Verhaltenswissenschaft empirisch belegte Antworten.

Erstens, die Verhaltensanpassungen sind in ihrer Kombination wenig (miss-)erfolgskontrolliert. Der Unfall tritt zu selten ein und Beinaheunfälle werden nicht erkannt. Unfälle sind als seltene Ereignisse von einer Vielzahl von Zufallsfaktoren abhängig. Das heißt, es fehlt die Erfahrung, welches Verhalten das Unfallrisiko erhöht. Der Einzelfahrer, der bei Nebel mit durchschnittlich höherer Geschwindigkeit als der Fahrer in der Kolonne fährt, hat in der perceptiv sehr eingeschränkten Situation keine Erfahrung über die Folgen. Die in der Verkehrssimu-

lation bei Nebel beobachtete Häufung von sicherheitskritischen Situationen – zu kurze Zeitlücke und starke Bremsung – ist dem Fahrer in der Kolonne nicht bewusst. Auch hier fehlt ihm vor allem aufgrund der eingeschränkten Wahrnehmung bei Nebel die zutreffende Einschätzung der Situation. Er erfährt nicht die möglichen Konsequenzen seines Fahrverhaltens als Fahrer in einer bei Nebel unüberschaubaren Kolonne. Die Miss-/Erfolgskontrolle ist vergleichbar nicht vorhanden wie bei plötzlichen Behinderungen in uneinsichtigen Kurven, vor Bergrücken und beim Nachfolgen eines sichteinschränkenden Lkw.

Zweitens, die Verhaltensanpassungen selbst sind nur unzureichend bewusst, weil – insbesondere unter Nebel – die perceptiv Rückmeldung eingeschränkt ist. Die Schätzung der absoluten Höhe der Geschwindigkeit ist unzureichend: Bei fehlender Tachokontrolle wird die eigene Fahrgeschwindigkeit unterschätzt. Der Grund dafür ist, dass die bei Klarsicht vorhandenen Fahrraum-Signale der Geschwindigkeitswahrnehmung bei Nebel fehlen. Hinzu kommt, dass die Autotechnik zur Erhöhung des Fahrkomforts nicht visuelle Geschwindigkeitssignale (Geräusche, Rütteln) unterbindet. Dass die eigene Fahrgeschwindigkeit bei Nebel oszilliert, wird nicht bemerkt. Das Oszillieren von Geschwindigkeit und Abstand beim Folgen eines beschleunigenden Vorderfahrzeugs ist als Verhaltensadaptation unter den gegebenen Wahrnehmungseinschränkungen erklärbar: Die Erkennbarkeitsschwelle für das vorausfahrende Fahrzeug ist bei Nebel erhöht, sodass ein gleicher Abstand nicht gehalten werden kann. Mal fährt man zu nah heran, mal entfernt man sich zu weit. Aus unseren Untersuchungen gibt es Hinweise, dass Fahrer nicht ihr eigenes Fahrverhalten, sondern das des vorausfahrenden Fahrers verantwortlich machen, wenn sie Schwankungen im Fahrverhalten bemerken. Selbst wenn das Vorderfahrzeug in der Fahrsimulation konstant fährt, wird ihm die Oszillation des eigenen Fahrverhaltens zugeschrieben.

Ursächlich für Fehlverhalten im Nebel ist demnach weniger, dass sich die Fahrer im Nebel anders verhalten als bei klarer Sicht, sondern vielmehr dass Verhaltensweisen, die bei guten Sichtverhältnissen sinnvoll und ungefährlich sind, im Nebel unreflektiert beibehalten werden und hier zu einem Gefährdungspotenzial führen. Routinen, die bei klarer Sicht automatisiert ablaufen, werden in den für die meisten Autofahrer seltenen Nebelsituationen nicht

aufgebrochen und durch eine bewusst gesteuerte Verhaltensänderung ersetzt.

7.3.2 Erklärungsansatz zur Entstehung von Massenfällen im Nebel

Auch wenn derzeit, wie oben erwähnt, in einigen Punkten noch Forschungsbedarf besteht, so lässt sich doch auf Basis der Befundlage eine schlüssige Erklärung zur Entstehung von Massenfällen bei Nebel geben, die eine deutliche Erweiterung der SCHÖNBACH-Hypothese darstellt:

1. Die Fahrgeschwindigkeit bei Nebel wird zwar sowohl bei Kolonnenfahrten als auch bei Einzelfahrten reduziert, aber nicht in einem sichtangemessenen Umfang. Es wird schneller gefahren, als man im Sichtbereich noch anhalten könnte.
2. Es gibt eine Tendenz zur verstärkten Kolonnenbildung unter Nebel. Dies kann im Sinne der SCHÖNBACHschen Theorie gewertet werden und durch soziale Vergleichs- und Orientierungsprozesse verursacht sein. Die Zeitlücken liegen aber meist in einem Bereich von 1-3 Sekunden und sind somit nicht per se als sicherheitskritisch zu werten (die empfohlenen Zeitlücken der StVO liegen bei 1,8 Sekunden, aber erst Zeitlücken unter 0,9 Sekunden werden polizeilich als sicherheitsgefährdet geahndet).
3. Die Oszillation der Fahrgeschwindigkeit nimmt unter Nebel drastisch zu. Bei gleichzeitiger Sichteinschränkung ist ein Aufschwingen der Variabilität der Kolonnengeschwindigkeit unvermeidlich. So kommt es zu extremen Verzögerungswerten, die noch dazu nicht voraussehbar sind.

Allein der 3. Punkt würde schon ausreichen, um Massenfälle bei Nebel zu erklären. Bedenkt man dann noch die größeren Kolonnen im Nebel – teils erklärt durch die theoretischen Annahmen SCHÖNBACHS –, erhöht sich die Unfallwahrscheinlichkeit statistisch gesehen erneut. Denn so gibt es mehr Situationen (Kolonnenfahrten), in denen das Oszillationsproblem zum Tragen kommen kann. Kommen letztlich noch schnelle Einzelfahrer hinzu, die nicht fähig sind, innerhalb ihrer Sichtweite anzuhalten, und zudem auch nicht mit fast stehenden (weil oszillierenden) Kolonnen rechnen – da sie sich ja alleine auf der Autobahn fühlen und keinen Grund für eine Verkehrsbehinderung sehen –, so ist es fast schon verwunderlich, dass es nicht noch häufiger zu Unfällen im Nebel kommt. Dieses komplexe Wir-

kungsgefüge von drei verschiedenen Faktoren ist eher dazu geeignet, das Zustandekommen von Massenfällen im Nebel zu erklären, als die allein auf soziale Vergleichsprozesse reduzierte Theorie von SCHÖNBACH.

7.3.3 Offene Fragen

Die Befunde führen unserer Einschätzung nach einen wesentlichen Schritt über unsere bisherigen Erkenntnisse hinaus. Sie werfen jedoch zugleich eine Reihe von offenen Fragen auf, die mit der Weiterentwicklung von Fahrerhaltensmodellen und Simulationstechniken zusammenhängen.

Die Entwicklung adäquater Fahrerhaltensmodelle erfährt derzeit vor dem Hintergrund moderner Fahr- und Verkehrsfluss-Simulationstechniken einen Aufschwung. Die eigenen Daten gehen in die Konzeption eines Fahrerhaltensmodells (PELOPS) ein. Daten aus anderen Verhaltensuntersuchungen – auch mit angrenzender Thematik, wie Sichtbehinderung durch Fahrzeuge, Baustellen u. a., oder Fahrverhalten in Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern (z. B. aggressives Fahren) – werden ebenso aufgenommen. So werden Fahrerhaltensmodelle durch Einbau verhaltenswissenschaftlich neu gewonnener Erkenntnisse modifiziert und erweitert, um die Vorhersagen zu verbessern. Die von uns erhobenen Daten sind deshalb bezüglich ihres Stellenwertes für die Vorhersage in aktualisierten Fahrerhaltensmodellen jeweils neu zu bestimmen.

Unsere Untersuchungen waren explizit nicht darauf angelegt, das zeitliche Fahrverhaltensmuster zu untersuchen. Deshalb richten sich Fragen auf die Entstehungs- und Begrenzungsbedingungen von Oszillationen. Fahrsimulationen – als die Methode der Wahl – sollten verstärkt genutzt werden, um das zeitliche Fahrverhaltensmuster genauer studieren zu können. Insbesondere sollte die Dynamik, mit der sich der Aufschaukelungsprozess entwickelt, analysiert und die resultierenden Differenzgeschwindigkeiten genauer quantifiziert werden.

7.4 Empfehlungen

7.4.1 Ausgangspunkt und Zielsetzung

Ausgangspunkt des Projektes war die Erwartung, dass bei einer empirischen Bestätigung sozialer Risikofaktoren für Nebelfahrten hierfür geeignete präventive Maßnahmen empfohlen werden könn-

ten. Die Prüfung der sozialpsychologischen Hypothesen zusammen mit Alternativhypothesen erbrachte Ergebnisse, die diese Erwartung nicht stützen. Die Befunde sind Basis für generelle Aussagen über die Entstehung unangepassten Fahrverhaltens bei Nebel und fokussieren damit andere Zielsetzungen bei der Entwicklung von Maßnahmen zur Prävention von nebelbedingten Massenfällen:

- Was wir beobachten, sind weitgehend automatisierte Verhaltensanpassungen, hier Anpassungen an Behinderungen vorausschauenden Fahrens (Sichtweite) und an das Verhalten anderer Fahrer im Verkehr (Kolonnenfahren, Folgeverhalten).
- Diese Verhaltensanpassungen sind in ihrer Kombination wenig (miss-)erfolgskontrolliert. Der Unfall ist „nicht abzusehen“, er tritt zu selten auf. Es fehlen Risikohinweise dafür, dass die gewohnten Verhaltensadaptationen in der gegebenen Situation unangemessen sind.
- Zumindest einige der Verhaltensanpassungen selbst sind nur unzureichend bewusst (awareness), weil – insbesondere unter Nebel – die perzeptive Rückmeldung eingeschränkt ist (Geschwindigkeit, Abstand) oder überhaupt nicht besteht (Oszillation).

Die Maßnahmen müssen darauf gerichtet sein,

- das „unbekümmerte“ Fahren im automatisierten Modus zu blockieren und regel- und wissenbasiertes Wissen anzustoßen,
- die Konsequenzen des eigenen Fahrverhaltens – im Vorfeld von Beinaheunfällen und Unfällen – erfahrbar zu machen und
- das eigene Fahrverhalten – Geschwindigkeit, Abstand, Oszillation – über Rückmeldung erfahrbar zu machen.

7.4.2 Optionen und Empfehlungen für Maßnahmen

Diese Ziele können über die unterschiedlichen Maßnahmenbereiche verfolgt werden.

Rechtlicher Bereich

Einige Regelungen in der StVO und der StZVO sind zu bedenken. Die StVO regelt im § 3 die Geschwindigkeit und im § 4 den Abstand. In Bezug auf Geschwindigkeit wird explizit eine Konkretisierung für

das Fahren bei eingeschränkter Sichtweite vorgenommen: „Beträgt die Sichtweite [...] weniger als 50 m, so darf er [der Fahrzeugführer] nicht schneller als 50 km/h fahren, wenn nicht eine geringere Geschwindigkeit geboten ist.“ Im abstandsbezogenen § 4 fehlt eine vergleichbare Konkretisierung. Dabei ist die Zeitlücke die kritischere Variable. Für sie wäre eine Präzisierung denkbar. Im § 17 der StVO wird die Beleuchtung geregelt, u. a. das Einschalten der Nebelschlussleuchte. Obwohl Nebelschlussleuchten in der StZVO vorgeschrieben sind, fehlt eine positive Formulierung, wann sie einzuschalten sind. Negativ formuliert heißt es: „Nebelschlussleuchten dürfen nur dann benutzt werden, wenn durch Nebel die Sichtweite weniger als 50 m beträgt“ (§ 17 Absatz 3).

In der StZVO (§ 53d) wird offen gelassen, ob eine oder zwei Nebelschlussleuchten eingebaut werden. Die hierzu geführte Diskussion, ob ein oder zwei Leuchten aus perzeptiver Sicht besser sind, scheint offenbar nicht abgeschlossen zu sein. Aus unserer Sicht ist anzumerken, dass erst durch das Sehen zweier Bezugspunkte (zwei Leuchten) und deren Position relativ zueinander während der Annäherung der Abstand eingeschätzt werden kann. Eine Leuchte markiert zwar ein Hindernis, dessen Abstand aber, gerade unter den eingeschränkten Sichtbedingungen bei Nebel, nicht gut geschätzt werden kann.

Polizeiliche Überwachung

Das Problem mangelnder negativer Konsequenzen für unangemessenes Fahren bei Nebel könnte ansatzweise durch verstärkte polizeiliche Geschwindigkeitskontrollen angegangen werden. Kontrollen bei schlechter Witterung in gefährdeten Regionen könnten einen allgemeinen Effekt haben. Sind Geschwindigkeitsüberschreitungen mit Sofort-Sanktionen verbunden, dann ist lernpsychologisch eine höhere Wirksamkeit zu erwarten.

Zur weiteren Verbesserung der Unfallursachenforschung wäre eine Präzisierung der Unfalldokumentation wünschenswert.

Straßenraum

Um die Wahrnehmung bei Nebel zu verbessern, sind besondere straßenbezogene Maßnahmen in nebelgefährdeten Regionen denkbar. Abstandsmarkierungen auf der Straße können die Einschätzung des Sichtabstandes erleichtern. Sie können

insbesondere dazu genutzt werden, die Zeitlücke zum vorausfahrenden Fahrzeug besser abzuschätzen. Leuchtende Leitpfosten wären eine andere Alternative. Die Implementierung einer Fahrbahnbeleuchtung könnte wegen des zusätzlichen Streulichtes kontraproduktiv sein.

Verkehrserziehung und -aufklärung

In den Fahrschulen kann die Ausbildung bezüglich Fahrens bei Nebel verbessert werden. Die Unterrichtsmaterialien zur Fahrweise bei Nebel und in der Kolonne können dem neuesten Stand entsprechend aktualisiert werden. Ein spezielles Training ist vorstellbar: Zum Beispiel kann über CBT (Computer Based Training) das Fahren im Nebel mit erfahrbaren Konsequenzen und Rückmeldung der eigenen Fahrweise simuliert werden. Über Medien kann der Stand der aktuellen Forschung vermittelt und so können eingängige, aber unzutreffende Erklärungsmuster überwunden werden. Auch an die Konzeption eines Flyers ist zu denken, der bei geeigneten Gelegenheiten (z. B. polizeilichen Kontrollen) verteilt wird.

Fahrerinformationssysteme und Fahrerassistenzsysteme

Mit zunehmender Weiterentwicklung und Marktdurchsetzung können FIS (Fahrerinformationssysteme) und FAS (Fahrerassistenzsysteme) eine zentrale Rolle in der Prävention von Nebelunfällen bekommen. Über RDS-TMC (Radio Data System – Traffic Message Channel) können Warnungen und Handlungsempfehlungen gegeben werden. Mangelnde perzeptive Rückmeldung bei Nebel kann technisch kompensiert werden. Bei Verbesserung der Sicht mittels Radar- und Infrarottechnik muss aber bedacht werden, dass dies die gefahrene Geschwindigkeit so ausgestatteter Fahrzeuge erhöhen wird, und es so zu einer höheren Variabilität der Geschwindigkeit der Verkehrsteilnehmer gesamt kommen kann, was die Unfallgefahr wieder erhöht.

Verkehrslenkung

Wechselsignalanlagen bieten die Möglichkeit, rechtzeitig zu warnen. Inwieweit weitere Information im Sinne konkreter Handlungsempfehlungen bei Nebel gegeben werden kann, sollte überdacht werden.

7.4.3 Maßnahmenbewertung

Am 25. Juni 2003 fand ein Expertengespräch auf Einladung der BAST statt. An dem Gespräch beteiligten sich – neben den Mitarbeitern am Forschungsprojekt und Vertretern aus den Fachbereichen Verkehrspsychologie, Unfallforschung und Straßenverkehrstechnik – Experten von der Deutschen Verkehrswacht, dem Deutschen Verkehrssicherheitsrat, der Polizei und des Bundesverkehrsministeriums. Ein Protokoll und eine Teilnehmerliste wurden von der BAST erstellt (siehe Anhang). Im Folgenden werden die wichtigsten Punkte der Diskussion wiedergegeben.

Zunächst wurde die Befundlage dargestellt und erkannt, dass nicht die Druck-Sog-Hypothese von SCHÖNBACH, sondern eine allgemeinere Konzeption der Unfallverursachung bei Nebel, wie sie zusammenfassend beschrieben wurde, Ausgangspunkt für die Empfehlung von Maßnahmen sein muss.

Die Bewertung der möglichen Maßnahmen erfolgte unter den Gesichtspunkten,

- ob sie kurzfristig oder erst langfristig umsetzbar sind,
- wie schnell sie greifen,
- ob sie ökonomisch vertretbar und durchsetzbar und
- ob sie technisch und organisatorisch durchführbar sind.

Prinzipiell werden technischen Systemen (FIS und FAS) große Chancen zugerechnet, deren Weiterentwicklung und Marktdurchsetzung jedoch noch nicht abzusehen sind. Der Einsatz wird erst dann Erfolg zeigen, wenn viele Fahrzeuge mit solchen Systemen ausgerüstet sind und damit im Fahrzeugverband vergleichbares Fahrer- und Fahrzeugverhalten gewährleistet ist.

Die Verbesserung der Sicht anhand der Straßenbeschaffenheit (z. B. beleuchtete Pfosten) und der Einsatz von Wechselzeichenanlagen sind sehr Erfolg versprechend und mittelfristig umsetzbar, aus ökonomischen Gründen jedoch auf wenige geeignete Streckenabschnitte beschränkt.

Ebenso mittelfristig Erfolg versprechend – aber kostengünstiger und flächendeckender zu realisieren – ist die Verkehrserziehung in Fahrschulen und Fahrkursen. Den Fahrern muss ihr Fehlverhalten im

Nebel zunächst bewusst gemacht werden. Hierbei können computergestützte Trainingsmaßnahmen von großer Bedeutung sein, da über die Fahrsimulation sowohl die Konsequenzen des Fahrverhaltens bei Nebel als auch die Fahrweise selbst erfahrbar werden.

Maßnahmen, die zu einem relativ kurzfristigen Erfolg führen können, sind die polizeiliche Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung bei Nebel verbunden mit Sanktionen und direkter Aufklärung. Dies scheitert allerdings zurzeit an technischen und organisatorischen Problemen, da die zur Verfügung stehenden Sichtweitenmesser keine rechtlich verwertbare Messung vornehmen und die Polizei bei den selten auftretenden Nebelereignissen meist bereits ausgelastet ist und keine zusätzlichen Kapazitäten für eine solche verkehrserzieherische Maßnahme hat.

Eine Verkehrserziehung und Aufklärung über die Medien sind Maßnahmen, die eine beständige Aufgabe darstellen, von denen man aber nicht sicher sein kann, wie weit sie greifen. Ziel sollte es hier sein, den Autofahrer dazu anzuregen, im Nebel seine gewohnten Fahr routinen zu unterbrechen und zu reflektieren, in welcher Situation er sich befindet. Diese Form von Bewusstmachung könnte unbewusst angewandten falschen Routinen in Nebelsituationen entgegenwirken.

8 Literatur

- BREHM, J. W. (1966): „A theory of psychological reactance.“, New York: Academic Press
- BRISBANE, G. (1992): „Driver behaviour during periods of restricted visibility“, Proceedings 16th ARRB Conference, Part 4, 313-329
- BRISBANE, G. (1994): „Speed modification – intelligent signs for the future“, Proceedings 17th ARRB Conference, Part 5, 149-163
- BRISBANE, G. (1996): „Driving in Fog – putting research into practice“, Proceedings Roads 96 Conference, Part 5, 283-299
- CAVALLO, V., COLOMB, M., DORÉ, J. (2000): „La conduite dans le brouillard“, *Récherche Transports Sécurité*, 66, 81-99
- CAVALLO, V., LAYA, O., LAURENT, M. (1986): „The estimation of time to collision as a function of visual stimulation“, *Vision in Vehicles*, 1986, 179-185
- Deutscher Verkehrssicherheitsrat (DVR) (2000): „Elektronische Temporegelungen an Autobahnen – hohe Akzeptanz“, Bonn, Pressemeldung vom 18. August 2000, www.dvr.de
- Deutscher Verkehrssicherheitsrat (DVR), BOLTE, F. (2000): „Telematik gegen Unfälle“, Bonn, Pressemeldung, www.dvr.de
- DIEKAMP, R. (1995): „Entwicklung eines fahrzeugorientierten Verkehrssimulationsprogramms“, Schriftenreihe Automobiltechnik, ika, Aachen
- DURTH, W., BARK, A., LIPPOLD, C. (1995): „Über die Unfallrelevanz von Nebelarten und den Sinn von mobilen versus stationären Nebelwarnanlagen“, Untersuchung im Auftrag der Adam Opel AG Rüsselsheim im Rahmen des PROMETHEUS-Programms, Darmstadt
- DVR-REPORT (1995): „Schneller als die Natur erlaubt“, Zur Sache, DVR-Report, 4/95, 10-13
- EDWARDS, J. (1999): „Speed adjustment of motorway commuter traffic to inclement weather“, *Transportation Research Part F* 2, 1-14
- EHMANN, D. (2000): „Simulationsmodell des menschlichen Spurwechselerhaltens“, VDI/SAE/JSAE Gemeinschaftstagung, Der Fahrer im 21. Jahrhundert, Berlin
- FESTINGER, L. (1957): „A theory of cognitive dissonance“, Stanford: Stanford University Press
- GODTHELP, H. (1986): „Vehicle control during curve driving“, *Human Factors*, 28 (2), 211-221
- HAWKINS, R. (1988): „Verkehrsverhalten auf Autobahnen unter Bedingungen eingeschränkter Sicht“, *Zeitschrift für Verkehrssicherheit*, 34 (2), 74-79
- HOGEMA, J., van der HORST, R. (1995): „Evaluation of A16 motorway fog-signaling system with respect to driving behavior“, *Transportation research record*, 1573, 63-67
- HOGEMA, J., van der HORST, R., van NITTFERICK, W., STOOP, J. (1996): „Evaluation of an automatic fog warning system“, *Traffic Engineering and Control*, November 1996, 629-632
- ISHIMOTO, K., FUKUZAWA, Y., KAJIYA, Y., HAGIWARA, T., TAKEUCHI, M. (1993): „Visibility

- reduction caused by snow and its counter measures“, Vortrag nach ISHIMOTO, K., FUKUZAWA, Y., KAJIYA, Y., TAKEUCHI, M., HAGIWARA, T., KAKU, T. (1993): „Visibility reduction caused by snow and driver's eye movements“, The proceedings of the 9th annual meeting of Japan snow engineering society, 9-14 (in Japanese)
- KIEGELAND P. (1996): „Fahrzeugführung im Nebel“, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, 42, (278-81)
- KÜHNEN, M., BRÜHNING, E., SCHEPERS, A., SCHMID, M. (1995): „Unfallgeschehen auf Autobahnen“, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft M 51
- LAMBLE, D., LAAKSO, M., SUMMALA, H. (1999): „Detection thresholds in car following situations and peripheral vision: implications for positioning of visually demanding in-car displays“, Ergonomics, 42 (6), 807-815
- LENSING, N. (2003): Straßenverkehrszählung 2000. Ergebnisse. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW
- LERNER, M. (2002): „Nebelunfälle in Deutschland in den Jahren 1995-1999“, Zeitschrift für Verkehrssicherheit, 48 (1), 27-29
- LUDMANN, J. (1998): „Beeinflussung des Verkehrsablaufs auf Straßen – Analyse mit dem fahrzeugorientierten Verkehrssimulationsprogramm PELOPS“, Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen
- NEUNZIG, D. (1996): „Erweiterung des Simulationsprogramms PELOPS zur Abbildung von Verkehrsabläufen in Verdichtungsräumen“, Diplomarbeit am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen
- NILSSON, L., ALM, H. (1993): „Effects of a vision enhancement system on drivers' ability to drive safely in fog“, Vision in Vehicles, September 9-11, 263-271
- PAULMIER, G., PAUMIER, J.-L., SERRES, A. (1992): „La circulation et la visibilité par temps de brouillard“, Bulletin Liaison Labo. P. et Ch., 178, 7-18
- PAUMIER, J.-L., PAULMIER, G., DUBUISSON, J. S., DORÉ, J., COLOMB, M. (1991): „Visibility in fog: fog chamber experiment comparison with model prediction“, CIE 22nd Sessio, Division 4, 66-67
- RICHTER, S. (2002): „Einstellungen und Verhalten beim Fahren im Nebel“, Aachen: Shaker
- RICHTER, S., SCHLAG, B. (1998): „Psychologische Untersuchungen zu Nebelunfällen“, Bericht zum BAST-FP 2.9110, Dresden
- RICHTER, S., SCHLAG, B. (1999): „Wahrnehmung und Interaktion von Kraftfahrern bei Nebel“, 9-28, in: RICHTER, S., SCHLAG, B (Hrsg): Empirische Verkehrspsychologie, Berlin
- ROSS, H. E. (1967): „Water, fog and the size-distance hypothesis.“ British Journal of Psychology, 58, 301-313
- SCHLAG, B. (1988): „Sicherheitsrisiken bei jungen Fahrern“, Report Psychologie, Januar 1988, 27-55
- SCHMEDDING, K., SAAT, D., SCHAL, S. (1994): „Zur Tragweite von Beleuchtungseinrichtungen im Nebel“, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1994/12, 341-343
- SCHÖNBACH, P. (1996a): „Massenunfälle bei Nebel“, Zeitschrift für Sozialpsychologie, 109-125
- SCHÖNBACH, P. (1996b): „Soziale Risikofaktoren bei Nebelfahrten“, Ruhr-Uni Bochum. Unveröffentlichtes Exposé
- SCHREUDER, D. (1991): „Motorway lighting under fog conditions“, Institute for Road Safety Research, Netherlands
- SCHUPP, A., SCHLAG, B. (1999): „Das Risiko, einen Unfall zu verursachen – Analysen für Männer und Frauen, Beifahrerkonstellationen und Altersgruppen“, 112-132, in: RICHTER, S., SCHLAG, B. (Hrsg): Empirische Verkehrspsychologie, Berlin
- SHEPARD, F. (1996): „Reduced visibility due to fog on the highway“, Synthesis of Highway Practice 228, Washington
- SNOWDEN, R., STIMPSON, N., RUDDLE, R. (1998): „Speed perception fogs up as visibility drops“, Nature, 392, 450
- Statistisches Bundesamt Deutschland (2003): Verkehr – Deutschland – „Ursachen von Unfällen mit Personenschaden“, www.destatis.de

-
- STERN, J., SCHLAG, B. (1999): „Akzeptanz verkehrssicherheitsfördernder Maßnahmen bei jungen Fahrern“, 246-266, in: RICHTER, S., SCHLAG, B. (Hrsg): Empirische Verkehrspsychologie, Berlin
- SUMMALA, H. (1998): „Accident risk and driver behaviour“, Safety Science, 22, 103-117
- van der HULST, M., MEIJMAN, T., ROTHENGATTER, T. (1999): „Anticipation and the adaptive control of safety margins in driving“, Ergonomics, 42 (2), 336-345
- WEILKES, M. (2000): „Auslegung und Analyse von Fahrerassistenzsystemen mittels Simulation“, Dissertation am Institut für Kraftfahrwesen der RWTH Aachen
- WIEDEMANN, R. (1974): „Simulation des Straßenverkehrsflusses“, Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Heft 8