

Sicherheitswirkungen von Verkehrsinformationen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 84

bast

Sicherheitswirkungen von Verkehrsinformationen

Entwicklung und Evaluation verschiedener Warnkonzepte für Stauendewarnungen

von

Klaus Bogenberger
Alexander Dinkel

TRANSVER GmbH
Verkehrsforschung und Beratung
München

Ingo Totzke
Frederik Naujoks
Dominik Mühlbacher

Würzburger Institut für Verkehrswissenschaften
Würzburg

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Fahrzeugtechnik Heft F 84

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, Stabsstelle Presse und 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 **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 82.371/2009:
Konzept zur Ermittlung der Sicherheitswirkungen von digitalen Verkehrsinformationen

Projektbetreuung

Christine Lotz

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und 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 0943-9307
ISBN 978-3-86918-243-8

Bergisch Gladbach, Mai 2012

Print  kompensiert
Id-Nr. 1219261
www.bvdm-online.de

Kurzfassung – Abstract

Sicherheitswirkungen von Verkehrsinformationen

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war der Vergleich verschiedener Stauendewarnungen hinsichtlich ihrer Effekte auf die Fahrsicherheit. Hierfür wurden im Rahmen einer Fahrsimulatorstudie mit $N = 32$ Probanden mit Bewegungssystem On-trip-Warnungen vor Stauenden auf Autobahnen untersucht.

Es wurden in zwei Verkehrsbedingungen („mit Verkehr“ vs. „ohne Verkehr“: Stauenden werden mit oder ohne Umgebungsverkehr erreicht) jeweils zwei Stauendarten simuliert: (1) Umgebungsverkehr bremst kurz vor dem Stauende plötzlich ab („hartes Stauende“) bzw. Stauende ist durch die Streckengeometrie nicht einsehbar („verdecktes Stauende“) vs. (2) Umgebungsverkehr reduziert die Geschwindigkeit vor dem Stauende graduell („weiches Stauende“) bzw. Stauende ist einsehbar („unverdecktes Stauende“). Zudem wurden der erstmalige Zeitpunkt der Warnung („3,5 km“ vs. „1,5 km“ vs. „0,3 km“ vor Stauende) und die Warnpräzision („präzise Warnung“: Distanz zum Stauende wird angezeigt und regelmäßig aktualisiert vs. „unpräzise Warnung“ ohne konkrete Distanzangabe) variiert. Außerdem wurden Stauenden in einer nicht-gewarnten Kontrollfahrt angefahren.

Es wurde ein Bewertungskonzept für die Fahrsicherheit entwickelt, anhand dessen die eingeführten Warnkonzepte mittels Indikatoren für Längs- und Querregelung, Ereigniserkennung und Probandenbefragung verglichen werden können: (1) Die Rohdaten verschiedenartiger Indikatoren wurden in einem deskriptiven, grafischen und inferenzstatistischen Vorgehen interpretiert und (2) die so ermittelten Kennwerte wurden in eine integrierte statistische Auswertung mittels TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), das einen standardisierten Vergleich verschiedener Warnalternativen ermöglicht, überführt.

Dieses Bewertungskonzept wurde auf die in der Fahrsimulation aufgezeichneten Daten angewendet, sodass für die eingeführten Variationen der Stauendarten (Warnpräzision und Warndistanz) in Abhängigkeit der Verkehrsbedingung eine vergleichende Bewertung der Sicherheitswirkungen ermöglicht wurde. Durch eine ergänzende kritische Einordnung der Ergebnisse und des Versuchsauf-

baus dienen die Ergebnisse als Entscheidungsunterstützung bei der Entwicklung und Einführung von Stauendewarnungen.

Der Originalbericht enthält als Anhänge umfangreiche weitere tabellarische Darstellungen zu den Verkehrsbedingungen mit Verkehr (ANH. 1), Verkehrsbedingungen ohne Verkehr (ANH. 2), ferner TOPSIS-Entscheidungsmatrizen (ANH. 3) und Kreuzvalidierungen TOPSIS (ANH. 4). 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 diese Anhänge im Berichtstext wurden zur Information des Lesers beibehalten.

Safety effects of traffic information

The objective of this project was to evaluate the safety effect of congestion tail warnings. In the context of a driving simulator study equipped with a motion system, warnings were provided to $N = 32$ participants en route to the tail of congestion.

Under two different traffic conditions (“with traffic” and “without traffic”: tails of a congestion are reached with or without surrounding traffic), two different kinds of congestion tails were simulated in each case: (1) Surrounding traffic abruptly decelerates shortly before reaching the congestion tail or the tail end is not visible due to road geometry vs. (2) The speed of the surrounding traffic is gradually reduced before reaching the tail of the congestion or the tail end is visible. Additionally, the point of the warnings’ reception („3.5 km“ vs. „1.5 km“ vs. „0.3 km“ prior to the congestion tail) and content (“precise warning”: the distance to the congestion is indicated and regularly updated vs. “imprecise warning”: without a clear distance indication) were varied. Furthermore, the tail was approached in a so called “control condition” without any warning system.

A methodology for the evaluation of the driving safety was developed. The various warnings were compared on the basis of single indicators for longitudinal and lateral regulation, event detection, and questioning of test persons: (1) The raw data of all single indicators was depicted graphically and

interpreted objectively in a descriptive, graphical and inference-statistical way, (2) an integrated statistical evaluation with TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) was carried out. Several different indicators were taken into account which allowed a standardized comparison of various warning alternatives.

The evaluation methodology was based on the data collected in the driving simulation. Thus, for the various warning precisions, warning distances, and traffic conditions, different impacts on driving safety could be found. A comparison of the effects on driving safety showed that precise warnings have greater effects on driving safety than imprecise warnings (predominantly when surrounding traffic abruptly decelerates at the congestion tail). The lowest driving safety was shown, independent from the presence of surrounding traffic, when approaching the congestion tail without any warning.

The original report contains extensive further tabular depictions as appendices, on road conditions with traffic (APPENDIX 1), road conditions with no traffic (APPENDIX 2), additional TOPSIS decision matrices (APPENDIX 3), and TOPSIS cross-validations (APPENDIX 4). The reproduction of these appendices was omitted in the present publication. They are available at the Federal Highway Research Institute and can be viewed there. References to the annexes in the body of the report were maintained for the reader's information.

Inhalt

1	Einführung	9	4	Bewertungskonzept	33
1.1	Problemstellung und Ziel der Arbeit ...	9	4.1	Entwicklung des Bewertungs- konzepts	33
1.2	Aufbau der Arbeit	10	4.2	Gewählte Kriterien und Indikatoren zur Erfassung der Fahrsicherheit	34
1.3	Aufgabenteilung	11	4.2.1	Klassifizierung	34
2	Verkehrstechnische Grundlagen	12	4.2.2	Längsregelung	35
2.1	Einordnung und Bedeutung	12	4.2.3	Querregelung	35
2.2	Stau und Stauende	12	4.2.4	Ereigniserkennung	35
2.2.1	Verkehrliche Grundlagen	12	4.2.5	Probandenbefragung	35
2.2.2	Grundlagen zum Stauende	14	4.3	Beschreibung und Anwendung des TOPSIS-Verfahrens	35
2.2.3	Fahrsicherheit am Stauende	17	4.3.1	Beschreibung	35
2.2.4	Fazit	21	4.3.2	Modellieren der Analyseprobleme	36
2.3	Verkehrsinformationen	21	4.3.3	Gewichtung der Indikatoren	36
2.3.1	Einordnung und Bedeutung	21	4.3.4	Messen und Bewerten der Indikatorausprägungen	36
2.3.2	Kodierung von Meldungen	23	4.3.5	Bestimmen der normalisierten Entscheidungsmatrix	37
2.3.3	Übertragung von Meldungen	25	4.3.6	Berechnen der gewichteten norma- lisierten Entscheidungsmatrix	37
2.3.4	Meldungsanbieter	26	4.3.7	Entwickeln virtueller Alternativen	38
2.3.5	Fazit zu den Verkehrs- informationen	26	4.3.8	Berechnen der euklidischen Abstandsmaße	39
3	Beschreibung der Fahrsimulator- studie	27	4.3.9	Bestimmen der relativen Nähe zur Best-Case-Alternative	39
3.1	Fragestellung	27	5	Ergebnisse der Simulatorstudie	39
3.2	Methodisches Vorgehen	27	5.1	Auswertungsstrategie	39
3.2.1	Beschreibung Fahrsimulation	27	5.2	Bedingung „Mit Verkehr“	40
3.2.2	Überblick über die Versuchs- strecken	28	5.2.1	Geschwindigkeitsverläufe	40
3.2.3	Stauannäherungen „Mit Verkehr“	28	5.2.2	Bremsverhalten	41
3.2.4	Stauannäherungen „Ohne Verkehr“ ...	29	5.2.3	Probandenurteile	44
3.2.5	Füllstrecken	29	5.3	Bedingung „Ohne Verkehr“	46
3.2.6	Variationen der Stauendewarnung	29	5.3.1	Geschwindigkeitsverläufe	46
3.2.7	Nebenaufgabe	31	5.3.2	Bremsverhalten	48
3.2.8	Versuchsplan	31			
3.2.9	Versuchsablauf	32			
3.3	Stichprobe	33			

5.3.3	Probandenurteile	51
5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse	53
6	Bewertung mit TOPSIS	53
6.1	Ergebnisaufbereitung	53
6.2	Interpretation der TOPSIS-Resultate für die Bedingung „mit Verkehr“	54
6.3	Interpretation der TOPSIS-Resultate für die Bedingung „ohne Verkehr“	55
6.4	Auswertung des Vorhandenseins von Umgebungsverkehr	57
6.5	Überprüfung des TOPSIS-Verfahrens	57
7	Kritische Einordnung der Warnkonzepte und Ergebnisse	59
7.1	Allgemein	59
7.2	Gegenüberstellung der Ergebnisse	59
7.2.1	Vorgehen	59
7.2.2	Einfluss der Stauendarten auf das Fahrerverhalten und die Wirkung von Stauendwarnungen	59
7.2.3	Bewertung des Aspekts „Warndistanz und -präzision“	60
7.3	Diskussion der Warnkonzepte und deren Umsetzbarkeit	61
7.4	Hinweise zur Ableitung von Mindestanforderungen für sicherheitsoptimale Verkehrsinformationen	63
7.5	Diskussion von Versuchsaufbau und Bewertungskonzept	63
7.6	Weiterer Forschungsbedarf	66
7.6.1	Allgemein	66
7.6.2	Technische Umsetzung	66
7.6.3	Weiterführende Studien zur Systemgestaltung im Hinblick auf Akzeptanz und Aufmerksamkeit	67
7.6.4	Praxiseinführung	68
8	Zusammenfassung	69
Literatur		72

Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V.
AKTIV	Projekt „Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr“
AKTIV-VM	Projekt AKTIV, Teilprojekt „Verkehrsmanagement“
AP	Arbeitspaket
AS	Anschlussstelle
BAB	Bundesautobahn
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BR	Bayerischer Rundfunk
C2C	Car-to-Car/Car 2 Car
C2C CC	Car 2 Car-Communication Consortium
C2I	Car-to-Infrastructure/Car 2 Infrastructure
C2X	Car-to-X/Car 2 X
CALM IR	Communications Access for Land Mobiles Infrared – Infrared
COOPERS	Projekt „Co-operative Systems for Intelligent Road Safety“
CVIS	Projekt „Cooperative Vehicle-Infrastructure Services“
DAB	Digital Audio Broadcasting
DIWA	Projekt „Direkte Information und Warnung für den Autofahrer“
DMB	Digital Multimedia Broadcasting
DSRC	Dedicated Short Range Communication
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-H	Digital Video Broadcast-Handhelds
DVB-T	Digital Video Broadcast-Terrestrial
dWISta	dynamische Wegweiser mit integrierten Stauinformationen
ECL	Event Code List, Ereignisliste
FCD	Floating Car Data

FPD	Floating Phone Data	TMC	Traffic Message Channel
GIDAS	German In-Depth Accident Study	TPEG	Transport Protocol Experts Group
GPRS	General Packet Radio Service	TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
GPS	Global Positioning System	TTC	Time To Collision
GSM	Global System for Mobile Communications	UKW	Ultrakurzwelle
HBS	Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen	UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
HSPA	High Speed Packet Access	VANET	Vehicular AdHoc Networks
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	WAVE	Wireless Access for Vehicular Environment
INVENT	Projekt „Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik“	WDR	Westdeutscher Rundfunk
kbit/s	Kilobits pro Sekunde	WLAN	Wireless Local Area Network
KEF	Kommission zur Ermittlung des Finanzbedarfs der Rundfunkanstalten	xFCD	extended Floating Car Data
KI	Konfidenzintervall		
LCL	Location Code List, Ortsliste		
LTE	Long Term Evolution		
MARZ	Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterezentralen		
Mbit/s	Megabits pro Sekunde		
QSV	Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs gemäß HBS		
RDS	Radio Data System		
RMS	Root mean square (quadratisches Mittel)		
SAFESPOT	Projekt „Cooperative Systems for Road Safety“		
sim ^{TD}	Projekt „Sichere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland“		
StVO	Straßenverkehrsordnung		
SWR	Südwest-Rundfunk		
TAP	TPEG Automotive Profile		
TEC	Traffic Event Compact		
THW	Time Headway		
TIT	Time Integrated Time To Collision		

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen

ρ	Verkehrsdichte [Fz/km]
A_i	(Entscheidungs-)Alternativen
A^+	positiv-ideale Alternative
A^-	negativ-ideale Alternative
a	Verzögerungs-/Beschleunigungsfaktor [m/s ²]
C_i^+	Abstandsindex für relative Nähe zu positiv-idealer Alternative
C_j	Indikatoren
d	Entfernung zwischen zwei Fahrzeugen
d_{ij}	Ausprägung von Indikatoren
m	Anzahl untersuchter Indikatoren
n	Anzahl der (Entscheidungs-)Alternativen
\underline{D}	Verkehrsdichte [Fz/km] (querschnittsbezogen)
D	Entscheidungsmatrix
DTC	Distance To Collision [m]
q	Verkehrsfluss [Fz/h]
\underline{R}	normalisierte Entscheidungsmatrix
r_{ij}	Normalisierung der Indikatorausprägungen
S_i^+	Abstandsmaß zur positiv-idealen Alternative
S_i^-	Abstandsmaß zur negativ-idealen Alternative
Δt	Zeitlücke
TTC	Time To Collision [s]
t_{Netto}	Nettozeitlücke zwischen zwei Fahrzeugen [s]
\underline{V}	gewichtete normalisierte Entscheidungsmatrix
V	Geschwindigkeit [km/h] (querschnittsbezogen)
v_{diff}	Differenzgeschwindigkeit [km/h]

1 Einführung

1.1 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Eine aktuelle Staubilanz besagt, dass im Jahr 2010 auf deutschen Autobahnen rund 185.000 Stauereignisse gemeldet wurden, die sich zu einer Gesamtlänge von rund 400.000 km Stau summieren. Dies bedeutet eine deutliche Steigerung im Vergleich zum Vorjahr 2009 um 32 % bzw. 14 %, während im selben Zeitraum die Kfz-Fahrleistung auf Autobahnen nur um 1,5 % gestiegen ist. (ADAC, 2011)

Aus Staus resultieren Zeitverluste mit den damit verbundenen wirtschaftlichen Konsequenzen in Form erhöhter Betriebs- und Folgekosten sowie höherer Umweltbelastungen durch Emissionen. Die durch Staus in Deutschland jährlich entstehenden Kosten für Zeitverluste und erhöhten Kraftstoffverbrauch werden auf rund 25 Mrd. Euro (Institut für Verkehrswissenschaft Köln) bis 100 Mrd. Euro (BMW AG) geschätzt (EISENKOPF, 2009).

Ein weiterer wichtiger Aspekt von Staus ist die Reduzierung der Verkehrssicherheit. Im Jahr 2008 sind im Außerortsbereich in Stausituationen rund 37.000 Unfälle eingetreten (ADAC, 2008). Es ist anzunehmen, dass vor allem die für die Verkehrsteilnehmer unerwartet auftretenden Stauenden eine erhöhte Gefahr im Verkehrsablauf darstellen, da sie zur Unfallvermeidung zügige und den veränderten Fahrsituationen angepasste Reaktionen der Fahrer erfordern.

Die Annäherung an Stauenden sollte für die Fahrer demnach durch gezielte Informationen und rechtzeitige Warnungen sicherer werden.

Die derzeit übliche Information zu Stausituationen zielt auf eine Sensibilisierung der Fahrer auf Verkehrsstörungen ab, erreicht aber auch, dass die Verkehrsteilnehmer mit einer zeitlichen Verlagerung des Fahrtzeitpunktes bzw. einer Änderung der Routenwahl reagieren können. Die Information sollte den Verkehrsteilnehmer je nach Anwendungsfall vor bzw. während seiner Fahrt erreichen (pre-trip bzw. on-trip). Pre-trip-Informationen können Meldungen und Verkehrsprognosen von Verkehrsbehörden oder weiteren Informationsdienstleistern sein, die zum Beispiel über das Internet bereitgestellt werden. Eine on-trip-Informationsübermittlung erfolgt beispielsweise mittels straßenseitiger dyna-

mischer Anzeigen wie dWISta-Tafeln (dynamische Wegweiser mit integrierten Stauinformationen) oder über Verkehrsfunk durch gesprochene Meldungen bzw. digital via RDS-TMC (Radio Data System – Traffic Message Channel).

Bei TMC-kompatiblen Navigationsgeräten werden die Meldungen dynamisch und individuell genutzt, neben Listen- bzw. Kartendarstellungen kann aufgrund von Staumeldungen eine Neuberechnung der Fahrtroute ermöglicht werden. Das TMC-Signal wird kostenfrei über den öffentlichen Rundfunk zur Verfügung gestellt. Zudem werden von Diensteanbietern sowie Navigationsgeräte- und Automobilherstellern erweiterte Verkehrsinformationen kostenpflichtig zur Verfügung gestellt (TMC-Pro bzw. Navteq traffic). Für die Kunden dieser Dienste steht bislang die Minimierung der Reisezeitzuschläge im Vordergrund. Es ist davon auszugehen, dass auch die reine Information über einen vorhandenen Stau die Aufmerksamkeit des Fahrers erhöht und dies sicherheitsfördernd wirken kann. Spezielle Sicherheitsapplikationen, wie eine Stauendewarnung, sind aktuell aufgrund der eingeschränkten räumlichen Auflösung und Genauigkeit der Verkehrsinformationen und der technischen Limitationen der weit verbreitetsten TMC-Umsetzungslösungen noch nicht verfügbar.

Basierend auf den Erfahrungen mit dem sprachunabhängigen RDS-TMC wird seit 1997 die TPEG-Technologie entwickelt. Hierbei handelt es sich um einen offenen internationalen Standard für multimodale sprachunabhängige Verkehrs- und Reiseinformationen für unterschiedliche digitale Übertragungsmedien. Wie bei TMC sind in den meisten TPEG-Meldungen Informationen zur Ortsreferenzierung enthalten. Der Vorteil gegenüber der TMC-Kodierung ist jedoch, dass zur Ortsreferenzierung auch neue genauere, dynamische Referenzierungsmethoden verwendet werden können (z. B. AGORA-C, OpenLR). Die exakte räumliche Verortung von Meldungen (Local Hazard Warning in TPEG) ermöglicht in Zukunft auch z. B. in Navigationsgeräten Sicherheitsanwendungen (BOGENBERGER et al., 2005).

In einer Mitteilung der Bundesrepublik Deutschland zu der eSafety-Konferenz 2007 wird gefordert, dass Verkehrsinformationen auch auf untergeordneten Netzen – ggf. mit einem reduzierten Funktionsumfang – zur Verfügung stehen sollen. Für Verkehrsmeldungen im nachgeordneten Netz ist die bisher fehlende Online-Erfassung von Verkehrsdaten auf

diesen Straßen problematisch, weshalb aktuelle Verkehrsinformationen nur schwerlich generiert werden können. Durch eine wachsende Flotte von datenliefernden Fahrzeugen, die sog. (x)FCD (extended Floating Car Data) generieren, die Verwendung von Daten auf der Basis von Mobiltelefonnutzern im Straßennetz (sog. Floating-Phone-Daten, FPD) oder Informationen aus Rückkanälen von Navigationsgeräten (TOMTOM, 2011) sowie zukünftige kooperative Verkehrssysteme wird aber auch hier eine technische Möglichkeit geschaffen, verbesserte sicherheitsrelevante Verkehrsinformationen zu erzeugen. Bei der Erschließung sekundärer Netze ist aufgrund der größeren Datenvolumina (das Verkehrsnetz ist weit größer) ein Wechsel von analogen Rundfunkkanälen auf breitbandige, digitale Verbreitungskanäle Grundvoraussetzung, da Erstere bereits heute an ihre Grenzen stoßen, sodass insbesondere zu Hauptverkehrszeiten eine Vorselektion der Meldungen stattfinden muss. In der Richtlinie 2010/40/EU des Europäischen Parlaments und des Rates (2010) wird als vorrangige Maßnahme u. a. gefordert, dass den Verkehrsteilnehmern europaweit sicherheitswirksame Verkehrsinformationen kostenfrei zur Verfügung stehen sollen. Eine Abgrenzung der Funktionalitäten zu kostenpflichtigen Services, die über den o. g. Mindestumfang hinausgehen, steht derzeit noch aus. Hierfür sind quantifizierte Aussagen zu den Sicherheitswirkungen von digitalen Verkehrswarnungen erforderlich, die bislang nicht ermittelt wurden.

Entsprechende Verkehrsinformationen müssen zuverlässig vorliegen sowie zeitlich und räumlich auf das aktuelle Stauende abgestimmt sein (BOGENBERGER, 2003). Eine Methodik zur Ermittlung der Qualität von Verkehrsinformationen wurde z. B. von BOGENBERGER et al. (2009) vorgestellt. Für die Bereitstellung einer Warnung vor stromaufwärtigen Stauenden (als dem Ort, an dem die Fahrer beim Erreichen des Staus abbremsen müssen) mittels kooperativer Systeme konnte eine rechtzeitige Reduzierung der Geschwindigkeiten beobachtet werden (BRENZEL et al., 2001; INVENT, 2006). Viele Verkehrsunfälle sind auf Unachtsamkeit und Fehleinschätzungen der Fahrer zurückzuführen: So wurde im Rahmen des Projektes DIWA (Direkte Information und Warnung für den Autofahrer) ermittelt, dass gezielte Informationen mit lokaler Gefahrenwarnung eine Reduzierung der Unfallzahlen bewirken können (NEUHERZ et al., 2006). Für Straßenbaustellen, die eine häufige Ursache für Staus sind, wurde im Rahmen des Projekts AKTIV ein

Fahrerassistenzsystem zur Verbesserung der Längsdynamik sowie zur Gefahrenwarnung erprobt (KRANKE et al., 2010).

Zu der prototypischen Darstellung und Anzeige von Stauendeinformationen existieren bislang Erfahrungen aus Forschungsvorhaben wie z. B. INVENT (Intelligenter Verkehr und nutzergerechte Technik), AKTIV (Adaptive und Kooperative Technologien für den Intelligenten Verkehr), DIWA und sim^{TD} (Sichere Intelligente Mobilität Testfeld Deutschland): Daraus resultierende Umsetzungsfragen sind jedoch noch weitgehend ungeklärt.

In Anbetracht des dargestellten Standes der Technik sind die vorrangigen Ziele des Projektes FE 82.371/2009 „Konzept zur Ermittlung der Sicherheitswirkung von digitalen Verkehrsinformationen“ die Erstellung verschiedener Konzepte zur Warnung vor Stauenden und der Vergleich der Warnkonzepte hinsichtlich ihrer Wirksamkeiten zur Erhöhung der Fahrsicherheit. Der Fokus der Bearbeitung liegt auf der Untersuchung von on-trip auf Autobahnen bereitgestellten Stauendewarnungen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Um die oben genannten Zielsetzungen zu erfüllen, wird das nachfolgend dargestellte Vorgehen gewählt. Die wesentlichen Inhalte und Zusammenhänge werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Der Fokus der Arbeit liegt auf Stauendewarnungen, die den Verkehrsteilnehmern auf Autobahnen bereitgestellt werden.

Die Grundlagen für die Bearbeitung des Forschungsprojektes werden in Kapitel 2 des vorliegenden Berichtes dargestellt. Es werden die „Verkehrsflusstheorie und Fahrsicherheit am Stauende“ (Kapitel 2.2) sowie die Thematik „Verkehrsinformationen“ (Kapitel 2.3) untersucht.

Im Bereich der Verkehrsflusstheorie werden insbesondere die Ausbreitungen und charakteristischen Merkmale von Staus sowie der Prozess der Annäherung von Fahrern an Stauenden analysiert. Die Ergebnisse ermöglichen in der weiteren Projektbearbeitung eine realistische Simulation der verkehrlichen Bedingungen bei der Annäherung an Stauenden und im Stau. Zudem werden die Erkenntnisse zu der Stauausbreitung bei der Festlegung von Warndistanzen diskutiert sowie unterschiedliche Stauarten und Stauenden differenziert.

In Kapitel 2.3 werden die technischen und organisatorischen Hintergründe bei der Generierung und Übertragung von Verkehrsinformationen beschrieben. Darauf basierend werden verschiedene Warnkonzepte entwickelt. Bei der Darstellung von Möglichkeiten zur Erfassung und Kodierung von Staus in Verkehrsinformationen wird zwischen dem jetzigen Stand der Technik und zukünftig verfügbaren Möglichkeiten unterschieden. Daraus werden unterschiedlich präzise Warninhalte von Verkehrsinformationen abgeleitet. Verschiedene technische Alternativen zur Meldungsübertragung werden recherchiert und die Ergebnisse in der Versuchsvorbereitung genutzt, um unterschiedliche Distanzen zur Warnungsbereitstellung in Abhängigkeit der technischen Gegebenheiten zu entwickeln und bei der Durchführung des Versuchs anzuwenden.

Auf Basis der Rechercheergebnisse erfolgen die Festlegungen der zu untersuchenden Warnstrategien, des Versuchsdesigns und des Bewertungskonzepts. Hierfür werden verschiedene Varianten für Warnstrategien abgeleitet, die mittels Fahrsimulatorversuchen untersucht werden (dargestellt in Kapitel 3). Variiert werden dabei die Warnpräzision und die Warndistanz, wobei nicht berücksichtigt wird, ob die Alternativen derzeit technisch und/oder organisatorisch realisierbar sind.

Wie sich die Verkehrsteilnehmer in praxisnahen Verkehrssituationen bei der Bereitstellung unterschiedlicher digitaler Stauendwarnungen verhalten, wird mittels Fahrsimulatorversuchen mit Probanden ermittelt. Im Rahmen der Simulatorstudie werden Daten aufgezeichnet und als Indikatoren zur Beschreibung der Fahrsicherheit ausgewertet. Die Entwicklung und Anwendung des Bewertungskonzepts sind in den Kapiteln 4 bis 6 beschrieben:

Zum einen werden in Kapitel 5 die Rohdaten einzelner Indikatoren in einem statistischen (deskriptiv, grafisch und inferenzstatistisch) Vorgehen grafisch dargestellt und objektiv interpretiert. Die Daten werden mittels inferenzstatistischer Verfahren geprüft, um zufallskritisch abgesicherte Aussagen zu der Wirkung von Stauendwarnungen in ausgewählten Variablen der Stauannäherung zu erzielen. Diese Ergebnisse werden grafisch dargestellt und verbal beschrieben. Die ausführlichen Ergebnisse aus der Inferenzstatistik werden im Anhang bereitgestellt.

Des Weiteren wird unter Berücksichtigung mehrerer Indikatoren eine integrierte statistische Auswertung durchgeführt. Das zur Wirksamkeitsermittlung

und zum Variantenvergleich gewählte statistische Verfahren TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, PETERS et al., 2007) wird in Kapitel 4 beschrieben. Das TOPSIS-Verfahren zeichnet sich dadurch aus, dass ein standardisierter Vergleich der Ausprägungen verschiedener Indikatoren durchgeführt werden kann. TOPSIS ermöglicht damit den Vergleich der Wirkungen der geprüften Warnkonzepte auf die Verkehrssicherheit anhand mehrerer Indikatoren. Das TOPSIS-Verfahren bzw. die erzielten Resultate werden in Kapitel 6.5 auf Plausibilität überprüft.

Gemäß Projektauftrag wird mittels Fahrsimulator ein System für on-trip-Stauwarnungen untersucht, das sich teilweise auf Informationen stützt, die aufgrund technischer Restriktionen in dieser Genauigkeit derzeit in der Praxis (noch) nicht verfügbar sind. Aus diesem Grund erfolgen in Kapitel 7 eine kritische Einordnung der erzielten Ergebnisse und die Ableitung des identifizierten erweiterten Forschungsbedarfs. Der Vergleich der Sicherheitswirkungen der untersuchten Warnkonzepte wird als zentrales Ergebnis des Forschungsprojektes in Kapitel 7.2 dargestellt. Unter dem Aspekt einer Umsetzung der Warnkonzepte in die Praxis erfolgt in Kapitel 7.3 eine kritische Einordnung der untersuchten Warnalternativen im Vergleich zu den derzeit vorherrschenden technischen und organisatorischen Randbedingungen.

Zudem werden der gewählte Versuchsaufbau und das Bewertungskonzept kritisch hinterfragt sowie Hinweise zu der Interpretation der gewonnenen Ergebnisse gegeben. Die Analyse liefert Hinweise auf erweiterten Forschungsbedarf (vgl. Kapitel 7.6).

Ergänzende Ergebnisse und Informationen des Versuchs, die als Basis für weitergehende Untersuchungen dienen können, sind in einem Anhang verfügbar.

1.3 Aufgabenteilung

Die Partner verfolgten im Rahmen der Projektarbeit jeweils inhaltliche und methodische Schwerpunkte: Die TRANSVER GmbH zeigte sich für die verkehrstechnischen Aspekte und die Bewertung mittels TOPSIS zuständig, während die WIVW GmbH für den Themenkomplex Fahrsimulation sowie ergonomische Aspekte hauptverantwortlich war.

Dem vorliegenden Dokument liegen somit die folgenden Zuständigkeiten zugrunde:

- Kapitel 1, 2, 7 und 8: Gemeinsame Arbeit,
- Kapitel 3 und 5: WIVW GmbH,
- Kapitel 4 und 6: TRANSVER GmbH.

Das Forschungsvorhaben wurde in intensiver Abstimmung bearbeitet, sodass die verschiedenen für die Fragestellung relevanten Arbeitsgebiete (Forschungsmethodik, Verkehrstechnik, Kognitive Ergonomie etc.) in vorliegendem Bericht zusammengeführt wurden.

2 Verkehrstechnische Grundlagen

2.1 Einordnung und Bedeutung

Die Arbeiten zur Versuchsvorbereitung und -durchführung basieren in weiten Teilen auf den recherchierten Grundlagen zu:

- Stautentstehung und -ausbreitung (Kapitel 2.2): Um ein System zur Stauendewarnung zu entwickeln und zu etablieren, ist die Kenntnis erforderlich, welche Verkehrszustände zu unterscheiden sind sowie unter welchen Bedingungen Staus entstehen und sich ausbreiten. Von Projektrelevanz sind insbesondere verschiedene Arten von Stauenden und die Fahrsicherheit bei der Annäherung an Stauenden. Die Ergebnisse werden verwendet, um die Stausituationen in den Fahrsimulatorversuchen realitätsnah darzustellen. Aus den Darstellungen zum Fahrverhalten und der Fahrsicherheit bei der Annäherung an Stauenden soll die Notwendigkeit digitaler Stauendewarnungen deutlich werden. Die Ergebnisse werden verwendet, um verschiedene Verkehrsbedingungen und Stauendeararten für die Fahrsimulation (Kapitel 3) festzulegen.
- Verkehrsinformationen (Kapitel 1.1): Der Fokus liegt hier insbesondere auf den technischen Rahmenbedingungen zur Generierung und Versendung von (digitalen) Verkehrsinformationen. Die Erkenntnisse sind bei der Entwicklung der Warnkonzepte für die Festlegung von Warndistanzen und die verfügbare bzw. erforderliche Präzision von Meldungsinhalten hilfreich.

Der Bezug der Grundlagen zu der vorliegenden Aufgabenstellung wird jeweils direkt hergestellt,

wobei der Verkehr auf Autobahnen im Fokus der Untersuchung steht.

2.2 Stau und Stauende

2.2.1 Verkehrliche Grundlagen

Verkehrszustände

Die Bewegungsvorgänge des Verkehrs (beispielsweise Beschleunigen, Fahren, Bremsen) werden als Verkehrsablauf bezeichnet. Die Bewegung mehrerer Fahrzeuge ist definiert als Verkehrsfluss. Dieser kann mikroskopisch über Kenngrößen für einzelne Fahrzeuge oder makroskopisch mittels Größen, die über einen bestimmten Zeitraum gemittelt wurden, bestimmt werden (SCHNABEL et al., 1997).

Eine Grundlage für die Information über den Verkehrsablauf ist die Einteilung des Verkehrsablaufs in Verkehrslagestufen. Hierfür existieren unterschiedliche Praxisanwendungen und Regelwerke:

Im Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen (HBS) wird der Verkehr in sechs Qualitätsstufen des Verkehrsablaufs (QSV) in Abhängigkeit der querschnittsbezogenen Geschwindigkeiten (V) und Verkehrsdichten (D) charakterisiert.

Im „Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrsrechnerzentralen und Unterzentralen“ (MARZ) werden ebenfalls Geschwindigkeit und Verkehrsdichte als Entscheidungskriterien verwendet, der Verkehrsablauf wird in die folgenden vier Verkehrsstufen untergliedert (BASt, 1999):

- frei,
- dicht,

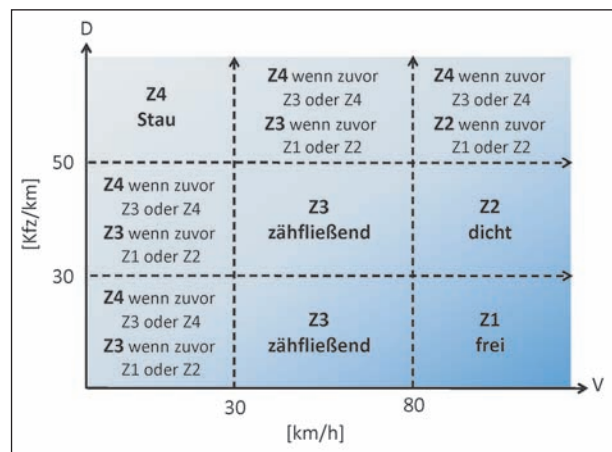


Bild 1: Einteilung der Verkehrsstufen nach MARZ (gemäß BASt, 1999)

- zähfließend,
- Stau.

Bild 1 zeigt die Einteilung der Verkehrsstufen nach MARZ (BASt, 1999).

Stauentstehung und -ausbreitung

In Abhängigkeit des Geschwindigkeitsniveaus und der Anzahl an Geschwindigkeitseinbrüchen wurden auf Basis empirischer Untersuchungen, die im Auftrag der BMW AG durchgeführt wurden, folgende Stauarten unterschieden (TRANSVER, 2010):

- Kurzer Geschwindigkeitseinbruch:
Der Fahrer muss bremsen, kann jedoch schnell wieder beschleunigen.
- Stop-and-Go:
Der Fahrer muss in einem Streckenabschnitt mehrmals bremsen und stärker beschleunigen.
- Breiter Stau:
Der Fahrer muss über lange Zeit eine sehr niedrige Geschwindigkeit fahren.
- Stehender Verkehr:
Der Fahrer steht über eine lange Zeit am gleichen Ort.

Diese Stauarten spiegeln die Durchfahrung von Stauereignissen aus Fahrersicht wider. Für die vorliegende Fragestellung interessiert primär die Annäherung an das Stauende (vgl. Kapitel 2.2.2). Um Stauendewarnungen im Rahmen des Projektes umfassend zu behandeln, ist die Kenntnis erforderlich, unter welchen Bedingungen Staus auf Autobahnen in der Regel entstehen, die Stauausbreitung ist für die Untersuchung der Annäherung an Stauenden ebenfalls bedeutsam.

Generell gelten für den Verkehrsablauf auf Autobahnen neben den grundsätzlichen Vorgaben zum Führen von Fahrzeugen insbesondere das Rechtsfahrgebot (§ 2 Straßenverkehrsordnung (StVO)), das Fehlen allgemeiner Geschwindigkeitsbegrenzungen für Pkw (§ 3 StVO) sowie die Vorgabe eines ausreichenden Sicherheitsabstands zum vorausfahrenden Fahrzeug (§ 4 StVO).

Im Allgemeinen wird eine sog. Richtzeitlücke in Höhe von 2 Sekunden empfohlen (SCHNABEL et al., 1997). In SCHICK (2003) wurde die in Formel 1 beschriebene Berechnung aufgestellt. Demnach würde sich, ohne Berücksichtigung der Länge der

Fahrzeuge, je Fahrstreifen eine Kapazität von 1.800 Kfz/h einstellen, sofern sich alle Fahrzeuge durchgängig gemäß der 2-Sekunden-Richtzeitlücke verhalten.

$$q = \frac{3.600 \text{ s/h}}{2 \text{ s/Kfz}} = 1.800 \text{ Kfz/h}$$

Formel 1

Diverse Analysen realer Verkehrsdaten der Bundesautobahnen (BAB) konnten die Größenordnung dieser theoretischen Herleitung bestätigen. Aufgrund der längeren Lkw ist die Kapazität auf dem rechten Fahrstreifen niedriger (TREIBER et al., 2010b).

Die aktuelle Kapazität beeinflusst in Zusammenhang mit der Verkehrsbelastung unmittelbar die Entstehung von Verkehrsstaus:

Umfangreiche empirische Untersuchungen zum Verkehrsablauf auf Autobahnen lieferten die folgenden allgemeinen Erkenntnisse zu der Stauentstehung (TREIBER et al., 2010b). Demnach entstehen Staus meist bei hohem Verkehrsaufkommen in Kombination mit einer kapazitätseinschränkenden Engstelle. Eine Engstelle kann beispielsweise sein:

- Reduktion der Fahrstreifenanzahl,
- Baustelle,
- Zu- oder Abfahrt auf Autobahnen,
- Anschlussstelle,
- Steigung,
- unfallinduzierte Engstelle (auch auf der Gegenfahrbahn),
- Störung im Verkehrsablauf (Unachtsamkeit, fehlerhafte Fahrstreifenwechsel, mangelnde Sicherheitsabstände, unangepasste Geschwindigkeit, überholende Lkw, ...).

KERNER (1999) ermittelte für breite Staus eine Reduzierung der Abflussverkehrsstärke/Kapazität, die typischerweise bei ca. 2/3 der Verkehrsstärke des freien Verkehrs liegt. Hieraus resultieren typische Auflösungsgeschwindigkeiten an der stromabwärtigen Staufont. Die Ausbreitung von Verkehrsstörungen hängt von der vorherrschenden Verkehrslage ab (KERNER, 2004):

- Bei freiem Verkehr breiten sich Verkehrsstörungen stromabwärts aus. Die resultierende charakteristische Geschwindigkeit der Stauausbrei-

tung ergibt sich aus den mittleren Geschwindigkeiten der Fahrzeuge.

- Im gestauten Verkehr breiten sich Störungen aufgrund der Reaktionen der Fahrer auf das jeweilige Vorderfahrzeug entgegen der Fahrrichtung aus. Auf deutschen Autobahnen aufgezeichnete Verkehrsdaten zeigen, dass sich die stromabwärtige Staufront größtenteils konstant mit ca. -15 km/h fortpflanzt (vgl. auch Bild 3).

Die Rekonstruktion von raum-zeitlichen Staumustern lieferte die folgenden bemerkenswerten Regelmäßigkeiten (TREIBER et al., 2010a), die v. a. für die automatisierte Erkennung und Prognose der Ausbreitung von Staus für Stauendwarnungen berücksichtigt werden müssen:

- Der Bereich mit gestautem Verkehr liegt entweder mit einer konstanten Ausdehnung von ca. 1 bis 2 km vor oder er ist stärker ausgedehnt und weist eine variable zeitliche Ausbreitung auf.
- Die Stelle des stromabwärtigen Übergangs von gestauten in freien Verkehr ist entweder an die Engstelle gebunden (siehe Bild 2) oder bewegt sich mit ca. -15 km/h.
- Diese Ausbreitungsgeschwindigkeiten gelten auch für räumlich begrenzte Staus, sodass sich diese entweder als Stop-and-Go-Welle stromaufwärts bewegen oder ortsfest bleiben.
- Die stromaufwärtige Staufront als Übergangsbereich von freien in gestauten Verkehr besitzt keine charakteristische Geschwindigkeit. Sie kann sich sowohl in stromaufwärtiger als auch in stromabwärtiger Richtung ausbreiten. Das hängt von der Kapazität der Engstelle sowie der stromaufwärtigen Verkehrsnachfrage ab. In Bild 2 ist die stromabwärts gerichtete Ausbreitung mit relativ gleichmäßigen Geschwindigkeiten für einzelne Stauwellen erkennbar.

Aus Bild 2 lässt sich zudem erkennen, dass die Stauursache ggf. bereits nicht mehr existiert, wenn die Fahrzeuge, die den Stau durchfahren, den Ort der ursprünglichen Stauursache erreichen (TREIBER et al., 2010b): Zum Beispiel gilt für Fahrzeuge, die um ca. 10:00 Uhr im Bereich der Anschlussstelle (AS) Allershausen in gestauten Verkehr einfahren, dass am Ort der Störungsursache im Bereich des AK Neufahrn keine Verkehrsstörung mehr vorliegt.

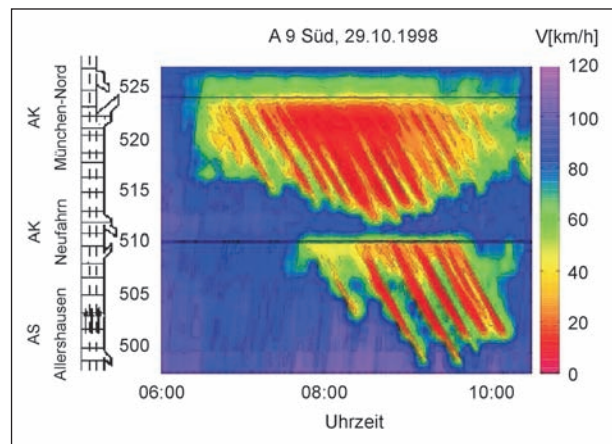


Bild 2: Raum-zeitliches Geschwindigkeitsprofil auf der BAB A 9 (TREIBER et al., 2010)

Gemäß KERNER (1999) liegt der Zufluss zu einer Störung häufig als so genannter synchronisierter Verkehr vor. Dieser Verkehrszustand unterscheidet sich vom freien Verkehrsablauf dahingehend, dass relativ viele Fahrzeuge vorhanden sind und deshalb aufgrund geringerer Weglücken die Fahrstreifen nicht immer wie gewünscht frei gewechselt werden können. Dies führt zu relativ identischen Geschwindigkeiten auf allen Fahrstreifen, dem synchronisierten Verkehrsfluss. Der Vergleich von Stop-and-Go-Verkehrsablauf und synchronisiertem Verkehrszustand zeigt, dass bei Stop-and-Go-Verkehren jedes Fahrzeug innerhalb des Staus für eine bestimmte Zeitdauer komplett stehen bleibt (CHOWDHURY et al., 2000).

Für die in Kapitel 3 beschriebene Fahrsimulatorstudie zeigt sich, dass sich die Entstehung und Ausbreitung von Staus sehr heterogen ausgeprägt sein könne und sich nicht verallgemeinert und allgemeingültig beschreiben lassen. Diese unterschiedlichen Ausprägungen von Staus sind bei der Entwicklung eines Stauende-Warnsystems zu berücksichtigen.

2.2.2 Grundlagen zum Stauende

Begriffsbestimmung

Da unterschiedliche Interpretationen möglich sind, ist im Kontext der Aufgabenstellung zunächst die Begrifflichkeit „Stauende“ zu definieren:

- Zeitliches Stauende:
Zeitpunkt der Auflösung eines Stauereignisses.
- Räumliches Stauende:
Einfahrtsbereich in den Stau aus Fahrersicht (stromaufwärtige Staufront) oder Ausfahrt aus

gestautem Bereich, die stromabwärtige Staufront (TREIBER et al., 2010b).

In Bild 3 ist im unteren Teil eine schematische Zeitreihe von Geschwindigkeiten an einem Querschnitt dargestellt. Der obere Teil der Grafik zeigt am Beispiel eines gestauten Bereichs die verwendeten Begrifflichkeiten.

Für die vorliegende Themenstellung interessiert primär die Annäherung an stromaufwärtige Staufonten mit/ohne Stauendewarnung. Der Begriff Stau-

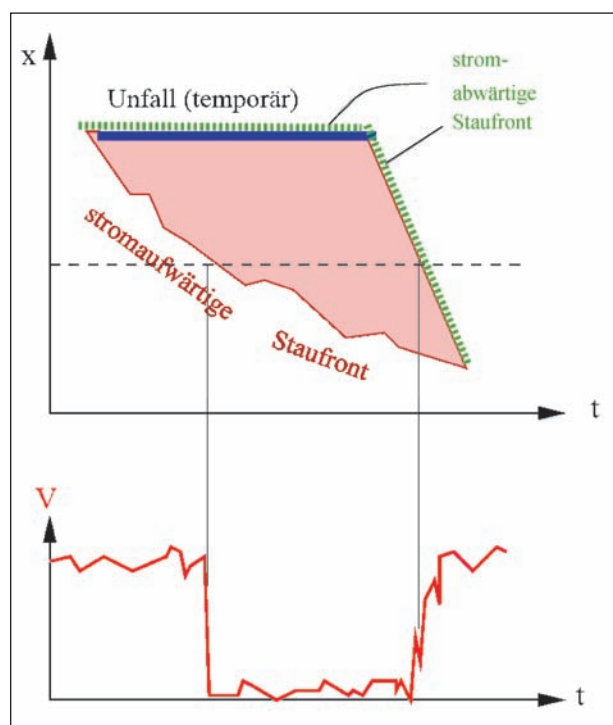


Bild 3: Schematische Zeitreihe der Geschwindigkeit an einem Querschnitt (TREIBER et al., 2010b)

ende ist in vorliegender Arbeit in räumlichem Kontext zu verstehen, er soll nachfolgend für den Übergang zwischen freiem Verkehr und gestautem Verkehr verwendet werden (TREIBER et al., 2010b).

Ergänzend gilt KERNER (1999), der das Stauende als Region definiert, in der sich die Verkehrsstärke, die Verkehrsdichte und die mittlere Geschwindigkeit innerhalb eines sehr kurzen Streckenstückes stark verändern.

Unterscheidung von Stauendarten

Vereinfacht können aufgrund der verkehrlichen Bedingungen in Stauanfahrten zwei Arten von Stauenden unterschieden werden (in Anlehnung an KIM, 2002; BULD, 2003; KERNER, 2004):

- Stauenden mit zufließendem synchronisiertem Verkehr (sog. weiches Stauende):
Übergang vom synchronisierten zum gestauten Verkehr mit einer relativ sachten Geschwindigkeitsreduktion aus der Sicht eines Fahrers bei einer Annäherung an ein Stauende (Geschwindigkeitsbereich: 0 bis 70 km/h).
- Stauenden mit zufließendem freiem Verkehr (sog. hartes Stauende):
Übergang vom freien zum gestauten Verkehr mit einem relativ plötzlichen Geschwindigkeitseinbruch (Geschwindigkeitsbereich: 0 bis 110 km/h).

Tabelle 1 fasst qualitative Parameter zur Unterscheidung der Verkehrszustände freier Verkehr und synchronisierter Verkehr zusammen (ausgehend

Kriterium	Verkehrszustand	
	Weiches Stauende (synchronisierter Verkehr)	Hartes Stauende (freier Verkehr)
Geschwindigkeit auf Fahrstreifen	Geringer als im freien Verkehr, aber noch relativ hohe Werte möglich	Hohe Werte, Geschwindigkeit relativ frei wählbar
Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Fahrstreifen	Geschwindigkeiten auf mehreren Fahrstreifen sind vergleichbar	Höhere Geschwindigkeiten auf linkem Fahrstreifen
Spurwechsel	Häufige Spurwechsel	Fahrzeuge können Fahrstreifen frei wechseln
Auslastungen der Fahrstreifen	Unterschiede zwischen Fahrstreifen in der Auslastung nähern sich an	Höhere Auslastung auf rechtem Fahrstreifen
Fahrzeugkolonnen	Abstände zwischen Fahrzeugen größer, kleinere Kolonnen	Teilweise lange Kolonnen mit geringen Abständen
Charakteristik des Geschwindigkeitseinbruchs	Zuerst geringe Reduktion der Geschwindigkeit, dann Einbruch	Abrupter Geschwindigkeitseinbruch

Tab. 1: Qualitative Unterschiede zwischen den Verkehrszuständen synchronisierter Verkehr und freier Verkehr beim Übergang zum gestauten Verkehr

von Kapitel 2.2.1 sowie Arbeiten von KERNER et al., 1997; NEUBERT et al., 1999; KNOSPE et al., 2002; LUBASHEVSKY et al., 2002).

Des Weiteren können Stauenden nach der Streckengeometrie unterschieden werden. So können Stauenden durch den Fahrer von weitem sichtbar sein (z. B. auf gerader Strecke), in dieser Studie als „unverdecktes Stauende“ bezeichnet, oder vom Fahrer erst spät erkennbar sein (z. B. bei Stauenden in Kurven), in dieser Studie als „verdecktes Stauende“ bezeichnet. Dementsprechend steht dem Fahrer eine geringere Reaktionszeit bzw. ein geringer Reaktionsweg zur Verfügung.

Es lassen sich harte bzw. verdeckte sowie weiche bzw. unverdeckte Stauenden unterscheiden, die sich im Hinblick auf die Annäherung an die Stauenden aus Fahrersicht wesentlich unterscheiden. Es wurden verschiedene Kenngrößen identifiziert, die eine Simulation dieser verkehrlichen Situationen erlauben und für die Fahrer bei der Annäherung an die Stauenden charakteristisch sind. Der Prozess der Annäherung an Stauenden wird im Folgenden näher behandelt.

Annäherung an Stauenden

Die Analyse des Prozesses der Stauannäherung ist für den Untersuchungsgegenstand der Stauendewarnungen von herausragender Bedeutung. Die Ergebnisse gehen in die Einordnung der Fahr-sicherheit am Stauende ein (siehe Kapitel 2.2.3).

Der gesamte Prozess der Annäherung an Stauenden aus Fahrersicht wurde von van DRIEL (2007) wie folgt beschrieben: Nähern sich Fahrer einem Stauende, wird eine Reduktion der Fahrzeuggeschwindigkeit erforderlich. Dies wird nicht unmittelbar bei Erkennung des Stauendes geschehen, da immer Reaktionszeiten sowie weitere Verzögerungen auftreten. In der Regel sehen die Fahrer das Stauende im Voraus und beginnen mit dem Abbremsen vor der Ankunft am Stauende.

Die Annäherung an ein Stauende ist aus Sicht des Fahrers als eine dynamische Kontrollaufgabe zu betrachten: Fahrer müssen Veränderungen in der Verkehrsumgebung kontinuierlich überwachen, um Kollisionen mit anderen Fahrzeugen oder stehenden Objekten zu vermeiden (KOORNSTRA, 1993; van der HULST et al., 1999). Eine kritische Rolle spielt dabei die Lenkung der Aufmerksamkeit: Aufgrund der aktuellen Informationen aus der Ver-

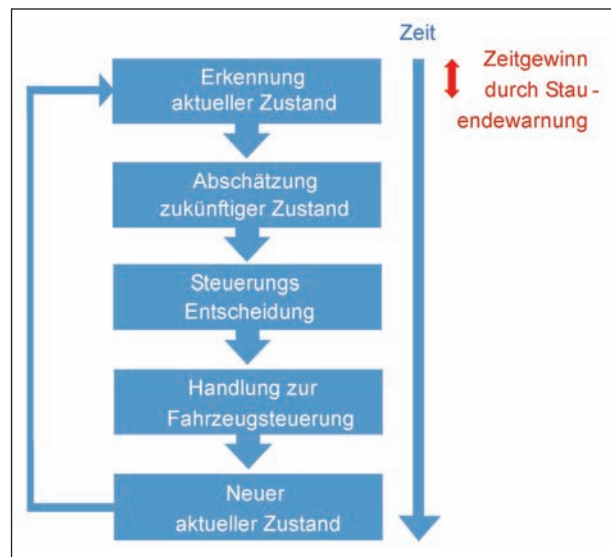


Bild 4: Fahraufgabe als Steuerungsmodell (angelehnt an MINDERHOUD, 1999)

kehrssituation und dem Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer werden Veränderungen in diesen abgeschätzt, um das eigene Verhalten an die zukünftigen Bedingungen anpassen zu können („traffic adjustment“, KLEBELSBERG, 1982).

Bild 4 stellt den Fahrprozess in Anlehnung an MINDERHOUD (1999) als Steuerungsmodell dar. Eine Stauendewarnung könnte demnach die Fahraufgabe bei der Gefahrenerkennung unterstützen, da bei der Ereigniserkennung durch vorherige Informationen Zeitvorteile resultieren können.

Einerseits ziehen manche Umweltreize automatisch Aufmerksamkeit auf sich, z. B. durch rapide Änderungen von Farbe oder Gestalt von Objekten (THEEUWES, 1990). In diesem Sinne können die Aktivierung der Bremslichter oder eine schnelle Veränderung des Netzhautbildes eines vorausfahrenden Fahrzeugs automatisch Aufmerksamkeit auf sich ziehen (LIEBERMANN et al., 1995). Die Aufmerksamkeit einer Person wird in diesem Fall durch das Vorhandensein bestimmter Reizkonfigurationen gesteuert. Dies wird auch zusammenfassend als „Salienz“ von Stimuli bezeichnet (d. h. das Potenzial von Stimuli, Aufmerksamkeit auf sich zu ziehen, sog. exogene Aufmerksamkeitsprozesse; TRICK et al., 2004).

Andererseits hängt die Aufmerksamkeitssteuerung auch von den Erwartungen eines Fahrers ab: Aufgrund der Erfahrung wissen Fahrer beispielsweise, an welchen Orten für die Fahraufgabe relevante Informationen zu erwarten sind und wie sich die Fahrsituation in der nahen Zukunft entwickeln wird (sog.

endogene Aufmerksamkeitsprozesse; van der HULST et al., 1999; TRICK et al., 2004). So werden Verkehrszeichen oder andere Verkehrsteilnehmer schneller an erwarteten als unerwarteten Orten entdeckt (THEEUWES et al., 1993). Ähnlich führt die Erwartung, dass ein Abbremsen in naher Zukunft nötig sein wird, in Bremssituationen zu schnelleren Fahrerreaktionen (SCHWEITZER et al., 1995; van WINSUM, 1996). van der HULST et al. (1999) zeigten, dass Probanden schneller auf das Abbremsen eines Führungsfahrzeugs reagieren, wenn die Verkehrssituation Hinweise auf ein bevorstehendes Bremsen des Vorderfahrzeugs liefern, als wenn diese fehlen. Außerdem reduzierten in dieser Studie die Probanden die Fahrgeschwindigkeit und den Zeitabstand schon vor dem eigentlichen Bremsbeginn des Vorderfahrzeugs. Ähnliche Erwartungseffekte wurden von MUHRER et al. (2010) sowie von SCHMIDT und KRÜGER (2010) für Bremsmanöver beim Folgefahren berichtet. Wenn Hinweisreize auf ein bevorstehendes kritisches Ereignis fehlen, tendieren Fahrer dazu, zu kleine Folgeabstände zu wählen und die Beobachtung des vorausfahrenden Fahrzeugs zu vernachlässigen (KNIPLING et al., 1992).

Die Wahrnehmung von Stauenden sowie adäquate Reaktionen darauf sind weiterhin gemäß REICHAERT (2001) unter anderem beeinflusst von

- der Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Stauende,
- der Einsehbarkeit der dem Verkehr gewidmeten Straßenverkehrsfläche,
- der Entfernung des Stauendes und
- der für Reaktionen verfügbaren Straßenverkehrsfläche.

Diese Befunde legen nahe, dass Fahrer durch Warnsysteme über bevorstehende kritische Fahrsituationen (wie z. B. Stauenden) zu informieren sind, um die Aufmerksamkeit der Fahrer gezielt zu steuern. Hierdurch kann mit höherer Wahrscheinlichkeit eine erfolgreiche Bewältigung der kritischen Fahrsituation erfolgen. Bisher liegen jedoch nur vereinzelte Studien zu Warnungen vor Stauenden bzw. zu Warnungen vor stehenden Objekten auf Autobahnen vor.

Im Rahmen der Untersuchung der Annäherung an Stauenden wurden im Rahmen der Projektbearbeitung zusätzlich Einzelfahrzeugdaten ausgewertet. Hierbei handelt es sich um Floating-Car-Daten

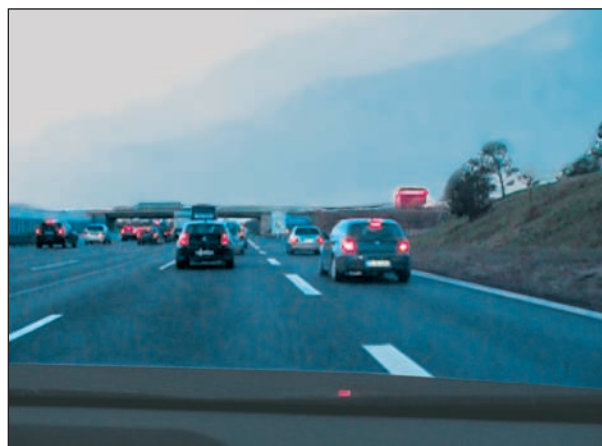


Bild 5: Beispielbild zu Videoaufzeichnung Fahrt BAB A 9 (DINKEL et al., 2010)

(FCD), die 2008 im Rahmen von mehreren Befahrungen auf der BAB A 9 und der BAB A 92 aufgezeichnet wurden (DINKEL et al., 2010). Ergänzt um durchgängige Videoaufzeichnungen aus der Fahrerperspektive (vgl. Bild 5) sind dies aussagekräftige Informationen zur Annäherung an Stauenden, die zur Validierung der folgenden Aussagen von KERNER (1999) beitragen: Im Laufe des Annäherungsprozesses ändern sich Geschwindigkeiten und Verkehrsstärken. Innerhalb eines Staus sind die Geschwindigkeiten und Verkehrsflüsse sehr gering, bis zu null. Im Gegensatz dazu können bei synchronem Verkehr die Geschwindigkeiten zwar relativ gering sein, jedenfalls sind sie aber größer null. Die Verkehrsstärke ist sehr hoch, sie kann bis zu dem Wert des freien Verkehrs betragen.

2.2.3 Fahrsicherheit am Stauende

Eine Erhöhung der Fahrsicherheit an Stauenden bzw. bei der Annäherung an Stauenden stellt das vorrangige Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit dar. Hierfür werden in den nachfolgenden Kapiteln die Ergebnisse der Recherche zu den Aspekten

- Gefahrenerkennung,
- Fahrzeugabstände und
- Studien zur Stauendewarnung

dargestellt.

Eine Analyse der an Stauenden eingetretenen Unfälle (ASSENMACHER, 2008) zeigte, dass diese Unfälle meist sehr schwerwiegende Folgen und eine im Vergleich zu weiteren Straßenverkehrsunfällen auf Autobahnen überdurchschnittlich hohe

Zahl an Verunglückten aufweisen. LEE et al. (2002) zeigten anhand einer Analyse lokal erfasster Geschwindigkeitsdaten, dass auf einem Abschnitt eines US-Highways ca. 88 % der Unfälle unter Beteiligung stehender oder schnell abbremsender Fahrzeuge eintreten. Ähnliche Befunde werden von OH et al. (2001) und ZHENG et al. (2010) berichtet. Offizielle Unfallstatistiken des Statistischen Bundesamts (2010) legen nahe, dass insbesondere zwei Unfallszenarien auf Autobahnen relevant sind, die jeweils 30 bis 40 % der Autobahnunfälle ausmachen:

(1) Unfälle mit schlecht einsehbarer Streckengeometrie und (2) Unfälle mit vorausfahrendem oder stehendem Verkehr.

Mögliche Fehler bei der Reaktion von Fahrern auf Hindernisse, die bspw. zu Unfällen an Stauenden führen können, sind gemäß REICHART (2001) neben weiteren Fehlern insbesondere

- eine unzureichende Gefahrenerkennung, woraus ausbleibende oder verspätete Reaktionen resultieren, sowie
- besonders bedeutend bei der Folgefahrt: Unzureichende Sicherheitsabstände.

Diese Aspekte werden nachfolgend diskutiert.

Gefahrenerkennung

Gemäß den in Kapitel 2.2.1 geschilderten Untersuchungsergebnissen von KERNER (1999) erfordert die Annäherung an Stauenden eine Geschwindigkeitsreduktion. Ist die Sicht des Fahrers eingeschränkt, beispielsweise durch eine unübersichtliche Verkehrsführung, Witterungseinflüsse oder vorausfahrende Fahrzeuge, die keine Sicht auf den vorausliegenden Verkehrsablauf ermöglichen (Lkw, Lieferwagen, getönte Rückscheiben etc.), kann das Stauende für den Fahrer sehr überraschend „erscheinen“ und einen starken Eingriff des Fahrers erfordern. Dementsprechend stellen diese sog. harten Stauenden aufgrund der Überraschung, hervorgerufen durch eine für den Fahrer unerwartete Situation (vgl. Kapitel 2.2.2), eine größere Gefahr dar.

Die Fahrsicherheit am Stauende ist beeinflusst von der Ausbreitungsgeschwindigkeit der stromaufwärtigen Staufront. Diese weist bei Stauauflösung keinen charakteristischen Wert auf (vgl. Kapitel 2.2.1) und ist von den Verkehrsbedingungen abhängig. Dies bedeutet für den Fahrzeuglenker: Je

negativer die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist, desto überraschender erscheint das Stauende, da die Stauwelle dem sich annähernden Fahrer entgegenkommt und damit die Zeit zum Reagieren kleiner wird. Hohe positive Ausbreitungsgeschwindigkeiten ermöglichen dem Fahrer in der Regel hingegen eine eher harmonische Annäherung an das Stauende.

Konkret sollen im Hinblick auf die Annäherung an die Stauenden in den Fahrsimulatorversuchen die Aspekte der Gefahrenerkennung berücksichtigt werden. Es zeigt sich, dass die in Kapitel 2.2.2 eingeführte Unterscheidung zwischen „harten“ (verdeckten) und „weichen“ (unverdeckten) Stauenden bei der Entwicklung der Simulatorstudie (dargestellt in Kapitel 3) zu berücksichtigen ist, da diese Differenzierung eine große Rolle bei der Gefahrenerkennung und der Fahrsicherheit bei der Stauannäherung spielt.

Fahrzeugabstände

Wie von REICHART (2001) beschrieben und zu Beginn des Kapitels dargelegt, haben die Fahrzeugabstände im Verkehrsfluss großen Einfluss auf die Verkehrs- bzw. Fahrsicherheit. Wie nachfolgend u. a. gezeigt werden soll, hängt die Ausprägung der Abstände zwischen Einzelfahrzeugen vom Verkehrszustand ab.

Die Abstände zwischen fahrenden Fahrzeugen können zeitlich (in Sekunden), räumlich (in Metern) oder als aufbereitete Größe (z. B. als Time To Collision, TTC) angegeben und interpretiert werden. Die räumlichen und zeitlichen Fahrzeugabstände entsprechen sich und sind geschwindigkeitsabhängig.

Die Größe TTC wird aus dem räumlichen Abstand und den gefahrenen Geschwindigkeiten hintereinanderfahrender Fahrzeuge bestimmt (vgl. Formel 2) und häufig als Indikator für die Verkehrssicherheit verwendet (z. B. STEINHOFF, 2003).

$$TTC = \frac{\text{Nettoabstand}}{\text{Geschwindigkeitsdifferenz}} \quad \text{Formel 2}$$

Erkenntnisse der Literaturrecherche zu den Fahrzeugabständen im Hinblick auf die Fahrsicherheit an Stauenden werden im Folgenden dargestellt.

Bild 6 zeigt die auf der BAB A 1 ermittelten Zeitlücken bei unterschiedlichen Verkehrsdichten (NEUBERT et al., 1999). Im oberen Teil der Grafik ist

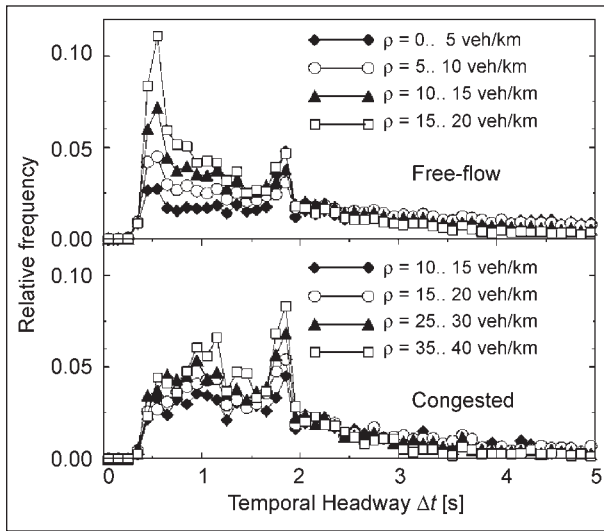


Bild 6: Verteilung der Zeitlücken für den freien und stockenden Verkehr auf der BAB A 1 (NEUBERT et al., 1999)

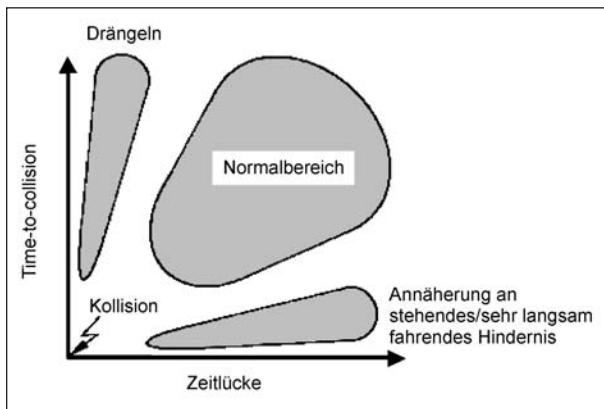


Bild 7: Modellvorstellung zweidimensionaler Sicherheitsraum aus Zeitlücke und TTC (FILZEK, 2002)

freier Verkehr dargestellt. Hier treten am häufigsten Zeitlücken von ca. 0,5-0,8 s auf, was der Fahrt mit sehr geringem Abstand in Fahrzeugpulks entspricht, sowie bei ca. 1,8 s, was unterhalb des empfohlenen Sicherheitsabstands von 2 s liegt (vgl. Kapitel 2.2.1). Der untere Teil der Grafik zeigt die Zeitlückenverteilung bei gestautem Verkehr. Hier zeigt sich, dass die Zeitlücken von ca. 1,3 s und ca. 1,8 s am häufigsten vorkommen. Anhand der Grafik lässt sich somit aus den Verteilungskurven erkennen, dass der Anteil sehr geringer Zeitlücken bei gestautem Verkehrsfluss abnimmt.

Gemäß FILZEK (2002) eignen sich die Zeit- bzw. Weglücken zwischen Fahrzeugen als Indikatoren, um die Fahrsicherheit abzuschätzen.

In Bild 7 ist ein zweidimensionaler Sicherheitsraum dargestellt, der aus den Zeitlücken und TTC gebildet wird. Aus dem in Bild 7 dargestellten Sicher-

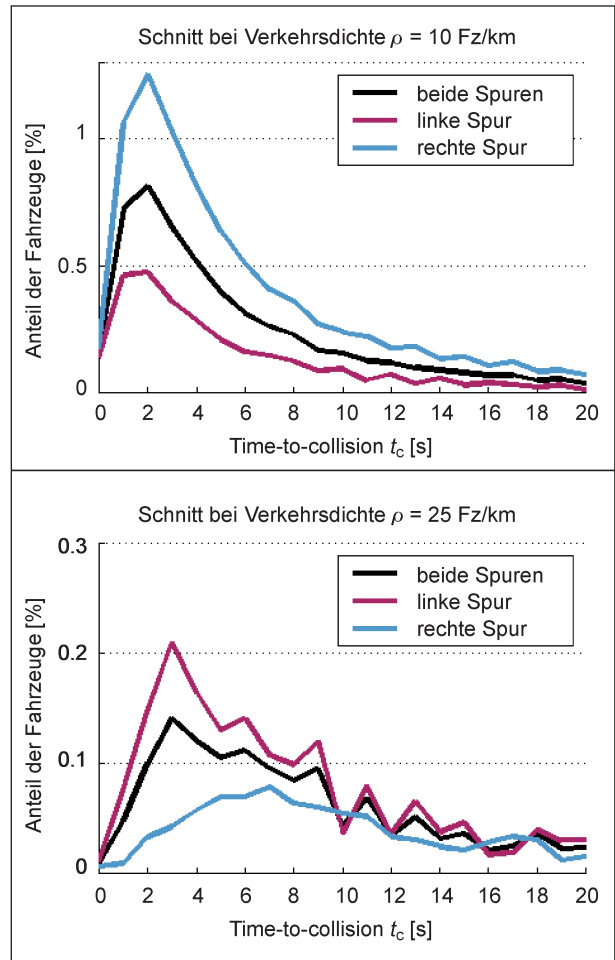


Bild 8: Verteilung der TTC bei freiem sowie bei gestörtem Verkehr auf der BAB A 92 (KIENZLE, 2001)

heitsraum ist ersichtlich, dass ungünstige Kombinationen aus geringen Werten für TTC und kleinen Zeitlücken die Bereiche mit geringen Verkehrssicherheiten bilden. Besonders gefährlich ist es demnach, wenn ein Fahrer bei kleinen Abständen stark bremsen muss.

Bild 8 stellt die Verteilungen der TTC bei freiem und bei gestörtem (im Beispiel beträgt die Verkehrsdichte 25 Fz/km) Verkehrsfluss dar (KIENZLE, 2001). In beiden Fällen treten hauptsächlich sehr geringe TTC auf, Werte höherer Ausprägungen kommen kaum vor.

Es zeigt sich, dass die kritischen sehr kleinen TTC-Werte bei gestörtem Verkehrsablauf seltener auftreten als bei freiem Verkehr. Im Hinblick auf den Aufbau der Fahrsimulatorstudie (siehe Kapitel 3) bedeutet dies, dass vor allem Stausituationen, die für den Fahrer bei vermeintlich „freier“ Fahrt mit geringen Zeitabständen unvermittelt auftauchen, ein Verkehrssicherheitsrisiko darstellen.

Relevante Studien zu der Stauendewarnung

In der Literatur lassen sich einige Arbeiten finden, in denen Verkehrsinformationssysteme entwickelt und mittels Fahrsimulatorversuchen bewertet wurden, beispielhaft sind zu nennen:

HOGEMA et al. (2000) haben Fahrsimulatorversuche durchgeführt, um die Auswirkungen von im Fahrzeug oder am Straßenrand angezeigten Warnungen zu untersuchen. Es wurde ermittelt, dass die Geschwindigkeitsreduktionen mit Bereitstellung von Stauwarnungen bereits in größeren Entfernungen vor dem Stauende begannen als bei den Fahrten ohne zusätzliche Informationen. Zudem wurden die maximalen Geschwindigkeitsreduktionen geringer und bei Annäherung an das Stauende nahmen die minimalen TTC (vgl. Kapitel 2.2.3) zu. Auch im Rahmen der Forschungsinitiative INVENT konnte durch Fahrsimulatorversuche gezeigt werden, dass bei der Warnung vor Stauenden die Geschwindigkeiten früher reduziert wurden (KRAUTTER et al., 2004). DAHMEN-ZIMMER et al. (2001) folgerten aus Befahrungen und Simulatorversuchen mit Warnanzeigen, dass mit der beobachteten Geschwindigkeitsreduktion zudem eine verbesserte Aufmerksamkeit und damit eine erhöhte Fahrsicherheit erzielt wurden. HOGEMA et al. (2000) berichten, dass im Rahmen eines Fahrsimulationsexperiments für die Indikatoren maximale Abbremsung und minimale TTC keine Verbesserungen ermittelt werden konnten. Ursache könnte sein, dass die Stauendewarnungen bereits einige Kilometer vor den Stauenden und damit zu früh angezeigt wurden.

Van DRIEL et al. (2007) sowie BROOKHUIS et al. (2009) untersuchten in einem Fahrsimulator einen sog. Congestion Assistant, bei dem erstmalig 5 km vor dem Erreichen eines Stauendes die Entfernung zum Stauende angezeigt wurde. Nach jeweils 0,5 km wurde die Entfernungsanzeige aktualisiert. Der Simulatorparcours wurde unter normalen bzw. unter eingeschränkten Sichtbedingungen (Nebel) durchfahren. Es wurde unter normalen Sichtbedingungen deutlich, dass die Fahrer mit Warnsystem eine geringere Annäherungsgeschwindigkeit an den Stau wählten als ohne Warnsystem. Da die Probanden im Nebel langsamer fuhren als bei normalen Sichtbedingungen, unterschieden sich in diesem Fall die Fahrtgeschwindigkeiten nach Warnungen nicht von nicht-assistierten Fahrten.

POPIV et al. (2010) zeigten ebenfalls in einer Simulatorstudie Vorteile von Warnungen vor einem Stauende hinter einer Kurve: Bei gewarnten Stau-

annäherungen bremsten Probanden früher und weniger stark als in nicht-assistierten Stauanfahrten.

ALM und NILSSON (2000) prüften schließlich in einer Simulatorstudie die Wirkung von präzisen und unpräzisen Warnungen vor einem Stauende. Unpräzise Warnungen wurden z. B. realisiert, indem rote Signale am Straßenrand eingeblendet wurden oder die Art der Gefahr genannt wurde (z. B. „Stau“). Präzise Warnungen konnten zudem eine Abstandsangabe umfassen (z. B. „Stau in 1 km“). Die Warnungen wurden erstmals 1 km vor Erreichen des Stauendes dargeboten. In allen Warnbedingungen wurde die Fahrgeschwindigkeit ab ca. 800 m vor Erreichen des Stauendes im Vergleich zur nicht-gewarnten Fahrt reduziert. Die Autoren fanden keine Wirkunterschiede zwischen den Warnbedingungen.

Aufgrund der veröffentlichten Studien zur Warnung vor Stauenden lassen sich die folgenden Punkte festhalten:

- Warnungen vor Stauenden bringen in den veröffentlichten Studien im Vergleich zu nicht-gewarnten Stauannäherungen einen Vorteil.
- Weniger klar ist die Frage der Warndistanz: Während in der Studie von van DRIEL et al. (2007) in einer Distanz von 5 km erstmals vor dem Stauende gewarnt wurde, wählten ALM und NILSSON (2001) eine Distanz von 1 km. POPIV et al. (2010) machten keine Angaben zur Warndistanz. Systematische Untersuchungen dieser Fragestellungen fehlen bislang.
- Eine weitere Frage stellt sich bezüglich der Präzision der Warnung. ALM und NILSSON (2001) testeten zwar verschiedene Warnkonzepte, konnten aber keine Unterschiede in der Geschwindigkeit 800 m vor dem Erreichen des Stauendes finden. Warnungen wurden in der Studie nur einmal gegeben und die Entfernung zum Stauende nicht aktualisiert wie etwa in der Studie von van DRIEL et al. (2007). Es stellt sich die Frage, ob präzise Warnungen mit einer solchen Positionsaktualisierung ebenfalls keinen Vorteil im Vergleich zu einer unpräzisen Warnung bringen.

Es zeigt sich, dass in den zitierten Studien meist einzelne Indikatoren separiert voneinander verglichen werden, ohne dass eine übergreifende und vergleichende Aussage auf Basis der Bewertung mehrerer Indikatoreausprägungen gebildet wurde.

2.2.4 Fazit

Stauenden stellen den Übergang zwischen freiem und gestautem Verkehr dar. Beim Durchfahren von Stauenden ändern sich die Geschwindigkeit und die Verkehrsdichte mehr oder weniger plötzlich. Fahrer müssen bei der Annäherung an Stauenden diese Veränderung in der Verkehrsumgebung bemerken, um eine adäquate Reaktion rechtzeitig einleiten zu können (z. B. Vergrößerung des Abstands zum Vordermann, Verringerung der Geschwindigkeit oder Spurwechsel). Wenn Fahrer diese Veränderung nicht bemerken bzw. nicht adäquat darauf reagieren, können Auffahrunfälle die Folge sein.

In der vorliegenden Arbeit sollen verschiedene Warnstrategien, die vor Stauenden warnen, miteinander verglichen werden. Aufgrund der vorliegenden Literatur können Stauenden danach unterschieden werden, welche verkehrlichen Bedingungen bei deren Erreichen vorliegen. Die Geschwindigkeit des Umgebungsverkehrs kann sich plötzlich ändern, wenn der Verkehr in einem freien Verkehrszustand zusammenbricht (sog. hartes Stauende). Auf der anderen Seite kann ein Zusammenbruch des Verkehrs auch graduell und weniger plötzlich aus einem synchronisierten Verkehrszustand heraus geschehen (sog. weiches Stauende). Bei der Reaktion auf ein stehendes oder plötzlich bremsendes Fahrzeug spielen Erwartungen der Fahrer eine Rolle: Erwarten Fahrer den Zusammenbruch des Verkehrs, sollten sie auf diesen besser vorbereitet sein und folglich schneller auf Stauenden reagieren. Genauso kann die Reaktion auf Stauenden durch die Streckengeometrie beim Erreichen von Stauenden erschwert sein (sog. verdecktes Stauende). Befinden sich Stauenden auf schlecht einsehbaren Positionen, steht dem Fahrer weniger Zeit zur Reaktion zur Verfügung. Sind Stauenden hingegen gut einsehbar, kann dies die Fahrerreaktion erleichtern (sog. „unverdecktes Stauende“). Ein Ziel der vorliegenden Studie ist folglich die Umsetzung von Stauenden mit verschiedenen verkehrlichen Bedingungen in der Stauanfahrt und verschiedenen Streckengeometrien beim Erreichen von Stauenden.

Die Recherche der Fahrzeugabstände (vgl. Kapitel 2.2.3) zeigt, dass vor allem bei freiem Verkehr geringe Zeitabstände auftreten. Basierend auf der Verkehrsflusstheorie (Kapitel 2.2.1) und der Unterscheidung verschiedener Stauendarten (vgl. Ka-

pitel 2.2.2) sind unterschiedliche Verkehrszustände (freier Verkehr, synchronisierter Verkehr) für die Annäherung an Stauenden zu unterscheiden. Aufgrund der in Kapitel 2.2.3 dargestellten Unterscheidung verschiedener Unfallszenarien, die sich aus den Unfallstatistiken des Statistischen Bundesamts (2010) ableiten lassen, werden für die Fahrsimulatorstudie (vgl. Kapitel 3) zwei Verkehrsbedingungen eingeführt:

- Verkehrsbedingung mit Verkehr:
Die Probanden fahren in einem Pulk mit mehreren Fahrzeugen auf das Stauende zu und erreichen dieses zusammen mit umgebendem Verkehr.
- Verkehrsbedingung ohne Verkehr:
Der Umgebungsverkehr wird kurz vor Erreichen des Stauendes abgeleitet und die Probanden erreichen das Stauende ohne umgebenden Verkehr.

2.3 Verkehrsinformationen

2.3.1 Einordnung und Bedeutung

Nachfolgend werden Stauendewarnungen im Kontext der Verkehrsinformationen bzw. -meldungen untersucht. Die Ergebnisse dienen dazu, den derzeitigen Stand der Technik und der Forschung im Bereich der Verkehrsinformationen, und somit den in Kapitel 3 gewählten Versuchsaufbau der Fahrsimulatorstudie, einzuschätzen zu können. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen verkehrlichen Grundlagen relevant.

Die Inhalte des vorliegenden Kapitels werden in Kapitel 7 zu einer „kritischen Einordnung der Ergebnisse“ der Simulatorstudie im Hinblick auf die derzeitige Praxis der Generierung und Verbreitung von Verkehrsinformationen verwendet.

Bislang erlauben die in der Praxis überwiegend eingesetzten Methoden der Erfassung und Kodierung der Ereignisse es nicht, die Verkehrsmeldungen örtlich präzise zu übermitteln bzw. Strategien und Prognosen zu berücksichtigen. Aus diesen Gründen werden aktuell in nationalen und europäischen Forschungsprojekten neue Kodierungsverfahren (z. B. TPEG) und Übertragungsverfahren (z. B. WLAN, DAB, Mobilfunk) erprobt. Projekte sind beispielsweise:

- AKTIV-VM (Adaptive und kooperative Technologien für den intelligenten Verkehr, Teilprojekt Verkehrsmanagement),
- SAFESPOT (Cooperative Systems for Road Safety),
- COOPERS (Co-operative Systems for Intelligent Road Safety),
- CVIS (Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems)
- DIWA (Direkte Information und Warnung für den Autofahrer).

Detaillierte Verkehrsinformationen als entgeltpflichtige Services, die auf Informationen von FPD und Navigationsgeräten mit Rückkanal basieren können, werden bereits heutzutage zur Verfügung gestellt (z. B. TOMTOM, 2011).

Um eine effektive Stauendewarnung realisieren zu können, bedarf es einer zuverlässigen Lokalisierung von Stauenden. Welche technischen Möglichkeiten hierzu momentan und in Zukunft bestehen, wird im Folgenden erarbeitet.

Die genannten Informationen zur Stauentstehung und -ausbreitung sowie zur Verkehrssicherheit am Stauende (Kapitel 2.2) beeinflussen die Anforderungen an zu übertragende Verkehrsinformationen, weshalb ausgewählte Aspekte nachfolgend ausführlicher dargestellt werden. Hierbei sind einige der Beschreibungen des Verkehrsfunks als Informationsinstrument im Verkehrsmanagement an die Ausführungen von FAKLER (2010a) angelehnt.

Eine automatische sensorgestützte Ermittlung des Verkehrszustands erfolgt derzeit primär auf Autobahnen und bedeutenden Verkehrsachsen in Ballungsgebieten. Die Detektion von Ereignissen im nachgeordneten Außerorts-Straßennetz erfolgt bisher hauptsächlich durch die Polizei und so genannte Staumelder (FAKLER, 2010b).

Aktuell werden Verkehrsinformationen im Rahmen des öffentlichen Verkehrswarndienstes via Verkehrsfunk von Rundfunkanstalten gesprochen sowie via RDS/TMC (Radio Data System/Traffic Message Channel) unentgeltlich übermittelt (FGSV, 2002). Für den motorisierten Individualverkehr werden neben Verkehrsstörungen (z. B. Stau, zählfließender Verkehr, vgl. Bild 1) auch gefährliche Situationen (z. B. Falschfahrer, Gegenstand auf der Fahrbahn) und Ereignisse (z. B. Baustelle, Fahr-

streifensperrung) gemeldet, die zum Teil um zusätzliche Umleitungsempfehlungen ergänzt werden. So sollen primär für kritische Situationen Sicherheitsgewinne erzielt werden, wobei der Verkehrsfunk aufgrund der unidirektionalen Übertragungsrichtung keine nutzerspezifische Informationsübermittlung zulässt (SCHMIDT-CLAUSEN, 2004).

Um eine reibungslose Kommunikation zwischen der Polizei, den Verkehrsbehörden und den Rundfunkanstalten sowie weiteren Anbietern von Verkehrsinformationen sicher zu stellen, sind die Erfassung und die Übertragung von Verkehrswarnmeldungen in der Rahmenrichtlinie für den Verkehrswarndienst (BMVBW, 2000) verbindlich festgelegt.

Hauptaufgabe des Verkehrswarndienstes ist die Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit. Meldepflichtig sind gemäß BMVBW (2000) sämtliche Verkehrsstörungen auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen, bei denen der Verkehr stockt oder zum Stehen kommt. Von der Landesmeldestelle wird keine Haftung für die versendeten Daten übernommen (BMVBW, 2000).

Bild 9 zeigt die öffentlich-rechtliche Meldungskette mit den einzelnen Prozessen und den zuständigen Stellen.

Eine vereinfachte Prozesskette aus Generierung, Übertragung und Nutzung von Verkehrsmeldungen im Fahrzeug ist exemplarisch in Bild 10 dargestellt. Beispielsweise sind hier im Vergleich zu Bild 9 keine Eingaben externer Stellen berücksichtigt.

Für das vorliegende Projekt sind für die Verkehrsinformationen insbesondere die folgenden in Bild 10 gezeigten Prozesse von Bedeutung:

- Kodierung von Meldungen:
Im Sinne einer zielgerichteten Warnung vor Stauenden sind die Meldungsinhalte zu der Art bzw. den Auswirkungen sowie der Ort der Störung bestmöglich wiederzugeben. Für die Meldungsübertragung hat eine Kodierung der Inhalte zu erfolgen, wobei Genauigkeit und Fehlerfreiheit der Informationen ein Optimum bilden müssen. Hierbei werden sowohl der aktuelle Stand der Technik als auch erwartete Genauigkeiten zukünftiger Technologien erprobt. Die technischen Probleme bei der Erfassung von Staus und der Lokalisierung von Stauenden werden in vorliegender Arbeit gemäß Projekt-

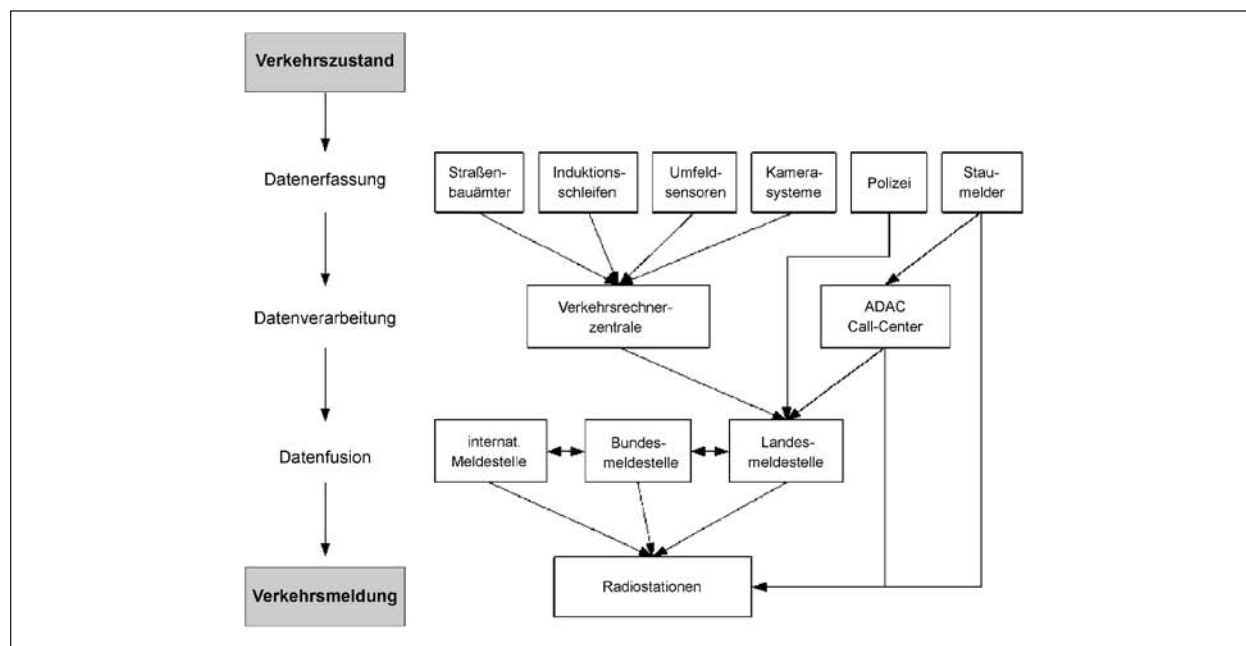


Bild 9: Öffentlich-rechtliche Meldungskette (HELLING, 2006)

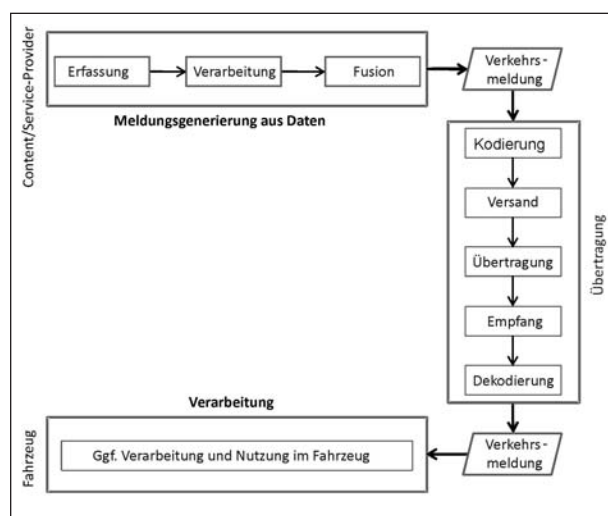


Bild 10: Prozesskette der Meldungsgenerierung, -übertragung und -nutzung in Fahrzeugen (angelehnt an HELING, 2006)

auftrag nur als „weiterer Forschungsbedarf“ behandelt (vgl. Kapitel 7).

- Übertragung von Meldungen

Auf die Wirksamkeit von Stauendwarnungen hat insbesondere die Rechtzeitigkeit der Warnung einen großen Einfluss. Mittels verschiedener Übertragungsmedien, die aufgrund von Einflüssen wie bspw. Abschattungen, TMC-Verfügbarkeit etc. generell bessere bzw. schlechtere Übertragungen ermöglichen, lassen sich unterschiedliche Wirkungen erzielen.

Diese ausgewählten Prozesse werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert. Die Ausführungen werden bei der Entwicklung des Warnkonzepts in Kapitel 3 berücksichtigt.

Des Weiteren wird im Folgenden auf die Meldungsanbieter näher eingegangen, da die organisatorischen Zusammenhänge die Ableitung von Mindestanforderungen an Verkehrsinformationen (vgl. Kapitel 7) beeinflussen können.

2.3.2 Kodierung von Meldungen

Stand der Technik

Zusätzlich zu den gesprochenen Meldungen werden Verkehrsinformationen in kodierter Form überwiegend über den digitalen Verkehrsfunk RDS/TMC verbreitet. Mittels UKW (Ultrakurzwellen) können mit diesem System minütlich in der Regel rund 20 bis 30 aktuelle Verkehrsmeldungen nach dem international standardisierten Protokoll Alert-C ausgestrahlt und empfangen werden. Die Meldungen sollen wiederholt versendet werden, was bei der Übertragung die Anzahl unterschiedlicher Meldungen einschränkt. Hieraus resultiert in seltenen Fällen, dass Meldungen je Sendegebiet etwas abweichende lokale Inhalte aufweisen können. Die mit dem Rundfunkprogramm empfangenen Verkehrsinformationen können schriftlich dargestellt oder von Navigationsgeräten automatisch verwendet werden. Die Kodierung der Meldungen hinsicht-

lich Art und Ort der Verkehrsbeeinträchtigungen erfolgt einheitlich durch Ereignislisten (Event Code List, ECL) und Ortslisten (Location Code List, LCL) (SCHMIDT-CLAUSEN, 2004). Die ECL und LCL werden in Deutschland von der BAST betreut und veröffentlicht.

Die Ereignisklassifizierung für TMC mittels der ECL erlaubt keine direkte Warnung vor Stauenden. Aus der Grundgesamtheit von rund 1.500 verschiedenen Ereignismeldungen sind diesbezüglich die folgenden Warninhalte am zutreffendsten (ISO 14819-2:2003, 2003):

- Stau, vorsichtig an das Stauende heranfahren,
- Stauende liegt hinter einer Kurve,
- Stauende liegt hinter einer Kuppe.

Die auf der Ortskodierung für Alert-C (ISO 14819-3:2004) basierende LCL stellt die Referenzierungsgrundlage für den Verkehrswarndienst über TMC dar. Das verwendete Referenzierungsmodell basiert auf einer verketteten Liste von Punkten (Locations), denen je ein Vorgänger und ein Nachfolger, die Art des Punktes (Kreuzung, Anschlussstelle, Rasthof etc.) sowie genau ein kodiertes Streckensegment zugewiesen werden. Der öffentlich-rechtliche Verkehrswarndienst umfasst Angaben zu der betroffenen Straße, der Fahrtrichtung sowie zu Start- und Endpunkt der Behinderung. Möglich sind Referenzierungen zu einzelnen Punkten („Point Locations“), Strecken („Linear Locations“) und Gebieten („Area Locations“). Die aktuelle LCL der Version 9.00 setzt sich folgendermaßen zusammen:

- rund 30.490 Point Locations,
- rund 4.740 Linear Locations,
- rund 7.290 Area Locations.

Die LCL umfasst alle BAB, die Bundesstraßen, einige Landstraßen und partiell Hauptverkehrsstraßen in Städten (BAST, 2010).

Eine detaillierte örtliche Referenzierung mittels Locations ist damit nur bedingt gegeben, da diese z. B. im Autobahnbereich nur anschlussstellengenau sind. Die Möglichkeit, die Ortsangabe durch so genannte Offsets weiter zu spezifizieren, ist im Standard berücksichtigt, wird jedoch bisher kaum in der Praxis angewandt.

Ausblick auf künftige Technologien

Aufgrund der genannten Einschränkungen bei der Kodierung der Meldungen durch RDS/TMC wird die Einführung neuer und leistungsfähigerer Standards, wie beispielsweise TPEG (Transport Protocol Experts Group), angestrebt.

Für die Anforderungen von Navigationssystemen wurde das sog. TPEG Automotive Profile (TAP) entwickelt. OBERT (2006) beschreibt verschiedene Anwendungsmöglichkeiten, zu denen beispielsweise die Stauendwarnung zählt. Für die Übertragung spezifischer verkehrsrelevanter Inhalte enthält TAP die Spezifikation TPEG-TEC (Traffic Event Compact). Die TPEG-TEC-Meldungen bestehen aus den folgenden so genannten Containern (MOBILE.INFO, 2006):

- Management Container zur Verwaltung der Meldung (ID, Version, etc.).
- Event Container zur Angabe des verkehrsrelevanten Ereignisses sowie optional eine oder mehrere zusätzliche Informationen zu den Ursachen:

Die sog. Local Hazard Warnings ermöglichen detaillierte Meldungen mit exakter räumlicher Verortung. Anders als bei der Klassifizierung von Ereignissen mittels ECL für TMC, für die kein eigenständiger Meldungsinhalt für Stauendwarnungen zur Verfügung steht, ermöglichen die im Event Container hinterlegten sog. Cause Codes Warnungen vor

- langsam fahrenden Fahrzeugen (im Falle von Fahrzeugen, die eine Mindestgeschwindigkeit unterschreiten),
- gefährlichen Stauenden (im Falle von akuter Auffahrunfallgefahr).

Die sog. Subcauses warnen im Falle von erwarteter zu kurzer Reaktionszeit für den Fahrer vor

- plötzlichem Stauende,
- Stauende hinter Kuppe,
- Stauende hinter Kurve,
- Stauende im Tunnel.

- Location Container zur Verortung der Verkehrsmeldung:

Auch bezüglich der Ortsreferenzierung ist der TPEG-Standard flexibler als Alert-C. Es ist sowohl die bisher übliche Kodierung über die LCL, als auch der Einsatz detaillierterer oder auch dynamischer Kodierungsverfahren möglich.

Eine Beispielanwendung von TPEG zur lokalen Gefahrenwarnung via DAB im Rahmen des Projektes DIWA wird von ASSENMACHER (2006) beschrieben.

2.3.3 Übertragung von Meldungen

Die im vorherigen Kapitel geschilderten detaillierteren Meldungsinhalte erfordern leistungsfähige, digitale Übertragungsmedien.

Die Kommunikationsmöglichkeiten zur Fahrerinformation können hinsichtlich der aussendenden Einheit folgendermaßen gegliedert werden (gemäß z. B. ITWISSEN, 2011):

- Fahrzeug-zu-Infrastruktur, C2I (Car-to-Infrastructure):
Datenübertragung von straßenseitiger Infrastruktur zu Fahrzeugen (ggf. mit bi-direktionalem Datenaustausch zwischen Fahrzeugen und Verkehrszentralen) sowie durchgängige unidirektionale Ausstrahlung nutzerunabhängiger Informationen mittels Rundfunks.
- Fahrzeug-zu-Fahrzeug, C2C (Car-to-Car):
Warnungen und Informationen werden zwischen Fahrzeugen ausgetauscht.

Den Überbegriff für diese beiden drahtlosen Kommunikationsansätze bezeichnet man als Car-to-X-(C2X-)Kommunikation.

Die folgende Auswahl der bedeutendsten Standards zur drahtlosen Datenübertragung ist angelehnt an BILSTRUP (2007), HOLFELDER (2004) und ITWISSEN (2011). Die Ausführungen stellen den Stand des Wissens zum Zeitpunkt der Berichterstellung dar.

C2I-Kommunikation

Für die C2I-Kommunikation kann zur Datenübertragung beispielsweise verwendet werden:

- WLAN-(Wireless-Local-Area-Network-)Netzwerke gemäß der Standards IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 802.11a, 802.11b oder 802.11g, die sich u. a. hinsichtlich

Datenraten, Frequenzbereichen und Modulationsverfahren unterscheiden. Die maximale Reichweite wird mit ca. 150 m bis 500 m angegeben.

- Bluetooth, das eine maximale Reichweite von bis zu 100 m aufweisen kann.
- Diverse Mobilfunksysteme unterschiedlicher Generationen, beispielsweise:
 - GSM (Global System for Mobile Communications), ein Mobilfunksystemen der 2. Generation (2G), das eine Datenübertragungsrate von rd. 200 kbit/s aufweist.
 - UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), das aufgrund der Verwendung von Leistungsmerkmalen der Leistungsvermittlung der GSM-Technik und der Datenpaketvermittlung der GPRS (General-Pocket-Radio-Service-)Technik ein 3G-Mobilfunksystem mit schnellem Datentransfer darstellt.
 - HSPA (High Speed Packet Access), als System der 3.5.-Generation eine Fortentwicklung von UMTS. Die Datenraten betragen rund 14,4 Mbit/s (Downlink) bzw. 5,7 Mbit/s (Uplink).
 - Long Term Evolution (LTE), mit Datenraten von 100 Mbit/s im Downlink bzw. 50 Mbit/s im Uplink ein Mobilfunksystem der 4. Generation.
- Terrestrische Rundfunksysteme, z. B. DAB (Digital Audio Broadcast) bzw. DAB+, für das aktuell von der KEF (Kommission zur Ermittlung des Finanzbedarfs der Rundfunkanstalten) eine finanzielle Unterstützung zugesichert wurde.

C2C-Kommunikation

Für die C2C-Kommunikation wurde der Mikrowellenbereich von 5,875 GHz bis 5,905 GHz reserviert, wobei i. d. R. WLAN des Standards 802.11p eingesetzt wird.

802.11p wurde speziell für die Anforderungen der Automotive-Kommunikation entwickelt. Besondere Charakteristika sind die hohe Zuverlässigkeit und geringe Latenzzeiten (der Datenaustausch ist innerhalb hunderter Millisekunden abgeschlossen). Die Datenrate beträgt 3 bis 54 Mbit/s.

Es sind Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 200 km/h möglich. Der typische Entfernungsbereich beträgt ca. 1 km.

Die Reichweite von Meldungen, die mittels C2C-Kommunikation übertragen werden, kann erhöht werden, indem Nachrichten von Fahrzeugen als „Repeater“ weitergereicht werden.

Grundlegende Ansätze

Derzeit werden zwei grundlegende Ansätze der C2X-Kommunikation unterschieden:

- WAVE (Wireless Access for Vehicular Environment), das eine Funkkommunikation zwischen Fahrzeugen und Einrichtungen am Straßenrand (Road Side Units, RSU) vorsieht, sowie
- VANET (Vehicular Adhoc Networks), bei der eine Echtzeitkommunikation zwischen Individualfahrzeugen stattfindet.

Beide Techniken werden vom Car to Car Communication Consortium (C2C CC) vorangetrieben und benutzen die WLAN-Technik (802.11 bzw. 802.11p).

2.3.4 Meldungsanbieter

Die Verkehrsmeldungen werden von Meldungsanbietern („Providern“) zur Verfügung gestellt, die einen privatwirtschaftlichen oder öffentlich-rechtlichen Hintergrund haben.

Die an der Erstellung und Verbreitung von Verkehrsmeldungen beteiligten Akteure lassen sich abhängig von ihren Aufgaben folgendermaßen unterscheiden (z. T. basierend auf STEINAUER et al., 2006):

- Ein Dateneigner (Content Owner) besitzt die verkehrsrelevanten Daten.
- Ein Datenveredler (Content Provider) verarbeitet Verkehrsdaten, um daraus Informationen zu generieren.
- Dienstanbieter (Service Provider) sind für die Übermittlung der aufbereiteten Informationen an den Verkehrsteilnehmer zuständig. Diese Aufgabe können auch Dritte, z. B. der ADAC (Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V.), übernehmen.

Zusätzlich sind Netzbetreiber involviert, die ein Kommunikationsnetz zur Datenübertragung (zum Beispiel zwischen Fahrzeugen und Zentrale) bereitstellen.

Die Bereitstellung von Verkehrsmeldungen durch öffentlich-rechtliche Diensteanbieter wird von der öffentlichen Hand getragen. Die Verkehrsmeldungen werden unentgeltlich zur Verfügung gestellt und von Radiostationen über den Rundfunk verbreitet. Die Generierung der Meldungen ist durch Richtlinien und Empfehlungen reglementiert. Die Meldungsgenerierung basiert hier primär auf staatlichen Datenquellen. Die Erfassung, Verarbeitung und Fusion von Verkehrsdaten (vgl. Bild 10) fallen in die Zuständigkeitsbereiche der Polizei, der Straßenverkehrsbehörden und der Straßenbauverwaltungen und sind somit an die Bundesländer gebunden. Privatwirtschaftliche Anbieter betreiben/nutzen zum Teil neben den öffentlichen Datenquellen eigene Verkehrsdatenerfassungssysteme (FCD, ddg-Sensoren etc.), um eine bessere Information generieren zu können. (HELLING, 2006)

2.3.5 Fazit zu den Verkehrsinformationen

Basierend auf den Ausführungen der vorangegangenen Kapitel und der in Kapitel 2.2 dargestellten verkehrlichen Grundlagen werden für den Versuchsaufbau (Kapitel 3) und die Entwicklung des Bewertungskonzepts (Kapitel 4) die folgenden Festlegungen getroffen und diese in verschiedenen Szenarien untersucht:

Kodierung von Meldungen

Im Rahmen der Studie sollen sowohl der jetzige Stand der Technik (relativ unpräzise Kodierung entsprechend RDS-TMC, die Möglichkeit zur Genauigkeitssteigerung mittels Offsets bislang kaum genutzt) als auch präzisere Kodierungsmöglichkeiten (angelehnt an die verbesserten Möglichkeiten mittels TPEG) umgesetzt werden.

Eine Meldung „Stau voraus“ würde der mit Rundfunk realisierbaren Genauigkeit bzw. etwas spezifischerer Low-Cost-Lösungen entsprechen. Die Angabe einer Entfernung bis zum Erreichen des Stauendes stellt technisch anspruchsvollere Möglichkeiten dar, die beispielsweise TPEG nutzen.

Dementsprechend sind im Rahmen der Simulatorstudie präzise vs. unpräzise Stauendewarnungen zu unterscheiden.

Übertragung von Meldungen

Der Übertragungszeitpunkt bzw. der Empfangsort von Stauendewarnungen soll im Rahmen der Untersuchung ebenfalls in variierenden Szenarien realisiert werden. Dem derzeit und zukünftig erwarteten Stand der Technik zur Datenübertragung mittels C2C- oder C2I-Kommunikation entsprechend wird in der Fahrstudie die Anzeige unterschiedlicher Warndistanzen untersucht:

- 3,5 km vor dem Stauende,
- 1,5 km vor dem Stauende,
- 0,3 km vor dem Stauende.

Der Warnzeitpunkt repräsentiert unterschiedliche technische Möglichkeiten und Konzepte zur Meldungsübertragung. Das Fahrverhalten nach Erhalt der Warnung bis zum Erreichen des Stauendes ist zu untersuchen und erlaubt Rückschlüsse auf geeignete Übertragungsmethoden.

Meldungsanbieter

Hinsichtlich der Zuordnung der oben genannten variierenden Warnkonzepte bedeutet dies für die Meldungsanbieter in grober Annäherung, dass sie zum einen einem öffentlich-rechtlichen Hintergrund entsprechen (Übermittlung meist relativ unpräziser Warnungen (basierend auf Locations oder meist genauer durch Staumelder, in variabler Entfernung zum Stauende)) sowie privatwirtschaftliche Dienstleister darstellen können, die durch alternative Informationsquellen ggf. präzise Warninhalte in geringeren Entfernungen zum Stauende übertragen können. Darauf aufbauend lassen sich bei der Durchführung der Fahrstudie sowohl präzise und unpräzise Warnungen als auch unterschiedliche Entfernungen zu den Stauenden zur Warnungsbereitstellung unterscheiden (siehe Kapitel 3).

3 Beschreibung der Fahrstudie

3.1 Fragestellung

Am Beispiel einer Stauendewarnung soll nachfolgend das Potenzial unterschiedlicher Warnungen vor Stauenden in Abhängigkeit des Zeitpunkts der erstmaligen Darbietung (sog. Warndistanz) und in

Abhängigkeit der Präzision der Warnung (sog. Warnpräzision) empirisch geprüft werden. Hierfür wurde angenommen, dass die Art des Stauendes in diesem Zusammenhang mitentscheidend ist: Je weniger vorhersehbar das Stauende aufgrund verkehrlicher oder streckengeometrischer Bedingungen ist, desto positiver sollten die Wirkungen einer Stauendewarnung sein. Aus diesem Grund wurden sowohl sog. harte Stauenden (mit freiem Verkehr und einem plötzlichen Geschwindigkeitseinbruch in der Stauanfahrt) bzw. verdeckte Stauenden (mit nicht-einsehbarer Streckengeometrie) als auch sog. weiche Stauenden (mit synchronisiertem Verkehr mit gemächlicher Geschwindigkeitsreduktion in der Stauanfahrt) bzw. unverdeckte Stauenden (mit einsehbarer Streckengeometrie) in der Würzburger Fahrstudie realisiert.

Für die vorliegende Arbeit ergeben sich somit zusammenfassend folgende Fragestellungen:

- Wie wirken sich verschiedene Stauendarten (hartes vs. weiches Stauende bzw. verdecktes vs. unverdecktes Stauende) auf das Fahrverhalten und die Wirkung von Stauendewarnungen aus?
- Welche Bedeutung hat die Präzision der gegebenen Informationen im Rahmen einer Warnung (sog. Warnpräzision) bzw. der Zeitpunkt der erstmaligen Warnung (sog. Warndistanz) auf die Wirkung der Stauendewarnung?

Es wurden Anfahrten an Stauenden mit und ohne Umgebungsverkehr in der Stauanfahrt realisiert (sog. Verkehrsbedingung), um die Wirkung verschiedener simulierter Verkehrszustände und der Streckengeometrie beim Erreichen von Stauenden zu untersuchen.

3.2 Methodisches Vorgehen

3.2.1 Beschreibung Fahrstudie

Der Versuch wurde in der Fahrstudie mit Bewegungssystem (siehe Bild 11) des Würzburger Instituts für Verkehrswissenschaften (WIVW GmbH) durchgeführt. Die Projektion des Sichtsystems erfolgt über drei Röhrenprojektoren, über die ein frontales Sichtfeld entsprechend einem Bildausschnitt von 180° dargeboten werden kann. Als Außen- und Innenspiegel fungieren LCD-Displays. Das Bewegungssystem des Würzburger Fahrstudie hat 6



Bild 11: Fahr Simulator mit Bewegungssystem der WIVW GmbH



Bild 12: Innenraum des Fahr Simulators mit Bewegungssystem der WIVW GmbH

Freiheitsgrade und kann lineare Beschleunigungen bis 5 m/s^2 darstellen, rotatorische bis $100^\circ/\text{s}^2$. Es besteht aus sechs elektronischen und drei passiv-pneumatischen Aktuatoren.

Die Fahrzeugkonsole ist voll instrumentiert und entspricht der eines serienfertigen Fahrzeugs mit Automatikgetriebe (BMW 510i; siehe Bild 12). Für die realistische Darstellung des Lenkmoments sorgt ein auf der Basis eines Lenkmodells gesteuerter Servomotor.

Alle Parameter der Fahrzeugbedienung (z. B. Bremspedalbetätigung, Lenkradwinkel) sowie des Fahrzeugmodells (z. B. Geschwindigkeit, Beschleunigung) werden mit einer Rate von 100 Hz aufgezeichnet. Für eine Übersicht der im Bewertungskonzept verwendeten Fahrparameter siehe Kapitel 4.2.2, 4.2.3 und 4.2.4.

3.2.2 Überblick über die Versuchsstrecken

Die Versuchsstrecke bestand aus einer 104 km (Verkehrsbedingung ohne Verkehr) bzw. 115 km langen (Verkehrsbedingung mit Verkehr) Autobahnstrecke mit einer Fahrstreifenbreite von 3,75 m. Zwischen den Fahrstreifen befanden sich ein 3,0 m breiter Grünstreifen mit Leitplanke und neben den äußeren Fahrstreifen ein jeweils 2,5 m breiter Seitenstreifen. Für die beiden Verkehrsbedingungen (mit und ohne Umgebungsverkehr in der Stauannäherung) wurden unterschiedliche Strecken realisiert, die sich jeweils in Stauabschnitten und Füllabschnitten gliedern lassen (siehe Kapitel 3.2.5). Es handelte sich bei allen Strecken um zweistreifige Autobahnstrecken inklusive einer zweistreifigen Gegenfahrbahn. Die Richtgeschwindigkeit der Autobahnen betrug 130 km/h. Ein Tempolimit galt auf den Strecken nicht.

3.2.3 Stauannäherungen „Mit Verkehr“

Die Streckenabschnitte zur Annäherung an das Stauende hatten jeweils eine Länge von 4.550 m. Im Streckenabschnitt von 0 m bis 3.300 m wurden die Simulatorfahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen so programmiert, dass sie eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 90 km/h einhielten. Auf dem linken Fahrstreifen waren Geschwindigkeiten von bis zu 130 km/h möglich. Im Streckenabschnitt von 3.300 m bis zum Stauende wurden zwei Varianten des Umgebungsverkehrs in der Fahrsimulation realisiert, um die Vorhersehbarkeit der Position des Stauendes zu variieren:

- (1) Hartes Stauende: Der Umgebungsverkehr bremste unmittelbar vor dem Stauende plötzlich ab. Die Fahrstreifenauslastungen und Fahrgeschwindigkeiten variierten z. T. erheblich zwischen den Fahrstreifen (entsprechend einer Stauannäherung im freien Verkehr).
- (2) Weiches Stauende: Der Umgebungsverkehr bremst mit zunehmender Nähe zum Stauende graduell ab. Zuvor näherten sich die Fahrstreifenauslastungen und Fahrgeschwindigkeiten zwischen den Fahrstreifen an (entsprechend einer Stauannäherung im synchronisierten Verkehr).

Bild 13 und Bild 14 veranschaulichen beispielhaft die erreichten Fahrgeschwindigkeiten der Fahrzeuge unmittelbar vor dem Fahrzeug der Probanden in verschiedenen Fahrten.

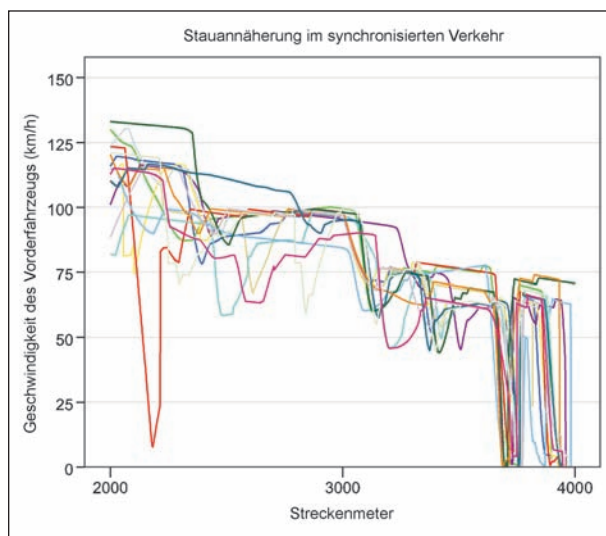


Bild 13: Fahrgeschwindigkeiten der Führungsfahrzeuge der Probanden in verschiedenen Fahrten bei der Annäherung an ein weiches Stauende

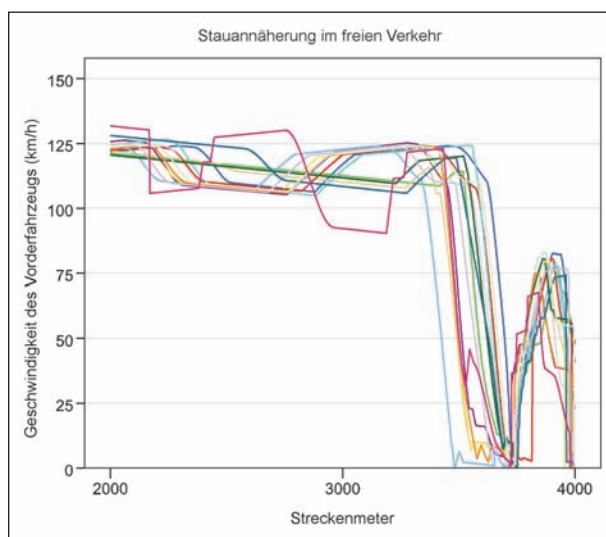


Bild 14: Fahrgeschwindigkeiten der Führungsfahrzeuge der Probanden in verschiedenen Fahrten bei der Annäherung an ein hartes Stauende

3.2.4 Stauannäherungen „Ohne Verkehr“

Die Stautrecken hatten eine Länge von 4.550 m. Die Stauanfahrten (Streckenmeter 0 bis 3.300) bestanden aus geraden Abschnitten mit leichten Kurven. Die Simulatorfahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen fuhren mit einer mittleren Geschwindigkeit von $v = 90$ km/h, überholende Fahrzeuge auf der linken Fahrbahn im Mittel 130 km/h). Nach 3.000 m erreichten die Fahrzeuge eine Abfahrt. Über diese wurden die Fahrzeuge des Umgebungsverkehrs weggeführt. Der sich anschließende Staubereich hatte eine Länge von 1.200 m. Nach 600 m (ab Beginn des Staubereichs) wurden stehende Fahrzeu-

ge auf die Fahrbahn aufgesetzt, die den Stau bildeten. Es wurden Stautrecken mit unterschiedlichen Streckengeometrien im Staubereich realisiert:

- (1) Nach einem geraden Streckenverlauf folgte ein kurviger Streckenabschnitt (gemäß den Richtlinien für Anlagen von Straßen (RAS, Bundesministerium für Verkehr, 1995). Der Stau befand sich entweder vor einer sich anschließenden Kuppe (unverdecktes Stauende) oder
- (2) hinter einer Kuppe (verdecktes Stauende).

Im Falle eines unverdeckten Stauendes waren die stehenden Fahrzeuge bereits frühzeitig (d. h. mit größerer Distanz) sichtbar. Im Gegensatz dazu waren die Staufahrzeuge bei einem verdeckten Stauende erst in einem Abstand von 150 m sichtbar.

3.2.5 Füllstrecken

Zusätzlich zu den beschriebenen Prüfsituationen wurden sog. Füllsituationen mit vergleichbaren verkehrlichen Bedingungen und vergleichbaren Streckengeometrien ohne das Auftreten von Stauenden eingeführt. Auch hier fuhren die Simulatorfahrzeuge auf dem rechten Fahrstreifen durchschnittlich 90 km/h. In einer Hälfte der Füllsituationen befolgten die Simulatorfahrzeuge auf dem linken Fahrstreifen die vorgegebene Richtgeschwindigkeit (im Mittel 130 km/h). In der anderen Hälfte wurden den Fahrzeugen auf dem linken Fahrstreifen ähnliche Geschwindigkeiten vorgegeben wie auf dem rechten Fahrstreifen (im Mittel 90 km/h).

Insgesamt wurden in der Fahrsimulation zwischen den 16 Stauannäherungen 8 Füllsituationen umgesetzt. Diese Füllsituationen wurden eingefügt, um den Fahrern das Auftreten und die Position der jeweiligen Stauenden zu verschleiern. Durch die Einführung der Füllstrecken war es den Fahrern nicht mehr möglich, durch verkehrliche Rahmenbedingungen in einem Streckenabschnitt ein Stauende in einem nachfolgenden Streckenabschnitt vorherzusagen.

3.2.6 Variationen der Stauendewarnung

Neben einer Variation der Stauendart unter verschiedenen verkehrlichen Bedingungen wurden folgende Systemmerkmale einer Stauendewarnung variiert:

- Warnpräzision: Präzision der dargebotenen Informationen,

- Warndistanz: Zeitpunkt der erstmaligen Warnung.

Die Warnungen beinhalteten entweder die Information über einen bevorstehenden Stau sowie die präzise Angabe der Entfernung bis zum Erreichen des Stauendes („präzise Warnung“; siehe Bild 15). Die Entfernungsanzeige wurde bis zum Erreichen des Stauendes in 300-m-Schritten (bzw. 500 m für die erstmalige Aktualisierung bei einer Warndistanz von 3,5 km) aktualisiert. Die Aktualisierungsfrequenz von 300 m wurde gewählt, um die visuelle Aufmerksamkeit der Probanden nicht zu stark auf das Warndisplay zu fokussieren, wie es im Fall einer häufigeren Aktualisierung möglich gewesen wäre. Die letzte Aktualisierung fand 300 m vor dem Erreichen des Stauendes statt.

Alternativ wurde eine Warnung ohne Entfernungsangabe dargeboten („unpräzise Warnung“; siehe Bild 16). Bei unpräzisen Warnungen blieb der entsprechende Warmbildschirm unverändert stehen.

Die konkrete Ausgestaltung der Warndisplays basierte auf Arbeiten des Forschungsprojekts sim^{TD} (Sichere Intelligente Mobilität – Testfeld Deutschland), welches das HMI für die vorliegende Studie zur Verfügung stellte.

Zusätzlich wurde der erstmalige Zeitpunkt der Stauendewarnung variiert. Als Stufen der Warndistanz wurden entsprechend der Realisierung verschiedener technischer Möglichkeiten zur Meldungsübertragung (siehe Kapitel 2.3.3) realisiert:

- (1) Warnung 3,5 km vor Stauende,
- (2) Warnung 1,5 km vor Stauende und
- (3) Warnung 0,3 km vor Stauende.

Die Darbietung dieser Stauendewarnungen erfolgte visuell über ein Display in der oberen Mittelkonsole (siehe Bild 17). Beim erstmaligen Erscheinen der jeweiligen Warnung wurde zusätzlich ein akustischer Warnton dargeboten. Die Darbietung der jeweiligen Stauendewarnung wurde mit Erreichen des Stauendes beendet.

Als Kontrollbedingung wurden zusätzlich einige Anfahrten an die jeweiligen Stauenden (hart vs. weich) eingeführt, in der keine Warnung vor dem bevorstehenden Stauende erfolgte. In diesen Stauendeanäherungen erschien auf dem Bildschirm die Meldung „Kein Empfang“: Die Fahrer waren somit informiert, dass möglicherweise ein Stauende ohne

vorherige Warnung folgt. Um die Stauenden weniger vorhersehbar zu machen, zeigte der Warmbildschirm auch in vier Füllsituationen „Kein Empfang“ an.

Fehlmeldungen wurden – in Absprache mit dem Auftraggeber – im Rahmen dieser Studie nicht umgesetzt bzw. untersucht. Zu solchen Fehlmeldungen zählen z. B. Warnmeldungen ohne tatsächliches Ereignis („Falscher Alarm“) bzw. tatsächliche Ereignisse ohne Warnmeldung („Verpasser“).



Bild 15: Screenshot der verwendeten präzisen Warnmeldung vor bevorstehendem Stauende (mit Entfernungsangabe)



Bild 16: Screenshot der verwendeten unpräzisen Warnmeldung (ohne Entfernungsangabe)



Bild 17: Fahrerkabine der Fahrsimulation mit Blick auf Bildschirme in der Mittelkonsole

3.2.7 Nebenaufgabe

Während der Fahrt sollten die Probanden eine Nebenaufgabe in Form einer Menüaufgabe bearbeiten. Es wurde erwartet, dass unter dermaßen realisierten Ablenkungsbedingungen die Vorhersehbarkeit der Stauenden reduziert ist. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, durch ein Menüsystem mit einer hierarchischen Struktur zu navigieren und dabei Funktionen des Menüsystems auszuwählen. Das Menüsystem wurde über einen Bildschirm in der unteren Mittelkonsole dargestellt (siehe Bild 17). Die Navigation durch das System geschah über einen Joystick als Bedienelement, der ebenfalls in der unteren Mittelkonsole angebracht war.

Das Menüsystem bestand aus vier Ebenen mit den Kategorien „Navigation“, „Entertainment“, „Telefon“ und „Bordcomputer“ (siehe Bild 18; RAUCH et al.,

Ebene 1	Ebene 2	Ebene 3	Ebene 4
Bordcomputer	Fahrzeugeinstellungen	Assistenzfunktionen	autom. Handbremse
			Wegfahrsperr
			Einparkhilfe
			Geschwindigkeitslimit setzen
		Sitz-einstellungen	Sitzposition
			Sitzheizung
			Rückenlehne
			Massagefunktion
	Fahrzeuginfos	Aktuelle Fahrdaten	aktuelle Geschwindigkeit
			durchschnittl. Geschwindigkeit
momentaner Verbrauch			
bisherigen Fahrzeit			
Fahrzeugcheck		nächster Ölwechsel	
		Reifendruck prüfen	
		Bremsbeläge prüfen	
		nächster TÜV-Termin	

Bild 18: Ausschnitt des Bereichs „Bordcomputer“ der Menüaufgabe

2004). Auf einer zweiten Ebene waren diesen Oberpunkten jeweils zwei Unterkategorien zugeordnet (z. B. „Fahrzeugeinstellungen“ und „Fahrzeuginfos“ beim Menüpunkt „Bordcomputer“) und den Unterkategorien auf der dritten Ebene ebenfalls (z. B. „Assistenzfunktionen“ und „Sitz-einstellungen“ für die Unterkategorie „Fahrzeugeinstellungen“). Auf der vierten und letzten Ebene befanden sich schließlich jeweils vier anzusteuern Funktionen. Insgesamt hat das Menüsystem eine 4x2x2x4-Struktur. Bild 18 zeigt einen Ausschnitt der hierarchischen Ordnung des Menüsystems für den Oberbegriff „Bordcomputer“.

Zu Beginn einer Aufgabe erschien ein Instruktionsschirm mit der jeweiligen Aufgabe, z. B. „Wegfahrsperr“, in der linken unteren Ecke des Bildschirms. Der Proband hatte nun die Aufgabe, zu diesem Begriff zu navigieren. Durch Bewegen des Joysticks in eine der Bewegungsrichtungen („oben“, „unten“, „links“ oder „rechts“) erschien der Bildschirm mit den Begriffen der ersten Ebene. Eine farbliche Unterlegung des Begriffs kennzeichnete die aktuelle Position im Menü. Mittels des Joysticks konnte anschließend der jeweilige Begriff ausgewählt und mit einer Bewegung des Joysticks nach rechts bestätigt werden. Bild 19 zeigt beispielhaft die Navigation durch das Menü anhand der Auswahl der Funktion „Wegfahrsperr“.

3.2.8 Versuchsplan

Hieraus resultierte ein Versuchsplan mit den Faktoren „Stauendart“ (hart vs. weich), „Warnpräzision“ (präzise vs. unpräzise) und „Warnabstand“ (3,5 km vs. 1,5 km vs. 0,3 km vs. keine Warnung). Alle Faktoren wurden als Messwiederholung umgesetzt (sog. Within-subjects-Faktor).

Um einen Einfluss der Abfolge von Prüf- und Füllsituationen auf die Ergebnisse zu kontrollieren, wurden die Probanden einer von vier möglichen Versuchsabfolgen zugeteilt. Die Nebenaufgabe wurde in allen nachfolgend berücksichtigten Stauendnäherungen bearbeitet.

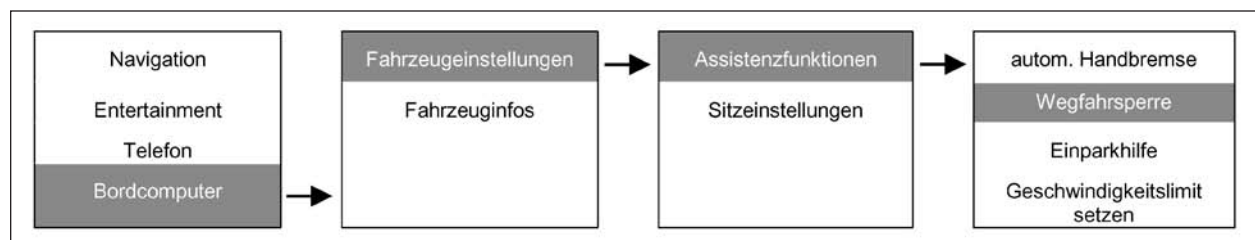


Bild 19: Schematische Darstellung der Navigation durch das Menüsystem für die Aufgabe „Wegfahrsperr“

Die Verkehrsbedingung der Stauannäherungen (mit vs. ohne Verkehr) wurde zwischen den Versuchspersonen variiert (sog. Between-subjects-Faktor). Die Ergebnisse der beiden Verkehrsbedingungen sollen allerdings parallel betrachtet werden, da ein direkter Vergleich zwischen diesen nicht eindeutig zu interpretieren ist. So unterscheiden sich die verwendeten Versuchsstrecken hinsichtlich (1) der Lage der Stauenden, (2) des verwendeten Umgebungsverkehrs und (3) der Probanden.

3.2.9 Versuchsablauf

Im Rahmen dieser Studie sollten sich die Probanden in einem Simulatorparcours insgesamt 16-mal einem Stauende auf einer zweistreifigen Autobahn nähern (siehe Bild 20). Die Richtgeschwindigkeit der Autobahn betrug 130 km/h. Die Fahrer wurden instruiert, zügig im Rahmen der Straßenverkehrsordnung (Einhaltung von Sicherheitsabständen, Rechtsfahrgebot, Überholverbot auf rechter Fahrbahn etc.) die Simulatorstrecke zu durchfahren.



Bild 20: Screenshot einer Prüfsituation in Fahrsimulation

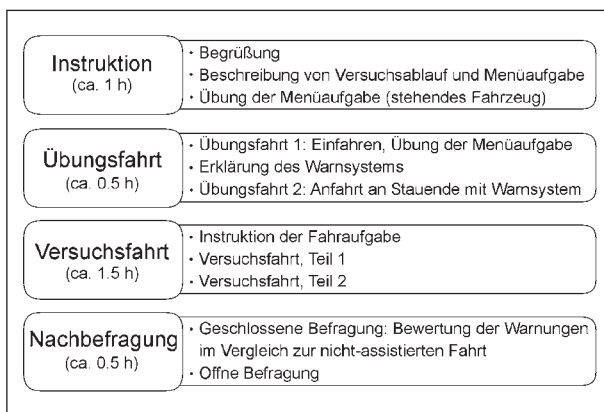


Bild 21: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs (inkl. Angabe der Dauern sowie der Inhalte der jeweiligen Stufen der Versuchssitzung)

Bild 21 veranschaulicht schematisch den Ablauf der Versuchssitzungen, die sich in vier Hauptteile gliedert. Im ersten Teil „Instruktion“ wurden die Probanden begrüßt und über die Forschungsfrage informiert sowie weitere Instruktionen gegeben. Hierzu zählt u. a. die Demonstration der während der Fahrzeugführung zu bearbeitenden Menüaufgabe. Diese Aufgabe wurde anschließend im stehenden Fahrzeug geübt. Hierzu wurden 45 Aufgaben bearbeitet.

Im zweiten Sitzungsteil „Übungsfahrt“ wurden verschiedene kurze Fahrten durchgeführt, damit die Fahrer sich erneut an die Fahrsimulation mit Bewegungssystem gewöhnten, die Bearbeitung der Menüaufgabe während der Fahrt übten sowie die Stauendewarnung kennen lernten (Dauer insgesamt ca. 30 Minuten). Unmittelbar vor der Übungsfahrt wurde das Warnsystem anhand einer schriftlichen Kurzinstruktion erläutert.

Im dritten Teil „Versuchsfahrt“ wurden die Fahrer nochmals kurz über die weiteren Fahrten und ihre Aufgabe instruiert. Es folgten zwei Fahrten à 45 min Dauer, in denen jeweils acht Anfahrten an Stauenden erfolgten. Die einzelnen Stauanfahrten unterschieden sich durch die oben eingeführten Variationen (Stauendart, Warnpräzision und Warndistanz). Nach jeder Stauanfahrt wurden die Probanden vom Versuchsleiter zu verschiedenen Aspekten der Fahrt befragt (z. B. „Wie sicher war die Annäherung an das Stauende?“). Die Probanden antworteten auf die Fragen anhand des Kategorienunterteilungsverfahrens (sog. KU-Skala; HELLER, 1985; siehe Tabelle 2). Dies ist ein zweistufiges Verfahren auf einer 15-stufigen Skala mit einer Zusatzkategorie für eine Ausprägung von 0 („gar nicht“). Probanden nennen für eine Beantwortung anhand der KU-Skala zuerst die Grobkatgorie (z. B. „sehr wenig“) und anschließend eine Feinunterteilung der Kategorie (z. B. „3“).

Abschließend folgte im Versuchsteil „Nachbefragung“ eine ausführliche Befragung der Probanden. Hierbei wurden zunächst schriftliche Befragungen durchgeführt, in der u. a. die eingeführten Warnvarianten im Vergleich zu einer nicht-gewarten Stau-

gar nicht	sehr wenig		wenig		mittel		viel		sehr viel						
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14

Tab. 2: Kategorienunterteilungsskala nach HELLER (1985)

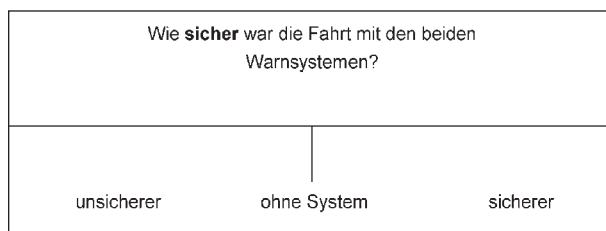


Bild 22: Beispiellitem für die Nachbefragung zum Vergleich der beiden Warnalternativen (präzise und unpräzise Warnung) mit der nicht-gewarnten Fahrt

annäherung beurteilt werden sollten. Zur Abgabe des Urteils wurden sog. Visuelle Analogskalen vorgegeben: Dies sind horizontale Linien (Länge: 16 cm), die an den beiden Enden durch die Vorgabe von Antwortalternativen verbal verankert sind (z. B. „Wie sicher war die Fahrt mit den Warnsystemen?“, linkes Ende: „unsicherer“, rechtes Ende: „sicherer“; siehe Bild 22). Die Mitte der Analogskala war jeweils verbal verankert mit „vergleichbar zu ohne System“. Aufgabe der Probanden war es, jeweils ein Kreuz auf diese Linie für das präzise und unpräzise Warnsystem zu machen, um die Frage zu beantworten. Zusätzlich erfolgte eine offene Nachbefragung, in der keine Antwortalternativen vorgegeben waren und die Probanden frei reden konnten (z. B. „Welches der Warnsysteme würden Sie nutzen? Warum?“).

3.3 Stichprobe

An dieser Studie nahmen $N = 32$ Probanden im Alter von 25 bis 72 Jahren (mit Verkehr: $m = 47,69$, $sd = 17,29$ Jahre, ohne Verkehr: $m = 48,88$, $sd = 16,44$ Jahre) teil. Die Probanden stammten aus dem Testfahrerpanel der WIVW GmbH und haben alle vor Beginn der Versuchsdurchführung ein ausführliches Training im Fahrsimulator mit Bewegungssystem erhalten (siehe HOFFMANN et al., 2003). Die Versuchssitzung dauerte ca. 3,5 Stunden. Die Probanden erhielten eine finanzielle Entschädigung für die Teilnahme am Versuch.

4 Bewertungskonzept

4.1 Entwicklung des Bewertungskonzepts

Eines der Ziele des Forschungsprojektes ist die Untersuchung der Einflüsse unterschiedlicher digitaler Verkehrsinformationen auf die Fahrsicherheit. Es

sind verschiedene Konzepte zur Warnung der Verkehrsteilnehmer vor Stauenden zu bewerten, die momentan noch nicht kommerziell verfügbar sind. Um den Einfluss der Warnalternativen auf das Fahrerverhalten zu erfassen, werden Fahrsimulatorversuche durchgeführt, die im vorangegangenen Kapitel dargestellt wurden. Es sind Kriterien und Indikatoren festzulegen, die hinsichtlich der Fahrsicherheit eine hohe Aussagekraft aufweisen und im Rahmen der Simulatorfahrten aufgezeichnet werden können.

Die Auswahl geeigneter Kriterien und Indikatoren ist in Kapitel 4.2 beschrieben. Für die vorliegende Aufgabenstellung werden für das Konzept zur Bewertung der Warnmeldungen die folgende Systematik und Terminologie verwendet (angelehnt an REFIOR et al., 2009):

- Es ist ein Ziel zu definieren, dessen Erreichungsgrad mittels des Bewertungsverfahrens zu erfassen ist.
- Indikatoren stellen messbare Merkmale der Zielerreichung dar (siehe Kapitel 4.2). Inhaltlich zusammengehörige Indikatoren werden unter dem Ordnungsbegriff „Kriterien“ zusammengefasst.
- Das Ziel wird in mehrere Kriterien untergliedert und differenziert (dargestellt in Kapitel 4.2).

Um die Effekte auf die Fahrsicherheit zu bestimmen, ist ein Bewertungskonzept erforderlich, das eine Bewertung der Warnalternativen und deren Vergleich zueinander ermöglicht.

Bewertet werden

- die prinzipielle Bereitstellung von Warnungen: Warnung vs. keine Warnung,
- die Warndistanzen: 3,5 km vs. 1,5 km vs. 0,3 km,
- die Präzision der Warnung: präzise vs. unpräzise.

Zudem erfolgt für die unterschiedlichen Warnstrategien eine Analyse des Einflusses der Einsehbarkeit des Stauendes sowie von umgebendem Verkehr auf die Fahrsicherheit.

Um Hinweise für die Bestimmung von Mindestanforderungen an sog. sicherheitsoptimale Verkehrsinformationen zu liefern (vgl. Kapitel 1), sind die Unterschiede zwischen den untersuchten Alternativen quantifiziert darzustellen. Diese Zielsetzungen

kann das Verfahren „Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution“ (TOPSIS) erfüllen (PETERS et al., 2007). Mit TOPSIS wird in Kapitel 4.3 ein systematisiertes Verfahren zum Abgleich von Zielsetzung und Indikatorausprägungen beschrieben und auf die Problemstellung angewandt. Es werden die Ausprägungen mehrerer vorher ausgewählter Indikatoren berücksichtigt, sodass eine integrierte Beurteilung und Rangfolge der Warnkonzepte hinsichtlich des Einflusses auf die Fahrsicherheit ermöglicht werden.

Ergänzend wird eine einzelindikator-orientierte Untersuchung der Fahrsimulordaten durchgeführt. Hier werden die Rohdaten einzelner Indikatoren grafisch dargestellt und objektiv interpretiert. Die Daten werden mittels inferenzstatistischer Verfahren geprüft, um zufallskritisch abgesicherte Aussagen zu der Wirkung von Stauendewarnungen in ausgewählten Variablen der Stauannäherung zu erzielen. Dieser Bewertungsschritt erlaubt neben der Analyse des Fahrerverhaltens entlang der gesamten Annäherung an das Stauende eine Validierung der TOPSIS-Resultate: Zur Sicherung der Aussagen werden die aus der einzelindikator-orientierten Untersuchung und die mittels TOPSIS gewonnenen Ergebnisse vergleichend gegenübergestellt und ein gemeinsames Fazit gezogen (siehe Kapitel 7.2). Insgesamt werden sämtliche Arbeitsschritte und Ergebnisse in einem mehrstufigen Verfahren überprüft (vgl. Kapitel 6.5), sodass abgesicherte Ergebnisse zu erwarten sind.

4.2 Gewählte Kriterien und Indikatoren zur Erfassung der Fahrsicherheit

4.2.1 Klassifizierung

Das direkteste Maß zur Beschreibung der Verkehrssicherheit ist die Anzahl der Unfälle. Dabei handelt es sich jedoch um eher seltene Ereignisse, weshalb alternative Indikatoren herangezogen werden, um indirekte qualitative Rückschlüsse auf die Verkehrssicherheit zu ermöglichen. So liegt bei stabilem und gleichmäßigem Verkehrsfluss ein relativ sicherer Verkehrsablauf vor, somit stellen beispielsweise Fahrzeugabstände und Geschwindigkeiten alternative Indikatoren dar.

Um in vorliegendem Projekt die Verkehrssicherheitseffekte unterschiedlicher Warnkonzepte zu er-

mitteln, sollen mehrere Indikatoren zur Beschreibung der u. g. Kriterien verwendet werden. Dabei handelt es sich um Größen, die im Rahmen der Fahrsimulatorversuche für den Prozess der Annäherung an das Stauende erfasst werden. Es wird je Warnkonzept und untersuchter Verkehrssituation ein individuelles Fahrerverhalten erwartet, bei dem die untersuchten Indikatoren unterschiedliche Ausprägungen annehmen. Diese Ausprägungen sind hinsichtlich der Wirksamkeit der Warnkonzepte auf die Fahrsicherheit zu interpretieren. Es besteht demnach die Forderung, dass die Indikatoren im Rahmen der Fahrsimulatorversuche messbar und die Ausprägungen interpretierbar sein müssen.

Unter Berücksichtigung durchgeführter Studien (bspw. van DRIEL, 2007; PIAO et al., 2009) werden aus der Grundgesamtheit der in den Fahrsimulatorversuchen verfügbaren Informationen geeignete Indikatoren herangezogen, die die Kriterien zur Wirksamkeitsermittlung bilden. Im Sinne einer umfassenden Bewertung ist das Verhalten der Probanden im Fahrprozess bei der

- Längsregelung,
- Querregelung,
- Ereigniserkennung

zu untersuchen. Gestützt durch die Resultate aus Probandenbefragungen bilden diese Situationen die Kriterien zur differenzierten Bewertung der Warnkonzepte.

Eine Vorauswahl der zu untersuchenden Indikatoren wurde im Rahmen einer Literaturrecherche getroffen, die Indikatoren werden in den folgenden Kapiteln beschrieben. Basierend auf Analysen der in den Vorversuchen aufgezeichneten Daten wurden Indikatoren für die Versuche „Ohne Verkehr“ und „Mit Verkehr“ festgelegt: Das Indikatorset „Mit Verkehr“ entspricht den Indikatoren „Ohne Verkehr“ unter Hinzunahme des Zeitabstands zum vorausfahrenden Fahrzeug zum Zeitpunkt des Bremsens (vgl. Kapitel 4.2.2), was ohne umgebenden Verkehr nicht ermittelbar ist. Die Indikatoren wurden mittels Analysen der in den Vorversuchen aufgezeichneten Daten des Fahrsimulators endgültig gewählt. Als Zielvorgabe wurde durch den Auftraggeber festgelegt, dass im Rahmen der Studie eine möglichst geringe Anzahl aussagekräftiger Indikatoren zu verwenden sei.

Eine qualitative Beschreibung der Indikatoren erfolgt in den folgenden Kapiteln.

4.2.2 Längsregelung

Zur Untersuchung des Kriteriums Längsregelung werden die Geschwindigkeiten von Fahrzeugen und deren Abstände zueinander erfasst und in Anlehnung an van DRIEL (2007) und PIAO et al. (2009) interpretiert:

Die Verteilungen und Ausprägungen von gefahrenen Geschwindigkeiten sind ein Maß für die Gleichmäßigkeit des Verkehrsablaufs und somit die Fahr-sicherheit. Je größer die gefahrenen Geschwindigkeiten sind, desto wahrscheinlicher ist die Annäherung an ein langsames vorausfahrendes Fahrzeug und desto größer wäre bei einem Unfall die Schwere.

Die räumlichen und zeitlichen Abstände zwischen hintereinanderfahrenden Fahrzeugen sollten den vorherrschenden Umfeldbedingungen angepasst sein und ausreichend groß sein, um auf bspw. unerwartete Stauenden reagieren zu können.

Die folgenden Indikatoren wurden gewählt um die Warnkonzepte im Längsverkehr zu bewerten:

- Längsbeschleunigung [m/s^2] als quadratisches Mittel RMS (Root Mean Square) für die letzten 300 m vor dem Stauende.
- Mittlere Standardabweichung der Geschwindigkeiten [km/h] für die Gesamtstrecke.
- Zeitabstand [s] zum vorausfahrenden Fahrzeug zum Zeitpunkt des Bremsens (Time Headway, THW).

4.2.3 Querregelung

Zur Beschreibung der Fahrsicherheit in der Querregelung werden die Spurhaltegüte, Fahrstreifenwechsel und Lenkbewegungen diskutiert (angelehnt an KNAPPE et al., 2006 und van DRIEL, 2007).

Für das vorliegende Projekt wird der folgende Indikator verwendet:

- Querbeschleunigung [m/s^2], zur Mittelwertberechnung werden die absoluten Werte der letzten 300 m vor dem Stauende herangezogen.

4.2.4 Ereigniserkennung

Die Erkennung von Stauenden als Ereignis und Reaktionen der Fahrer bzw. das Fahrerverhalten generell werden durch Warnungen stark beein-

flusst, was durch den folgenden Indikator erfasst werden soll:

- Bremsbereitschaft vor dem Stauende [m], die ermittelt wird für den Zeitpunkt, wenn das Bremspedal durch den Fuß des Probanden verdeckt, das Bremspedal aber noch nicht gedrückt wurde.

4.2.5 Probandenbefragung

Die Ergebnisse der Probandenbefragung, die unmittelbar nach Durchfahren der einzelnen Situationen sowie nach Beendigung aller Fahrten interviewt wurden, stellt ein Maß zur Einschätzung unterschiedlicher Warnkonzepte dar.

Zur Beurteilung der unterschiedlichen Warnungen wurden die Antworten auf folgende Frage ausgewertet:

- „Wie hilfreich war die Warnung?“, mit einer Skala von 0 (gar nicht) bis 15 (sehr hilfreich; siehe Kapitel 3.2.9).

4.3 Beschreibung und Anwendung des TOPSIS-Verfahrens

4.3.1 Beschreibung

Bei TOPSIS handelt es sich um ein Vorgehenskonzept zur Durchführung von Analysen, bei der die einzelnen Indikatoren in die Ermittlung einer Gesamteffizienz gewichtet eingehen können (PETERS et al., 2007).

Das TOPSIS-Verfahren dient zur Überprüfung der sog. „relativen Effizienz“, d. h. zum Vergleich der Effizienz mehrerer Alternativen zueinander. Das Verfahren wurde zur Unterstützung von Wirtschaftlichkeitsberechnungen entwickelt und mittlerweile in verschiedenen Bereichen angewendet (z. B. JANIC, 2003; JADIDI et al., 2008). Für vorliegende Fragestellung erfolgten Anpassungen, die in den folgenden Kapiteln kenntlich gemacht werden.

Bei TOPSIS erfolgt eine Ermittlung der Abstandsmaße (vgl. Kapitel 4.3.8) der untersuchten Indikatoren unterschiedlicher Alternativen zu den besten ermittelten Werten. Diejenige Alternative, deren Indikatorausprägungen insgesamt am geringsten von den jeweils optimalen Ausprägungen abweichen, wird am besten bewertet. Das als Resultat des TOPSIS-Verfahrens ermittelte Bewertungsmaß

weist eine strenge Monotonie auf, sodass für die Ergebnisse eine anschauliche Rangfolge erstellt werden kann. Voraussetzung zur Beurteilung von Entscheidungsalternativen mittels TOPSIS ist, dass die untersuchten Kriterien kardinalskaliert vorliegen.

Im Folgenden werden die Arbeitsschritte zur Durchführung des TOPSIS-Verfahrens grundsätzlich beschrieben (basierend auf PETERS et al., 2007) sowie konkret auf das Projekt „Konzept zur Ermittlung der Sicherheitswirkungen von digitalen Verkehrsinformationen“ projiziert.

Die einzelnen Arbeitsschritte des TOPSIS-Verfahrens wurden in Microsoft Excel programmiert und das Verfahren auf die Daten der Fahrsimulatorstudie angewendet. Eine Bewertung der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 5.

4.3.2 Modellieren der Analyseprobleme

Allgemein

Im ersten Arbeitsschritt ist festzulegen, welche Kriterien und Indikatoren für eine Untersuchung unterschiedlicher Konzepte genutzt werden sollen. Dabei wird differenziert zwischen

- **Kostenindikatoren:**
Eingangsgrößen („Kosten“), die minimal sein sollten.
- **Nutzenindikatoren:**
Ausgangsgrößen, deren erwünschte Ausprägung von der jeweiligen Größe abhängt. Beispielsweise sollten die Effekte hinsichtlich Fahrsicherheit maximal sein, eine Ausgangsgröße „Emissionen“ wäre jedoch zu minimieren.

Es ist zudem zu definieren, welche Alternativen, d. h., welche unterschiedlichen Fälle verglichen werden sollen. Die Anzahl der zu untersuchenden Alternativen beeinflusst maßgeblich den Arbeitsaufwand zur Anwendung des TOPSIS-Verfahrens.

Anwendung auf das Projekt

Im Rahmen der Analyse werden keine Kostenindikatoren berücksichtigt, da für die unterschiedlichen Warnkonzepte keine Kostenmodelle vorliegen.

Die Nutzenindikatoren sollen den Einfluss der Warnmeldungen auf die Fahrsicherheit am Stauende repräsentieren. Es werden die in Kapitel 4.2

genannten Indikatoren zur Abschätzung der Sicherheitswirksamkeit der Warnkonzepte für die Kriterien Längsregelung, Querregelung, Ereigniserkennung und Probandenbefragungen herangezogen.

4.3.3 Gewichtung der Indikatoren

Allgemein

Zur Bewertung relativer Indikatorbedeutungen und der Gewichtung von Indikatoren existieren für TOPSIS keine allgemeingültigen Vorgaben.

Anwendung auf das Projekt

In Absprache mit dem Auftraggeber wird keine Gewichtung der Indikatoren durchgeführt.

4.3.4 Messen und Bewerten der Indikatoreausprägungen

Allgemein

Aus den untersuchten n (Entscheidungs-)Alternativen wird eine Entscheidungsmatrix \underline{D} gebildet, die sich aus den Ausprägungen d_{ij} der insgesamt m Indikatoren C_j zusammensetzt (siehe Formel 3).

$$\underline{D} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_j & \dots & C_m \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_i \\ \dots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1j} & \dots & d_{1m} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & & \dots & d_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & & & \dots \\ d_{i1} & d_{i2} & \dots & d_{ij} & \dots & d_{im} \\ \dots & \dots & \dots & & & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nj} & \dots & d_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Formel 3

Es gilt:

$$d_{ij} \in \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 1, \dots, m$$

Demnach repräsentieren die Spaltenvektoren der Entscheidungsmatrix die Ausprägungen je Indikator C_j sämtlicher Alternativen A_1 bis A_n , während die Zeilenvektoren jeweils sämtliche Indikatoreausprägungen d_{ij} einer Alternative A_i enthalten.

Anwendung auf das Projekt

In vorliegendem Projekt setzt sich die Entscheidungsmatrix aus folgenden Elementen zusammen:

- A: Alternativen (A) für unterschiedliche Konzepte für Stauendewarnungen, diese unterscheiden sich hinsichtlich:
 - verkehrlichen Bedingungen (mit Verkehr vs. ohne Verkehr),
 - Härte bzw. Einsehbarkeit des Stauendes (hartes bzw. verdecktes Stauende vs. weiches bzw. unverdecktes Stauende),
 - Warnpräzision (präzise vs. nicht-präzise Warnung),
 - Warnentfernung/Warnzeitpunkt (3,5 km vs. 1,5 km vs. 0,3 km vor Stauende vs. keine Warnung),
 - Warnung vs. keine Warnung.
- n: Anzahl der untersuchten alternativen Warnkonzepte (A). $(A) = 2 * 2 * 3 * 2 + 2 * 2 = 28$ (vgl. Kapitel 4.3.2).
- C_j: Indikatoren der Fahrsicherheit (vgl. Kapitel 4.2):
 1. Längsbeschleunigung (RMS),
 2. mittlere Querbeschleunigung (absolut),
 3. Anstieg Bremsbereitschaft (räumlich),
 4. Bewertung „Wie hilfreich war die Warnung?“
 5. Standardabweichung der Geschwindigkeiten,
 6. Zeitabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug beim Beginn des Bremsens (THW) (nur Indikator-Set „Mit-Verkehr“).
- m: Anzahl der untersuchten Indikatoren C_j; m = 5 ohne Verkehr bzw. m = 6 mit Verkehr (siehe oben, C_j).
- d_{ij}: die in den Fahrsimulatorversuchen gewonnenen Ausprägungen der Indikatoren.

Die Entscheidungsmatrix ist im Anhang 3 dargestellt.

4.3.5 Bestimmen der normalisierten Entscheidungsmatrix

Allgemein

Um eine durch Skaleneffekte in Form von stark unterschiedlichen Wertebereichen der Indikatoren-

ausprägungen herbeigeführte unbeabsichtigte Gewichtung der Indikatoren auszuschließen, muss eine Normalisierung der Entscheidungsmatrix stattfinden. Beispielsweise unterscheiden sich die Indikatoren in ihren Einheiten (z. B. Sekunden vs. Urteile) bzw. Ausprägungen (TTC vs. Geschwindigkeit), durch die Normalisierung kann erreicht werden, dass die Indikatoren trotz unterschiedlicher Grundlage vergleichbar werden.

Es kann zum Beispiel das folgende Vorgehen gemäß Formel 4 gewählt werden, um die Ausprägungen der Indikatoren zu vereinheitlichen. Dabei wird jeder Eintrag d_{ij} der Entscheidungsmatrix mit der Wurzel aus der Summe der Quadrate dividiert, wodurch die Wertebereiche der jeweiligen Indikatoren auf den Bereich [0,1] skaliert werden:

$$\forall d_{ij} \neq 0: r_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n d_{ij}^2}} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 1, \dots, m$$

Formel 4

$$\forall d_{ij} = 0: r_{ij} = 0 \quad \forall i = 1, \dots, n \quad \forall j = 1, \dots, m$$

Formel 5

Die Elemente r_{ij} bilden die normalisierte Entscheidungsmatrix \underline{R} :

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} & \dots & r_{1m} \\ \dots & \dots & & & & \dots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} & \dots & r_{im} \\ \dots & \dots & & & & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nj} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}$$

Formel 6

Anwendung auf das Projekt

Die Normalisierung wird gemäß den oben genannten Formeln durchgeführt.

4.3.6 Berechnen der gewichteten normalisierten Entscheidungsmatrix

Allgemein

Durch eine Multiplikation der normalisierten Entscheidungsmatrix \underline{R} mit einem gemäß Kapitel 4.3.3 festgelegten Indikatorgewicht wird die gewichtete normalisierte Entscheidungsmatrix \underline{V} ermittelt:

$$\underline{V} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1j} & \dots & v_{1m} \\ \dots & \dots & & & & \dots \\ v_{i1} & v_{i2} & \dots & v_{ij} & \dots & v_{im} \\ \dots & \dots & & & & \dots \\ v_{n1} & v_{n2} & \dots & v_{nj} & \dots & v_{nm} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_j r_{1j} & \dots & w_m r_{1m} \\ \dots & \dots & & & & \dots \\ w_1 r_{i1} & w_2 r_{i2} & \dots & w_j r_{ij} & \dots & w_m r_{im} \\ \dots & \dots & & & & \dots \\ w_1 r_{n1} & w_2 r_{n2} & \dots & w_j r_{nj} & \dots & w_m r_{nm} \end{bmatrix}$$

$$= \underline{R} * \begin{bmatrix} w_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & w_2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & w_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & w_m \end{bmatrix}$$

Formel 7

Anwendung auf das Projekt

Wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben, wird keine Gewichtung angewendet. Als einheitlicher und neutraler Multiplikator auf die Entscheidungsmatrix wird auf alle Indikatoren der Gewichtungsfaktor $w_j = 1,0$ angewendet. Aus diesem Grund entsprechen sich in vorliegender Arbeit die Matrizen $\underline{V} = \underline{D}$.

4.3.7 Entwickeln virtueller Alternativen

Basierend auf der (gewichteten) normalisierten Entscheidungsmatrix \underline{V} werden zwei virtuelle Alternativen gebildet:

- eine „positiv-ideale“ bzw. Best-case-Alternative A^+ , die sich aus den jeweils besten ermittelten Indikatoreausprägungen zusammensetzt sowie
- eine „negativ-ideale“ oder Worst-Case-Alternative A^- , die aus den jeweils schlechtesten vorhandenen Ausprägungen der unterschiedlichen Indikatoren gebildet wird.

A^+ und A^- werden verwendet, um die Ausprägungen der Indikatoren einschätzen und bewerten zu können.

$$A^+ = \left\{ \left(\max_i \{v_{ij} \mid j \in J\} \right), \left(\min_i \{v_{ij} \mid j \in J'\} \right) \mid i = 1, \dots, n \right\}$$

$$= \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_j^+, \dots, v_m^+\}$$

Formel 8

$$A^- = \left\{ \left(\min_i \{v_{ij} \mid j \in J\} \right), \left(\max_i \{v_{ij} \mid j \in J'\} \right) \mid i = 1, \dots, \right\}$$

Formel 9

mit

$J = \{j = 1, \dots, m \mid \text{Kriterium } j \text{ gehört zu den Nutzenindikatoren}\}$

$J' = \{j = 1, \dots, m \mid \text{Kriterium } j \text{ gehört zu den Kostenindikatoren}\}$

und

$J \cap J' = \wedge \quad J \cup J' = \{1, \dots, m\}$

Anwendung auf das Projekt

Für die untersuchten Indikatoren werden aus den ermittelten einzelnen Ausprägungen die Best- und Worst-Case-Alternativen gebildet. Hierfür wurde eine Einschätzung der folgenden Indikatoreausprägungen vorgenommen:

- RMS der Längsbeschleunigung (C_1):

$$v_1^+ = \left\{ \min_i \{v_{i1}\} \mid i = 1, \dots, 28 \right\}$$

$$v_1^- = \left\{ \max_i \{v_{i1}\} \mid i = 1, \dots, 28 \right\}$$

- mittlere absolute Querbewegung (C_2):

$$v_2^+ = \left\{ \min_i \{v_{i2}\} \mid i = 1, \dots, 28 \right\}$$

$$v_2^- = \left\{ \max_i \{v_{i2}\} \mid i = 1, \dots, 28 \right\}$$

- Anstieg Bremsbereitschaft vor Stauende (C_3):

$$v_3^+ = \left\{ \max_i \{v_{i3}\} \mid i = 1, \dots, 28 \right\}$$

$$v_3^- = \left\{ \min_i \{v_{i3}\} \mid i = 1, \dots, 28 \right\}$$

- Probandenbefragung „Wie hilfreich war die Warnung?“ (C_4):

$$v_4^+ = \left\{ \max_i \{v_{i4}\} \mid i = 1, \dots, 28 \right\}$$

$$v_4^- = \left\{ \min_i \{v_{i4}\} \mid i = 1, \dots, 28 \right\}$$

- Standardabweichung der Geschwindigkeiten (C_5):

$$v_5^+ = \left\{ \min_i \{v_{i5}\} \mid i = 1, \dots, 28 \right\}$$

$$v_5^- = \left\{ \max_i \{v_{i5}\} \mid i = 1, \dots, 28 \right\}$$

- Zeitabstand beim Beginn des Bremsens (C_6):

$$v_6^+ = \left\{ \max_i \{v_{i6}\} \mid i = 1, \dots, 28 \right\}$$

$$v_6^- = \left\{ \min_i \{v_{i6}\} \mid i = 1, \dots, 28 \right\}$$

4.3.8 Berechnen der euklidischen Abstandsmaße

Allgemein

Die Berechnung der Abstandsmaße erfolgt für jede der $i = 1$ bis 28 Alternativen A_i (vgl. Kapitel 4.3.4) zu beiden virtuellen Alternativen A^+ und A^- (vgl. Kapitel 4.3.7). Es handelt sich um die so genannten euklidischen Abstände, die für den $j = 1$ bis m im $m = 5$ (bzw. $m = 6$, vgl. Kapitel 4.3.4) -dimensionalen (abstrakten) Bewertungsraum bestimmt werden und jeweils die Nähe einer Alternative zu einer virtuellen negativ-idealen oder positiv-idealen Alternative beschreibt. Dabei werden die Abstände S_i^+ zu den Best- und S_i^- zu den Worst-Case-Alternativen bestimmt (siehe Formel 10 und Formel 11):

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad \forall i = 1, \dots, n$$

Formel 10

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad \forall i = 1, \dots, n$$

Formel 11

Anwendung auf das Projekt

Für die normalisierten Indikatorausprägungen r_{ij} werden die Abstandsmaße S_i^+ und S_i^- zu den virtuellen Alternativen A^+ und A^- berechnet.

4.3.9 Bestimmen der relativen Nähe zur Best-Case-Alternative

Allgemein

Der finale Bearbeitungsschritt des TOPSIS-Verfahrens dient zur Aufbereitung der bis dato gewonnenen Ergebnisse. Der zu berechnende (Abstands-) Index weist eine strenge Monotonie auf, sodass die geprüften Alternativen anhand der ermittelten (Abstands-)Indizes bzw. ihrer Effizienz gereiht werden können. Die ermittelten Zahlenwerte ermöglichen zudem einen quantifizierbaren Vergleich der Resultate.

Es gilt, dass eine effiziente Alternative möglichst nahe am positiv-idealen („effizienten“) Bereich der Indikatorausprägungen angesiedelt sein sollte und wiederum ein maximaler Abstand zu den negativ-idealen Ausprägungen bestehen sollte.

Für jede Alternative A_i wird gemäß Formel 12 ein (Abstands-)Index (C_i^+) für die relative Nähe zu der positiv-idealen Alternative A^+ ermittelt.

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^+}$$

Formel 12

mit

$$0 \leq C_i^+ \leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, n$$

Dieser Berechnungsschritt bewirkt, dass, je weiter eine Alternative von einer negativ-idealen Alternative A^- entfernt ist, desto größer der Abstandsindex C_i^+ ist. Mittels TOPSIS werden Alternativen besser bewertet, je näher sie an positiv-idealen Lösungen liegen und je weiter entfernt sie von negativ-idealen Lösungen sind. Entspricht eine untersuchte Alternative der Best-Case-Alternative A^+ , dann beträgt der Abstandsindex 1,0.

Anwendung auf das Projekt

Anhand der (Abstands-)Indizes (C_i^+) werden die untersuchten Warnkonzepte gemäß ihrer ermittelten Effekte auf die Fahrsicherheit sortiert.

Die Resultate sind in Kapitel 6 dargestellt.

5 Ergebnisse der Simulatorstudie

5.1 Auswertungsstrategie

Die Auswertung der verschiedenen unter Kapitel 4.2 genannten Indikatoren erfolgte in mehreren Schritten:

1. Zunächst wurden die Ergebnisse für die jeweilige Variable grafisch dargestellt (Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen, abgekürzt „KI“).
2. Um einen Vergleich der Fahrten mit den verschiedenen Warnalternativen und den Fahrten ohne das Warnsystem ziehen zu können, wurden Differenzwerte zwischen den Fahrten mit und ohne System gebildet. Durch Einstichproben-t-Tests wurde bestimmt, ob sich die Differenzwerte zum Testwert „null“ signifikant unterscheiden und somit Unterschiede zwischen den Fahrten mit Systemauslegungen und nicht-gewarnten Fahrten existieren.
3. Anschließend wurden die Einflüsse von Einsehbarkeit des Stauendes (verdeckt vs. unverdeckt [für die Versuchsbedingung ohne Verkehr] bzw. hartes vs. weiches Stauende [für die Versuchsbedingung mit Verkehr]), Warndistanz (0,3 km

vs. 1,5 km vs. 3,5 km vor Erreichen des Stauendes) und Warnpräzision (präzise vs. unpräzise Warnung) geprüft. In diesem Fall wurden multivariate Varianzanalysen mit Messwiederholung und den Differenzwerten zur Fahrt ohne System als abhängige Variable durchgeführt.

Speziell für das Abbremsen vor Stauenden interessierte weiterhin die Wahrscheinlichkeit des Einleitens des Bremsens in Abhängigkeit von der verbleibenden Distanz bis zum Erreichen des Stauendes. In diesem Zusammenhang sind sog. Überlebens- oder Ereignisdatenanalysen einschlägig. Diese Analysen betrachten die Wahrscheinlichkeit, mit der bestimmte Ereignisse im zeitlichen Verlauf auftreten. Über sog. Überlebenskurven können die Wahrscheinlichkeiten des Eintretens eines Ereignisses im Zeitverlauf miteinander verglichen werden. Im Rahmen der nachfolgenden Ergebnisdarstellung werden Überlebenskurven für den Bremsbeginn verglichen. Auf diese Weise kann bestimmt werden, ob die Bremswahrscheinlichkeiten in gewarnten Fahrten früher ansteigen als in nicht-gewarnten Fahrten bzw. ob sich die Warnalternativen diesbezüglich unterscheiden.

Für eine bessere Lesbarkeit der Ergebnisse der Fahr Simulatoruntersuchung wird auf die ausführliche Darstellung der deskriptiven Ergebnisse sowie der inferenzstatistischen Auswertung an dieser

Stelle verzichtet. Die entsprechenden Informationen sind im Anhang des Dokuments zu finden. Sofern nachfolgend Ergebnisse inhaltlich beschrieben werden, kamen zuvor entsprechende inferenzstatistische Prüfungen zu einem signifikanten Ergebnis.

5.2 Bedingung „Mit Verkehr“

5.2.1 Geschwindigkeitsverläufe

Zunächst sollen Geschwindigkeitsverläufe für Stauannäherungen mit Verkehr betrachtet werden. Es zeigen sich dabei nur bei harten Stauenden Vorteile von Warnungen hinsichtlich einer früheren Geschwindigkeitsreduktion und infolgedessen eines weniger abrupten Bremsens: Präzise Warnungen scheinen im Vergleich zu unpräzisen Warnungen mit einer stärkeren Reduktion in der Geschwindigkeit unmittelbar vor dem Bremsen bei harten Stauenden einherzugehen (siehe Bild 23 rechts und Bild 24 rechts). Hinsichtlich des Warnzeitpunkts scheint im Fall von unpräzisen Warnungen die 1,5-km-Warnung günstig zu sein. Bei präzisen Warnungen zeichnet sich eine frühere Geschwindigkeitsreduktion bei 1,5-km- und 3,5-km-Warnungen ab.

Bei weichen Stauenden sind die Geschwindigkeitsverläufe für gewarnte und nicht-gewarnte Fahrten

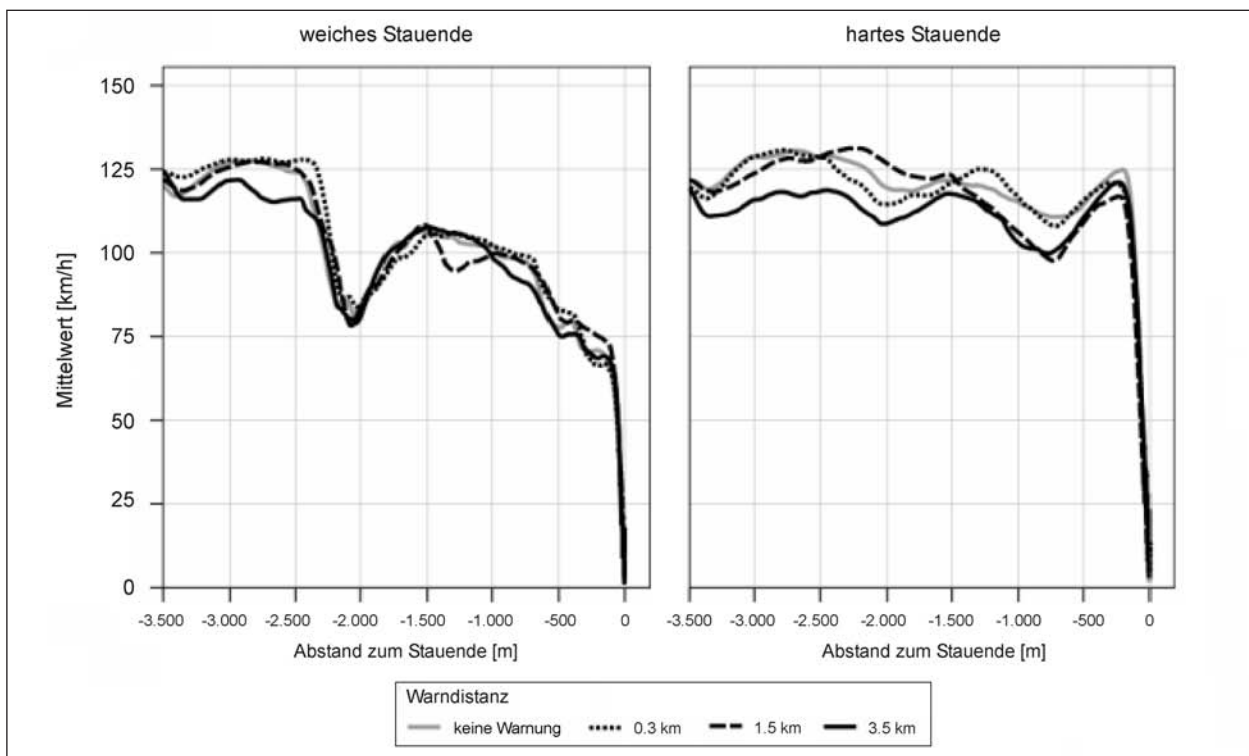


Bild 23: Geschwindigkeitsverläufe für Stauannäherungen ohne Warnung und mit unpräzisen Warnungen

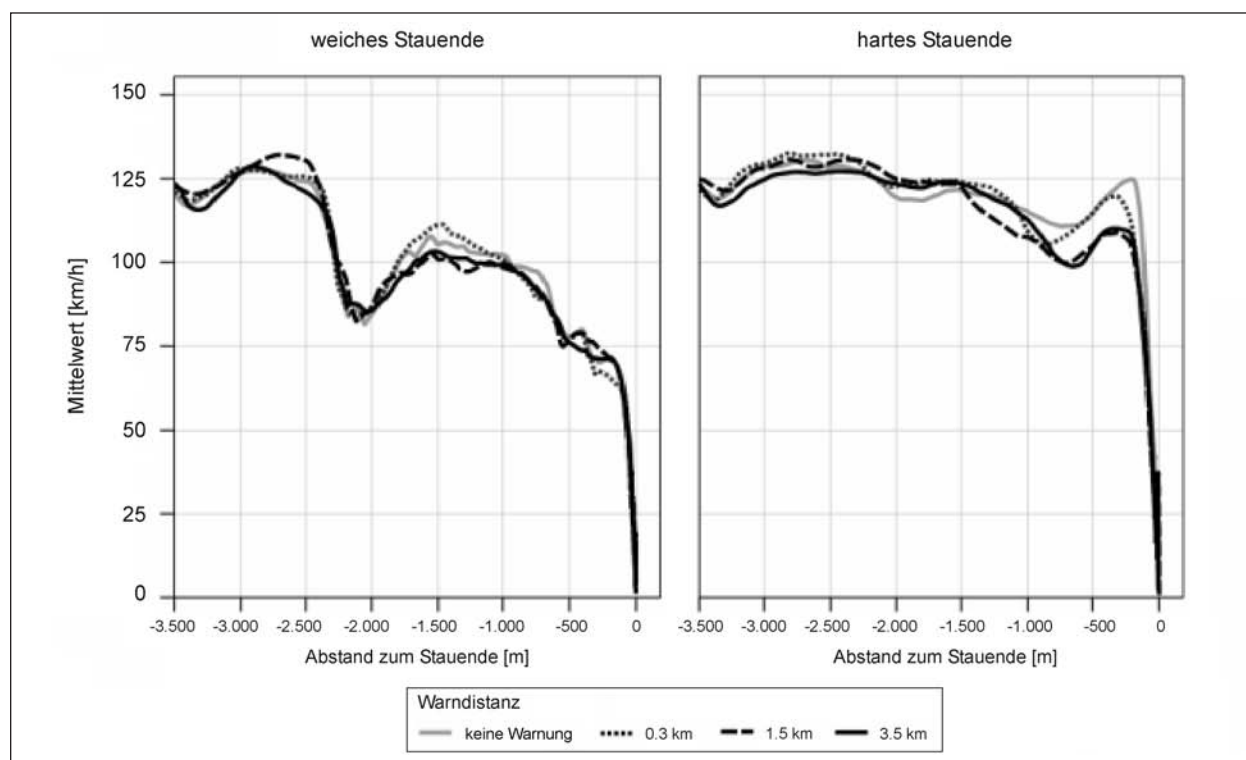


Bild 24: Geschwindigkeitsverläufe für Stauannäherungen ohne Warnung und mit präzisen Warnungen

vergleichbar: Ein diesbezüglicher Vorteil für Stauendewarnungen ergibt sich demnach für weiche Stauenden nicht (siehe Bild 23 links und Bild 24 links). In ähnlicher Weise sind keine systematischen Unterschiede in den Geschwindigkeitsverläufen zwischen den Warndistanzen zu beobachten.

5.2.2 Bremsverhalten

Es wurde erwartet, dass durch die Warnung vor einem Stauende die Fahrer in einer größeren Entfernung vor dem Stauende bremsbereit sind und zu bremsen beginnen (erfasst über die Parameter „Zeitpunkt Bremsbereitschaft“ und „Zeitpunkt Betätigung des Bremspedals“). Wie aus Bild 25 ersichtlich, wird diese Hypothese nicht bei beiden Stauendarten bestätigt: So sind die Fahrer insbesondere nach einer präzisen Warnung vor einem harten Stauende früher bremsbereit und bremsen früher als in einer nicht-gewarnten Fahrt. Bei präzisen Warnungen vor weichen Stauenden sowie bei unpräzisen Warnungen (sowohl bei harten als auch bei weichen Stauenden) ist dies nicht der Fall. Hier ergeben sich keine positiven Effekte einer Stauendewarnung auf den Zeitpunkt der Bremsbereitschaft oder der Bremspedalbetätigung.

Bild 25 zeigt zudem, dass die Warndistanz einen Einfluss auf den Bremszeitpunkt hat: Die 1,5-km-

Warnung geht mit einem früheren Bremszeitpunkt einher als die 3,5-km-Warnung. Ein Einfluss der Warndistanz auf die Bremsbereitschaft zeigt sich nicht.

Die Fahrer sind zudem vor Erreichen eines weichen Stauendes (Fahren im synchronisierten Verkehr) nach präzisen Warnungen längere Zeit bremsbereit, bevor sie mit dem Abbremsen beginnen, als in der nicht-gewarnten Fahrt (siehe Bild 26). Für unpräzise Warnungen ist dies bei weichen Stauenden nicht der Fall. In Stauanfahrten nach freiem Verkehr lässt sich dieser positive Effekt der Stauendewarnungen für beide Warnvarianten (präzise und unpräzise Warnung) zeigen. Die Dauer der Bremsbereitschaft vor dem Bremsbeginn ist bei harten und weichen Stauenden für präzise Warnungen für alle Warndistanzen größer als bei unpräzisen Warnungen.

Anschließend sollen die Überlebensfunktionen für den Bremszeitpunkt Anhaltspunkte geben, inwiefern die eingeführten Warnvarianten einen Vorteil auf den Bremszeitpunkt gegenüber den nicht-gewarnten Stauannäherungen haben. Es wird dabei für weiche Stauenden deutlich, dass bei der präzisen 0,3-km- und 3,5-km-Warnung die Wahrscheinlichkeit, das Bremspedal zu betätigen, später ansteigt als in der nicht-gewarnten Fahrt (siehe Bild

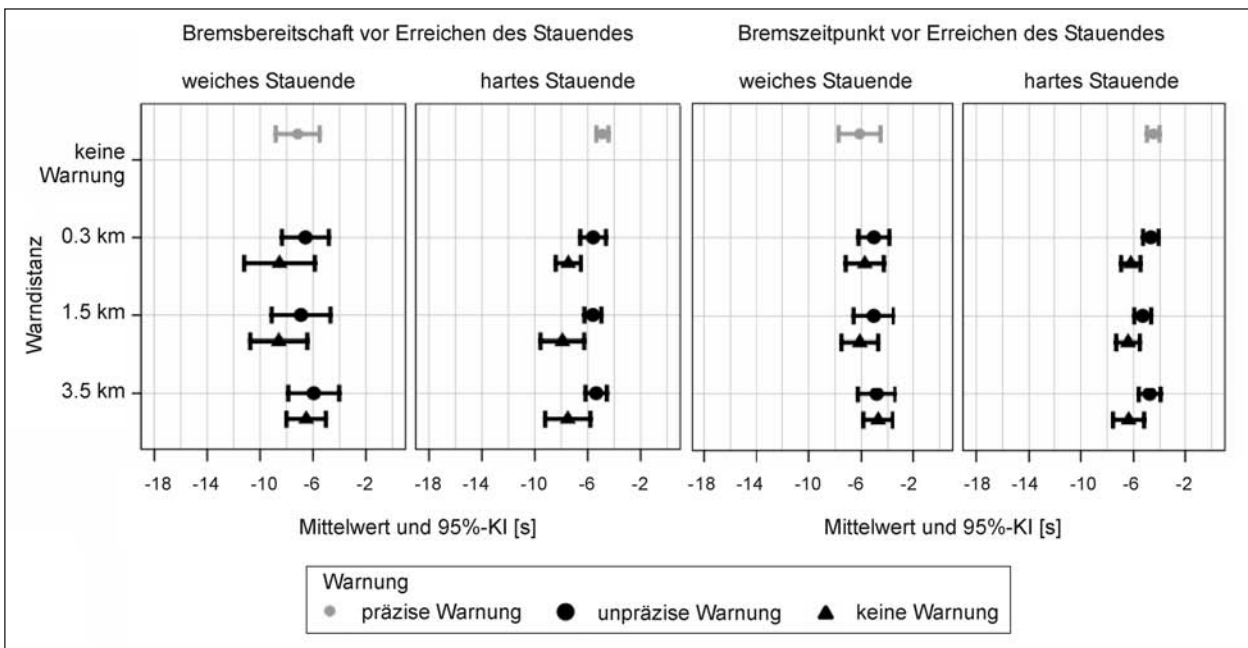


Bild 25: Mittlerer Zeitpunkt der Bremsbereitschaft (links) bzw. mittlerer Bremszeitpunkt (rechts) für Warnpräzision und Warndistanz. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95%-Vertrauensintervall

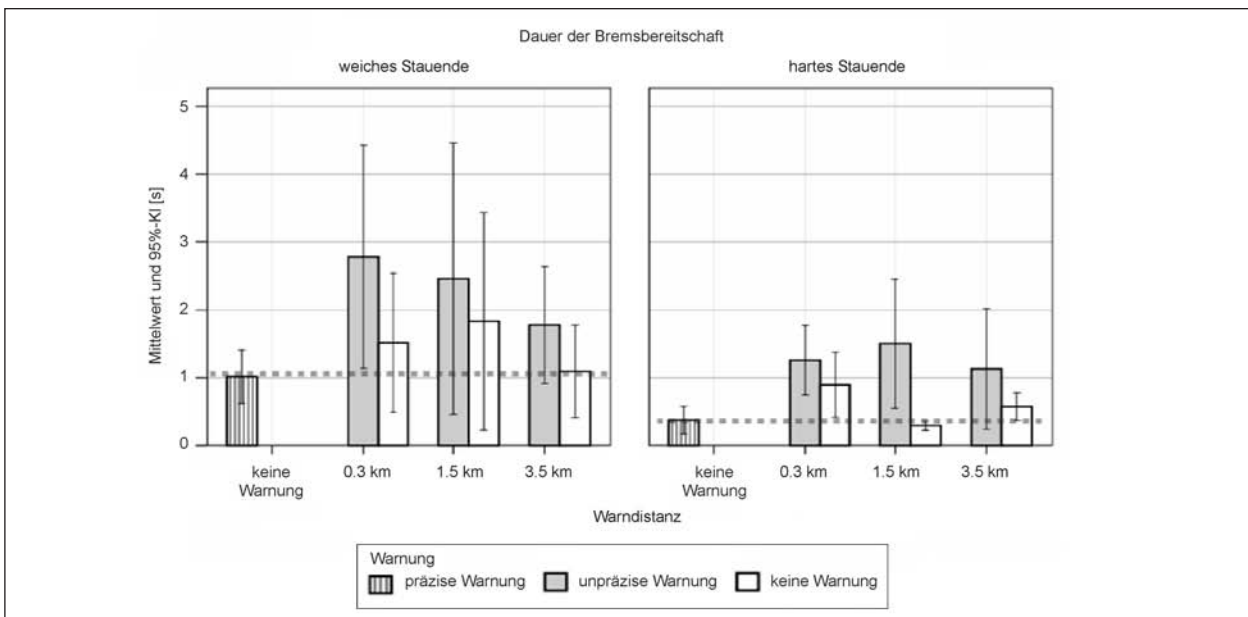


Bild 26: Dauer der Bremsbereitschaft. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95%-Vertrauensintervall

27). Lediglich bei der 1,5-km-Warnung ist die Überlebensfunktion des Bremszeitpunkts vergleichbar zur nicht-gewarnten Stauannäherung.

In ähnlicher Weise führen unpräzise Warnungen vor weichen Stauenden dazu, dass die Fahrer vermehrt später bremsen als in der nicht-gewarnten Fahrt. Dementsprechend ergibt sich bei Fahrten mit Warnungen für alle Warndistanzen eine flachere Überlebensfunktion für den Bremsbeginn als bei nicht-gewarnte Stauannäherungen (siehe Bild 28).

Demgegenüber haben präzise Warnungen bei harten Stauenden einen Vorteil im Sinne eines steileren Anstiegs der Wahrscheinlichkeit des Bremsbeginns mit abnehmendem Abstand zum Stauende verglichen mit nicht-gewarnten Annäherungen (siehe Bild 29): Die Wahrscheinlichkeit, dass Fahrer mit dem Bremsen beginnen, steigt mit präzisen Warnungen in größerer Distanz zum Stauende an als in der nicht-gewarnten Fahrt. Der steilste Anstieg findet sich bei 0,3-km-Warnungen verglichen mit den übrigen Warndistanzen. Hier ist im Ver-

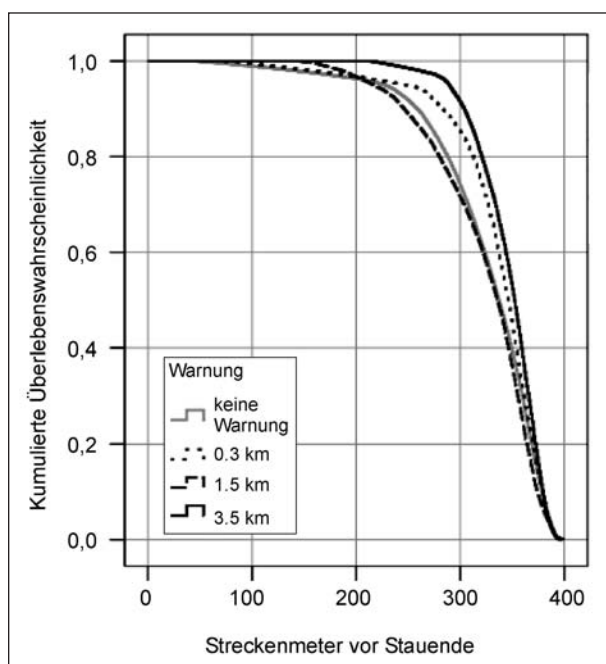


Bild 27: Überlebensfunktion bei Annäherungen an weichen Stauenden mit präzisen Warnungen. Dargestellt sind die Wahrscheinlichkeiten, wie viele Fahrer noch nicht das Bremspedal betätigt haben in den letzten 400 m vor dem tatsächlichen Stauende. Das Stauende ist bei 400 m auf der Abszisse positioniert

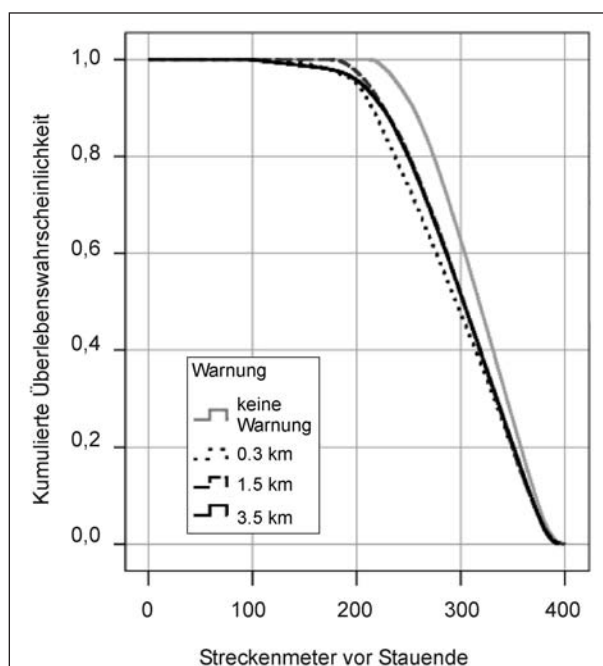


Bild 29: Überlebensfunktion bei Annäherungen an harten Stauenden mit präzisen Warnungen. Für eine ausführliche Beschreibung siehe Bild 27

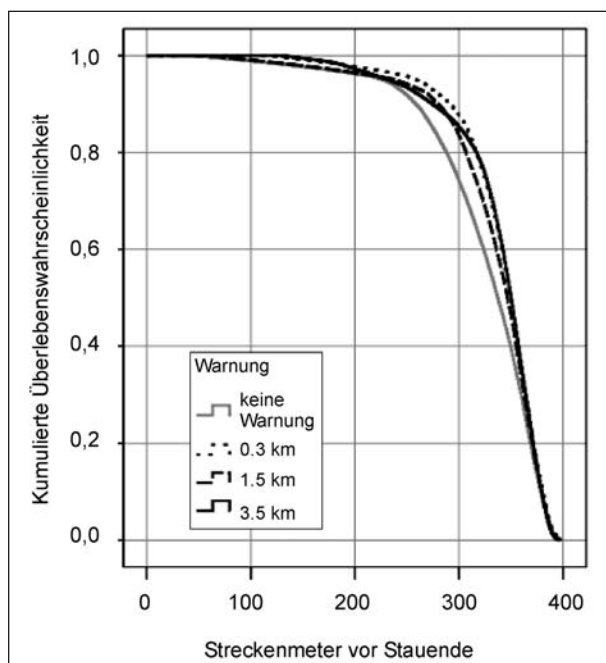


Bild 28: Überlebensfunktion bei Annäherungen an weichen Stauenden mit unpräzisen Warnungen. Für eine ausführliche Beschreibung siehe Bild 27

gleich zur nicht-gewarten Fahrt die Wahrscheinlichkeit, dass die Fahrer frühzeitiger mit dem Bremsen beginnen, am größten.

Bei unpräzisen Warnungen weicht die Überlebensfunktion für den Beginn des Bremsens nur bei

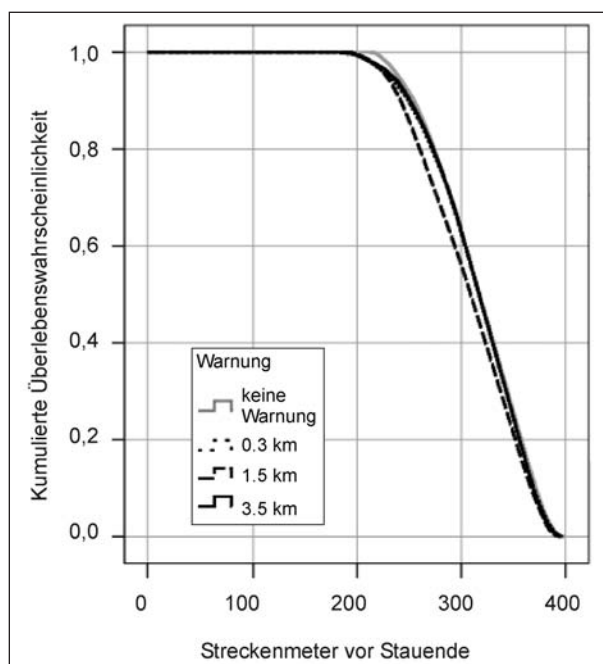


Bild 30: Überlebensfunktion bei Annäherungen an harten Stauenden mit unpräzisen Warnungen. Für eine ausführliche Beschreibung siehe Bild 27

1,5-km-Warnungen signifikant von der nicht-gewarten Stauannäherung ab (siehe Bild 30). Die Überlebensfunktionen und damit die Wahrscheinlichkeit des Bremsbeginns für unpräzise 0,3-km-Warnungen und 3,5-km-Warnungen unterscheiden sich nicht von der nicht-gewarten Fahrt.

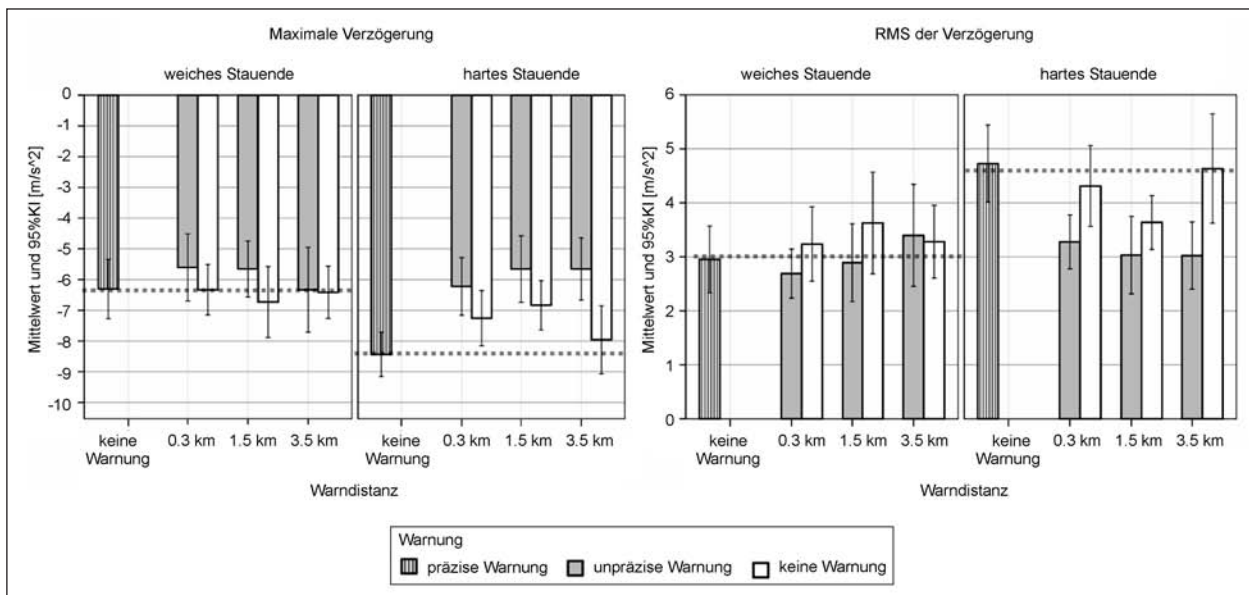


Bild 31: Mittlere maximale Längsverzögerung (links) bzw. mittlere Root-Mean-Square (RMS) der Verzögerung (rechts) für Warnpräzision und Warndistanz. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95%-Vertrauensintervall

Zudem müssen die Fahrer durch Warnungen vor harten Stauenden insgesamt weniger stark bremsen als bei nicht-gewarnten Stauanfahrten (erfasst über den Parameter „Maximale Verzögerung“; siehe Bild 31 links). Der Effekt unpräziser Warnungen ist diesbezüglich weniger stark ausgeprägt als der Effekt präziser Warnungen. Bei weichen Stauenden wird das Fahrverhalten durch beide Warnvarianten gegenüber einer nicht-gewarnten Annäherung an ein Stauende nicht verändert. Ein Einfluss der Warndistanz auf die Verringerung der Bremsstärke beim Erreichen der Stauenden findet sich nicht.

Während über die maximalen Verzögerungen ein punktueller Parameter für die Intensität des Bremsens betrachtet wird, hat die Betrachtung des quadratischen Mittels der Verzögerung (erfasst über den Parameter „RMS der Verzögerung“) den Vorteil, die Intensität des Bremsens über den gesamten Bremsweg einzubeziehen. Bei diesem Parameter wird ersichtlich, dass die Fahrer nur durch präzise Warnungen vor harten Stauenden weniger intensiv bremsen müssen als in der nicht-gewarnten Fahrt (siehe Bild 31 rechts). An weichen Stauenden ist die Intensität des Abbremsens durch präzise und unpräzise Warnungen unverändert. Die Warndistanz hat keinen Einfluss hinsichtlich der Verringerung der Intensität des Bremsens vor Stauenden.

Präzise Warnungen bei harten Stauenden sind im Vergleich zu den anderen Versuchsbedingungen (unpräzise Warnungen bei harten Stauenden sowie präzise und unpräzise Warnungen bei weichen

Stauenden) hinsichtlich ihrer Wirkungen auf die Bremsstärke positiv zu bewerten.

5.2.3 Probandenurteile

Zugleich geben die Fahrer unabhängig von der Stauendart an, von den Stauendwarnungen bezüglich der beurteilten Sicherheit (erfasst über die Frage „Wie sicher war die Annäherung an das Stauende?“) profitiert zu haben: Die entsprechenden Fahrerurteile sind in gewarnten Fahrten höher als in nicht-gewarnten Fahrten (siehe Bild 32 links). Mit präzisen Warnungen wird eine stärkere Steigerung der wahrgenommenen Sicherheit als mit unpräzisen Warnungen berichtet. Es ist kein Einfluss der Warndistanz zu beachten.

Weiterhin ist die erlebte Überraschung (erfasst über die Frage „Wie überraschend war das Stauende?“) beim Erreichen des Stauendes mit präzisen, nicht jedoch mit unpräzisen Warnungen geringer als bei nicht-gewarnten Fahrten (siehe Bild 32 rechts). Insbesondere an harten Stauenden reduzieren präzise Warnungen die erlebte Überraschung stark. Präzise Warnungen in großer Warndistanz (1,5-km-Warnung und 3,5-km-Warnung) sind Warnungen in kleiner Distanz (0,3-km-Warnung) diesbezüglich überlegen.

Die Fahrer geben zudem in verschiedenen Fragen an, von präzisen Warnungen stärker profitiert zu haben als von unpräzisen Warnungen (siehe Bild 33): Im Fall von präzisen Warnungen ist die berich-

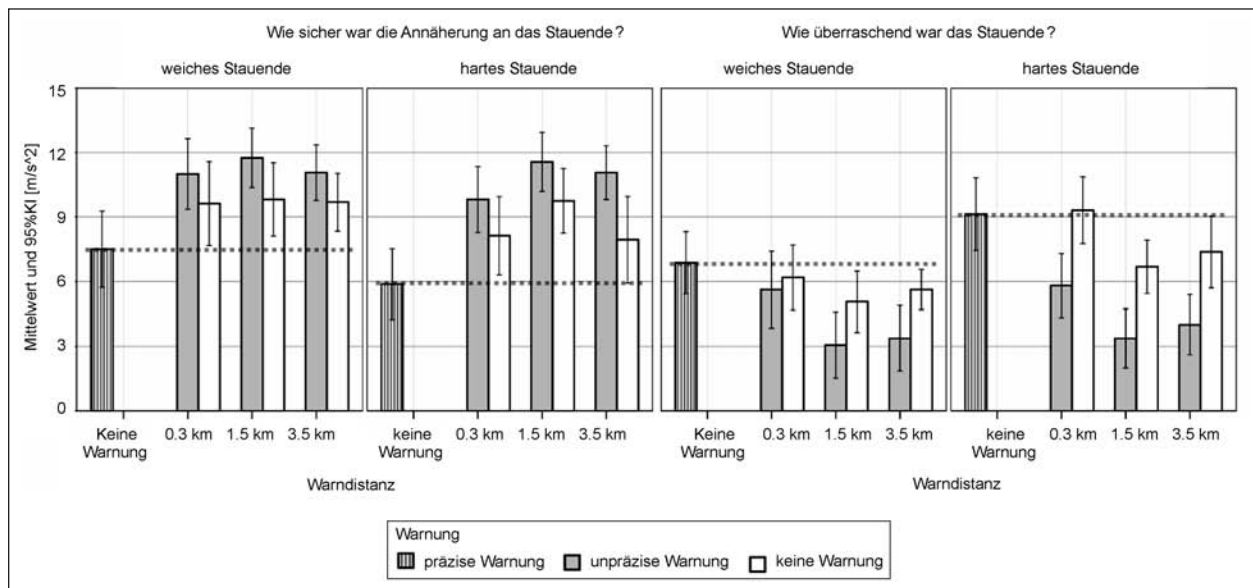


Bild 32: Beurteilung der Sicherheit der Stauannäherung (links) und der Überraschung durch das Stauende (rechts) für Warnpräzision und Warndistanz. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95%-Vertrauensintervall

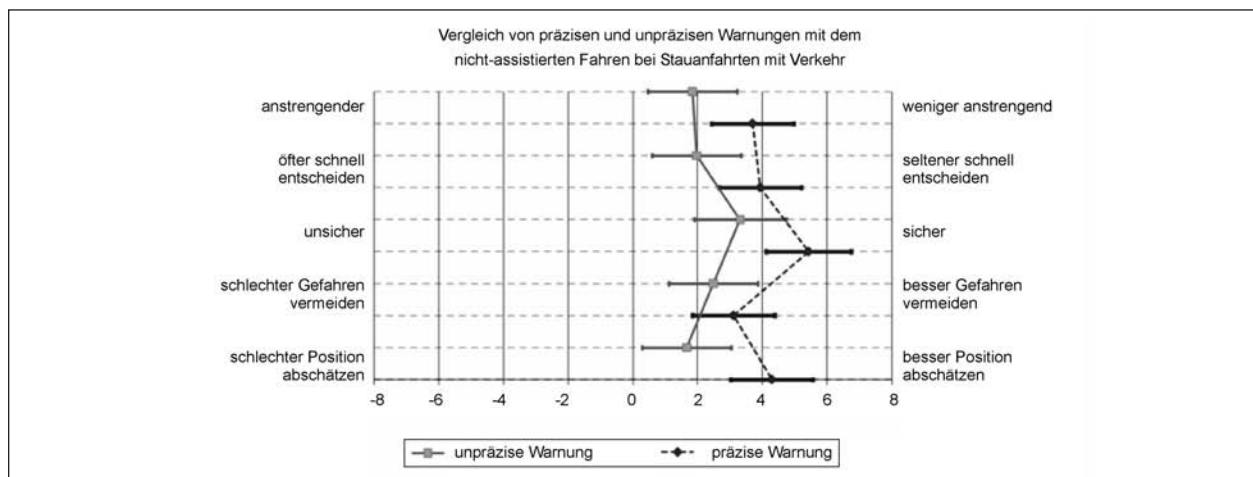


Bild 33: Probandenurteile für ausgewählte Fragen für eine Bewertung der Variationen der Warnpräzision. Positive Werte bedeuten eine im Vergleich zur nicht-gewarnten Fahrt günstige Bewertung der Warnung. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95%-Vertrauensintervall

tete Anstrengung (erfasst über die Frage „Wie anstrengend war das Fahren im fließenden Verkehr?“) niedriger, es müssen seltener schnelle Entscheidungen gefällt werden (erfasst über die Frage „Wie oft mussten Sie beim Fahren im fließenden Verkehr schnelle Entscheidungen treffen?“) und die Position des Stauendes ist besser abschätzbar (erfasst über die Frage „Wie gut konnten Sie die Position des Stauendes abschätzen?“). Ähnlich berichten die Fahrer, durch die präzisen Warnungen sicherer gefahren zu sein (erfasst über die Frage „Wie sicher war das Fahren im fließenden Verkehr?“) sowie Gefahren besser vermieden zu haben (erfasst über die Frage „Wie gut konnten Sie gefährliche Situationen vermeiden, die durch andere Verkehrsteilnehmer

im fließenden Verkehr verursacht wurden?“). Obwohl in den genannten Fragen die präzisen Warnungen positiver beurteilt werden als die unpräzisen Warnungen, haben auch noch unpräzise Warnungen im Vergleich mit nicht-gewarnten Annäherungen an ein Stauende Vorteile.

Entsprechend den berichteten Ergebnissen werden präzise Warnungen von den Fahrern unabhängig von der Einsehbarkeit der Stauenden und unabhängig von der Warndistanz als hilfreicher bewertet als unpräzise Warnungen (erfasst über die Frage „Wie hilfreich war die Warnung?“; siehe Bild 34).

Werden die Fahrer um ihr direktes Urteil gebeten, welche Variante der Warnpräzision sie bevorzugen,

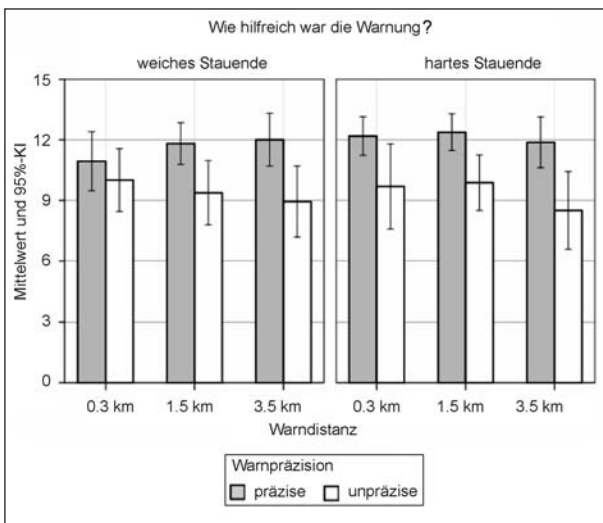


Bild 34: Beurteilung der Nützlichkeit der Warnung für Warnpräzision und Warndistanz. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95%-Vertrauensintervall

nennen 12 von 16 Fahrern die präzise Warnung. Als Begründung für die Wahl der präzisen Warnung werden beispielhaft genannt:

- „Man kann sich besser auf das Stauende vorbereiten und ist vorsichtiger.“
- „Bei Kenntnis der Entfernung des Stauendes kann man den Stau eventuell noch umfahren.“
- „Man kann nachfolgende Verkehrsteilnehmer warnen.“

Demgegenüber geben nur 4 von 16 Fahrern an, dass sie die unpräzise Warnung im alltäglichen Verkehr bevorzugt nutzen würden. Als Argumente führen diese Fahrer z. B. an:

- „Man ist gewarnt und muss selbst aufpassen – eine Anzeige der Distanz ist unnötig.“
- „Man ist aufmerksamer als mit dem präzisen Warnsystem. Dieses verleitet dazu, dass man sich zu sehr auf die Distanzanzeige verlässt.“

Bezüglich der Warndistanz bevorzugen die Fahrer unabhängig von der Warnpräzision die 1,5-km-Warnung: Sollen die Fahrer die realisierten Warndistanzen in eine gemeinsame Rangreihe bringen, wird für die unpräzise 1,5-km-Warnung von 11 von 16 Fahrern der Rang 1 (= beste Warndistanz) vergeben, 5 von 16 Fahrern vergeben den Rang 2, der einer mittelguten Warndistanz entspricht. Kein Fahrer vergibt für die unpräzise 1,5-km-Warnung den Rang 3 (= schlechteste Warndistanz; siehe Bild 35). Bei präzisen Warnungen finden sich ähnliche Ein-

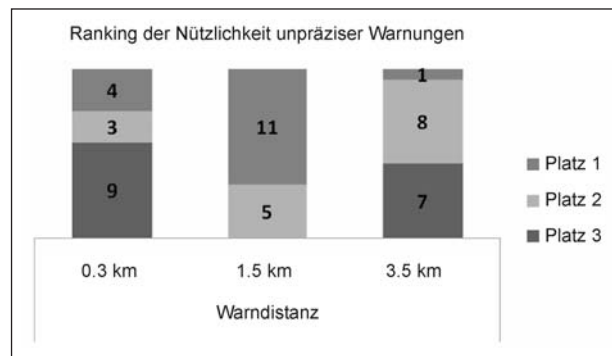


Bild 35: Rangvergabe für die realisierten Warndistanzen (Rang 1 = beste Variante, Rang 3 = schlechteste Variante). Dargestellt sind absolute Häufigkeiten der Beurteilung unpräziser Warnungen

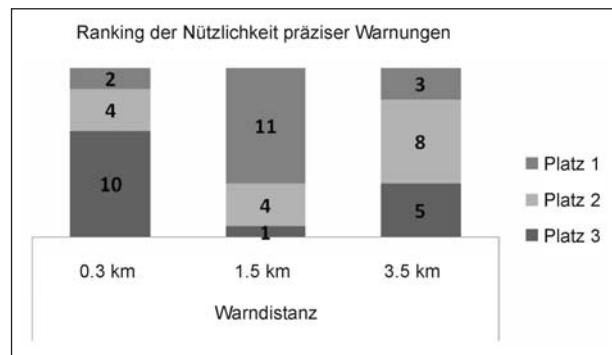


Bild 36: Rangvergabe für die realisierten Warndistanzen (Rang 1 = beste Variante, Rang 3 = schlechteste Variante). Dargestellt sind absolute Häufigkeiten der Beurteilung präziser Warnungen

schätzungen: Für präzise 1,5-km-Warnungen vergeben 11 von 16 Fahrern den Rang 1, 4 von 16 Fahrern den Rang 2 und nur 1 Fahrer den Rang 3 (siehe Bild 36). Für die 0,3-km- und 3,5-km-Warnung resultieren dementsprechend weniger günstige Ergebnisse in dieser Rangvergabe. Die 0,3-km-Warnung schneidet dabei im direkten Vergleich mit der 3,5-km-Warnung insgesamt etwas günstiger ab.

5.3 Bedingung „Ohne Verkehr“

5.3.1 Geschwindigkeitsverläufe

Auch für die Bedingung ohne Verkehr wurden zunächst Geschwindigkeitsverläufe für nicht-gewarnte Stauannäherungen grafisch betrachtet (siehe Bild 37 und Bild 38). Es wird sichtbar, dass Warnungen an verdeckten und unverdeckten Stauenden zu einer frühzeitigeren Geschwindigkeitsreduktion vor dem Erreichen der Stauenden beitragen. Bei beiden Stauendarten (verdeckt und unverdeckt) sind die Effekte bei präzisen Warnungen

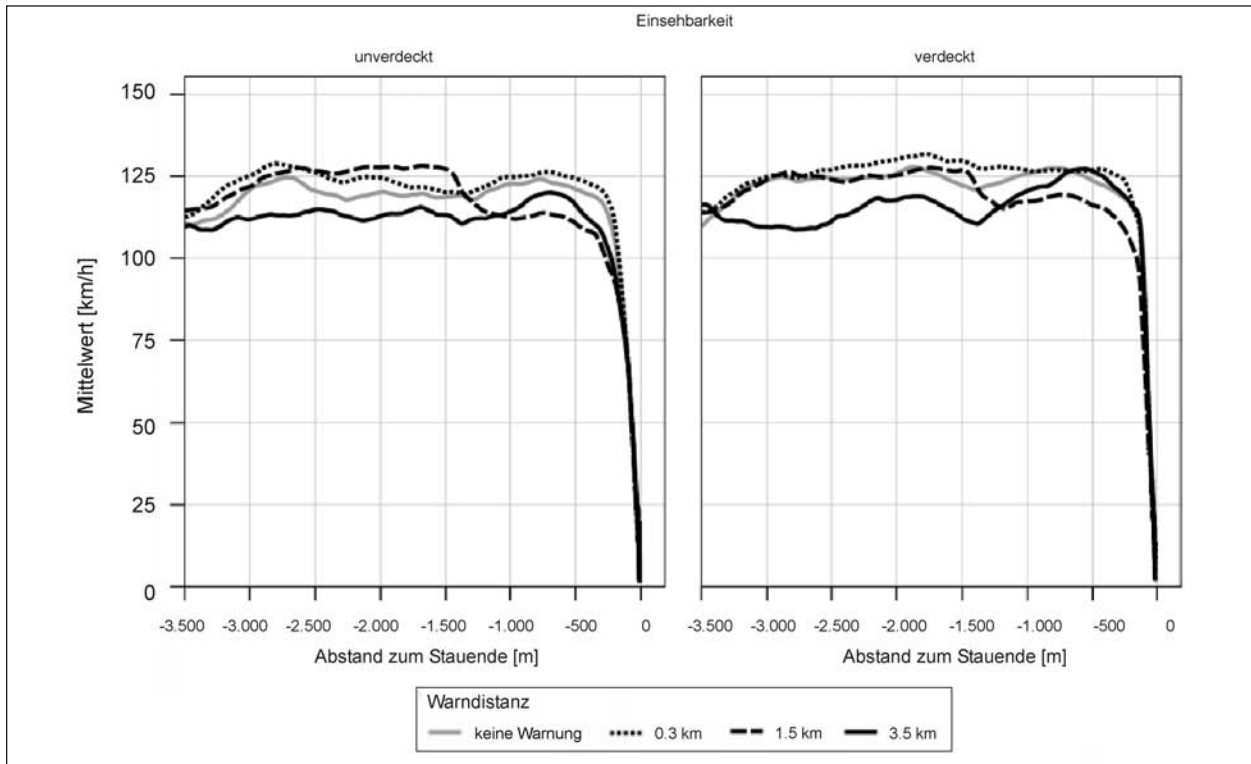


Bild 37: Geschwindigkeitsverläufe für Stauannäherungen ohne Warnung und mit unpräzisen Warnungen

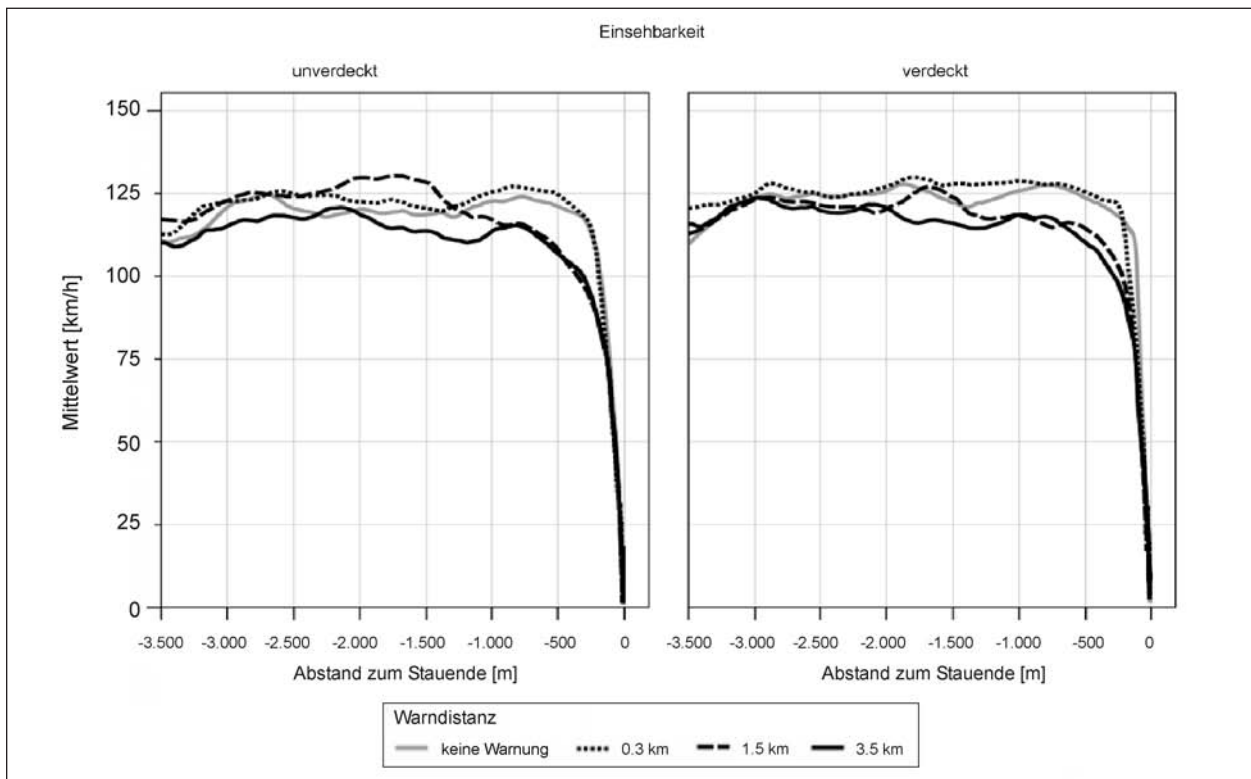


Bild 38: Geschwindigkeitsverläufe für Stauannäherungen ohne Warnung und mit präzisen Warnungen

für 1,5-km- und 3,5-km-Warnungen beobachtbar, bei unpräzisen Warnungen allerdings nur für 1,5-km-Warnungen. Nach unpräzisen 3,5-km-Warnungen vermindern die Fahrer zunächst die Ge-

schwindigkeit, erreichen aber noch vor dem Erreichen des Stauendes wieder die Ausgangsgeschwindigkeit (siehe Bild 37).

5.3.2 Bremsverhalten

Sowohl durch die Einführung von präzisen als auch unpräzisen Warnungen vor Stauenden sind die Fahrer in größerem Abstand zum Stauende bremsbereit und bremsen in größerem Zeitabstand verglichen mit der nicht-gewarnten Fahrt. Dieser Vorteil von Stauendewarnungen zeigt sich an verdeckten und an unverdeckten Stauenden.

Wie aus Bild 40 ersichtlich, sind die Fahrer dabei insbesondere nach einer präzisen Warnung vor

einem verdeckten Stauende früher bremsbereit und bremsen früher als bei einer unpräzisen Warnung. Zudem gehen die 1,5-km- und 3,5-km-Warnungen im Vergleich zu den 0,3-km-Warnungen mit einer früheren Bremsbereitschaft und einem früheren Bremszeitpunkt einher.

In Fahrten mit präzisen Warnungen zeigt sich eine größere Dauer der Bremsbereitschaft im Vergleich zu nicht-gewarnten Fahrten. Bei unpräzisen Warnungen ergibt sich dieser Effekt nur bei unverdeckten Stauenden (siehe Bild 39).

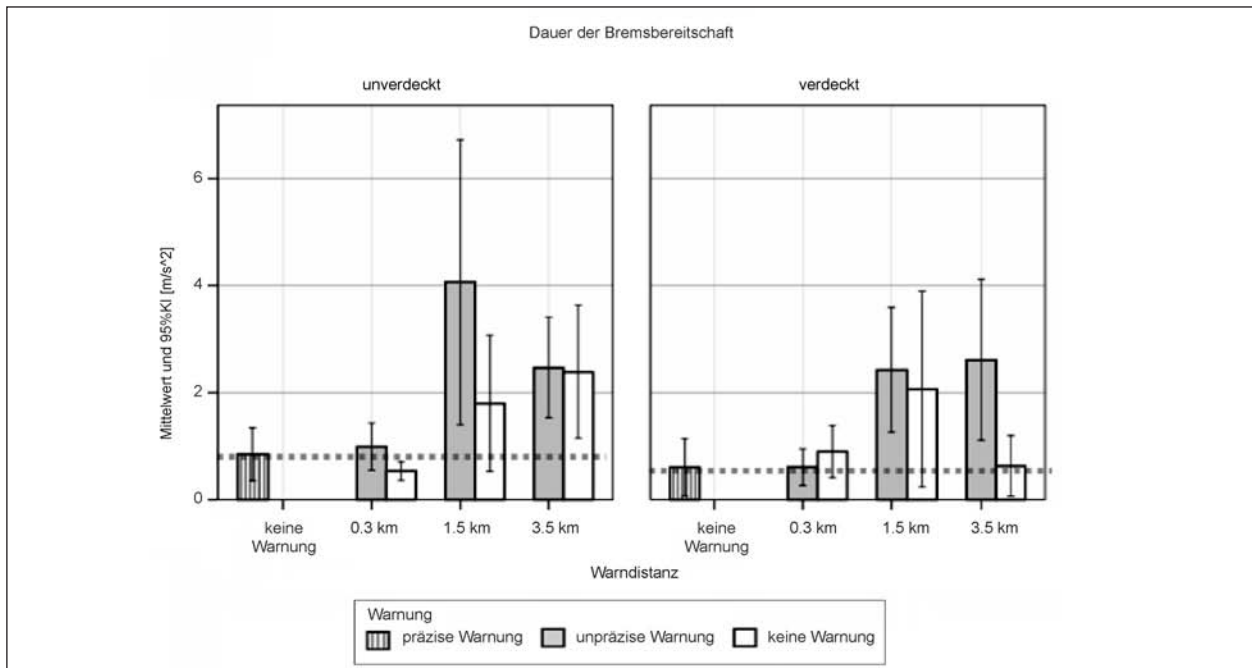


Bild 39: Dauer der Bremsbereitschaft. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95%-Vertrauensintervall

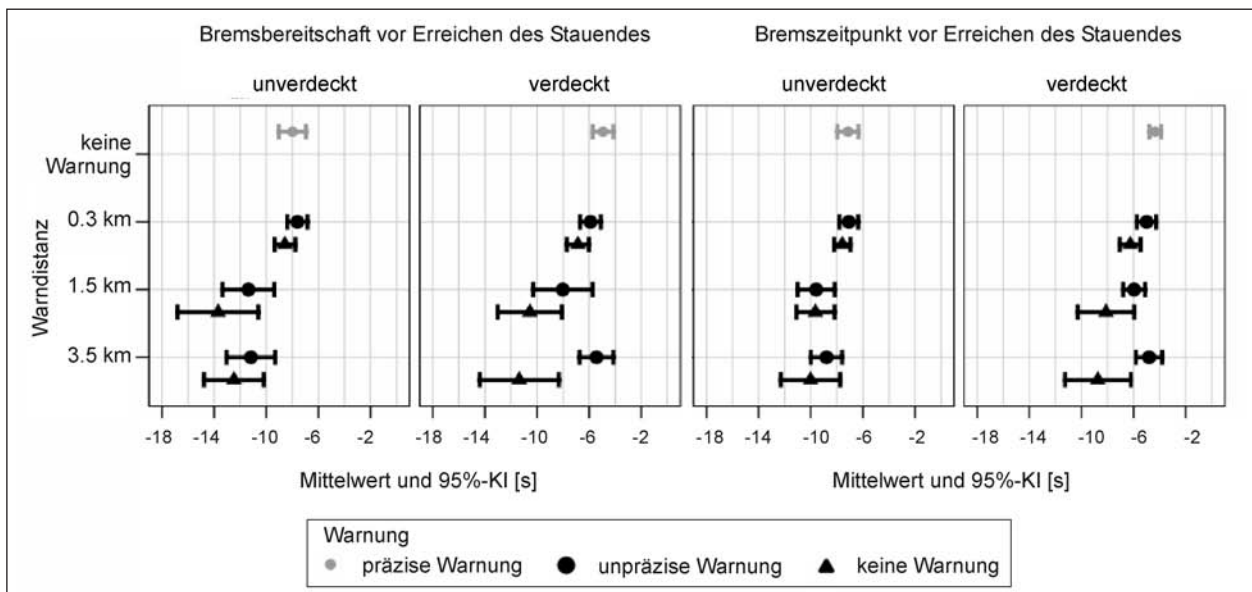


Bild 40: Mittlerer Zeitpunkt der Bremsbereitschaft (links) bzw. mittlerer Bremszeitpunkt (rechts) für Warnpräzision und Warnndistanz. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95%-Vertrauensintervall

In den Überlebensfunktionen zum Bremsverhalten wird sichtbar, dass für präzise Warnungen bei allen Warndistanzen die Wahrscheinlichkeit des Bremsbeginns stärker ansteigt als in der nicht-gewarnten Fahrt (siehe Bild 41). 1,5-km- und 3,5-km-Warnungen führen außerdem zu einem früheren Bremsbeginn als 0,3-km-Warnungen, unterscheiden sich aber nicht voneinander.

Bei unpräzisen Warnungen führen nur 1,5-km- und 3,5-km-Warnungen zu einem steileren Anstieg der Wahrscheinlichkeit des Bremsbeginns (siehe Bild 42). 0,3-km-Warnungen unterscheiden sich diesbezüglich nicht von der nicht-gewarnten Fahrt. Der stärkste Effekt findet sich bei unpräzisen Warnungen an unverdeckten Stauenden bei 1,5-km-Warnungen.

Für präzise Warnungen vor verdeckten Stauenden ergeben sich für jede Warndistanz Unterschiede beim Einsetzen des Bremsens verglichen mit der nicht-gewarnten Fahrt: Die Wahrscheinlichkeit des Bremsbeginns ist bei allen Warndistanzen deutlich früher als in der nicht-gewarnten Stauannäherung (siehe Bild 43). Bei präzisen Warnungen vor verdeckten Stauenden hat zudem die Warndistanz einen Einfluss auf die Wahrscheinlichkeit: Je größer die Warndistanz, desto steiler steigt die Wahr-

scheinlichkeit des Beginn des Bremsens mit abnehmender Distanz zum Stauende.

Auch bei unpräzisen Warnungen finden sich an verdeckten Stauenden bei allen Warndistanzen steilere Anstiege der Bremswahrscheinlichkeit im Vergleich zur nicht-gewarnten Fahrt (siehe Bild

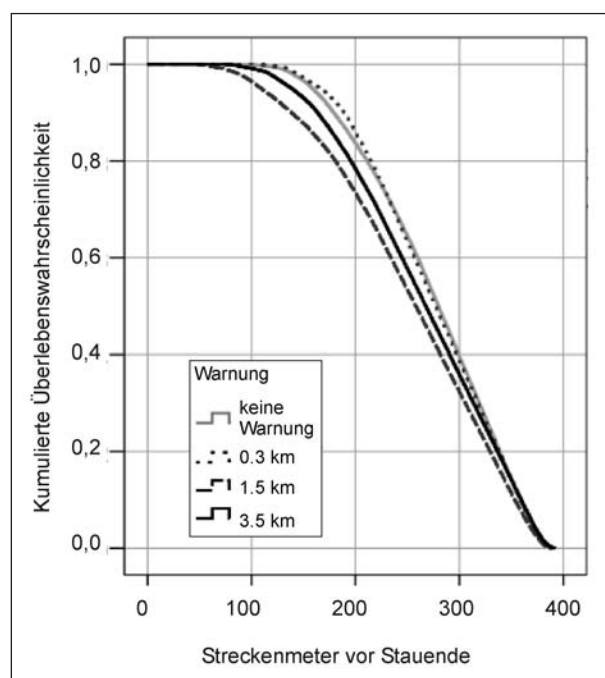


Bild 42: Überlebensfunktion bei Annäherungen an unverdeckte Stauenden mit unpräzisen Warnungen. Für eine ausführliche Beschreibung siehe Bild 27

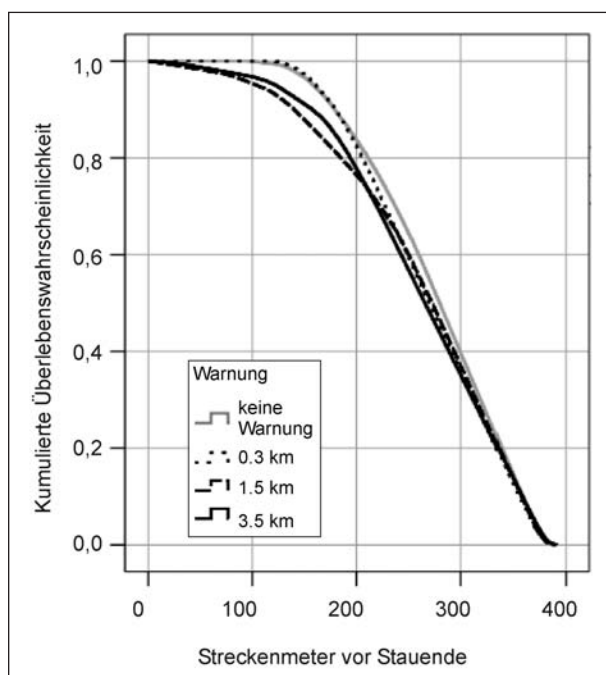


Bild 41: Überlebensfunktion bei Annäherungen an unverdeckte Stauenden mit präzisen Warnungen. Dargestellt sind die Wahrscheinlichkeiten, wie viele Fahrer noch nicht das Bremspedal betätigt haben in den letzten 400 m vor dem tatsächlichen Stauende. Das Stauende ist bei 400 m auf der Abszisse positioniert

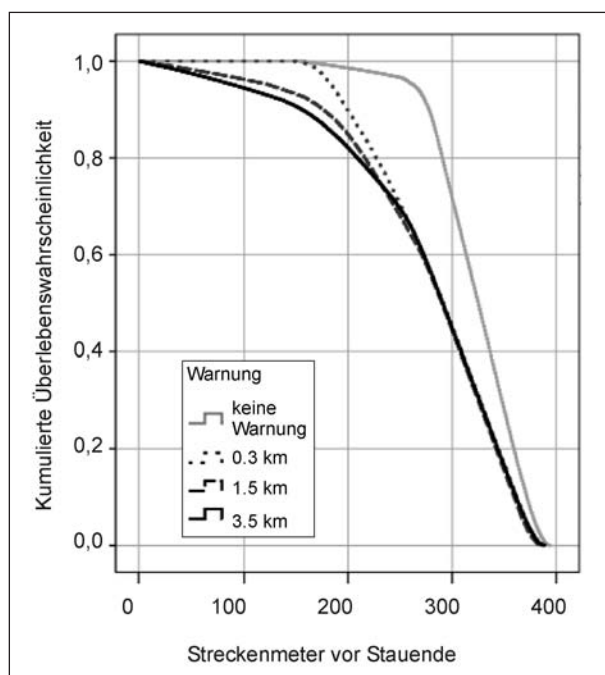


Bild 43: Überlebensfunktion bei Annäherungen an verdeckte Stauenden mit präzisen Warnungen. Für eine ausführliche Beschreibung siehe Bild 27

44). Im Gegensatz zur präzisen Warnung findet sich der stärkste Anstieg der Wahrscheinlichkeit für den Bremsbeginn bei 1,5-km-Warnungen, gefolgt von 0,3-km-Warnungen.

Bezüglich der Stärke, mit der die Fahrer beim Erreichen von Stauenden abbremsen müssen, zeigt sich der Vorteil von Stauendewarnungen nur für verdeckte Stauenden (Parameter „Maximale Verzögerung“; siehe Bild 45 links): Vor verdeckten Stau-

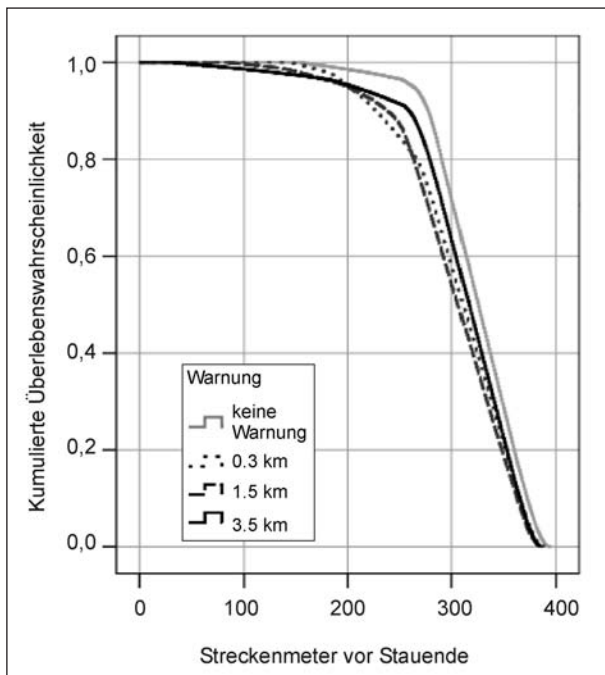


Bild 44: Überlebensfunktion bei Annäherungen an verdeckten Stauenden mit unpräzisen Warnungen. Für eine ausführliche Beschreibung siehe Bild 27

enden bremsen die Fahrer nach präzisen und unpräzisen Warnungen weniger stark ab als in Fahrten ohne Warnung. Bei unverdeckten Stauenden findet sich dieser Effekt nicht.

Allerdings ist zu bemerken, dass der Einfluss unpräziser Warnungen auf die Bremsstärke weniger stark ausgeprägt ist als der Effekt präziser Warnungen. Außerdem ist der Warnzeitpunkt zu beachten: So bremsen die Fahrer beim Erreichen der Stauenden im Fall von 1,5-km-Warnungen weniger stark als bei 3,5-km- und 0,3-km-Warnungen. Gerade bei 3,5-km-Warnungen ist der Unterschied im Bremsverhalten bei präzisen und unpräzisen Warnungen erkennbar: Unpräzise Warnungen bei verdeckten Stauenden gehen mit einer ähnlichen maximalen Verzögerung einher wie die nicht-gewarnte Annäherung. Präzise Warnungen führen demgegenüber in dieser Situation zu einer geringeren maximalen Verzögerung.

Zugleich ist die Bremsintensität (erfasst über den Parameter „RMS der Verzögerung“) durch präzise Warnungen vor verdeckten Stauenden geringer als in der nicht-gewarnten Fahrt (siehe Bild 45 rechts). An unverdeckten Stauenden ist die Bremsintensität weitgehend unbeeinflusst von der Warnpräzision. Die Verringerung der Bremsintensität ist durch präzise Warnungen insbesondere an verdeckten Stauenden stärker ausgeprägt als an unverdeckten Stauenden. Der Einfluss des Warnzeitpunkts auf das Bremsverhalten zeigt sich ebenfalls bei der Betrachtung des RMS der Verzögerung: Auch hier müssen Fahrer beim Erreichen der Stauenden in-

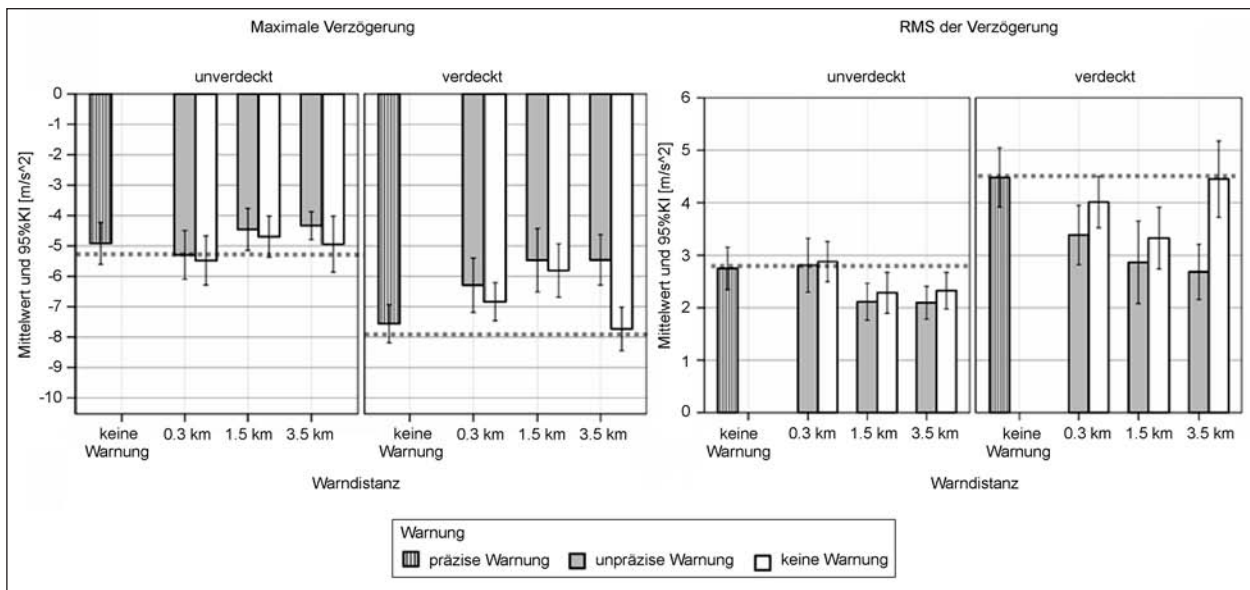


Bild 45: Mittlere maximale Längsverzögerung (links) bzw. mittlere Root-Mean-Square (RMS) der Verzögerung (rechts) für Warnpräzision und Warndistanz. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95%-Vertrauensintervall

folge von 1,5-km-Warnungen weniger intensiv abbremsen als nach 3,5-km- oder 0,3-km-Warnungen.

5.3.3 Probandenurteile

Bezüglich der wahrgenommenen Sicherheit (erfasst über die Frage „Wie sicher war die Annäherung an das Stauende?“) geben die Fahrer nur bei verdeckten Stauenden an, von Stauendewarnungen profitiert zu haben (siehe Bild 46 links): Für präzise und unpräzise Warnungen berichten die Fahrer hier von einer gesteigerten Sicherheit gegenüber nicht-gewarnten Stauanfahrten. Bei unverdeckten Stauenden wird dagegen die wahrgenommene Sicherheit nicht durch die Warnungen beeinflusst (siehe Bild 46 links). Die Fahrer beurteilen weiterhin Stauanfahrten mit präzisen Warnungen als sicherer als Stauanfahrten mit unpräzisen Warnungen. Bei 1,5-km- und 3,5-km-Warnungen schätzen die Fahrer die Steigerung der Sicherheit höher ein als bei 0,3-km-Warnungen. Weiterhin geben die Fahrer unabhängig von der Warnpräzision an verdeckten und unverdeckten Stauenden an, beim Erreichen der Stauenden weniger überrascht gewesen zu sein (erfasst über die Frage „Wie überraschend war das Stauende?“; siehe Bild 46 rechts). Insbesondere an verdeckten Stauenden wird bei präzisen Warnungen verglichen mit unpräzisen Warnungen von einer stärkeren Reduktion der Überraschung berichtet. Weiterhin zeigt sich ein Unterschied zwischen präzisen und unpräzisen Warnungen in Abhängigkeit von

der Warndistanz: Während bei präzisen 3,5-km- und 1,5-km-Warnungen die wahrgenommene Überraschung stärker reduziert wird als bei 0,3-km-Warnungen, ist bei unpräzisen Warnungen die 1,5-km-Warnung gegenüber den übrigen Warndistanzen von Vorteil.

Die Fahrer geben in der Nachbefragung an, von präzisen Warnungen insgesamt stärker profitiert zu haben als von unpräzisen Warnungen (siehe Bild 47). So berichten die Fahrer bei präzisen Warnungen von einer verminderten wahrgenommenen Anstrengung (erfasst über die Frage „Wie anstrengend war das Fahren im fließenden Verkehr?“) und urteilen, seltener schnelle Entscheidungen gefällt haben zu müssen (erfasst über die Frage „Wie oft mussten Sie beim Fahren im fließenden Verkehr schnelle Entscheidungen treffen?“) und die Position des Stauendes besser abschätzen zu können (erfasst über die Frage „Wie gut konnten Sie die Position des Stauendes abschätzen?“) als mit unpräzisen Warnungen. Ebenso geben die Fahrer wieder, durch die präzisen Warnungen sicherer gefahren zu sein (erfasst über die Frage „Wie sicher war das Fahren im fließenden Verkehr?“) sowie Gefahren besser vermieden zu haben (erfasst über die Frage „Wie gut konnten Sie gefährliche Situationen vermeiden, die durch andere Verkehrsteilnehmer im fließenden Verkehr verursacht wurden?“). Des Weiteren schildern die Fahrer in den genannten Punkten, von unpräzisen Warnungen im Vergleich zu nicht-gewarnten Fahrten in höherem Maße profitiert zu haben.

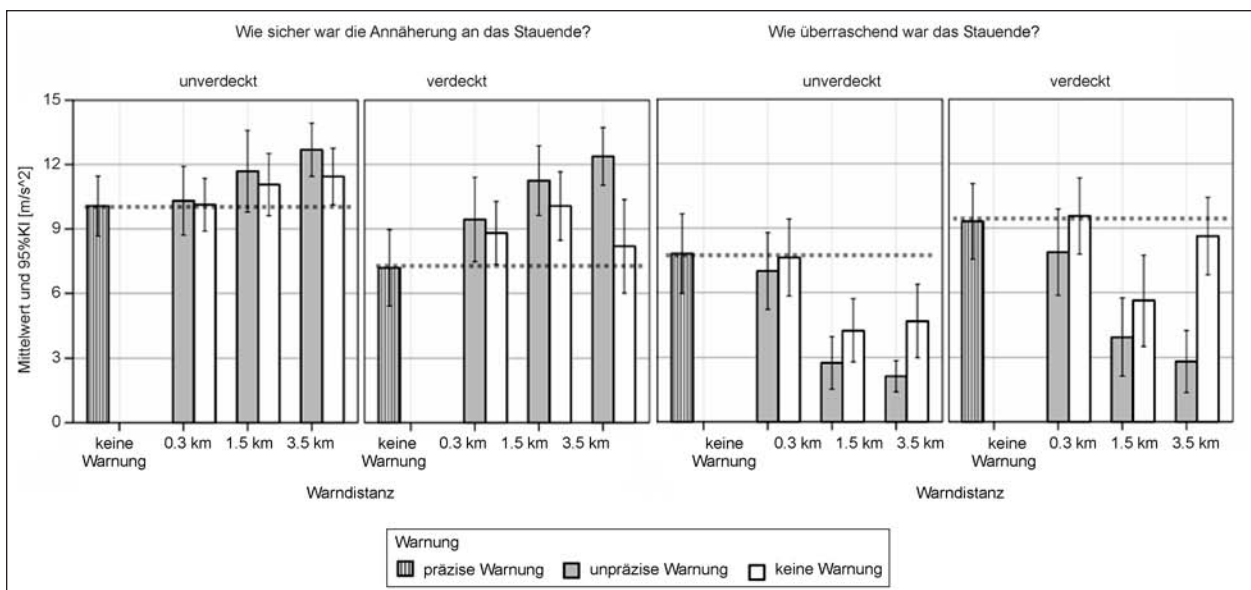


Bild 46: Beurteilung der Sicherheit der Stauannäherung (links) und der Überraschung durch das Stauende (rechts) für Warnpräzision und Warndistanz. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95%-Vertrauensintervall

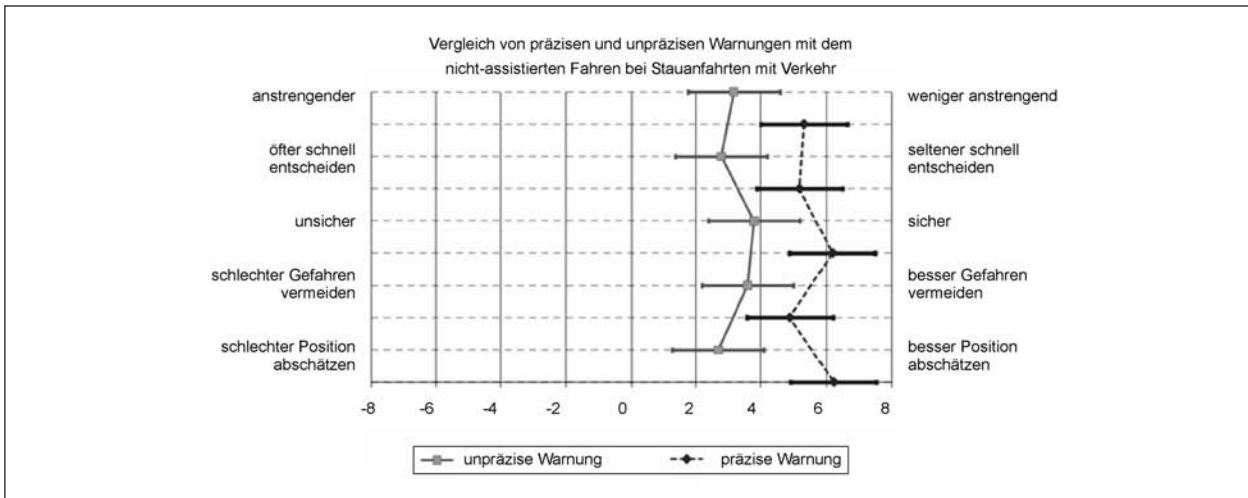


Bild 47: Probandenurteile für ausgewählte Fragen für eine Bewertung der Variationen der Warnpräzision. Positive Werte bedeuten eine im Vergleich zur nicht-gewarnten Fahrt günstige Bewertung der Warnung. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95%-Vertrauensintervall

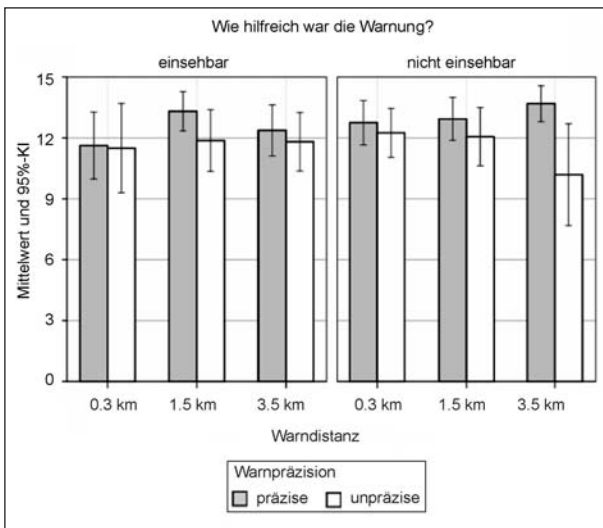


Bild 48: Beurteilung der Nützlichkeit der Warnung für Warnpräzision und Warndistanz. Dargestellt sind Mittelwerte mit 95%-Vertrauensintervall

Weiterhin werden präzise Warnungen bei Anfahrten an verdeckte Stauenden als nützlicher bewertet als unpräzise Warnungen (erfasst über die Frage „Wie hilfreich war die Warnung?“, siehe Bild 48). Bei unverdeckten Stauenden macht die Warnpräzision diesbezüglich keinen Unterschied. Die Warndistanz hat keinen Einfluss auf die Einschätzung der Nützlichkeit der Warnung.

Auf die Frage, welche der beiden Warnalternativen (präzise oder unpräzise) sie bevorzugen würden, nennen 14 von 16 Fahrern die präzise Warnung. Die von den Fahrern genannten Gründe ähneln den in im Studienteil „Mit Verkehr“ genannten Argumenten (siehe Kapitel 5.2.3).

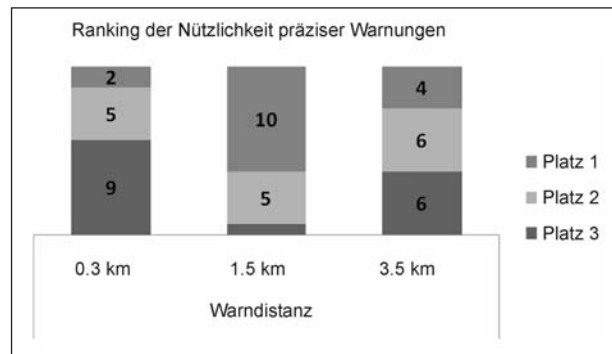


Bild 49: Rangvergabe für die realisierten Warndistanzen (Rang 1 = beste Variante, Rang 3 = schlechteste Variante). Dargestellt sind absolute Häufigkeiten der Beurteilung präziser Warnungen

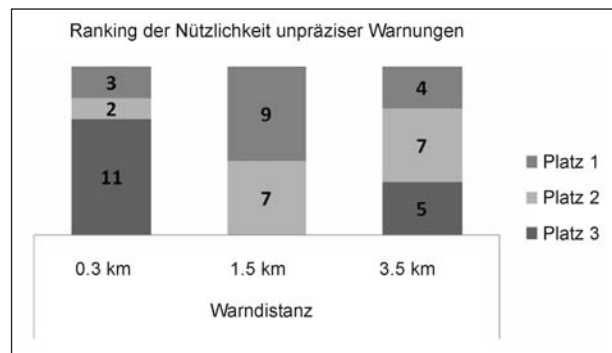


Bild 50: Rangvergabe für die realisierten Warndistanzen (Rang 1 = beste Variante, Rang 3 = schlechteste Variante). Dargestellt sind absolute Häufigkeiten der Beurteilung unpräziser Warnungen

Hinsichtlich der Warndistanz präferieren die Fahrer unabhängig von der Warnpräzision die 1,5-km-Warnung. Haben die Fahrer die Aufgabe, die realisierten Warndistanzen in eine gemeinsame Rangreihe zu bringen, wird für die präzise 1,5-km-Warnung

von 10 von 16 Fahrern der Rang 1 (entspricht der besten Warndistanz) vergeben, 5 von 16 Fahrern vergeben den Rang 2 (= mittelmäßige Warndistanz) und 1 Fahrer vergibt für die präzise 1,5-km-Warnung den Rang 3 (= schlechteste Warndistanz; siehe Bild 49). Bei unpräzisen Warnungen finden sich ähnliche Einschätzungen: Für unpräzise 1,5-km-Warnungen vergeben 9 von 16 Fahrern den Rang 1, 7 von 16 Fahrern den Rang 2 und kein Fahrer den Rang 3 (siehe Bild 50). Für die 0,3-km- und 3,5-km-Warnung resultieren dementsprechend weniger günstige Ergebnisse.

5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Wie wirken sich verschiedene Stauendearten auf das Fahrverhalten und die Wirkung von Stauendewarnungen aus?

Zusammenfassend ergeben sich Unterschiede in der Wirkung präziser und unpräziser Warnungen in Abhängigkeit von der Einsehbarkeit der Stauenden verglichen mit der nicht-gewarnten Fahrt: Erfolgt die Stauanfahrt mit Umgebungsverkehr, nutzen die Fahrer vor allem präzise Warnungen an harten Stauenden (Umgebungsverkehr bremst plötzlich ab) für die Anpassung ihres Fahrverhaltens (frühere Bremsbereitschaft, Bremszeitpunkt und weniger intensives Abbremsen). An weichen Stauenden finden sich keine diesbezüglichen Effekte der Stauendewarnungen.

Erfolgt die Stauanfahrt jedoch ohne Verkehr, werden die Warnungen unabhängig von der Warnpräzision und unabhängig von der Einsehbarkeit (verdeckt oder unverdeckt) der Stauenden von den Fahrern mehrheitlich für die Anpassung des Fahrverhaltens an das bevorstehende Bremsen genutzt (frühere Bremsbereitschaft und Bremsbeginn an verdeckten und unverdeckten Stauenden). Hinsichtlich der Bremsintensität zeigen sich Effekte von Stauendewarnungen nur an verdeckten Stauenden.

Welche Bedeutung hat die Präzision der gegebenen Informationen im Rahmen einer Warnung (sog. Warnpräzision) bzw. der Zeitpunkt der erstmaligen Warnung (sog. Warndistanz) auf die Wirkung der Stauendewarnung?

Im direkten Vergleich können die Auswirkungen präziser Warnungen positiver bewertet werden als die Auswirkungen unpräziser Warnungen (frühere

Bremsbereitschaft, früherer Bremszeitpunkt und stärkere Reduktion der Bremsintensität als bei unpräzisen Warnungen in beiden Verkehrsbedingungen). Zu beachten ist, dass diese Vorteile präziser Warnungen gegenüber unpräzisen Warnungen mehrheitlich für harte bzw. verdeckte Stauenden zu finden sind.

Obwohl sich im Fahrverhalten in der Bedingung mit Verkehr positive Effekte auf das Fahrverhalten vor allem bei harten Stauenden finden, geben die Fahrer unabhängig von der Einsehbarkeit der Stauenden an, von präzisen und unpräzisen Warnungen im Sinne einer gesteigerten Sicherheit profitiert zu haben. In der Bedingung ohne Verkehr zeigt sich ein anderes Muster der Probandenurteile: Die Fahrer berichten nur an verdeckten Stauenden von einer gesteigerten Sicherheit durch präzise und unpräzise Warnungen, nicht aber an unverdeckten Stauenden. Die meisten Fahrer präferieren präzise gegenüber unpräzisen Warnungen.

Im Hinblick auf die Warndistanz sind die Ergebnisse weniger eindeutig: Erfolgt die Stauanfahrt mit Umgebungsverkehr, lässt sich meist kein Einfluss der Warndistanz auf das Bremsverhalten ermitteln. Im Gegensatz dazu lassen sich in Stauanfahrten ohne Umgebungsverkehr die folgenden Effekte der Warndistanz finden: 1,5-km-Warnungen sind hier (im Vergleich zu 0,3-km- und 3,5-km-Warnungen) am positivsten zu bewerten (hinsichtlich Bremsbereitschaft, Bremszeitpunkts und Reduktion der Bremsintensität). Die 1,5-km-Warnungen werden übereinstimmend hierzu von den Fahrern in beiden Verkehrsbedingungen als am nützlichsten eingestuft.

6 Bewertung mit TOPSIS

6.1 Ergebnisaufbereitung

Die nachfolgend diskutierten Bewertungsergebnisse basieren auf den Ausgangsdaten der Fahrsimulatorstudie (siehe Auswahl in Kapitel 4.2 und Kapitel 3), die mittels TOPSIS hinsichtlich Fahrsicherheit analysiert werden. Bei der Interpretation der Ergebnisse werden die prinzipielle Bereitstellung von Warnungen, die Warndistanzen und die Präzision der Warnungen in Kombination miteinander untersucht.

Des Weiteren erfolgt für die unterschiedlichen Warnstrategien eine Analyse des Einflusses der

Einsehbarkeit des Stauendes unter Berücksichtigung der Verkehrsbedingung (mit und ohne Verkehr) auf die Fahrsicherheit.

Die Resultate sind in Tabelle 3 und in Tabelle 4 zusammengefasst. Als Resultat des TOPSIS-Verfahrens enthält die Spalte 5 je Warnalternative A_i (Spalte 3) die Abstands-Indizes C_i^+ , die den Abstand zum positiv-idealen Bereich der Indikatorausprägungen (Best Case) darstellen. Je näher der Wert des Indexes C_i^+ an 1,0 liegt, desto besser wird die jeweilige Warnalternative beurteilt. Basierend auf diesen Werten wurde eine Rangfolge gemäß des Einflusses der Warnalternativen auf die Fahrsicherheit gebildet (vgl. Spalte 6). Die im Hinblick auf die Fahrsicherheit einflussreichste Warnalternative wird als Rang 1 bezeichnet. Dieser Rang entspricht 100 %, für die nachfolgenden Ränge wird in der Spalte 4 die Differenz der jeweiligen Abstands-Indizes zu dem Abstands-Index der effektivsten Alternative prozentual angegeben.

Die Ergebnisse der TOPSIS-Analyse werden analog zu der Ergebnisdarstellung in Kapitel 5 in die Verkehrsbedingungen „mit Umgebungsverkehr“ (Kapitel 6.2) sowie „ohne Umgebungsverkehr“ (vgl. Kapitel 6.3) gegliedert.

6.2 Interpretation der TOPSIS-Resultate für die Bedingung „mit Verkehr“

Die nachfolgende Bewertung der Bedingung „mit Verkehr“ basiert auf der mittels TOPSIS durchgeführten Analyse der in der Fahrsimulatorstudie aufgezeichneten Indikatoren. Die Resultate können in Tabelle 3 nachvollzogen werden.

Bewertung des Aspekts „Art des Stauendes“

Die Niveaus der Abstands-Indizes bewegen sich bei den Fahrten mit weichen Stauenden im Bereich von 0,50 bis 0,69 (Standardabweichung 0,06), bei harten Stauenden liegt ein niedrigeres Niveau von 0,18 bis 0,70 mit einer Standardabweichung in Höhe von 0,19 vor. Die Verteilung der einzelnen Werte ist in Tabelle 3 nachzuvollziehen.

Der Vergleich der Eintragungen in Tabelle 3 zeigt hinsichtlich der Ausprägung der Stauenden, dass für weiche Stauenden i. d. R. eine größere Fahrsicherheit vorherrscht als in den Fällen mit harten Stauenden.

1	2	3	4	5	6
Stauende	Warndistanz und Präzision	Warnalternative	Nähe zu Rang 1 [%]	TOPSIS Index C_i^+	Rang
weich	3,5 km – präzise	A_6	79	0,56	6
	1,5 km – präzise	A_4	99	0,69	2
	0,3 km – präzise	A_2	87	0,61	4
	keine Warnung	A_1	75	0,53	7
	3,5 km – unpräzise	A_7	71	0,50	10
	1,5 km – unpräzise	A_5	73	0,51	9
	0,3 km – unpräzise	A_3	75	0,52	8
hart	3,5 km – präzise	A_{13}	94	0,66	3
	1,5 km – präzise	A_{11}	100	0,70	1
	0,3 km – präzise	A_9	85	0,59	5
	keine Warnung	A_8	26	0,18	14
	3,5 km – unpräzise	A_{14}	39	0,27	13
	1,5 km – unpräzise	A_{12}	57	0,40	11
	0,3 km – unpräzise	A_{10}	41	0,29	12

Tab. 3: Aufbereitete Ergebnisse der Datenanalyse mit TOPSIS für die Bedingung mit umgebendem Verkehr

Bewertung des Aspekts „prinzipielle Warnungsbereitstellung“

Bei *harten* Stauenden wurde für die ungewarnten Fahrten ein Abstands-Index C_i^+ von 0,18 ermittelt, welcher 26 % des Abstands-Indexes der besten Variante entspricht. Somit stellen die Fahrten ohne Warnung in Bezug auf die Fahrsicherheit die als schlechteste bewertete Variante (Rang 14) dar.

Das Szenario ohne Bereitstellung einer Stauendewarnung wird bei *weichen* Stauenden mit Rang 7 (C_i^+ : 0,53) im Mittelfeld der Rangfolge platziert. Die Alternative ohne Warnung wird besser bewertet als alle jene Varianten, in denen „unpräzise“ vor den Stauenden gewarnt wird.

Es zeigt sich somit, dass eine Stauendewarnung vor allem bei *harten* Stauenden einen Einfluss auf die Fahrsicherheit ausübt und die Fahrten ohne Warnung bei *weichen* Stauenden nicht die Varianten mit der geringsten Fahrsicherheit darstellen.

Bewertung des Aspekts „Warndistanz und Warnpräzision“

Bei allen Szenarien mit Umgebungsverkehr zeigt sich ein einheitliches Bild bei der Bewertung der *Warnpräzision*: Für die präzisen Warnungen werden sowohl bei *weichen* als auch bei *harten* Stauenden für alle Warndistanzen stets bessere Resultate als für die unpräzisen Warnungen ermittelt. Die Variante der *weichen* Stauenden zeichnet sich dadurch aus, dass die unpräzisen Warnungen in ihren Effekten auf die Fahrsicherheit weniger stark von den präzisen Warninhalten abweichen, als dies für *harte* Stauenden der Fall ist. Die präzisen Warnungen liegen für *weiche* Stauenden im Bereich von 99 % bis 79 % des Ranges 1, die unpräzisen Warnungen weisen 75 % bis 72 % Nähe zu Rang 1 auf. Für die *harten* Stauenden wird für die präzisen Warnungen der Bereich 100 % bis 85 % und für unpräzise Warnungen 57 % bis 39 % als Nähe zu Rang 1 bestimmt.

Vor allem im Falle der *harten* Stauenden lassen sich somit vergleichsweise große positive Effekte der präzisen Stauendewarnungen aller Warndistanzen zu den nicht-gewarnten Fahrten und zu den unpräzisen Warnungen erkennen. Für *weiche* Stauenden gilt, dass die Unterschiede hinsichtlich der Warnpräzision für alle Warndistanzen weniger stark als bei den *harten* Stauenden ausgeprägt sind.

Für *harte* Stauenden bildet die Warndistanz von 1,5 km bei *präzisen* Warnungen den Rang 1 (C_i^+ : 0,70). Im Falle *weicher* Stauenden kann gezeigt werden, dass mit Umgebungsverkehr die präzise Warnung in 1,5 km Entfernung zu dem Stauende die beste Alternative darstellt, C_i^+ beträgt hier 0,69. Werden Warnungen *unpräzise* ausgegeben, stellt die Warndistanz von 1,5 km bei *harten* Stauenden die beste Warndistanz aller unpräzisen Warninhalte dar. Es wird ein Abstands-Index C_i^+ von 0,40 (Rang 11) ermittelt.

Der Warndistanz 3,5 km können vor allem bei *präziser* Warnung vor *harten* Stauenden positive Effekte auf die Fahrsicherheit nachgewiesen werden (Rang 3, C_i^+ : 0,66). Für *weiche* Stauenden wird bei präzisen Warnungen der Rang 6 (C_i^+ : 0,56) bestimmt. *Unpräzise* Warnungen in 3,5 km Entfernung vor *harten* als auch vor *weichen* Stauenden stellen mit Rang 13 bzw. 10 jeweils die am schlechtesten bewerteten Alternativen zur Anzeige einer Warnung dar.

Bei *weichen* Stauenden gilt für *unpräzise* Warnungen die Warndistanz von 0,3 km als beste unpräzise Alternative (Rang 8), C_i^+ beträgt hier 0,52. Die präzise Warnung in 0,3 km Distanz zu *weichen* Stauenden belegt Rang 4 (C_i^+ : 0,61). Für *harte* Stauenden gilt die präzise Warnung in 0,3 km als schlechteste präzise Warnalternative (Rang 5), im Falle unpräziser Warnungen belegt die Variante mit 0,3 km Warndistanz den 12. Rang.

Die Bewertung des Aspekts *Warndistanz und -präzision* zeigt, dass die Fahrten mit präzisen Warnungen in 1,5 km Entfernung sowohl bei *harten* als auch bei *weichen* Stauenden die größte Fahrsicherheit aufweisen. Für *weiche* Stauenden ist bei unpräzisen Warnungen die Entfernung 0,3 km die beste Alternative, im Falle harter Stauenden wird die unpräzise Warnung in 1,5 km Distanz als beste Variante bestimmt.

6.3 Interpretation der TOPSIS-Resultate für die Bedingung „ohne Verkehr“

Die nachfolgende Ergebnisdarstellung bezieht sich auf die in Tabelle 4 dargestellten Resultate des TOPSIS-Verfahrens.

1	2	3	4	5	6
Stauende	Warndistanz und Präzision	Warnalternative	Nähe zu Rang 1 [%]	TOPSIS Index C_i^+	Rang
unverdeckt	3,5 km – präzise	A ₂₀	92	0,82	2
	1,5 km – präzise	A ₁₈	100	0,90	1
	0,3 km – präzise	A ₁₆	57	0,51	7
	keine Warnung	A ₁₅	56	0,50	8
	3,5 km – unpräzise	A ₂₁	82	0,74	4
	1,5 km – unpräzise	A ₁₉	80	0,72	5
	0,3 km – unpräzise	A ₁₇	51	0,46	9
verdeckt	3,5 km – präzise	A ₂₇	85	0,77	3
	1,5 km – präzise	A ₂₅	75	0,67	6
	0,3 km – präzise	A ₂₃	37	0,34	11
	keine Warnung	A ₂₂	10	0,09	14
	3,5 km – unpräzise	A ₂₈	14	0,12	13
	1,5 km – unpräzise	A ₂₆	45	0,40	10
	0,3 km – unpräzise	A ₂₄	21	0,19	12

Tab. 4: Aufbereitete Ergebnisse der Datenanalyse mit TOPSIS für die Bedingung ohne umgebenden Verkehr

Bewertung des Aspekts „Art des Stauendes“

Ein Vergleich der Resultate hinsichtlich der Einsehbarkeit der Stauenden zeigt, dass für unverdeckte Stauenden insgesamt eine größere Fahrsicherheit vorherrscht (C_i^+ von 0,90 bis 0,46 mit einer Standardabweichung in Höhe von 0,16) als in den Fällen mit verdeckten Stauenden (C_i^+ von 0,77 bis 0,09, die Standardabweichung beträgt 0,25).

Bewertung des Aspekts „prinzipielle Warnungsbereitstellung“

Für den Vergleich der Resultate ohne Bereitstellung einer Warnung mit den Fällen mit Warnung konnten die folgenden Unterschiede ermittelt werden:

Bei *verdeckten* Stauenden sind die Fahrten ohne Warnung die Varianten mit der geringsten Fahrsicherheit (Rang 14). Es liegt ein sehr geringer Abstands-Index von 0,09 vor, was 10 % des Abstands-Indexes der besten Lösung entspricht.

Für die Fälle mit *unverdeckten* Stauenden ist die Variante ohne Stauendewarnung mit Rang 8 insgesamt im Mittelfeld der Rangfolge platziert (C_i^+ : 0,50). Die Fahrten ohne Warnungsbereitstellung stellen in dieser Verkehrsbedingung die am zweit-schlechtesten bewertete Variante dar, die unpräzise

Warnung in 0,3 km Entfernung weist mit Rang 9 und einem Effizienz-Index C_i^+ in Höhe von 0,46 eine schlechtere Bewertung auf.

Aus dieser Bewertung lässt sich schlussfolgern, dass die Bereitstellung einer Stauendewarnung vor allem bei verdeckten Stauenden im Vergleich zu nicht-gewarnten Fahrten einen positiven Einfluss auf die Fahrsicherheit ausübt. Die ermittelten Abstands-Indizes weisen bei den verdeckten Stauenden eine relativ große Bandbreite von 0,77 (A₂₇) bis 0,09 (A₂₂) auf.

Bewertung des Aspekts „Warndistanz und Warnpräzision“

Rang 1 für die höchste Fahrsicherheit wird bei unverdeckten Stauenden für *präzise* Warnungen bei einer Warndistanz von 1,5 km bestimmt, der Abstands-Index beträgt 0,90. Im Falle verdeckter Stauenden wird für präzise Warnungen bei der Warndistanz von 1,5 km der sechste Rang ermittelt (C_i^+ : 0,67) – bei präzisen Warnungen vor verdeckten Stauenden schneidet die 3,5-km-Warndistanz besser ab (Rang 3, C_i^+ : 0,77). Werden Warnungen vor verdeckten Stauenden *unpräzise* ausgegeben, stellt die Warnungsentfernung von 1,5 km die beste Warndistanz der unpräzisen Warninhalte dar

(Rang 10, C_i^+ : 0,40). Bei unverdeckten Stauenden wird die in 3,5 km Entfernung angezeigte Warnung besser als die Warnung in 1,5 km Entfernung bestimmt.

Die Warndistanz von 3,5 km weist bei präziser Warnung vor allem bei verdeckten Stauenden einen hohen Einfluss auf die Fahrsicherheit auf (Rang 2, C_i^+ : 0,82). Auch bei unverdeckten Stauenden können präzisen Warnungen in 3,5 km Entfernung vergleichsweise hohe Effekte auf die Fahrsicherheit nachgewiesen werden (Rang 3, C_i^+ : 0,77). Bei unpräzisen Warnungen vor unverdeckten Stauenden wird die Warnentfernung 3,5 km mit Rang 4 bewertet, für unpräzise Warnungen in 3,5 km vor verdeckten Stauenden wird der 13. Rang bestimmt und somit besser bewertet als der Fall ohne Warnung.

Für die Warndistanzen 0,3 km zeigen sich in Abhängigkeit der Einsehbarkeit der Stauenden im Vergleich zu den übrigen untersuchten Warndistanzen die größten Unterschiede hinsichtlich der Ausprägung der Effekte auf die Fahrsicherheit. Vor allem bei unverdeckten Stauenden weisen die Warnungen in 0,3 km Distanz im direkten Vergleich zu den übrigen Warnentfernungen jeweils den schlechtesten Rang auf (Rang 7 für präzise Warnungen, Rang 9 für unpräzise Warnungen). Im Falle verdeckter Stauenden gilt, dass die Warnung in 0,3 km die schlechteste *unpräzise* Warnentfernung darstellt, für unpräzise Warnungen wurde Rang 12 (C_i^+ : 0,19) ermittelt.

Für *unverdeckte Stauenden* gilt, dass die präzisen und unpräzisen Warnungen in 3,5 km und 1,5 km Entfernung den vergleichsweise größten Einfluss auf die Fahrsicherheit ausüben (der Abstands-Index liegt zwischen 0,90 und 0,72). Die Fälle ohne Warnung sowie präzise und unpräzise Warnung in 0,3 km weisen Abstands-Indizes von 0,46 bis 0,51 auf.

Bei verdeckten Stauenden zeigt sich, dass die präzisen Warnungen in 3,5 km und 1,5 km vor dem Stauende einen vergleichsweise großen Einfluss auf die Fahrsicherheit ausüben (C_i^+ : 0,77 und 0,67). Als drittbeste Variante konnte für verdeckte Stauenden die unpräzise Warnung in 1,5 km Entfernung bestimmt werden (C_i^+ : 0,40). Die übrigen Varianten weisen geringere Einflüsse auf die Fahrsicherheit auf, die Abstands-Indizes betragen zwischen 0,34 und 0,09.

Daraus lässt sich folgern, dass vor allem bei verdeckten Stauenden die Warnpräzision einen Einfluss auf die Fahrsicherheit ausübt.

6.4 Auswertung des Vorhandenseins von Umgebungsverkehr

Mittels einer Gegenüberstellung der absoluten Ausprägungen der prozentualen Abstände zu den Indizes der Ränge 1 mit bzw. ohne Verkehr kann belegt werden, dass die Resultate in den Varianten mit Umgebungsverkehr näher beisammen liegen (Rang 14: 26 % von Rang 1) als ohne Umgebungsverkehr, wo zwischen dem besten und dem schlechtesten Rang eine größere Bandbreite vorherrscht: Rang 14 weist 10 % des Abstands-Indexes von Rang 1 auf. So ist sowohl der Abstands-Index des 1. Rangs größer als in den Fällen ohne Verkehr, zudem weist der TOPSIS-Index C_i^+ des Rangs 14 ohne Verkehr eine geringere Ausprägung als mit Verkehr auf.

Bei harten/verdeckten Stauenden sind die Fahrten ohne Warnung sowohl mit als auch ohne umgebenden Verkehr die hinsichtlich der Fahrsicherheit schlechtesten Varianten (Rang 14).

6.5 Überprüfung des TOPSIS-Verfahrens

Das in Microsoft Excel programmierte TOPSIS-Verfahren wurde in verschiedenen Phasen der Projektbearbeitung auf seine Anwendbarkeit auf die Problemstellung und die Validität der erzielten Ergebnisse überprüft. Zur Absicherung der Projektergebnisse wurde das folgende Vorgehen gewählt:

1. Die in Kapitel 3 beschriebene Simulatorstudie wurde zunächst anhand eines Vorversuchs mit einer verringerten Probandenanzahl ($N = 6$) entwickelt und erprobt. Bereits zu diesem frühen Projektstadium wurden die Daten des Vorversuchs mittels TOPSIS analysiert, indem Rangfolgen für verschiedene Warndistanzen auf Basis einzelner Indikatoren ermittelt wurden. Dieses Resultat wurde mit einer Rangfolge verglichen, die auf Basis grafischer Darstellungen der Indikatoren gewählt wurde. Diese erste Plausibilitätskontrolle führte zu dem Ergebnis, dass TOPSIS eine quantifizierte Rangfolge der Varianten liefert, die der Einschätzung entspricht, und TOPSIS demzufolge im weiteren Projektverlauf angewendet wurde.

2. Aus dem projektbegleitenden Betreuerkreis erfolgte die Vorgabe, dass zur Bewertung der unterschiedlichen Stauendwarnkonzepte eine möglichst geringe Anzahl unterschiedlicher Indikatoren herangezogen werden sollte. Hieraus resultiert die Schlussfolgerung, dass besonders jene Indikatoren auszuwählen waren, die einen großen Einfluss auf die Fahrsicherheit ausüben.

Aus der Gesamtheit der als Ausgangsdaten des Fahrsimulators vorliegenden Daten wurden die folgenden Indikatoren vorausgewählt und untersucht:

Fahrdaten:

- mittlere Geschwindigkeit,
- maximale Verzögerung,
- mittlere Querbeschleunigung,
- maximale Querbeschleunigung,
- Querabweichung (mittlere Standardabweichung),
- Anstieg Bremsbereitschaft (m vor Stauende),
- Betätigung Bremse (m vor Stauende),
- mittlere Verzögerung,
- TIT (Time integrated Time To Collision).

Befragungsdaten:

- Wie sehr haben Sie sich auf das System verlassen?
- Wie hilfreich war die Warnung?
- Wie kontrollierbar war die Annäherung an das Stauende?
- Wie rechtzeitig war die Warnung?
- Wie überraschend war das Stauende?
- Wie sicher war die Annäherung an das Stauende?

Es wurde eine Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Indikatoren auf die TOPSIS-Rangfolgen durchgeführt, indem im Rahmen der Wahl der Indikatoren (vgl. Kapitel 4.2) unterschiedliche Kombinationen verschiedener Indikatoren als Eingangsdaten in TOPSIS verwendet wurden und die Resultate miteinander verglichen wurden.

Als beispielhaftes Ergebnis dieses Validierungsschrittes ist der Ausschluss des Indikators TIT (Time integrated Time To Collision), gemäß MINDERHOUD et al. (2001) das Integral von TTC-Werten unterhalb eines Schwellenwertes über die Zeit $[s^2]$ zu nennen. In vorliegender Arbeit wurde als Schwellenwert der TTC (vgl. Kapitel 2.2.3) ein Wert von 3 s gewählt und TIT für die Gesamtstrecke berechnet. Im Kontext der in den Fahrsimulatorversuchen aufgezeichneten Daten, in denen kleine Werte für TTC nur selten auftraten, hat sich dieser Indikator als nicht aussagekräftig erwiesen.

Durch dieses Vorgehen wurden die zu untersuchenden Indikatoren festgelegt (siehe Kapitel 4.2). Zudem konnte als Resultat dieses Arbeitsschrittes festgestellt werden, dass die Ergebnisse aus TOPSIS reproduzierbar sind, da die ermittelten Rangfolgen trotz unterschiedlicher Indikatorkombinationen in der Regel vergleichbar waren.

3. Eine weitere Überprüfung des TOPSIS-Verfahrens wurde anhand einer Kreuzvalidierung durchgeführt: Mittels dieses statistischen Testverfahrens wurde die für die Indikatoren verfügbare Datenbasis in Teilgruppen aufgeteilt und durch eine erneute Anwendung des TOPSIS-Verfahrens mit den neuen Datensätzen die jeweils erzielten Rangfolgen aus TOPSIS miteinander verglichen. Die aus dem Hauptversuch vorliegenden Datensätze der Versuche „mit Verkehr“ wurden in unterschiedliche neue Zufallsgruppen aufgeteilt und als Eingangsdaten im TOPSIS-Verfahren verwendet. Die erzielten Rangfolgen wurden anschließend qualitativ zwischen den Teilgruppen sowie zu den „ursprünglichen“ Ergebnissen des gesamten Datensatzes verglichen. Anhand der im Anhang dargestellten Ergebnistabelle der Kreuzvalidierung der Zufallsreihenfolgen kann nachvollzogen werden, dass das TOPSIS-Verfahren auch bei einer Neuaufteilung der Datensätze reproduzierbare Ergebnisse liefert.
4. Als letzter Schritt der Verifizierung und Einordnung der Resultate aus TOPSIS wird ein Abgleich mit den Ergebnissen aus der einzelnindikator-orientierten Analyse (dargestellt in Kapitel 5) durchgeführt. Die Resultate sind in Kapitel 7.2 ausführlich beschrieben.

7 Kritische Einordnung der Warnkonzepte und Ergebnisse

7.1 Allgemein

Dieses Kapitel stellt eine kritische Einordnung der in der vorliegenden Arbeit erzielten Ergebnisse dar.

Die Resultate der statistischen (deskriptiv, grafisch und inferenzstatistisch) Bewertung aus Kapitel 5 werden den Ergebnissen der Bewertung mittels TOPSIS (vgl. Kapitel 6) vergleichend gegenübergestellt und diskutiert (siehe Kapitel 7.2).

In Kapitel 7.3 erfolgt eine Diskussion der angewendeten Warnkonzepte und deren Umsetzbarkeit hinsichtlich der Stauendart, der Warndistanz, der Warnpräzision und des umgebenden Verkehrs.

In Kapitel 7.4 werden Hinweise zur Ableitung von Mindestanforderungen für sicherheitsoptimale Verkehrsinformationen gegeben. Diese umfassen Hinweise zur Einordnung und Interpretation der erzielten Ergebnisse.

Der gewählte Versuchsaufbau und das Bewertungskonzept werden in Kapitel 7.5 kritisch hinterfragt und Hinweise zu der Interpretation der gewonnenen Ergebnisse gegeben.

Die kritische Analyse und Einordnung des Gesamtprojekts liefern schließlich Hinweise auf erweiterbaren, auf den Projektergebnissen aufbauenden Forschungsbedarf (vgl. Kapitel 7.6).

7.2 Gegenüberstellung der Ergebnisse

7.2.1 Vorgehen

Nachfolgend werden die Hauptergebnisse aus der statistischen einzelindikator-orientierten Bewertung (Kapitel 5) mit den Hauptaussagen der indikatorintegrierten Bewertung mittels TOPSIS (Kapitel 6) verglichen und darauf basierend jeweils die Hauptaussagen der Studie zusammengefasst.

Es werden die Aspekte „Einfluss der Stauendarten auf das Fahrerverhalten und die Wirkung von Stauendwarnungen“ (Kapitel 7.2.2) diskutiert sowie eine Analyse der Ergebnisse mit dem Fokus auf „Warndistanz und -präzision“ durchgeführt (Kapitel 7.2.3).

7.2.2 Einfluss der Stauendarten auf das Fahrerverhalten und die Wirkung von Stauendwarnungen

Mit Umgebungsverkehr: Zusammenfassung der einzelindikator-orientierten Bewertung

Zusammenfassend ergeben sich aus der statistischen Analyse der Fahrsimulatorergebnisse Unterschiede in der Wirkung präziser und unpräziser Warnungen in Abhängigkeit von der Stauendart verglichen mit der nicht-gewarnten Fahrt: Erfolgt die Stauanfahrt mit Umgebungsverkehr, nutzen die Fahrer vor allem präzise Warnungen an harten Stauenden für die Anpassung ihres Fahrverhaltens im Vergleich zu einer nicht-gewarnten Annäherung an ein Stauende. An weichen Stauenden finden sich keine diesbezüglichen Effekte der Stauendwarnungen. Diese Aussagen stützen sich auf Analysen der Geschwindigkeitsverläufe, des Bremsverhaltens und der Probandenurteile.

Mit Umgebungsverkehr: Zusammenfassung der TOPSIS-Bewertung

Die Effekte der Stauendwarnungen zeigen sich bei harten Stauenden stärker als bei weichen Stauenden. Bei harten Stauenden stellen die Fahrten ohne Warnung die in Bezug auf die Fahrsicherheit schlechtesten Varianten dar.

Das Szenario ohne Bereitstellung einer Stauendwarnung wird bei weichen Stauenden im Mittelfeld der Rangfolge platziert. Es erhalten alle jene Varianten, in denen unpräzise vor den Stauenden gewarnt wurde, schlechtere (höhere) Ränge als die Alternative ohne Warnung.

Mit Umgebungsverkehr: Fazit

Beide Bewertungsmethoden kommen zu dem Ergebnis, dass durch die Stauendarten das Fahrverhalten bei der Annäherung an Stauenden beeinflusst wird. Im Hinblick auf die Stauendwarnungen kann festgestellt werden, dass vor allem die präzisen Stauendwarnungen positive Effekte auf die Fahrsicherheit haben, die Effekte sind vor allem an harten Stauenden zu beobachten.

Für die weichen Stauenden werden gemäß einzelindikator-orientierter Analysen der Geschwindigkeitsverläufe, des Bremsverhaltens und der Probandenurteile keine ausgeprägten Effekte der Stauendwarnungen festgestellt. TOPSIS liefert zusätzli-

che Hinweise, dass aus unpräzisen Warnungen bei weichen Stauenden im Vergleich zu nicht-gewarnten Fahrten keine Erhöhung der Fahrsicherheit resultiert.

Ohne Umgebungsverkehr: Zusammenfassung der einzelindikator-orientierten Bewertung

Die einzelindikator-orientierte Bewertung der Fahr simulatorergebnisse besagt: Erfolgt die Stauanfahrt ohne Verkehr, werden die Warnungen unabhängig von der Warnpräzision und unabhängig von der Einsehbarkeit (verdeckt oder unverdeckt) der Stauenden von den Fahrern mehrheitlich für die Anpassung des Fahrverhaltens an das bevorstehende Bremsen genutzt. Hinsichtlich der Bremsintensität zeigen sich Effekte von Stauendewarnungen nur an verdeckten Stauenden. Gemäß den Probandenurteilen wurde nur an verdeckten Stauenden eine höhere Sicherheit durch präzise und unpräzise Warnungen, nicht aber an unverdeckten Stauenden wahrgenommen.

Ohne Umgebungsverkehr: Zusammenfassung der TOPSIS-Bewertung

Ein direkter Vergleich der mittels TOPSIS bestimmten Abstands-Indizes für alle Warnalternativen ohne Umgebungsverkehr (dargestellt in Kapitel 6) zeigt, dass für unverdeckte Stauenden insgesamt eine größere Fahrsicherheit vorherrscht als in den Fällen mit verdeckten Stauenden. Es kann gezeigt werden, dass bei verdeckten Stauenden ohne Warnung die geringste Fahrsicherheit vorherrscht. Besonders hier lassen sich durch die Warnungen positive Effekte auf die Fahrsicherheit erwarten.

Ohne Umgebungsverkehr: Fazit

Für die untersuchten Fälle ohne Umgebungsverkehr können besonders günstige Einflüsse der Stauendewarnung auf die Fahrsicherheit an verdeckten Stauenden ermittelt werden. Diese sind bei unverdeckten Stauenden geringer als bei verdeckten Stauenden. Die Ergebnisse beider Bewertungsverfahren stimmen in ihren Aussagen überein.

7.2.3 Bewertung des Aspekts „Warndistanz und Warnpräzision“

Mit Umgebungsverkehr: Zusammenfassung der einzelindikator-orientierten Bewertung

Im direkten Vergleich werden die Auswirkungen präziser Warnungen positiver bewertet als die Aus-

wirkungen unpräziser Warnungen, was sich durch eine frühere Bremsbereitschaft, frühere Bremszeitpunkte und stärkere Reduktionen der Bremsintensitäten als bei unpräzisen Warnungen zeigt. Zu beachten ist, dass diese Vorteile präziser Warnungen gegenüber unpräzisen Warnungen mehrheitlich für harte Stauenden zu finden ist.

Obwohl sich im Fahrverhalten in der Bedingung mit Verkehr positive Effekte auf das Fahrverhalten vor allem bei harten Stauenden finden, geben die Fahrer sowohl bei harten als auch bei weichen Stauenden an, von präzisen und unpräzisen Warnungen im Sinne einer gesteigerten Sicherheit profitiert zu haben.

In der Befragung zeigt sich, dass die meisten Fahrer insgesamt präzise gegenüber unpräzisen Warnungen bevorzugen.

Im Hinblick auf die Warndistanz sind die Ergebnisse weniger eindeutig: Erfolgt die Stauanfahrt mit Umgebungsverkehr, findet sich meist kein Einfluss der Warndistanz auf das Bremsverhalten. 1,5-km-Warnungen werden von den Fahrern als am nützlichsten eingestuft.

Mit Umgebungsverkehr: Zusammenfassung der TOPSIS-Bewertung

Mittels TOPSIS kann ein einheitliches Bild bei der Bewertung der Warnpräzision ermittelt werden: Die präzisen Warnungen zeigen sowohl bei harten als auch bei weichen Stauenden für alle Warndistanzen stets bessere Resultate (Abstands-Indizes) als die unpräzisen Warnungen. Vor allem im Falle der harten Stauenden zeigen sich im Vergleich zu den weichen Stauenden positive Effekte der präzisen Stauendewarnungen aller Warndistanzen sowohl auf die nicht-gewarnte Fahrt als auch auf die unpräzise Warnung. Sowohl bei weichen als auch bei harten Stauenden weisen präzise Warnungen mit einer Warndistanz von 1,5 km jeweils die höchste Fahrsicherheit auf.

Mit Umgebungsverkehr: Fazit

Es wird mit beiden Bewertungsverfahren übereinstimmend ermittelt, dass präzise Warnungen größere Effekte auf die Fahrsicherheit ausüben als unpräzise Warnungen. Präzise Warnungen mit 1,5-km-Warndistanz stellen in den Fällen mit Umgebungsverkehr die beste Warnalternative dar. 0,3-km- und 3,5-km-Warnungen sind in diesem Zusammenhang zusammenfassend weniger positiv zu bewerten.

Ohne Umgebungsverkehr: Zusammenfassung der einzelindikator-orientierten Bewertung

Unabhängig von der Warnpräzision zeigt sich an verdeckten und an unverdeckten Stauenden durch die Warnungsbereitstellung eine Steigerung der Fahrsicherheit im Sinne einer früheren Bremsbereitschaft und eines früheren Bremszeitpunkts. Diese Vorteile sind bei präzisen Warnungen an verdeckten Stauenden stärker ausgeprägt als an unverdeckten Stauenden. Gleiches lässt sich für die Bremsintensität berichten. Vor verdeckten Stauenden mussten die Probanden insbesondere nach präzisen Warnungen weniger stark bremsen als nach unpräzisen Warnungen.

Die Fahrer berichten nur an verdeckten Stauenden von einer gesteigerten Sicherheit durch präzise und unpräzise Warnungen, nicht aber an unverdeckten Stauenden. In Übereinstimmung hierzu präferieren die meisten Fahrer präzise gegenüber unpräzisen Warnungen.

In den Stauanfahrten ohne Umgebungsverkehr finden sich deutliche Effekte der Warndistanz: 1,5-km-Warnungen sind hier (im Vergleich zu 0,3-km- und 3,5-km-Warnungen) am positivsten zu bewerten (hinsichtlich Bremsbereitschaft, Bremszeitpunkt und Reduktion der Bremsintensität). 1,5-km-Warnungen werden übereinstimmend hierzu von den Fahrern als am nützlichsten bezeichnet.

Ohne Umgebungsverkehr: Zusammenfassung der TOPSIS-Bewertung

Die Ergebnisse des TOPSIS-Verfahrens zeigen, dass bei unverdeckten Stauenden die präzise Warnung in 1,5 km Warndistanz die höchste Fahrsicherheit aufweist. Die beste Warndistanz für unpräzise Warnungen liegt bei 3,5 km Entfernung vor unverdeckten Stauenden.

Für verdeckte Stauenden stellt die präzise Warnung in 3,5 km Entfernung zum Stauende die Variante mit der höchsten Fahrsicherheit dar. Werden Warnungen unpräzise ausgegeben, wurde für verdeckte Stauenden die Warndistanz 1,5 km am besten bewertet.

Vor allem bei verdeckten Stauenden wird mit präzisen Warninhalten die Fahrsicherheit verbessert.

Ohne Umgebungsverkehr: Fazit

Für die Fälle ohne Umgebungsverkehr zeigt die Gegenüberstellung der beiden Bewertungsmetho-

den einen Unterschied in den Aussagen zu den Warndistanzen: Gemäß einzelindikator-orientierter Bewertung gelten die Warnungen mit 1,5 km Warndistanz als sicherheitswirksamste Warnalternative, mittels der indikator-integrierenden TOPSIS-Analyse werden präzise Warnungen in 1,5 km Distanz bei unverdeckten und präzise Warnungen in 3,5 km Distanz bei verdeckten Stauenden als einflussreichste Alternativen auf die Fahrsicherheit bestimmt. 0,3-km-Warnungen schneiden im direkten Vergleich mit den anderen Warndistanzen in der Regel schlechter ab.

Hinsichtlich der Präzision lässt sich im direkten Vergleich der Warndistanzen festhalten, dass die Fahrten mit präzisen Warnungen eine höhere Fahrsicherheit als Fahrten mit unpräzisen sowie ohne Warnungen aufweisen.

7.3 Diskussion der Warnkonzepte und deren Umsetzbarkeit

Stauendeart

Die im Rahmen der Studie ermittelten positiven Effekte von Stauendewarnungen auf die Fahrsicherheit ergeben sich insbesondere bei harten bzw. verdeckten Stauenden. Bei weichen Stauenden ist dieser Vorteil nur in den Fahrerurteilen zu finden, nicht jedoch im Fahrverhalten. Hieraus resultiert ein erhebliches Wirkpotenzial von Warnungen im Fahrzeug, sofern diese in für den Fahrer nicht-vorhersehbaren Fahrsituationen (hier: harte bzw. verdeckte Stauenden) präzise vor sicherheitskritischen Fahrsituationen warnen. Im Hinblick auf die technische Realisierbarkeit und Umsetzung einer Stauendeart-Unterscheidung erscheint dies jedoch derzeit aufgrund einer fehlenden Datengrundlage hinsichtlich der Einsehbarkeit sowie der verkehrlichen Bedingungen an den Stauenden nicht realisierbar.

Auf Basis der vorliegenden Untersuchung stellt sich daher die Frage, ob alle Arten von Stauenden durch Warnungen angekündigt werden sollten. Auf Seiten des Warnsystems stellt sich diesbezüglich die Frage eines Schwellenwerts für die Auslösung einer Warnung: Ab welchem Wert eines Entscheidungskriteriums wird ein Alarm aktiviert (PARASURAMAN et al., 1997)?

Eine Möglichkeit ist dabei, das Entscheidungskriterium so zu wählen, dass vor allen möglichen Ereignissen gewarnt wird. Ein solches Vorgehen würde

dazu führen, dass Fahrer insgesamt mehr Alarme und damit auch zwangsweise mehr Fehlalarme erleben (PARASURAMAN et al., 1997). Fehlalarme können dazu führen, dass das Vertrauen in Warnsysteme sinkt und diese Warnsysteme im Resultat nicht benutzt werden (LEE und SEE, 2004). Eine andere Warnstrategie kann darin bestehen, nur vor bestimmten Ereignissen zu warnen. Beispielsweise könnten sich häufige Warnungen vor unverdeckten Stauenden, die von den Fahrern selbst erkannt werden können, nachteilig auf die langfristige Akzeptanz eines Warnsystems auswirken. In der vorliegenden Studie wurden beispielsweise verschiedene Stauenden durch Variationen von Parametern des Umgebungsverkehrs oder der Streckengeometrie erzeugt. Da Warnungen vor Stauenden vor allem im Fall von verdeckten Stauenden einen Vorteil gegenüber dem nicht-gewarten Fahren bringen, könnte angestrebt werden, auch nur vor solchen Stauenden zu warnen.

Eine weitere Möglichkeit bestünde in der Anwendung eines gestuften Warnsystems. Wenn Warnungen vor bestimmten Stauenden keinen Vorteil für den Fahrer bringen, könnten diese Warnungen dem Fahrer als reine Information zur Verfügung gestellt werden (unter Entfernung von Warnelementen).

Basierend auf den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung wäre es denkbar, ein zweistufiges Warnkonzept vor Stauenden zu verfolgen: So könnte das Warnsystem den Fahrer über unverdeckte Stauenden informieren (Fahrer entscheidet selbst, ob er die Information des Systems nutzen möchte), während verdeckte Stauenden ausnahmslos eine Warnung des Systems auslösen.

Warnpräzision

Zusammenfassend kann für präzise Warnungen ein deutlicher Vorteil gegenüber unpräzisen Warnungen ermittelt werden. Die in Kapitel 2.3.2 beschriebenen Defizite der momentanen Meldungskodierung machen jedoch deutlich, dass in der Praxis eine Steigerung der Genauigkeiten von Verkehrsinformationen stattfinden muss, was wiederum Einfluss auf die erforderlichen Methoden zur Meldungsübertragung haben kann. Eine Weiterleitung der Meldung vom letzten im Stauende befindlichen Fahrzeug an die nachfolgenden Fahrzeuge würde zu einer aktuelleren und exakteren Information führen. Eine Übertragung der Position des letzten Fahrzeugs im Stau in eine Zentrale (über straßenseitige Kommunikationseinheiten oder Mobil-

funk) würde ein Versenden von präzisen Warnungen auch als kollektiven Dienst ermöglichen. Technisch ist diese Funktionalität jedoch zurzeit nicht auf dem Markt verfügbar.

In der Realität liegen die Informationen zum Ort des Stauendes in der Regel weniger genau als in der Simulatorstudie vor. Basierend auf ausschließlich stationärer Erfassung sind außer in Einzelfällen keine exakten Informationen zu der Lage des Stauendes zu erwarten. Eine Ergänzung um Informationen, zum Beispiel Daten aus Fahrzeugen (sog. „floating car data“, FCD) und gemeldeten Informationen, kann zu einer Verbesserung der Informationslage führen. Gemäß MANSFELD (1998) kann bei der Standortbestimmung mittels GPS (Global Positioning System) systembedingt mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit eine Genauigkeit von unter 20 Metern erzielt werden. Angesichts der räumlich-zeitlichen Entwicklung des Stauendes (vgl. Kapitel 2.2) sind jedoch auch hier bestimmte Prozentsätze der Fahrzeugflotte erforderlich, um entsprechende Meldungen bzw. Informationen abzusetzen (vgl. WOLF et al., 2007).

Im Hinblick auf die derzeit üblichen Dauern zur Datenverarbeitung und Meldungsübertragung sind auch aufgrund des Zeitverzugs im Datenverarbeitungs- und -übertragungsprozess Ungenauigkeiten zu erwarten.

Die Analyse der derzeitigen Möglichkeiten zur Stauendeortung machen deutlich, dass momentan lediglich unpräzise Warnungen abgesetzt werden können. Da die präzisen Warnkonzepte i. d. R. effektiver als unpräzise Warnungen eingeschätzt werden, sollten weitere Möglichkeiten zur Erhöhung der Warnungspräzision erforscht werden.

Warndistanz

Aus den Probandenurteilen in der Fahrerbefragung und dem Ranking der Nützlichkeit aus der Nachbefragung lässt sich eine Präferenz von 1,5-km-Warnungen ablesen. Die Untersuchung weiterer, in der Studie nicht betrachteter Warndistanzen könnte weitere Unterschiede und Ergebnisse liefern. So könnte der Bereich zwischen den gewählten Distanzen von 0,3 km und 1,5 km weiter untersucht werden.

Die in den beiden vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Ergebnisse wurden gemäß Projektauftrags auf Basis von Daten aus Fahrsimulatorversu-

chen ermittelt, in denen Informationen wie z. B. die exakte Lage des Stauendes und die Verortung des annähernden Fahrzeugs durchgängig und weitestgehend exakt vorlagen. Bei der Ausgestaltung der Warnmeldung waren hinsichtlich der Präzision keine Einschränkungen vorhanden, wohingegen in der Realität aufgrund technischer Defizite jedoch Grenzen gesetzt sind.

Für unterschiedliche Randbedingungen (Umgebungsverkehr, Einsehbarkeit) wurden verschiedene Entfernungen zu den Stauenden als sicherheitswirksamste Warndistanzen identifiziert. Eine Umsetzung in die Praxis erfordert somit eine Verortung des Stauendes, dessen Position sich mit der Zeit verändern kann (vgl. Kapitel 2.2), sowie eine Verortung des sich annähernden Fahrzeugs (vgl. vorherigen Abschnitt „Warnpräzision“).

Umgebender Verkehr

Es lassen sich die folgenden grundlegenden Aussagen zu der technischen Realisierbarkeit und Umsetzung der geprüften Warnkonzepte treffen:

Die in vorliegender Studie getätigte Unterscheidung hinsichtlich mit vs. ohne Umgebungsverkehr kann derzeit in der Praxis technisch nicht in dem erforderlichen Maß getroffen werden, um situationsangepasst ein Warnkonzept in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen auszuwählen. Eine Verknüpfung stationär erfasster Verkehrsdaten mit einer fahrzeugbezogenen Umgebungserfassung könnte in der Zukunft die hierfür erforderliche Datengrundlage liefern. Hier besteht zukünftiger Forschungsbedarf.

7.4 Hinweise zur Ableitung von Mindestanforderungen für sicherheitsoptimale Verkehrsinformationen

Gemäß der Richtlinie 2010/40/EU des Europäischen Parlaments und des Rates (2010) sollen den Verkehrsteilnehmern sicherheitswirksame Verkehrsinformationen kostenfrei zur Verfügung gestellt werden. Der Umfang kann in Abhängigkeit der Netzkategorie variieren. Anhand der in vorliegender Studie ermittelten Erkenntnisse sind die Mindestanforderungen an sicherheitsoptimale Verkehrsinformationen abzuleiten. Die Herleitung der Mindestanforderungen stellt keinen Bestandteil des Projekt-

auftrags dar. Vielmehr sollen die Ergebnisse der Fahrsimulatorstudie (siehe Kapitel 5) sowie die kritischen Einordnungen der Ergebnisse in den vorangegangenen Kapiteln diesen Prozess unterstützen. Die mittels TOPSIS aufbereiteten Ergebnisse (vgl. Kapitel 6) werden als hilfreiche Zusatzinformationen erachtet, da dieses Verfahren eine Reihung alternativer Warnkonzepte im Hinblick auf die Effekte auf die Fahrsicherheit liefert, was bei einer Ableitung von Mindestanforderungen für sicherheitsoptimale Verkehrsinformationen direkt interpretiert und verwendet werden kann.

Die Forschungsarbeit erlaubt Aussagen zu der Fahrsicherheit bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen, Stauenden sowie Warnkonzepten:

- präzise vs. unpräzise Warnungen,
- verschiedene Warndistanzen,
- mit vs. ohne Warnung,
- unverdeckte/weiche vs. verdeckte/harte Stauenden,
- mit und ohne Umgebungsverkehr.

Für die Auswahl eines Warnkonzepts ist ein Tradeoff zu bestimmen, da die Untersuchungsergebnisse belegen, dass sich in Abhängigkeit unterschiedlicher Umgebungsbedingungen (mit/ohne Verkehr) und Stauendarten (weich/hart bei Annäherung mit Umgebungsverkehr bzw. unverdeckt/verdeckt in Abhängigkeit der Streckengeometrie) jeweils unterschiedliche Warnkonzepte am besten eignen bzw. den größten Einfluss auf die Fahrsicherheit ausüben. Da diese Randbedingungen in absehbarer Zeit nicht on-trip erfasst werden können wird zu diskutieren sein, ob standardmäßig als „Worst-Case-Szenario“ die Erkenntnisse aus den verdeckten bzw. harten Stauenden aufzugreifen sind, da diese gemäß Kapitel 5 das größere Gefahrenpotenzial als unverdeckte bzw. weiche Stauenden aufweisen.

7.5 Diskussion von Versuchsaufbau und Bewertungskonzept

Versuchsaufbau allgemein

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bestätigen zum einen frühere Befunde (ALM und NILSSON, 2000; van DRIEL et al., 2007; BROOKHUIS et al., 2009; POPIV et al., 2010), die besagen, dass Warnungen vor Hindernissen in Form von Stauenden

eine Anpassung des Fahrverhaltens bewirken. Die verkehrlichen Bedingungen bei Stauannäherungen, die Bedeutung der Warnpräzision sowie des Warnzeitpunkts wurden in bisherigen Studien nicht systematisch betrachtet.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die vorliegende Studie in einem Fahrsimulator mit Bewegungssystem durchgeführt wurde. Deshalb ist hinsichtlich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reales Fahren zu beachten, dass die ermittelten Werte der Fahrzeugführung (z. B. Bremszeitpunkt, maximale Verzögerung) aus der Fahrsimulation nicht absolut, sondern insbesondere im direkten Vergleich der experimentellen Bedingungen zu interpretieren sind (z. B. Zeitgewinn in der Dauer der Bremsbereitschaft zwischen gewarnten und nicht-gewarnten Fahrten).

Die durchgeführte Nebenaufgabe stellt einen weiteren Aspekt dar, der bei einem Ergebnisübertrag relevant ist: Die Stauanfahrten fanden unter Ablenkungsbedingungen statt. Es stellt sich die Frage, ob vergleichbare Ergebnisse auch für nicht-abgelenktes Fahren gefunden werden können. Zum einen könnte es sein, dass ohne die Bearbeitung von Nebenaufgaben generell weniger defensiv gefahren würde (z. B. höhere Geschwindigkeit oder geringere Abstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen). Zum anderen könnte es sein, dass Fahrer Stauenden generell früher entdecken und dementsprechend weniger stark von Warnungen profitieren.

Bewertung des Versuchsdesigns

Das Hauptinteresse der vorliegenden Studie lag in der Untersuchung verschiedener Warnkonzepte bei der Annäherung an Stauenden auf Autobahnen. Die Wirkung der Einsehbarkeit von Stauenden und der unterschiedlichen Warnauslegungen (Warnpräzision und Warndistanz) wurden deshalb in einem Messwiederholungsdesign geprüft. Dies bietet den Vorteil, Unterschiede zwischen den Versuchspersonen als Alternativerklärung für die gefundenen Wirkungen der unabhängigen Variablen weitestgehend auszuschließen, da alle Versuchsbedingungen mit denselben Fahrern durchgeführt werden. Auf der anderen Seite bringen Messwiederholungsdesigns eigene Probleme mit sich: Zum einen kann die mehrmalige Messung zu Übungseffekten oder Gewöhnung an das Testmaterial bzw. die Teststrecken führen. So könnte das Fahrverhalten der Fahrer bei Annäherungen an Stauenden alleine durch die mehrmalige Messung und die damit zwangsläufig

verbundene mehrmalige Anfahrt an Stauenden verändert worden sein. Zum anderen könnte es sein, dass sich durch die Länge des Versuchs Ermüdungseffekte auf Seiten der Fahrer eingestellt hätten. Um diese genannten Nachteile von Messwiederholungsdesigns zu kontrollieren, wurden vier verschiedene Abfolgen von Stau- und Füllstrecken erstellt. Die Fahrer wurden diesen Abfolgen per Zufall zugewiesen.

Die Fahrer wurden zudem zu Beginn des Versuchs einer der beiden Verkehrsbedingungen (mit vs. ohne Verkehr) per Zufall zugeteilt: Die Fahrer näherten sich den Stauenden daher entweder in allen Simulatorstrecken mit oder ohne umgebenden Verkehr an. Diese sog. randomisierte Zuteilung der Versuchspersonen wird unternommen, um den Einfluss unbekannter Störgrößen (z. B. von Personenvariablen) auf die Versuchsergebnisse zu kontrollieren und diese damit eindeutig durch die Manipulation der unabhängigen Variablen interpretierbar zu machen – in diesem Fall des Vorhandenseins oder Fehlens von Verkehr beim Erreichen des Stauendes.

Zusammengefasst wurde unter Beachtung der Vielzahl der manipulierten Variablen und unter Beachtung der möglichen Probleme verschiedener Untersuchungsansätze ein adäquates Versuchsdesign gewählt und umgesetzt.

Bewertung der realisierten Verkehrsbedingungen (mit vs. ohne Verkehr)

Die Erarbeitung des verkehrlichen Hintergrunds für die Wirkungsprüfung von Warnkonzepten vor Stauenden ist insofern von Bedeutung, als dass bisher im Hinblick auf die Umsetzung der zu warnenden Situationen diese Verkehrsumgebung vernachlässigt wurde (z. B. ALM und NILSSON, 2000; van DRIEL et al., 2007; BROOKHUIS et al., 2009; POPIV et al., 2010). Die genannten Studien kommen übereinstimmend zu einer positiven Bewertung von Warnungen vor den realisierten Stauenden, machen allerdings keine Differenzierung zwischen verschiedenen Arten von Stauenden.

Eine generell positive Auswirkung – wie in den erwähnten Studien – auf das Fahrverhalten kann in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht bestätigt werden: Erfolgt die Stauanfahrt mit Umgebungsverkehr, nutzen die Fahrer insbesondere präzise Warnungen an harten Stauenden (in diesem Fall Stauenden nach vorherigem freiem Verkehr) für eine

Anpassung des Fahrverhaltens an das bevorstehende Abbremsen. Bei Anfahrten an weiche Stauenden zeigen sich weniger starke Effekte der Stauendewarnungen auf das Fahrverhalten. Erfolgt die Anfahrt aber ohne Verkehr, zeigen sich hinsichtlich der Bremsbereitschaft und des Bremszeitpunkts positive Effekte präziser und unpräziser Warnungen sowohl an unverdeckten als auch an verdeckten Stauenden. Die vorliegende Arbeit liefert in diesem Sinne einen ergänzenden Beitrag für die vorliegenden Befunde: Es ist zu berücksichtigen, dass die Gestaltung der Verkehrsumgebung einen merklichen Einfluss auf die Ergebnisse der Wirküberprüfung verschiedener Warnkonzepte ausübt.

Schließlich ist darauf hinzuweisen, dass die Ergebnisse zum Fahrverhalten in der Bedingung mit Verkehr und der Bedingung ohne Verkehr nicht ohne weiteres miteinander vergleichbar sind: Die Fahrsituationen unterscheiden sich erheblich voneinander. Daher wurde auf einen direkten Vergleich hinsichtlich des Fahrverhaltens zwischen den Bedingungen verzichtet. Grund für dieses Vorgehen ist, dass sich die umgesetzten Versuchsstrecken und die damit verbundene Fahraufgabe der Fahrer voneinander unterschieden. Zwar wurden in beiden Bedingungen unverdeckte und verdeckte Stauenden realisiert, durch die Umsetzung über die verkehrlichen Rahmenbedingungen oder die Streckengeometrie würde jedoch ein Vergleich zwischen den beiden Bedingungen mehrdeutige Ergebnisse liefern.

Im vorliegenden Versuch wurde deswegen (mit Ausnahme der Nachbefragung) auf einen direkten Vergleich zwischen diesen verkehrlichen Rahmenbedingungen verzichtet. Stattdessen wurden die Ergebnisse parallel für die Bedingung mit und ohne Verkehr berichtet.

Methodische Neuerung: Verkehrszustände in der Fahrsimulation

Basierend auf verkehrstechnischen Quellen (KIM, 2002; KNOSPE et al., 2002; LUBASHEVSKY et al., 2002; KERNER, 2004) wurden verschiedene prototypische Stauende-Situationen abgeleitet und in der Fahrsimulation umgesetzt. Es wurde erwartet, dass sich das Fahrverhalten der Testfahrer an verschiedenen Stauenden in Abhängigkeit von deren Einsehbarkeit unterscheidet:

- So wurden unverdeckte Stauenden in Form von Stauenden mit vorherigem synchronisiertem

Verkehr (Differenz in Spurauslastung und -geschwindigkeiten näherte sich an und der Geschwindigkeitseinbruch geschah allmählich in der Versuchsbedingung mit Verkehr) und

- verdeckte Stauenden in Form von Stauenden mit vorherigem freiem Verkehr (Differenz in Spurauslastung und -geschwindigkeiten und abrupter Geschwindigkeitseinbruch am Stauende) umgesetzt.

Die vorliegende Arbeit erweitert die bestehende Literatur insofern, als dass Studien, die Verkehrszustände in der individuellen Fahrsimulation umsetzen, bisher weitgehend fehlen. Stauenden wurden bisher entweder aus einer makroskopischen Sichtweise (d. h. über Mittelung der erhobenen Variablen über viele Fahrzeuge) oder aus einer mikroskopischen Sichtweise (d. h. über die Betrachtung einzelner Fahrzeuge oder Fahrzeugverbände, nicht aber der Verkehrsumgebung) betrachtet (vgl. Kapitel 2.2). Eine Umsetzung der verschiedenen makroskopisch abgeleiteten Verkehrszustände in die Fahrsimulation für die Modellierung des Umgebungsverkehrs in der individuellen Fahrsimulation geschah bisher nur vereinzelt (z. B. BULD et al., 2003; COOPER et al., 2009).

Die wiederholte Herstellung qualitativ voneinander unterscheidbarer Verkehrszustände in der Fahrsimulation und die systematische Betrachtung der Stauannäherung unter diesen Verkehrszuständen stellen somit eine Erweiterung der bisherigen empirischen Betrachtung von Stauenden dar und verbinden damit makroskopische (durch Modellierung der Verkehrsumgebung) und mikroskopische (durch die Betrachtung des Fahrverhaltens individueller Fahrer in diesen Verkehrszuständen) Ansätze der Untersuchung von Übergängen zwischen Verkehrszuständen. Die Ergebnisse hinsichtlich des Fahrverhaltens an den unterschiedlichen Stauenden deutet darauf hin, dass die Kritikalität der Bremssituation beim Erreichen des Stauendes in hohem Maße von den vorherrschenden verkehrlichen Rahmenbedingungen abhängt.

Notwendigkeit objektiver Kriterien für die Wirküberprüfung – Fahrer überschätzen die Wirkung von Stauendewarnungen

Ein interessantes Ergebnis stellt die Dissoziation von Fahrerurteilen bezüglich der Fahrsicherheit und des Fahrverhaltens, besonders in der Bedingung mit Verkehr, dar. Wie erwähnt, zeigen sich po-

sitive Effekte von Warnungen im Fahrverhalten, insbesondere für präzise Warnungen und für die Annäherung an verdeckte Stauenden. Erfolgt die Stauannäherung mit Verkehr, zeigen sich sowohl in der Bremsbereitschaft als auch bezüglich des Bremszeitpunkts positive Wirkungen ausschließlich für präzise Warnungen an harten Stauenden. Die Bremsintensität wird nur an harten Stauenden verringert. Trotzdem werden die Stauanfahrten unabhängig von der Einsehbarkeit der Stauenden als sicherer bewertet. Erfolgt die Stauannäherung ohne Umgebungsverkehr, finden sich zwar durch präzise und unpräzise Warnungen an unverdeckten und verdeckten Stauenden eine frühere Bremsbereitschaft und ein früherer Bremsbeginn, die Bremsintensität ist aber auch in diesem Fall nur an verdeckten Stauenden vermindert. In der Bedingung mit Verkehr berichten die Fahrer, im Gegensatz zur Bedingung ohne Verkehr, allerdings auch bei harten Stauenden von einer gesteigerten Sicherheit durch die Stauendewarnungen. Folglich überschätzen die Fahrer in der Bedingung mit Verkehr die Steigerung der Fahrsicherheit bezüglich der Variablen Bremsbereitschaft- und -zeitpunkt und der Bremsintensität bei harten Stauenden, nicht aber die Fahrer in der Bedingung ohne Verkehr.

Bewertungskonzept

Wie die Ergebnisse der Gegenüberstellung der Aussagen aus der einzelindikator-orientierten und der indikator-integrierten Analyse zeigen (siehe Kapitel 7.2), entsprechen und ergänzen sich die Resultate aus beiden Methoden weitestgehend. Die Hauptaussagen wurden übereinstimmend getroffen. Unter Berücksichtigung der Erfordernis, dass durch Experten festgelegt werden muss, welche Indikatoren mittels TOPSIS untersucht werden, wurde durch die Überprüfung des Verfahrens (vgl. Kapitel 6.5) gezeigt, dass TOPSIS aufgrund der integrierten Berücksichtigung mehrerer Indikatoren eine valide Ergänzung der Bewertung auf Basis separiert voneinander analysierter Indikatoren darstellt. Die Rangfolge als Verfahrensergebnis kann direkt in weiteren zukünftigen Arbeitsschritten (siehe Kapitel 7.6) verwendet werden.

Kritisch anzumerken ist, dass das Verfahren zwar einen standardisierten Rahmen einzelner Schritte zur Bewertung verschiedener Alternativen darstellt, jedoch eine Reihe an individuellen Möglichkeiten zur Verfügung steht (z. B. bei der Wahl der Indikatoren, deren Gewichtung und der Datenaufberei-

tung), woraus je nach Anwendung des Verfahrens unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden können. Im Rahmen des vorliegenden Projekts erfolgen eine umfangreiche Überprüfung und Validierung des TOPSIS-Verfahrens und seiner Ergebnisse (vgl. Kapitel 6.5). Hier konnte gezeigt werden, dass plausible Ergebnisse erzielt wurden. Werden diese Arbeitsschritte jedoch nicht durchgeführt, ist die Aussage der Ergebnisse weiter kritisch zu hinterfragen. Keinesfalls ist es in vorliegendem Kontext möglich, TOPSIS als alleinige Methode zur Variantenbeurteilung heranzuziehen.

7.6 Weiterer Forschungsbedarf

7.6.1 Allgemein

Aus den Versuchsergebnissen lassen sich zahlreiche Fragestellungen für zukünftige Studien ableiten:

Weitere Studien sollten versuchen, die gefundenen Ergebnisse anhand einer anderen Versuchsumgebung (idealerweise unter standardisierten Versuchsbedingungen im Feld) zu replizieren. Somit könnten einerseits die Hypothesen der vorliegenden Arbeit erneut überprüft und andererseits ausgeschlossen werden, dass diese auf der in dieser Studie umgesetzten Verkehrsumgebung beruhen.

Des Weiteren könnte die Stauannäherung alternativ ohne Nebenaufgabe simuliert werden, um einen Vergleich mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie zu ermöglichen. Weitere Fragestellungen finden sich beispielsweise im Bereich des Aufmerksamkeitsverhaltens der Fahrer bei Stauendeannäherungen (Blickverhalten).

Basierend auf den im Rahmen der vorliegenden Arbeit gewonnenen Erkenntnissen kann für zukünftige Arbeiten im Kontext von Verkehrsinformationen sowie der Ermittlung ihrer Wirksamkeiten der nachfolgend formulierte weitere Forschungsbedarf abgeleitet werden.

7.6.2 Technische Umsetzung

Übertragung von Stauendeinformationen

Bezüglich der Übertragung von Stauendewarnungen müssen insbesondere Sicherheitsfragen geklärt werden. So muss beispielsweise gewährleistet sein, dass die Meldungen eine hohe Verfügbarkeit und Datensicherheit aufweisen, zudem sind Maß-

nahmen zur Überprüfung der Plausibilität von Meldungen zu entwickeln. Diese Arbeiten haben im Kontext des zu wählenden Übertragungsmediums (vgl. Kapitel 2.3.3) zu erfolgen.

Gesamtsystem zur Stauendewarnung

Die in der vorliegenden Studie untersuchten Stauendewarnungen wurden ausschließlich auf Meldungsebene behandelt, die technischen Hintergründe zur Generierung der Meldungen wurden nur kurz in Kapitel 2.3 eingeführt. Um die erprobten Warnkonzepte in die Realität umzusetzen, sind weitergehende Arbeiten notwendig, um erforderliche Daten(-quellen) zu erforschen sowie ganzheitliche Systemarchitekturen zu entwickeln.

In diesem Kontext ist zu berücksichtigen, dass der Fokus der vorliegenden Arbeit auf Autobahnen lag. Für Landstraßen bestehen zusätzliche Defizite hinsichtlich der Informationsverfügbarkeit (es stehen bedeutend weniger kontinuierlich erfasste Verkehrsdaten zur Verfügung), weshalb für diese Netzkategorie teilweise gesonderte Untersuchungen und Lösungen erforderlich sind.

Die daraus resultierenden detaillierten Arbeiten können dazu dienen, Kosten abzuschätzen und so mittels TOPSIS die Effizienz der Warnalternativen zu ermitteln. Ein Vergleich der verschiedenen Warnkonzepte unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Aspekte würde weitere Informationen zur Ableitung des Mindestumfangs an sicherheitswirksamen Informationen liefern.

Verortung von Stauenden

Aus den in Kapitel 7.2 genannten bestehenden Defiziten bei der Verortung von Stauenden wird der folgende Forschungsbedarf abgeleitet:

- Welche Maßnahmen können eingesetzt werden, um eine exaktere Verortung von Stauenden zu bewirken?
- Wie kann die Kodierung von Meldungen optimal an die Erfordernisse angepasst werden?

Da die präzisen Warnkonzepte im Vergleich i. d. R. effektiver als unpräzise Warnungen eingeschätzt werden, sollten weitere Möglichkeiten zur Erhöhung der Warnungspräzision erforscht werden.

Es ist zukünftig auch für die präzise Angabe der Position von Stauenden möglich, dass die Positions-

angaben des Warnsystems generell nicht exakt mit der tatsächlichen Position übereinstimmen oder manche Stauenden gar nicht entdeckt werden, bzw. Stauenden angezeigt werden, die sich beim Erreichen dieser schon wieder aufgelöst haben. Grund für diese Ungenauigkeit dürfte die raum-zeitliche Dynamik der Position von Stauenden sein. Wie in Kapitel 2 erwähnt, wurden variable Fortbewegungsgeschwindigkeiten von Stauenden beobachtet (BANKS, 2002), sodass eine exakte Prognose der Stauendeposition sowie deren Meldung an den Fahrer schwierig sein dürften.

7.6.3 Weiterführende Studien zur Systemgestaltung im Hinblick auf Akzeptanz und Aufmerksamkeit

Zukünftige Forschung sollte auf die Frage eingehen, wie die Fahrer mit Prognosefehlern in der Position des Stauendes umgehen. Der Versuch erfolgte in einem Fahrsimulator, sodass die Verkehrsumgebung und die Position der Stauenden relativ genau definiert werden konnten. Die präzise Entfernungsangabe war deswegen in der Bedingung ohne Verkehr auf den Meter genau korrekt, in der Bedingung mit Verkehr war die Anzeige bis auf wenige Meter korrekt. Eine solche Präzision in der Angabe der Position von Stauenden ist vor dem Hintergrund der raum-zeitlichen Dynamik der Position von Stauenden allerdings unrealistisch. Der gefundene Vorteil präziser Warnungen könnte eventuell in einen Nachteil umschlagen, falls die Position des Stauendes zwar präzise, aber inkorrekt angezeigt wird.

Vor diesem Hintergrund stellt sich einerseits die Frage, wie Fahrer mit präzisen, aber inkorrekten Warnungen umgehen. Wird beispielsweise ein Stauende früher erreicht als durch das Warnsystem angezeigt, könnte dies die Schwierigkeit der Fahraufgabe für den Fahrer erhöhen und möglicherweise kritische Folgen haben, wenn sich die Fahrer zu sehr auf die angezeigte Position des Stauendes verlassen („Overtrust“; LEE und SEE, 2004). Genauso könnte ein Stauende, welches vom Fahrer später als vom System angezeigt erreicht wird, auf den Fahrer besonders überraschend wirken. Außerdem könnte die Ungenauigkeit des Warnsystems dazu führen, dass dieses von Fahrern nicht benutzt wird, wenn es zu häufig vor Stauenden warnt, die sich beim Erreichen dieser schon wieder aufgelöst haben.

Es ist zu analysieren, wie ein Konzept für Stauendewarnungen zu gestalten ist, sodass bei teilweise

fehlerhaften bzw. nicht-übertragenen Meldungen eine optimale Akzeptanz und Wirksamkeit erzielt werden können.

Es würde sich weiterhin die Frage stellen, wie die Möglichkeit der Inkorrektheit von Warnungen an den Fahrer kommuniziert wird und welche Konsequenzen für die Gestaltung von Warnungen aus der möglichen Inkorrektheit von Warnungen resultieren. Eventuell kann die potenzielle Ungenauigkeit der Position von Stauenden ähnlich zu den bereits erwähnten Ansätzen aus der militärischen Forschung (KIRSCHENBAUM und ARRUDA, 1994) oder der zivilen Luftfahrt (GEMPLER und WICKENS, 1998) in die Warnung selbst integriert werden. KIRSCHENBAUM und ARRUDA (1994) stellten die Unsicherheit in der Position von Schiffen auf einem taktischen Display durch Ellipsen dar. Die Ellipsen zeigten dabei die mögliche Position der Ziele an, anstatt deren Position punktuell darzustellen. GEMPLER und WICKENS (1998) zeigten mögliche Flugrouten von Flugzeugen an, indem die vorhergesagte Flugroute auf einem Display mit einem Unsicherheitsbereich umgeben wurde.

Aus den vorgenannten Ergebnissen lassen sich für die Systemgestaltung von Stauendwarnungen zusammenfassend die folgenden Implikationen ableiten: Einerseits stellt sich die Frage, ob vor allen Arten von Stauenden gewarnt werden sollte. Bei weichen Stauenden finden sich im Gegensatz zu harten Stauenden geringere Effekte auf die Verbesserung der Fahrsicherheit und bei unverdeckten verglichen mit verdeckten Stauenden sind die Wirkungen der Warnungen weniger stark ausgeprägt. Zu viele unnötige Warnungen können eventuell dazu führen, dass diese auf lange Frist nicht mehr beachtet werden oder für sog. falsche Alarmer gehalten werden. Ein weiteres Argument für eine Limitierung der Anzahl an Warnmeldungen findet sich in der aufmerksamkeitsleitenden Funktion von Warnungen: Wird (hier: durch Warnungen) die Aufmerksamkeit auf ein bestimmtes Objekt gerichtet (hier: ein Stauende), könnte es sein, dass anderen Objekten weniger Aufmerksamkeit geschenkt wird (hier: rückwärtiger Verkehr). Da der Fokus der vorliegenden Studie auf den Auswirkungen verschiedener Warnkonzepte auf das Fahrverhalten beim Abbremsen vor Stauenden lag, traten neben den Stauenden keine weiteren sicherheitskritischen Ereignisse in der Stauanfahrt auf. Es wäre jedoch denkbar, dass Fahrer mit präzisen Warnungen und Warnungen mit größeren Warndistanzen ihre Aufmerksamkeit einseitig auf das gewarnte Ereignis

richten (sog. „attentional tunneling“; DAVISON und WICKENS, 2001). Auf andere Gefahrenquellen als die durch das Warnsystem angezeigten reagieren Fahrer dann möglicherweise weniger schnell.

Ein weiterer unerwünschter Effekt von Warnungen kann in einer erhöhten Beanspruchung der Fahrer durch das Lesen des Displays bei präzisen Warnungen und Warnungen in großer Warndistanz liegen. Die Fahrer in dieser Studie berichteten von einer höheren visuellen Belastung durch das Lesen präziser Warnungen gegenüber unpräzisen Warnungen und durch 3,5-km- und 1,5-km-Warnungen gegenüber der 0,3-km-Warnung. Weitere Studien sollen diese erhöhte Beanspruchung auch mit objektiven Methoden untersuchen (z. B. Blickverhalten) und mögliche negative Konsequenzen einer solchen erhöhten visuellen Belastung berücksichtigen. Zukünftige Forschung sollte in diesem Fall auch objektive Methoden wie die Erfassung des Blickverhaltens der Fahrer einsetzen.

7.6.4 Praxiseinführung

Markteinführung

In Anbetracht der im vorherigen Kapitel genannten erwarteten Einschränkungen der digitalen Stauendwarnungen sind Konzepte für eine Markteinführung der Systeme zu entwickeln. In diesem Kontext ist im Rahmen zukünftiger Arbeiten abzuwägen,

- wie das System zu vermarkten ist, sodass bei teilweise fehlerhaften bzw. nicht übertragenen Meldungen die Wirksamkeit nicht leidet, sowie
- ab welchen Ausstattungsgraden eine Markteinführung realisierbar ist und welche Zeithorizonte dafür veranschlagt werden.

In organisatorischer Hinsicht ist zu klären, wer sich für die Meldungsgenerierung und -übermittlung verantwortlich zeigt.

Die Markteinführung eines Systems zur Stauendwarnung muss auch Ergebnisse der in vorherigem Kapitel genannten erforderlichen weiterführenden Studien zu der Akzeptanz und Wirksamkeit von Stauendwarnungen berücksichtigen.

Ergebnisübertrag auf weitere Verkehrsinformationen

Gemäß Projektauftrag wurden in vorliegender Studie die Verkehrsinformationen auf Stauendwar-

nungen beschränkt. Weitere warnende, aber auch rein informierende Meldungen sollten zukünftig jedoch in ähnlicher Weise untersucht werden. Die Ergebnisse würden einen Abgleich mit den Resultaten der vorliegenden Studie für Stauendewarnungen ermöglichen. In zukünftigen Untersuchungen stellen beispielsweise kooperative Systeme, die erweiterte Umgebungsinformationen verwenden, sowie weitere Systeme zur lokalen Gefahrenwarnung zu berücksichtigende Ansätze dar.

Mindestanforderungen für sicherheitsrelevante Verkehrsinformationen

Der Prozess der Ableitung von Mindestanforderungen für sicherheitsrelevante Verkehrsinformationen wurde in vorliegendem Projekt gemäß Beauftragung lediglich unterstützt, jedoch nicht durchgeführt. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gewonnenen Erkenntnisse stellen einen Beitrag zu der Bearbeitung dieser komplexen Aufgabe dar. Eine weiterführende Analyse der erzielten Informationen sowie die Entwicklung einer neutralen und nachvollziehbaren Grundlage zur Entscheidungsunterstützung, in die die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit eingehen, stehen jedoch momentan noch aus.

8 Zusammenfassung

Kontext und Aufgabenstellung

In der Richtlinie 2010/40/EU des Europäischen Parlaments und des Rates (2010) wurde gefordert, dass den Verkehrsteilnehmern europaweit sicherheitswirksame Verkehrsinformationen kostenfrei zur Verfügung stehen sollen. Die Funktionalitäten von kostenpflichtigen Services, die den o. g. Mindestumfang übersteigen, wurden bislang nicht abgegrenzt. Diese Entscheidung erfordert quantifizierte Aussagen zu den Sicherheitswirkungen digitaler Verkehrswarnungen, die bisher nicht vergleichend ermittelt wurden.

Dies ist insbesondere wichtig, da Verkehrsstaus für die Verkehrsteilnehmer gefährliche Verkehrssituationen darstellen, die teilweise mit einer plötzlichen und starken Reduktion der Geschwindigkeit einhergehen. Hierdurch kann eine Verringerung der Fahrsicherheit resultieren. Insbesondere unerwartete und plötzliche Stauenden können im Fahrtablauf eine erhöhte Gefahr darstellen, da zur Unfallver-

meidung zügige Reaktionen der Fahrer nötig sind. Die Annäherung an Stauenden sollte für die Fahrer demnach durch gezielte Informationen und rechtzeitige Warnungen während der Fahrt (on-trip) sicherer werden.

An diesen Punkten setzte das Projekt FE 82.371/2009 „Konzept zur Ermittlung der Sicherheitswirkung von digitalen Verkehrsinformationen“ an, dessen vorrangige Ziele es waren, verschiedene Warnkonzepte vor Stauenden zu entwickeln und hinsichtlich ihres Einflusses auf die Fahrsicherheit auf Autobahnen zu untersuchen und zu vergleichen.

Untersuchungsmethodik

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war der Vergleich verschiedener Stauendewarnungen hinsichtlich ihrer Effekte auf die Fahrsicherheit. Die Untersuchungsmethode zeichnet sich durch folgendes Vorgehen aus:

Die Bearbeitung basierte auf einer Recherche verkehrstechnischer Grundlagen zu den Themengebieten „Stau und Stauende“ sowie „Verkehrsinformationen“, die in Kapitel 2 dargelegt sind. Die Erkenntnisse wurden genutzt, um zum einen eine realistische Simulation der verkehrlichen Bedingungen bei der Annäherung an Stauenden zu ermöglichen, sowie zum anderen, um verschiedene Stauendewarnungen zu entwickeln. Es wurden Konzepte zur On-trip-Warnung vor Stauenden auf Autobahnen festgelegt und diese mit N = 32 Fahrern im Rahmen einer Fahrsimulatorstudie mit Bewegungssystem untersucht.

In zwei Verkehrsbedingungen („mit Verkehr“ vs. „ohne Verkehr“), in denen Stauenden mit bzw. ohne Umgebungsverkehr erreicht werden, wurden jeweils zwei Stauendarten von unterschiedlicher Kritikalität simuliert:

1. Der umgebende Verkehr bremst kurz vor dem Stauende plötzlich ab („hartes Stauende“ in der Verkehrsbedingung mit Verkehr) bzw. das Stauende ist durch die Streckengeometrie nicht einsehbar („verdecktes Stauende“ in der Verkehrsbedingung ohne Verkehr) vs.
2. Der umgebende Verkehr reduziert die Geschwindigkeit vor dem Stauende graduell („weiches Stauende“ in der Verkehrsbedingung mit Verkehr) bzw. das Stauende ist durch die Streckengeometrie einsehbar („unverdecktes Stauende“ in der Verkehrsbedingung ohne Verkehr).

Des Weiteren wurden der erstmalige Zeitpunkt der Warnung (in 3,5 km, 1,5 km oder 0,3 km Entfernung vor dem Stauende) sowie die Warnpräzision („präzise Warnung“, bei der die Distanz zum Stauende angezeigt und regelmäßig aktualisiert wird, vs. „unpräzise Warnung“, bei der keine konkrete Distanzangabe geliefert wird) variiert. Zusätzlich wurden Stauenden in Kontrollsituationen ohne die Bereitstellung einer Stauendewarnung angefahren.

Mit der Erwartung, dass unter Ablenkungsbedingungen die Vorhersehbarkeit der Stauenden beim Durchfahren des Simulatorparcours reduziert ist, hatten die Fahrer während der Fahrt zusätzlich eine Nebenaufgabe in Form einer Menüaufgabe zu bearbeiten. Für eine ausführliche Beschreibung des methodischen Vorgehens in der Fahrstudie ist auf Kapitel 3 verwiesen.

Es wurde ein Bewertungskonzept entwickelt, anhand dessen die angezeigten Warnalternativen mittels Indikatoren für Längs- und Querregelung, Ereigniserkennung und Probandenbefragung hinsichtlich ihres Einflusses auf die Fahrsicherheit verglichen werden konnten (siehe Kapitel 4). Der erste Bewertungsschritt sah vor, dass die Rohdaten verschiedenartiger Indikatoren, die im Rahmen der Fahrstudie aufgezeichnet wurden, in einem deskriptiven, grafischen und inferenzstatistischen Vorgehen einzelindikator-orientiert interpretiert wurden.

Eine begrenzte Anzahl aussagekräftiger Indikatoren wurden als Eingangsdaten zur Untersuchung mittels eines indikator-integrierenden statistischen Verfahrens ausgewählt:

- Längsbeschleunigung,
- Querbeschleunigung,
- Anstieg der Bremsbereitschaft vor dem Stauende,
- Probandenbefragung: „Wie hilfreich war die Warnung?“,
- Standardabweichung der Geschwindigkeiten,
- Zeitabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug beim Beginn des Bremsens.

Zur Datenanalyse wurde das Verfahren TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) angewendet, wodurch ein standardisierter Vergleich verschiedener Warnalternativen möglich wurde (PETERS et al., 2007). Die Ergeb-

nisse des TOPSIS-Verfahrens wurden auf ihre Plausibilität überprüft.

Das Bewertungskonzept wurde auf die in der Fahrstudie aufgezeichneten Daten angewendet, sodass die verschiedenen Stauendewarnungen in Abhängigkeit von der Verkehrsbedingung hinsichtlich der Sicherheitswirkungen vergleichend bewertet wurden. Durch eine ergänzende kritische Einordnung der Ergebnisse, der Warnkonzepte und des Versuchsaufbaus können die Ergebnisse als Entscheidungsunterstützung bei der Entwicklung und Einführung von Stauendewarnungen verwendet werden.

Untersuchungsergebnisse

Nachfolgend werden kurz die Kernaussagen der statistischen einzelindikator-orientierten Bewertung (Kapitel 5) sowie der indikator-integrierten Bewertung mittels TOPSIS (Kapitel 6) dargestellt. Eine ausführliche Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse findet sich in Kapitel 7.

Mit Verkehr

Die Fahrten mit Verkehr weisen bei harten Stauenden ohne Warnung die geringste Fahrsicherheit auf. Vor allem präzise Warnungen vor harten Stauenden werden für eine Anpassung des Fahrverhaltens an die bevorstehenden Stauenden genutzt. An weichen Stauenden und bei unpräzisen Warnungen sind die Effekte auf die Fahrsicherheit weniger stark ausgeprägt. Bei weichen Stauenden wird gemäß indikator-integrierter Bewertung durch die Bereitstellung einer unpräzisen Stauendewarnung die Fahrsicherheit im Vergleich zur ungewarnten Fahrt nicht erhöht.

Obwohl sich im Fahrverhalten in der Bedingung mit Verkehr positive Effekte auf das Fahrverhalten vor allem bei harten Stauenden finden, geben die Fahrer unabhängig von der Einsehbarkeit der Stauenden an, von präzisen und unpräzisen Warnungen im Sinne einer gesteigerten Sicherheit profitiert zu haben. In der Befragung zeigte sich zudem, dass die meisten Fahrer präzise gegenüber unpräzisen Warnungen bevorzugen.

Es wurde sowohl für die weichen Stauenden als auch im Falle harter Stauenden für präzise Warnungen bei einer Warndistanz von 1,5 km die jeweils höchste Fahrsicherheit ermittelt.

Ohne Verkehr

Bei verdeckten Stauenden ist die Fahrsicherheit vor allem bei nicht-gewarnten Annäherungen vergleichsweise gering, besonders für diese Situationen lassen sich durch die Warnungen positive Effekte auf die Fahrsicherheit erzielen. Die Warnungen werden von den Fahrern unabhängig von der Warnpräzision und unabhängig von der Einsehbarkeit (verdeckt oder unverdeckt) der Stauenden mehrheitlich für die Anpassung des Fahrverhaltens an das bevorstehende Bremsen genutzt (frühere Bremsbereitschaft und Bremsbeginn an verdeckten und unverdeckten Stauenden). Indikator-integriert wurden für einsehbare Stauenden die Warndistanzen 3,5 km und 1,5 km unabhängig von der Warnpräzision besser bewertet als die Warnungen in 0,3 km Entfernung vor dem Stauende sowie als die Fahrsicherheit ohne bereitgestellte Warnungen. Bei verdeckten Stauenden zeigt sich, dass die präzisen Warnungen in 3,5 km und 1,5 km vor dem Stauende einen vergleichsweise großen Einfluss auf die Fahrsicherheit ausüben, die unpräzise Warnung in 1,5 km Entfernung wurde als drittbeste Variante bestimmt. Die übrigen Varianten (inklusive die nicht-gewarnten Fahrten) weisen gemäß TOPSIS eine geringere Fahrsicherheit auf

Folgerungen für die Praxis und weiterer Forschungsbedarf

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bestätigen frühere Befunde (ALM und NILSSON, 2000; van DRIEL et al., 2007; BROOKHUIS et al., 2009; POPIV et al., 2010), dass Warnungen vor Hindernissen in Form von Stauenden zu Anpassungen im Fahrverhalten führen. Den verkehrlichen Bedingungen bei Stauannäherungen und der Bedeutung der Warnpräzision und des Warnzeitpunkts wurden in den bisher durchgeführten Untersuchungen weniger Aufmerksamkeit gewidmet.

Gemäß Projektauftrag standen den Fahrern in den Fahrsimulatorversuchen die Verkehrsinformationen durchgängig und weitestgehend exakt zur Verfügung, die Einflüsse von Fehlmeldungen sollten nicht untersucht werden. Zudem wurden die Projektergebnisse vor dem Hintergrund momentan vorherrschender technischer und organisatorischer Defizite kritisch eingeordnet und erweiterter Forschungsbedarf abgeleitet. Hier wurden der Versuchsaufbau, das Bewertungskonzept, die untersuchten Warnkonzepte sowie die erzielten Ergebnisse analysiert.

Hieraus lassen sich Implikationen für die Systemgestaltung von Stauendewarnungen ableiten: Einerseits stellt sich die Frage, ob vor allen Arten von Stauenden gewarnt werden sollte. Bei weichen Stauenden finden sich im Gegensatz zu harten Stauenden nur geringe Effekte auf eine Steigerung der Fahrsicherheit. Bei unverdeckten verglichen mit verdeckten Stauenden sind die Wirkungen der Warnungen weniger stark ausgeprägt. Zu viele unnötige Warnungen können eventuell dazu führen, dass diese auf lange Sicht nicht mehr beachtet werden oder für sog. falsche Alarme gehalten werden. Ein Argument für die Bereitstellung einer begrenzten Anzahl an Warnungen findet sich in der aufmerksamkeitsleitenden Funktion von Warnungen: Wird (hier: durch Warnungen) die Aufmerksamkeit auf ein bestimmtes Objekt gerichtet (hier: ein Stauende), könnte es sein, dass anderen Objekten weniger Aufmerksamkeit geschenkt wird (hier: z. B. rückwärtiger Verkehr). Weiterführende Studien wären für die Beantwortung dieser Fragestellungen notwendig.

Die ermittelten Ergebnisse machen zudem deutlich, dass insbesondere präzise Warnungen einen starken Einfluss auf die Erhöhung der Fahrsicherheit ausüben. Ein Abgleich mit den verfügbaren technischen Möglichkeiten zur Meldungsgenerierung zeigt jedoch, dass hier zukünftig noch weiteres Optimierungspotenzial besteht.

Abschließend wird darauf hingewiesen, dass die vorliegende Studie in einem Fahrsimulator mit Bewegungssystem durchgeführt wurde. Hinsichtlich der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reales Fahren ist zu beachten, dass die ermittelten Werte der Fahrzeugführung (z. B. Bremszeitpunkt, maximale Verzögerung) aus der Fahrsimulation nicht absolut, sondern insbesondere im direkten Vergleich der experimentellen Bedingungen zu interpretieren sind (z. B. Zeitgewinn in der Dauer der Bremsbereitschaft zwischen gewarnten und nicht-gewarnten Fahrten). Weiteren Einfluss auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse hat die durchgeführte Nebenaufgabe: Die Stauanfahrten fanden unter Ablenkungsbedingungen statt. Es stellt sich die Frage, ob vergleichbare Ergebnisse auch für nicht-abgelenktes Fahren gefunden werden können. Zum einen könnte es sein, dass ohne die Bearbeitung von Nebenaufgaben generell weniger defensiv gefahren wird (z. B. höhere Geschwindigkeit oder geringere Abstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen). Zum anderen könnte es sein, dass Fahrer Stauenden generell früher entdecken und dementsprechend we-

niger stark von Warnungen profitieren. Zur Beantwortung dieser Fragestellungen sind weiterführende Studien notwendig.

Die Aussagen der einzelindikator-orientierten Bewertung sowie der indikator-integrierten Bewertung sind widerspruchsfrei (Kapitel 7.2), liefern im Vergleich aber jeweils einen individuellen Mehrwert: Ein Vorteil der einzelindikator-orientierten Untersuchung ist, dass der gesamte Prozess der Stauendeannäherung überprüft werden kann, wofür in TOPSIS aggregierte und damit unschärfere Werte verwendet werden müssen. Mehrwerte des TOPSIS-Verfahrens sind, dass mehrere vorab auszuwählende Indikatoren bei der Bewertung berücksichtigt werden und als Resultat eine Rangfolge der sicherheitswirksamsten Varianten quantifiziert wird. Es ist festzuhalten, dass das TOPSIS-Verfahren individuelle Einstellmöglichkeiten bietet (z. B. bei der Wahl der Indikatoren, der Gewichtung, der Datenaufbereitung), die einen Einfluss auf das erzielte Ergebnis ausüben. Im Rahmen des vorliegenden Projekts erfolgten eine Überprüfung und Validierung des TOPSIS-Verfahrens und seiner Ergebnisse (vgl. Kapitel 6.5). Es konnte gezeigt werden, dass plausible Ergebnisse erzielt wurden, jedoch wird in vorliegendem Kontext nicht empfohlen, TOPSIS als alleinige Methode zur Variantenbeurteilung heranzuziehen.

Die Ergebnisse der vorgestellten Studie können dazu beitragen, die Mindestanforderungen an unentgeltlich zur Verfügung stehenden sicherheitsrelevanten Verkehrsinformationen abzuleiten.

Literatur

- ADAC: Unfallarten und Verunglückte, <http://www.adac.de>, abgerufen am 07.03.2011
- ADAC: Staubilanz 2010, <http://www.adac.de>, abgerufen am 07.03.2011
- ALM, H.; NILSSON, L.: Incident warning systems and traffic safety: A comparison between the PORTICO and MELYSSA test site systems. *Transportation Human Factors*, 2 (1), pp. 77-93, 2000
- ASSENMACHER, S.: DIWA: Potenziale einer verbesserten Fahrerwarnung. Technische Universität München, 2008
- ASSENMACHER, S.; BUSCH, F.: Increasing traffic safety by improved driver information. *Proceedings, 13th World Congress on Intelligent Transport Systems*, London, 2006
- BANKS, J. H.: Review of empirical research on congested freeway flow. *Transportation Research Record*, 1802, 225-232, 2002
- BASSt: Merkblatt für die Ausstattung von Verkehrszentralen und Unterzentralen (MARZ). Bundesanstalt für Straßenwesen (Hrsg.), FGSV Verlag, Köln, 1999
- BASSt: http://www.bast.de/nn_42544/DE/Aufgaben/abteilung-f/referat-f4/Location-Code-List/locati-on-code-list-start.html. abgerufen am 24.11.2010
- BILSTRUP, K.: A Survey Regarding Wireless Communication Standards Intended for a High-Speed Vehicle Environment. Technical Report IDE0712, Halmstad (Schweden), 2007
- BMVBW: Rahmenrichtlinie für den Verkehrswarndienst (RVWD). *Verkehrsblatt* 22/2000, S. 642-646, Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.), Dortmund, 2000
- BOGENBERGER, K.: Qualität von Verkehrsinformationen. *Straßenverkehrstechnik* 10/2003, 2003
- BOGENBERGER, K.; KONHÄUSER, P.: Verkehrsmanagement der Zukunft INVENT – Verkehrsmanagement 2010. *Straßenverkehrstechnik* 4/2005, pp. 183 ff., 2005
- BOGENBERGER, K.; HAUSCHILD, M.: QFCD – Ein Mikroskopisches Verfahren zur Ermittlung der individuellen Qualität von Verkehrsinformationen. Präsentation, 3rd mobil.tum Conference, München, 2009
- BRENZEL, C.; BERNINGER, H.; GENSLER, F.; MESCHENMOSER, R.: WARN – Fahrzeug-Funkwarnsystem: Teilprojekt Systemspezifikation, -realisierung und Validierung. Bayerische Motoren Werke AG, Opel AG, Bosch GmbH, 2001
- BROOKHUIS, K. A.; van DRIEL, C. J. G.; HOF, T.; van AREM, B.; HOEDEMAEKER, M.: Driving with a congestion assistant: Mental workload and acceptance. *Applied Ergonomics*, 40 (6), pp. 1019-1025, 2009

- BULD, S.: INVENT – Das Learnability-Lab bei der Untersuchung von Fahrerassistenzsystemen. Informations- und Assistenzsysteme im Automobil – Erlernbarkeit als Beitrag zur Fahrsicherheit. Abschlusspräsentation im Rahmen des Projekts INVENT, Bergisch Gladbach, 2003
- Bundesministerium für Verkehr: Richtlinien für die Anlage von Straßen – Teil: Linienführung (RAS-L). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Köln, 1995
- CHOWDHURY, D.; SANTEN, L.; SCHADSCHNEIDER, A.: Statistical Physics of Vehicular Traffic and Some Related Systems. Physics Reports 329, Elsevier, Amsterdam, 2000
- COOPER, J. M.; VLADISAVLJEVIC, I.; MEDEIROS-WARD, N.; MARTIN, P. T.; COOPER, J. M. & STRAYER, D. L.: An investigation of driver distraction near the tipping point of traffic flow stability. Human Factors, 51, 261-268, 2009
- DAHMEN-ZIMMER, K.; JULIEN, S.; KOSTKA, M.; MARBERGER, C.; SCHNEIDER, C.; ZIMMER, A.: WARN – Fahrzeug-Funkwarnsystem: Evaluation des Bosch- und BMW Systems. Abschlussbericht, Universität Regensburg, 2001
- DAVISON, H. J. & WICKENS, C. D. (2001): Rotorcraft hazard cueing: The effects on attention and trust. In: R. JENSEN (Ed.), Proceedings of the 11th International Symposium on Aviation Psychology (pp. 1-6). Columbus: Ohio State University, 2001
- DINKEL, A.; BUSCH, F.: Projekt FE 82.338/2007 „Zuverlässige Ermittlung des Fahrbahnzustands zur Erhöhung der Verkehrssicherheit auf Autobahnen“. Technische Universität München, 2010
- EISENKOPF, A.: Reduzierung von Staus auf Bundesautobahnen: Bilanz, Handlungsbedarf und Maßnahmen – Die Sicht der Wissenschaft. ADAC/VDA-Workshop zu „Weniger Stau – mehr Mobilität“, Bonn, 2009
- Europäisches Parlament und Rat: Richtlinie 2010/40/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Juli 2010 zum Rahmen für die Einführung intelligenter Verkehrssysteme im Straßenverkehr und für deren Schnittstellen zu anderen Verkehrsträgern. Brüssel, 2010
- FAKLER, O.: Verkehrsmanagement: Verkehrsfunk als Informationsinstrument. <http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/107631/?clsld0=276673&clsld1=276675&clsld2=0&clsld3=0>. Artikel im Forschungsinformationssystem, abgerufen am 15.06.2010, 2010a
- FAKLER, O.: Verkehrsmanagement: Navigation (individuelle on-trip-Zielführung); <http://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/109166/>. Artikel im Forschungsinformationssystem, abgerufen am 15.06.2010, 2010b
- FGSV: FGSV AA 1.1 „Grundsatzfragen der Verkehrsplanung“: Verkehrsmanagement – Einsatzbereiche und Einsatzgrenzen. FGSV-Arbeitspapier Nr. 56, FGSV Verlag, Köln, 2002
- FILZEK: Abstandsverhalten auf Autobahnen – Fahrer und ACC im Vergleich. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2002
- GEMPLER, K. S. & WICKENS, C. D.: Display of Predictor Reliability on a Cockpit Display of Traffic Information (Technical Report ARL-98-06/ROCKWELL-98-1). University of Illinois Aviation Research Lab: Savoy, IL., 1998
- HELLER, O.: Hörfeldaudiometrie mit dem Verfahren der Kategorienunterteilung (KU). Psychologische Beiträge, 27, S. 478-493, 1985
- HELLING, U.: Fahrzeit- und Informationsvorteile durch Dynamische Zielführung. Der Einfluss der Verkehrsmeldungsqualität unter Beachtung von Netzauslastung und Alternativrouten. Dissertation. Universität Duisburg-Essen, Essen, 2006
- HOFFMANN, S.; KRÜGER, H.-P.; BULD, S.: Vermeidung von Simulator Sickness anhand eines Trainings zur Gewöhnung an die Fahrsimulation. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), Simulation und Simulatoren – Mobilität virtuell gestalten (VDI-Berichte, Nr. 1745, S. 385-404, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2003
- HOGEMA, J. H.; GÖBEL, M. P.: In-car versus roadside queue warning information: a driving simulator study, Report no. TM-00-D004, TNO Human Factors, Soesterberg, 2000
- HOLFELDER, W.: Vehicle-to-Vehicle and Vehicle-to-Infrastructure Communication – Recent Developments, Opportunities and Challenges. Contribution to the Workshop: Future Generation Software Architectures in the Automotive Domain Connected Services in Mobile Networks, La Jolla, 2004

- INVENT: Firmen-Schlussbericht zum Teilprojekt INVENT-VLA. Forschungsinitiative INVENT, 2006
- ISO 14819-2:2003: Traffic and Traveller Information (TTI). TTI messages via traffic message coding. Part 2: Event and information codes for Radio Data System. Traffic Message Channel (RDS-TMC), Genf, 2003
- ISO 14819-3:2004: Traffic and Travel Information (TTI). TTI messages via traffic message coding. Location referencing for ALERT-C, Genf, 2004
- ITWissen: <http://www.itwissen.info>. Abgerufen am 15.02.2011
- JADIDI, O.; HONG, T. S.; FIROUZI, F.; YUSUFF, R. M.; ZULKIFLI, N.: TOPSIS and multi-objective model integration for supplier selection problem. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Volume 31, Issue 2, Gliwice (Polen), 2008
- JANIC, M.: Multicriteria Evaluation of High-Speed Rail, Transrapid Maglev and Air Passenger Transport in Europe. *Transportation Planning and Technology*, Volume 26, Issue 6, New York (USA), 2003
- KERNER, B. S.; REHBORN, H.: Experimental properties of phase transitions in traffic flow. *Physical Review Letters*, 79, pp. 4030-4033, 1997
- KERNER, B. S.: Theory of Congested Traffic Flow. *Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory 1999*
- KERNER, B. S.: The physics of traffic. Empirical freeway pattern features, engineering applications and theory. Springer Verlag, Heidelberg, 2004
- KIENZLE, J.: Analyse von Einzelfahrzeugdaten – Verkehr verstehen. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2001
- KIM, Y.: Online traffic flow model applying dynamic flow-density relations. Dissertation, Technische Universität München, München, 2002
- KIRSCHENBAUM, S. S. & ARRUDA, J. E.: Effects of graphic and verbal probability information on command decision making. *Human Factors*, 36, 406-418, 1994
- KLEBELSBERG, D.: Verkehrspsychologie. Springer Verlag, Heidelberg, 1982
- KNAPPE, G.; KEINATH, A.; MEINECKE, C.: Empfehlungen für die Bestimmung der Spurhalte-güte im Kontext der Fahrsimulation. *MMI-Interaktiv*, ISSN 1439-7854, 11/2006
- KNIPLING, R. R.; HENDRICKS, D. L.; KOZIOL, J. S.; ALLEN, J. C.; TIJERINA, L.; WILSON, C.: A front-end analysis of rear-end crashes. In: *Proceedings of the IVHS America 1992 Annual Meeting* (pp. 733-745). Washington: IVHS America, 2
- KNOSPE, W.; SANTEN, L.; SCHADSCHNEIDER, A.; SCHRECKENBERG, M.: Single-vehicle data of highway traffic: Microscopic description of traffic phases. *Physical Review E*, 65, p. 56133, 2002
- KOORNSTRA, M. J.: Safety relevance of vision research and theory. In: A. G. GALE (Ed.), *Vision in Vehicles IV* (pp. 3-13), Elsevier, Amsterdam, 1993
- KRANKE, F.; POPPE, H.; KESTING, A.; TREIBER, M.: Der Baustellenlotse – Ein stauvermeidendes Fahrerassistenzsystem. *Straßenverkehrstechnik* 01/2010, pp. 12 ff., 2010
- KRAUTTER, W.; MACKAMUL, H.; MANGA, B.; MANSTETTEN, D.: Traffic scenarios in driving simulation: Implementation and application, *Advances in Transportation Studies, Special Issue*, 2004
- LEE, C.; SACCOMANNO, F. & HELLINGA, B.: Analysis of crash precursors on instrumented freeways. *Transportation Research Record*, 1784, 1-8, 2002
- LEE, J. D. & SEE, K. A.: Trust in automation: Designing for appropriate reliance. *Human Factors*, 46, 50-80, 2004
- LIEBERMANN, D. G.; BEN-DAVID, G.; SCHWEITZER, N.; APTER, Y.; PARUSH, A.: A field study on braking responses during driving, I. Triggering and modulation. *Ergonomics*, 38, pp. 1894-1902, 1995
- LUBASHEVSKY, I.; MAHNKE, R.; WAGNER, P.; KALENKOV, S.: Long-lived states in synchronized traffic flow: Empirical prompt and dynamical trap model, *Physical Review E*, 66, p. 16117, 2002

- MANSFELD, W.: Satellitenortung und Navigation: Grundlagung und Anwendungen globaler Satellitennavigationssysteme. Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1998
- MINDERHOUD, M. M.: Supported driving: Impacts on motorway traffic flow. Delft University of Technology, Delft, 1999
- MINDERHOUD, M. M.; BOVY, P. H. L.: Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment. *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 33, 2001
- Mobile.Info: TPEG – TEC Application Specification. Working Document, Version 1.0, Online-Dokument, 2006
- MUHRER, E.; VOLLRATH, M.: Expectations while car following – the consequences for driving behaviour in a simulated driving task. *Accident Analysis and Prevention*, 42, pp. 2158-2164, 2010
- NEUBERT, L.; SANTEN, L.; SCHADSCHNEIDER, A.; SCHRECKENBERG, E.: Single-vehicle data of highway traffic: A statistical analysis. *Physical Review E*, 60, p. 6480, 1999
- NEUHERZ, M.; ASSENMACHER, S.: Digitaler Rundfunk – Medium für die nächste Generation von Verkehrsinformationsdiensten, Straßenverkehrstechnik, Heft 10/2006, pp. 608 ff., 2006
- OBERT, G.: Local hazard warning. A cost efficient information service for digital radio receivers and navigation systems. *Proceedings, 13th World Congress on Intelligent Transport Systems*, London, 2006
- OH, C.; OH, J. S.; RITCHIE, S. G.; CHANG, M.: Real-time estimation of freeway accident likelihood. Paper presented at the Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., 2001
- PARASURAMAN, R., HANCOCK, P. A. & OLOFINBOBA, O.: Alarm effectiveness in driver-centred collision-warning systems. *Ergonomics*, 40, pp. 390-399, 1997
- PETERS, M. L.; ZELEWSKI, S.: TOPSIS als Technik zur Effizienzanalyse. *WiSt*, Heft 1, Verlag Vahren München, 2007
- PIAO, J.; McDONALD, M.: Safety impacts of I-V-cooperative systems. *ITS World Congress*, Stockholm, 2009
- POPIV, D.; ROMMERSKIRCHEN, C.; BENGLER, B.; DUSCHL, M.; RAKIC, M.: Effects of assistance of anticipatory driving on drivers' behavior during deceleration phases. In: J. KREMS, T. PETZOLD & M. HENNING (Eds.), *European Conference on Human Centered Design for Intelligent Transport Systems* (pp. 133-145). Lyon: HUMANIST Publications, 2010
- RAUCH, N.; TOTZKE, I.; KRÜGER, H.-P.: Kompetenzerwerb für Fahrerinformationssysteme: Bedeutung von Bedienkontext und Menüstruktur. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.), *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme* (VDI-Berichte, Nr. 1864, S. 303-322). VDI-Verlag, Düsseldorf, 2004
- REFIOR, O.; RICHERS, V.: Weiterqualifizierung Fachberaterinnen und Fachberater Unterricht Modul III: Nachhaltige Wirksamkeit von Fortbildung und Beratung für die Qualitätsentwicklung im Bereich Unterricht. Akademie Esslingen, 2009
- REICHART, G.: Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen. *Fortschritt-Berichte VDI*, Reihe 22, Nr. 7, Düsseldorf, 2001
- SCHICK, P.: Einfluss von Streckenbeeinflussungsanlagen auf die Kapazität von Autobahnabschnitten sowie die Stabilität des Verkehrsflusses. *Dissertation*. Universität Stuttgart, Stuttgart, 2003
- SCHMIDT-CLAUSEN, R.: Verkehrstelematik im internationalen Vergleich – Folgerungen für die deutsche Verkehrspolitik. *Europäische Hochschulschriften – Reihe V, Volks- und Betriebswirtschaft*; Frankfurt/Main, 2004
- SCHMIDT, G.; KRÜGER, H.-P.: Violating the driver's threat anticipation and the effect of different modalities for Forward Collision Warnings (FCW). Paper presented at HFES Europe Chapter Conference, Berlin, 2010
- SCHNABEL, W.; LOHSE, D.: Grundlagen der Straßenverkehrstechnik und der Verkehrsplanung. Verlag für Bauwesen, Berlin, 1997
- SCHWEITZER, N.; APTER, Y.; BEN-DAVID, G.; LIEBERMANN, D. G.; PARUSH, A.: A field study on braking responses during driving, II. Minimum driver braking times. *Ergonomics*, 38, pp. 1903-1910, 1995

- Statistisches Bundesamt: Verkehrsunfälle 2009 (Fachserie 8, Reihe 7). Statistisches Bundesamt, Wiesbaden 2010
- STEINAUER, B.; BRAKE, M.; BAIER, M. M.; KATHMANN, T.; OFFERMANN, F.; FELDGES, M.: Integration mobil erfasster Verkehrsdaten (FCD) in die Steuerungsverfahren der kollektiven Verkehrsbeeinflussung. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Wirtschaftsverlag NW – Verlag für neue Wissenschaft GmbH; Wilhelmshaven, 2006
- STEINHOFF, C.: Online-Bewertung der Akzeptanz und der Wirksamkeit präventiver Maßnahmen durch Streckenbeeinflussungsanlagen auf Autobahnen. Dissertation, TU München, München, 2003
- THEEUWES, J.; HAGENZIEKER, P.: Visual search of traffic scenes: On the effect of location expectations. In: A. G. GALE (Ed.), Vision in Vehicles IV (pp. 149-158). Elsevier, Amsterdam, 1993
- THEEUWES, J.: Perceptual selectivity is task dependent: Evidence from selective search, *Acta Psychologica*, 74, pp. 81-99, 1990
- TomTom: White paper: How TomTom's HD Traffic™ and IQ Routes™ data provides the very best routing. Amsterdam, 2011
- Transver: Stauklassifizierung. Bericht im Auftrag der BMW AG. München, 2010
- TREIBER, M.; KESTING, A.: Datengestützte Analyse der Stauentstehung und -ausbreitung auf Autobahnen. *Straßenverkehrstechnik* 01/2010, S. 5 ff., 2010a
- TREIBER, M.; KESTING, A.: Verkehrsdynamik und -simulation – Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. Springer Verlag, 2010b
- TRICK, L.; ENNS, J. T.; MILLS, J.; VAVRICK, J.: Driving and selective attention: A conceptual framework for understanding the role of selective attention in driving. *Theoretical Issues in Ergonomics Sciences*, 5, pp. 385-424, 2004
- Van der HULST, M.; MEIJMAN, T. F.; ROTHEN-GATTER, J. A.: Anticipation and the adaptive control of safety margins in driving. *Ergonomics*, 42, pp. 336-345, 1999
- Van DRIEL, C.: Driver support in congestion. Dissertation, University of Twente, Twente, 2007
- Van DRIEL, C. J. G.; HOEDEMAEKER, M.; van AREM, B.: Impacts of a Congestion Assistant on driving behaviour and acceptance using a driving simulator. *Transportation Research Part F*, 10, pp. 139-152, 2007
- Van WINSUM, W.: From adaptive control to adaptive driver behaviour. Unveröffentlichte Dissertation, Universität Groningen, Groningen, 1996
- WOLF, F.; HERRMANN, A.: Kooperative Verkehrssysteme – Technologien und Anwendungen der C2X-Kommunikation. Vortrag zu WCI – Wireless Communication and Information, Magdeburg, 2007
- ZHENG, Z.; AHN, S.; MONSERE, C. M.: Impact of Traffic Oscillations on Freeway Crash Occurrences. *Accident Analysis & Prevention*, 42 (2), pp. 626-636, 2010

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

1997

- F 22: Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch bei kurzzeitiger Motorabschaltung
Bugsel, Albus, Sievert € 10,50
- F 23: Unfalldatenschreiber als Informationsquelle für die Unfallforschung in der Pre-Crash-Phase
Berg, Mayer € 19,50

1998

- F 24: Beurteilung der Sicherheitsaspekte eines neuartigen Zweiradkonzeptes
Kalliske, Albus, Faerber € 12,00
- F 25: Sicherheit des Transportes von Kindern auf Fahrrädern und in Fahrradanhängern
Kalliske, Wobben, Nee € 11,50

1999

- F 26: Entwicklung eines Testverfahrens für Antriebsschlupf-Regelsysteme
Schweers € 11,50
- F 27: Betriebslasten an Fahrrädern
Vötter, Groß, Esser, Born, Flamm, Rieck € 10,50
- F 28: Überprüfung elektronischer Systeme in Kraftfahrzeugen
Kohlstruck, Wallentowitz € 13,00

2000

- F 29: Verkehrssicherheit runderneuerter Reifen
Teil 1: Verkehrssicherheit runderneuerter PKW-Reifen
Glaeser
Teil 2: Verkehrssicherheit runderneuerter Lkw-Reifen
Aubel € 13,00
- F 30: Rechnerische Simulation des Fahrverhaltens von Lkw mit Breitreifen
Faber € 12,50
- F 31: Passive Sicherheit von Pkw bei Verkehrsunfällen – Fahrzeugsicherheit '95 – Analyse aus Erhebungen am Unfallort
Otte € 12,50
- F 32: Die Fahrzeugtechnische Versuchsanlage der BAST – Einweihung mit Verleihung des Verkehrssicherheitspreises 2000 am 4. und 5. Mai 2000 in Bergisch Gladbach € 14,00

2001

- F 33: Sicherheitsbelange aktiver Fahrdynamikregelungen
Gaupp, Wobben, Horn, Seemann € 17,00
- F 34: Ermittlung von Emissionen im Stationärbetrieb mit dem Emissions-Mess-Fahrzeug
Sander, Bugsel, Sievert, Albus € 11,00
- F 35: Sicherheitsanalyse der Systeme zum Automatischen Fahren
Wallentowitz, Ehmanns, Neunzig, Weillkes, Steinauer, Bölling, Richter, Gaupp € 19,00

- F 36: Anforderungen an Rückspiegel von Krafträdern
van de Sand, Wallentowitz, Schrüllkamp € 14,00
- F 37: Abgasuntersuchung - Erfolgskontrolle: Ottomotor – G-Kat
Afflerbach, Hassel, Schmidt, Sonnborn, Weber € 11,50
- F 38: Optimierte Fahrzeugfront hinsichtlich des Fußgängerschutzes
Friesen, Wallentowitz, Philipps € 12,50

2002

- F 39: Optimierung des rückwärtigen Signalbildes zur Reduzierung von Auffahrunfällen bei Gefahrenbremsung
Gail, Lorig, Gelau, Heuzeroth, Sievert € 19,50
- F 40: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Spritzschutzsysteme an Kraftfahrzeugen
Domsch, Sandkühler, Wallentowitz € 16,50

2003

- F 41: Abgasuntersuchung: Dieselfahrzeuge
Afflerbach, Hassel, Mäurer, Schmidt, Weber € 14,00
- F 42: Schwachstellenanalyse zur Optimierung des Notausstiegssystems bei Reisebussen
Krieg, Rüter, Weißgerber € 15,00
- F 43: Testverfahren zur Bewertung und Verbesserung von Kinderschutzsystemen beim Pkw-Seitenaufprall
Nett € 16,50
- F 44: Aktive und passive Sicherheit gebrauchter Leichtkraftfahrzeuge
Gail, Pastor, Spiering, Sander, Lorig € 12,00

2004

- F 45: Untersuchungen zur Abgasemission von Motorrädern im Rahmen der WMTC-Aktivitäten
Steven € 12,50
- F 46: Anforderungen an zukünftige Kraftrad-Bremssysteme zur Steigerung der Fahrsicherheit
Funke, Winner € 12,00
- F 47: Kompetenzerwerb im Umgang mit Fahrerinformationssystemen
Jahn, Oehme, Rösler, Krems € 13,50
- F 48: Standgeräuschmessung an Motorrädern im Verkehr und bei der Hauptuntersuchung nach § 29 StVZO
Pullwitt, Redmann € 13,50
- F 49: Prüfverfahren für die passive Sicherheit motorisierter Zweiräder
Berg, Rücker, Bürkle, Mattern, Kallieris € 18,00
- F 50: Seitenairbag und Kinderrückhaltesysteme
Gehre, Kramer, Schindler € 14,50
- F 51: Brandverhalten der Innenausstattung von Reisebussen
Egelhaaf, Berg, Staubach, Lange € 16,50
- F 52: Intelligente Rückhaltesysteme
Schindler, Kühn, Siegler € 16,00
- F 53: Unfallverletzungen in Fahrzeugen mit Airbag
Klanner, Ambos, Paulus, Hummel, Langwieder, Köster € 15,00
- F 54: Gefährdung von Fußgängern und Radfahrern an Kreuzungen durch rechts abbiegende Lkw
Niewöhner, Berg € 16,50

2005

- F 55: 1st International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 3rd/4th September 2004 at Hannover Medical School € 29,00

2006

F 56: Untersuchung von Verkehrssicherheitsaspekten durch die Verwendung asphärischer Außenspiegel
Bach, Rüter, Carstengerdes, Wender, Otte € 17,00

F 57: Untersuchung von Reifen mit Notlaufeigenschaften
Gail, Pullwitt, Sander, Lorig, Bartels € 15,00

F 58: Bestimmung von Nutzfahrzeugemissionsfaktoren
Steven, Kleinebrahm € 15,50

F 59: Hochrechnung von Daten aus Erhebungen am Unfallort
Hautzinger, Pfeiffer, Schmidt € 15,50

F 60: Ableitung von Anforderungen an Fahrerassistenzsysteme aus Sicht der Verkehrssicherheit Vollrath, Briest, Schießl, Drewes, Becker € 16,50

2007

F 61: 2nd International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 1st/2nd September 2006 at Hannover Medical School € 30,00

F 62: Einfluss des Versicherungs-Einstufungstests auf die Belange der passiven Sicherheit
Rüter, Zoppke, Bach, Carstengerdes € 16,50

F 63: Nutzerseitiger Fehlgebrauch von Fahrerassistenzsystemen
Marberger € 14,50

F 64: Anforderungen an Helme für Motorradfahrer zur Motorsicherheit

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.

Schüler, Adolph, Steinmann, Ionescu € 22,00

F 65: Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Fahrzeugbeleuchtung im Hinblick auf ein NCAP für aktive Fahrzeugsicherheit
Manz, Kooß, Klinger, Schellinger € 17,50

2008

F 66: Optimierung der Beleuchtung von Personenwagen und Nutzfahrzeugen
Jebas, Schellinger, Klinger, Manz, Kooß € 15,50

F 67: Optimierung von Kinderschutzsystemen im Pkw
Weber € 20,00

F 68: Cost-benefit analysis for ABS of motorcycles
Baum, Westerkamp, Geißler € 20,00

F 69: Fahrzeuggestützte Notrufsysteme (eCall) für die Verkehrssicherheit in Deutschland
Auerbach, Issing, Karrer, Steffens € 18,00

F 70: Einfluss verbesserter Fahrzeugsicherheit bei Pkw auf die Entwicklung von Landstraßenunfällen
Gail, Pöppel-Decker, Lorig, Eggers, Lerner, Ellmers € 13,50

2009

F 71: Erkennbarkeit von Motorrädern am Tag – Untersuchungen zum vorderen Signalbild
Bartels, Sander € 13,50

F 72: 3rd International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“ – Reports on the ESAR-Conference on 5th/6th September 2008 at Hannover Medical School € 29,50

F 73: Objektive Erkennung kritischer Fahrsituationen von Motorrädern
Seiniger, Winner € 16,50

2010

F 74: Auswirkungen des Fahrens mit Tempomat und ACC auf das Fahrverhalten
Vollrath, Briest, Oeltze € 15,50

F 75: Fehlgebrauch der Airbagabschaltung bei der Beförderung von Kindern in Kinderschutzsystemen
Müller, Johannsen, Fastenmaier € 15,50

2011

F 76: Schutz von Fußgängern beim Scheibenanprall II
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 19,50

Bovenkerk, Gies, Urban

F 77: 4th International Conference on ESAR „Expert Symposium on Accident Research“

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50

F 78: Elektronische Manipulation von Fahrzeug- und Infrastruktursystemen

Dittmann, Hoppe, Kiltz, Tuchscheerer € 17,50

F 79: Internationale und nationale Telematik-Leitbilder und ITS-Architekturen im Straßenverkehr

Boltze, Krüger, Reusswig, Hillebrand € 22,00

F 80: Untersuchungskonzepte für die Evaluation von Systemen zur Erkennung des Fahrerzustands

Eichinger € 15,00

F 81: Potenzial aktiver Fahrwerke zur Erhöhung der Fahrsicherheit von Motorrädern

Wunram, Eckstein, Rettweiler € 15,50

F 82: Qualität von on-trip Verkehrsinformationen im Straßenverkehr – Quality of on-trip road traffic information – BAST-Kolloquium 23. & 24.03.2011

Lotz, Luks

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 20,00

2012

F 83: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung – Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe

Gasser, Arzt, Ayoubi, Bartels, Bürkle, Eier, Flemisch, Häcker, Hesse, Huber, Lotz, Maurer, Ruth-Schumacher, Schwarz, Vogt € 19,50

F 84: Sicherheitswirkungen von Verkehrsinformationen – Entwicklung und Evaluation verschiedener Warnkonzepte für Stauendwarnungen

Bogenberger, Dinkel, Totzke, Naujoks, Mühlbacher € 17,00

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

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

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.