

Einfluss von Fahrzeuginnenraumakustik und -vibrationen auf die Geschwindigkeitwahl von Kraftfahrern

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Christian Lank

Berichter: Universitätsprofessor Dr.-Ing. habil. Bernhard Steinauer

 Universitätsprofessor Dr.-Ing. Christian Lippold

Tag der mündlichen Prüfung: 30.06.2010

Juli 2010

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Straßenwesen Aachen (*isac*) der Rheinisch-Westfälischen Hochschule (RWTH) entstanden. Idee und Grundlage bildete das vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) geförderte FE 03.401/2005.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Bernhard Steinauer, Inhaber des Instituts für Straßenwesen Aachen der RWTH Aachen University, der mir zum einen die Erstellung dieser Arbeit ermöglichte, und mir zum anderen stets den nötigen geistigen Freiraum gegeben hat, mich fachlich wie persönlich weiter zu entwickeln.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Lippold, Inhaber des Lehrstuhls für Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen der TU Dresden, danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Koreferats. Dies gilt umso mehr, da er hierzu trotz seiner Aufgaben als Dekan der Fakultät Bauingenieurwesen der TU Dresden bereit war. Ich habe mich in Dresden sehr willkommen gefühlt.

Herrn Univ.-Prof. Dr. Ing. Dirk Vallée, Inhaber des Instituts für Stadtbauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen University danke ich für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses.

Meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Straßenwesen Aachen möchte ich für die schöne Zeit danken, in der mir die Arbeit viel Freude bereitet hat. Besonderer Dank gilt meinem *liebsten Bürokollegen* Andreas Sümmermann für die gute Zusammenarbeit, meinem Kollegen Tobias Volkenhoff, der mit seiner Diplomarbeit und seiner redaktionellen Tätigkeit zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat und meinem HiWi Christian Busen, der bei der Durchführung und Auswertung der empirischen Untersuchungen maßgeblich beteiligt war und auf den ich mich stets verlassen konnte.

Weiterer Dank gilt den Mitarbeitern der Unfallkommission Düren und des Landesbetriebs Straßenbau NRW für ihre Unterstützung bei der Durchführung der verkehrstechnischen Erprobung der Rüttelstreifen, Stefan Deutsche vom Institut für Kraftfahrzeuge Aachen für seinen kurzfristigen fachlichen Rat und die gemeinsame Zeit, die wir im Projekt KONVOI teilen durften, Dr. Matthias Wille vom Institut für Psychologie für seinen fachlichen Rat im Bereich der Psychologie, meinem guten Freund Felix Jancke vom Institut für Baubetrieb und Baumanagement der Universität Duis-

burg Essen für sein Feedback zu meiner Arbeit und Frau Dr. Rachel Raumann vom Germanistischen Institut der RTWH Aachen für die sprachliche Überarbeitung.

Mein abschließender Dank gilt meinen Eltern, die mir das nötige Rüstzeug mit auf den Weg gegeben und mich stets unterstützt haben sowie meinen Freunden, die mich über so viele Jahre begleitet, mich in meinem Wesen geprägt und mir viel Kraft gegeben haben. Ganz besonders danke ich meiner Lebensgefährtin Sabine, die viele Stunden auf mich verzichten musste. Ohne ihr Verständnis hätte ich meine Ziele nicht verwirklichen können. Danke!

Aachen im Juli 2010

A handwritten signature in black ink, reading "Christian Jäger". The signature is written in a cursive style with a large, sweeping initial 'C'.

Kurzfassung

Die Europäische Union steckte sich mit der Forderung, die Anzahl der Verkehrstoten bis zum Jahr 2010 zu halbieren, ein hohes verkehrspolitisches Ziel. Weite Teile der Verkehrssicherheitsarbeit werden seitdem durch Ursachenforschung und Entwicklung von Strategien zur Reduktion der im Straßenverkehr Getöteten bestimmt.

Landstraßen stellen im Vergleich der einzelnen Straßentypen die unfallträchtigste Betriebsform dar, wie die aktuellen Unfallzahlen belegen. Hier ist demnach der größte Handlungsbedarf für eine effektive Unfallreduktion zu sehen. Beispielhaft fokussiert die vorliegende Arbeit unfallträchtige Landstraßenkurven, für die ein kostengünstiges Konzept zur Beeinflussung der Geschwindigkeit und damit zur Erhöhung der Verkehrssicherheit entwickelt und bewertet wird. Eine mögliche Maßnahme zur Reduktion der Geschwindigkeit und damit der Unfallzahlen auf Landstraßen stellt die Beeinflussung der Fahrer durch akustische und haptische Signale dar. Diese können sowohl fahrzeugseitig als auch straßenseitig bereitgestellt werden. International wird die straßenseitige Warnung durch transversale Rüttelstreifen (TRS) bereits vielfach erfolgreich eingesetzt. Die Ausführungen basieren jedoch meist auf experimentellen Anordnungen. Die vorliegende Arbeit stellt neben dem Stand der Technik zum Einsatz von TRS wesentliche psychologische Grundlagen zusammen, die als Basis für die Konzeption einer optimierten Bauform von transversalen Rüttelstreifen dienen sollen. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Wahrnehmung und dem Risikoempfinden von Kraftfahrern. Auf Basis von Literaturrecherchen wird gezeigt, dass haptische und akustische Signale einen entscheidenden – bislang unterschätzten – Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten haben. Durch eine gezielte Änderung dieser Parameter wird demnach eine aktive Beeinflussung des Geschwindigkeitsniveaus erwartet.

Aufbauend auf den Grundlagenstudien wurden unterschiedliche Ausführungsvarianten von TRS hinsichtlich ihrer physikalischen Wirkung untersucht und optimiert. Als Resultat dieser Analysen wurde eine Ausführungsvariante konzipiert, die sich im Hinblick auf die akustische und haptische Wirkung auf den Fahrzeugführer als optimal darstellt. Die Wirkung dieser Ausführungsvariante auf das Geschwindigkeitsverhalten wurde im Rahmen von verkehrstechnischen Untersuchungen analysiert und bewertet. Die verkehrstechnische Wirkungsanalyse wurde durch Akzeptanzerhebungen komplettiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde nachgewiesen, dass transversale Rüttelstreifen eine schnelle und kostengünstige Alternative zur positiven Beeinflussung des Geschwindigkeitsverhaltens und damit der Verkehrssicherheit darstellen.

Abstract

The European Union set itself a high aim in 2001 in terms of its road safety policy with its objective of halving the number of people killed on EU roads by the year 2010. Since then a large part of the road safety work has consisted of carrying out cause studies and developing strategies for reducing the number of victims of road accidents.

When different types of roads are compared, country roads are the most dangerous according to the latest accident figures. So this is where the greatest need for action lies in order to effectively reduce the number of accidents. By way of example the present study focused on hazardous bends in country roads, for which a cost-effective concept for influencing speed behaviour and thus improving road safety was developed and evaluated. A possible way of reducing speed and consequently the number of accidents on country roads is to influence the driver through acoustic and haptic signals. These can be located both on the vehicle and on the road. Internationally the use of transversal rumble strips (TRS) as a warning signal is already being implemented successfully in many cases. The designs however are mostly based on experimental arrangements. The present study considers not only the state of the technology with regard to the use of TRS but also essential psychological considerations which serve as a basis for an optimised design of transversal rumble strips. The focus lies on the awareness and risk perception of drivers.

On the basis of literature studies it is shown that haptic and acoustic signals have a decisive – often underestimated – impact on speed behaviour. So an active influence on speed level is expected through a targeted alteration of these parameters. Building upon basic research, different design variants of TRS were examined and optimised with regard to their physical effect. As a result of these analyses a design variant was conceived which proved to be optimal regarding its acoustic and haptic effect on the driver. The impact of this design variant on speed behaviour was analysed and evaluated in the framework of traffic-technical investigations. The impact analysis was completed by acceptance surveys.

In the framework of this paper it could be proved that transversal rumble strips represent a fast, cost-effective alternative for exerting a positive influence on speed behaviour and thus on road safety.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangslage	1
1.2	Zielsetzung.....	5
1.3	Vorgehensweise	5
2	Stand der Technik.....	7
2.1	Nationale Anwendungs- und Forschungsergebnisse.....	8
2.1.1	Verbesserung der Verkehrssicherheit in Ortsdurchfahrten	8
2.1.2	Mechanisch-akustische Bremsen in Verbindungsrampen von Autobahnknoten.....	10
2.1.3	Temporäre Warnschwellen vor Arbeitsstellen.....	14
2.1.4	Merkblatt zur Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Motorradstrecken	16
2.2	Internationale Anwendungs- und Forschungsergebnisse	17
2.2.1	Einsatz von Rüttelstreifen in Österreich	17
2.2.2	Einsatz von Rüttelstreifen in Frankreich.....	19
2.2.3	Einsatz von Rüttelstreifen in Spanien	20
2.2.4	Einsatz von Rüttelstreifen in Dänemark	21
2.2.5	Einsatz von Rüttelstreifen in Großbritannien.....	22
2.2.6	Einsatz von Rüttelstreifen in den Vereinigten Staaten von Amerika ...	27
2.2.7	Einsatz von Rüttelstreifen in weiteren Ländern	33
2.3	Zusammenfassung des aktuellen Stands der Technik.....	33
3	Psychologische Grundlagen.....	36
3.1	Wahrnehmung	40
3.2	Wahrnehmung paralleler Reize.....	44
3.3	Aufmerksamkeit	48
3.4	Risikowahrnehmung und -verhalten.....	52
3.5	Geschwindigkeitswahrnehmung und –verhalten.....	54
3.6	Zusammenfassung der psychologischen Grundlagen	66
4	Technische Grundlagen	69
4.1	Grundlagen der Akustik	69
4.2	Grundlagen der Haptik.....	75
4.3	Zusammenfassung der technischen Grundlagen.....	83
5	Konzeption von Rüttelstreifen	84
6	Methodik der messtechnischen und verkehrstechnischen Untersuchung.....	88
7	Messtechnische Voruntersuchungen	90
7.1	Versuchsaufbau	91
7.2	Messtechnik	92
7.3	Auswertemethodik	94
7.4	Ergebnisse zur Wirkung von Einzelelementen.....	98
7.5	Ergebnisse zur Wirkung periodischer Anregungen	104
7.6	Zusammenfassung der technischen Voruntersuchungen	110

8	Verkehrstechnische Wirkungsanalyse	113
8.1	Messmethodik und -aufbau	115
8.2	Messzeitraum und -dauer	116
8.3	Analyse des Gesamtkollektivs	118
8.3.1	Größe des Untersuchungskollektivs	118
8.3.2	Bewertungsmethodik und -maßstäbe	119
8.3.3	Ergebnisse der Analyse	120
8.3.3.1	Geschwindigkeitsanalyse der Kontrollgruppe	120
8.3.3.2	Geschwindigkeitsanalyse des Untersuchungskollektivs	123
8.3.3.3	Analyse des allgemeinen Fahrerverhaltens	128
8.4	Analyse differenziert nach Zeitlücken	134
8.4.1	Bewertungsmethodik und -maßstäbe	134
8.4.2	Größe des Untersuchungskollektivs	138
8.4.3	Ergebnisse der Analyse	138
8.5	Analyse von Einzelfahrzeugdaten	141
8.5.1	Ganglinienerzeugung aus lokalen Einzelfahrzeugdaten	142
8.5.2	Datenumfang	146
8.5.3	Analyse der Geschwindigkeitsänderung differenziert nach Ortskundigkeit	147
8.5.4	Analyse der Geschwindigkeitsänderung differenziert nach Fahrzeugklassen	154
8.5.5	Analyse der Geschwindigkeitsänderung einzelner Fahrer	161
8.6	Unfallgeschehen	164
8.7	Zusammenfassung der verkehrstechnischen Wirkungsanalysen	166
9	Untersuchung der Akzeptanz	169
9.1	Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer	169
9.1.1	Verknüpfung von Akzeptanz und Fahrerverhalten	178
9.2	Reaktion der Bevölkerung	181
9.3	Zusammenfassung der Akzeptanzuntersuchung	185
10	Diskussion, Fazit und Empfehlungen	186
11	Literaturverzeichnis	195
12	Glossar	211
13	Anhang	213

1 Einleitung

Der Mensch sieht sich seit jeher einer Vielzahl von Gefahren ausgesetzt. Im Laufe der Entwicklung der westlichen Zivilisation haben die Risiken für die Gesundheit stark abgenommen. Wesentlich höhere Lebenserwartungen als noch zur Jahrhundertwende sind die Folge. Heute stellen insbesondere für jüngere Menschen vorsätzliche und unbeabsichtigte Verletzungen ein beträchtliches Problem und Risiko dar. Die führenden Ursachen für Verletzungen mit Todesfolgen in Europa stellen Straßenverkehrsunfälle, Selbstbeschädigung, Stürze, Gewalt und Vergiftung dar (vgl. WHO, 2005). Neben dem persönlichen Leid sind die Folgen von Verletzungen und Tod direkt mit sozioökonomischem Verlust verknüpft. Gerade weil den meisten Menschen das Risiko, dem sie im Straßenverkehr ausgesetzt sind, nicht richtig bewusst ist – in der Regel werden bspw. Flugzeugunglücke stärker wahrgenommen und somit das Fliegen als gefährlicher eingestuft – gilt es, das Risiko, im Straßenverkehr zu verunglücken, zu minimieren.

1.1 Ausgangslage

Die Europäische Union hat sich mit Verfassung des WEISSBUCH (2000) ein hohes Ziel bezüglich ihrer Verkehrssicherheitspolitik gesteckt. Die Forderung, die Anzahl der Verkehrstoten im Zeitraum von 2001 bis 2010 zu halbieren, bestimmt seitdem die Forschung und Maßnahmenplanung im Bereich der Verkehrssicherheitsarbeit.

Betrachtet man die Entwicklung der Verkehrstoten seit Veröffentlichung des WEISSBUCH (2000), so ist zu vermuten, dass die dort veröffentlichten Ziele ohne außerordentliche zusätzliche Kraftanstrengungen nicht zu erreichen sind. Die EU 27 Staaten (sowie auch die ursprünglichen Verfasser des WEISSBUCH (2000), die EU 15) liegen derzeit hinter den formulierten Zielen zurück. Legt man eine lineare Reduktion der Getöteten zu Grunde, hätte die Zahl der Unfalltote in Europa im Jahr 2007 um 33 % auf 33.625 reduziert worden sein müssen. Die tatsächliche Reduktion lag jedoch lediglich bei rund 23 % (39.054 Unfalltote). Der Hauptanteil der angestrebten Reduktion ist dabei von den Ländern mit dem größten Anteil an der Gesamtzahl der Unfalltote zu erbringen. Mit 4.949 (entspricht ca. 13 %) Getöteten im Jahr 2007 gehört Deutschland neben Polen, Italien und Frankreich zu den wichtigsten Ländern bei der Umsetzung dieser Ziele. Die verstärkten nationalen Anstrengungen im Bereich der Verkehrssicherheit sind anhand aktueller Unfallzahlen bereits zu belegen. Mit einer Reduktion von 36 % bis zum Jahr 2008 lag Deutschland nur leicht unter den angestrebten 39 % (siehe Bild 2). Inwieweit dieser Rückgang als Beitrag zum Erreichen der Europäischen Ziele ausreicht, bleibt jedoch zu diskutieren.

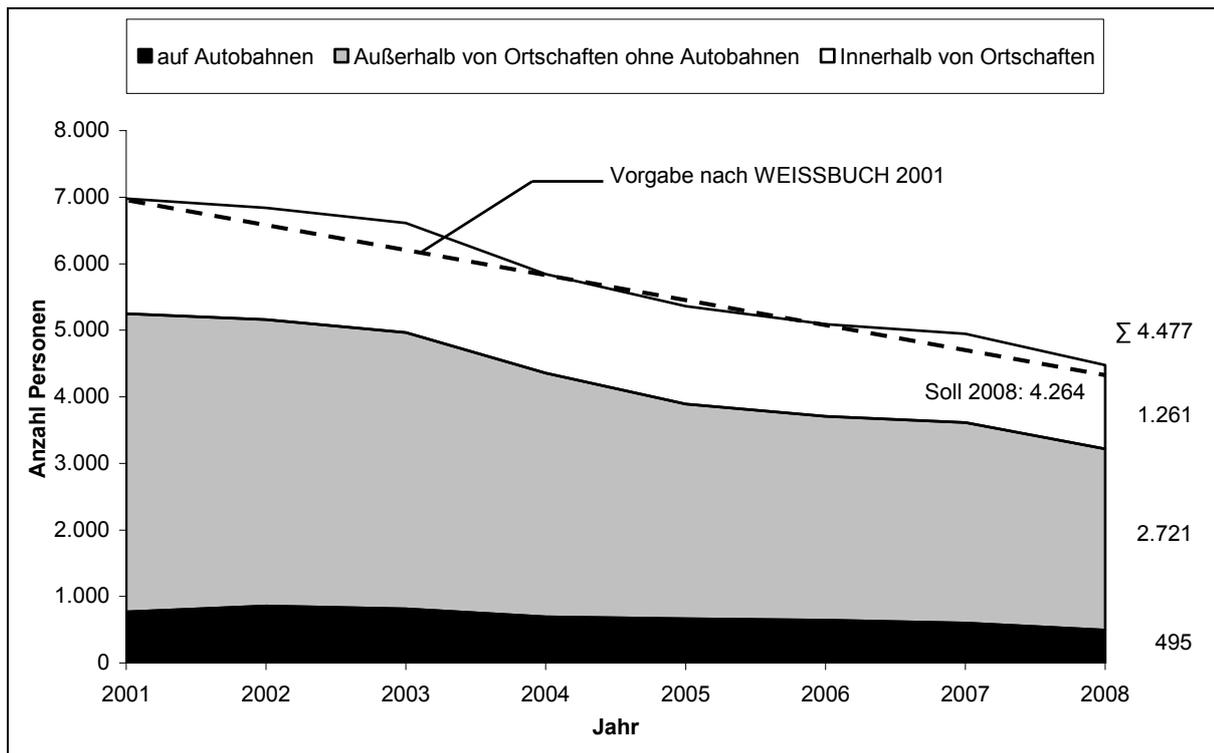


Bild 1: Zeitliche Entwicklung der Anzahl der Getöteten im bundesdeutschen Straßenverkehr differenziert nach Ortslage (DESTATIS, 2009) (zusätzlich wurde der linear interpolierte Verlauf der Anzahl Getöteter auf Basis der Forderung nach einer Halbierung bis 2010 eingezeichnet)

Unverkennbar ist hingegen, dass sich die moderne Verkehrssicherheitsbemühung nicht ausschließlich an der Entwicklung der Zahl der Verkehrstoten, sondern auch an der Zahl der schwerverletzten Unfallopfer messen lassen muss. Dies gewinnt insbesondere vor dem Hintergrund neuer Erkenntnisse zu der Entwicklung der Schwerstverletztenzahlen an Bedeutung. „Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass die so gemessene Verbesserung der Verkehrssicherheit mit einer Zunahme der Anzahl der schwerverletzten Personen, das heißt Personen mit irreparablen Behinderungen, oft begleitet mit lebenslanger Minderung der Erwerbsfähigkeit, einhergeht.“ (HÖHNSCHEID/LIPPARD/BARTZ, 2005) Im Rahmen einer Studie am Institut für Straßenwesen Aachen konnten LANK et al. (2009) die starken Schwankungen innerhalb der Gruppe der Schwerverletzten nach Verkehrsunfallstatistikgesetz belegen. Weitere Untersuchungen zu dieser Thematik befassen sich explizit mit der von HÖHNSCHEID/LIPPARD/BARTZ (2005) aufgeworfenen Frage nach einem möglichen Anstieg der schwerverletzten Unfallopfer insbesondere auf Landstraßen. Der erhöhte Handlungsbedarf gerade im Bereich von Landstraßen wird in Bild 1 deutlich. Demnach starben in den letzten Jahren ca. 60 % aller im deutschen Straßenverkehr Getöteten auf Landstraßen. Hier liegt demnach der größte Handlungsbedarf, aber auch das größte Potential hinsichtlich einer Steigerung der Verkehrssicherheit. Analysen der Ursachen dieser hohen Anzahl an Getöteten und Schwerverletzten vor al-

lem auf Landstraßen ergeben ein erhöhtes Unfallaufkommen in Landstraßenkurven (DVR, 2007).

Analysen machen deutlich, dass die Unfallursachen vorrangig auf den Menschen zurückzuführen sind. Gemäß DESTATIS (2009) konnten ca. 90 % der Unfallursachen bei Unfällen mit Personenschaden auf personenbezogene Ursachen zurückgeführt werden (siehe Bild 2). Dies deckt sich mit älteren Studien, wie beispielsweise von TREAT et al. (1977), die nach Analyse von über 2.000 Unfällen ca. 50 % alleine auf den Menschen und unter Hinzunahme der Interaktion zwischen Mensch und Umgebung über 90 % der Unfallursachen auf eine Beteiligung des Menschen zurückführten (siehe Bild 2). Der Mensch stellt demnach den zentralen Punkt in der Unfallforschung und in der -prävention dar. Allgemeine unfallbezogene Ursachen (8 % bis 9 %) und fahrzeugseitige Fehler (1 % bis 2 %) nehmen eine untergeordnete Rolle ein.

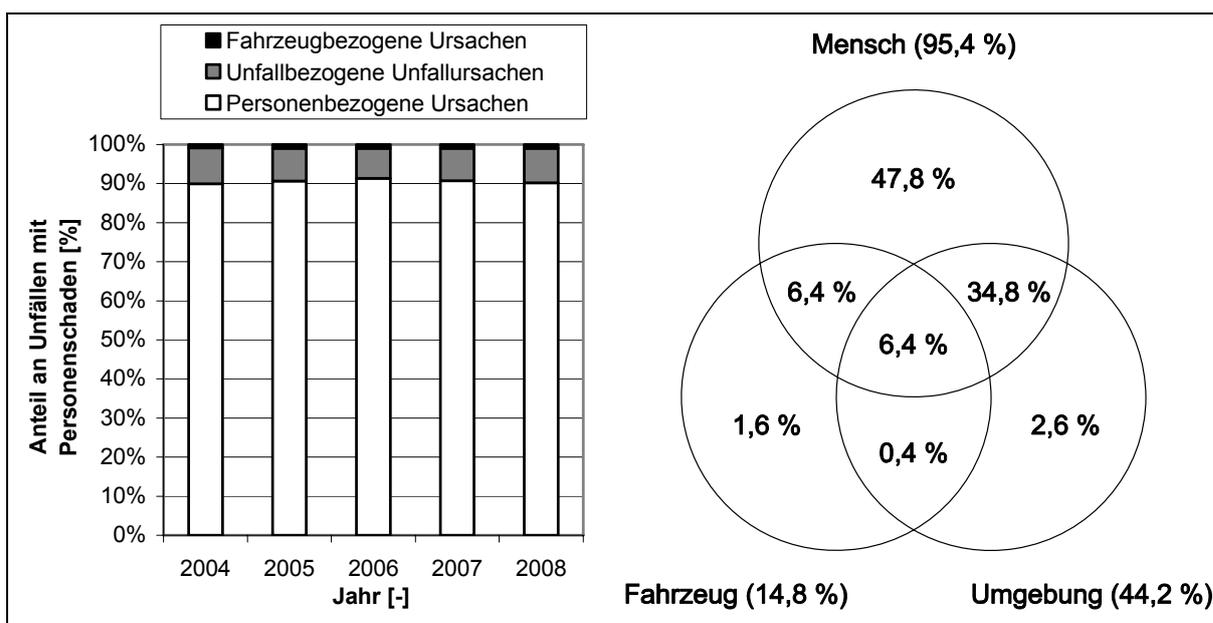


Bild 2: Verteilung der Unfallursachen bei Unfällen mit Personenschäden nach DESTATIS (2009) (links) und Verteilung der Unfallfaktoren nach TREAT et al. (1977) (rechts)

Auf Straßen außerhalb von Ortschaften stellt „nicht angepasste Geschwindigkeit“ mit ca. 50 % Anteil an der Gesamtzahl der Getöteten und ca. 40 % Anteil an schwerverletzten Personen die am stärksten vertretene Unfallursache dar (DESTATIS, 2009). Diese Anteile liegen sogar über den Ergebnissen internationaler Studien, nach denen 10 % aller und ca. 30 % der schweren Unfälle auf eine überhöhte Geschwindigkeit zurückzuführen sind (bspw. CORBETT/SIMON/O’CONNEL, 1998). Überhöhte Geschwindigkeit führt nach ERSO (2007) sowohl zu einer Erhöhung der Anzahl als auch der Folgen von Unfällen. Internationale Studien zum Risiko im Straßenverkehr bestätigen diese Aussagen (vgl. KLOEDEN et al., 1997, KLOEDEN/PONTE/MC-

LEAN, 2001). Gemäß NTG (2006) führt bspw. ein Anstieg der durchschnittlichen Geschwindigkeit von 100 km/h auf 110 km/h zu einem Anstieg der Unfälle mit Schwerverletzten um 33 % und sogar um 46 % bei Unfällen mit tödlichem Ausgang. FINCH et al. (1994) fassen in ihrer Studie zusammen, dass *„eine Erhöhung der Geschwindigkeit um 1 km/h die Anzahl der Unfälle um 3 % erhöht.“* In der Realität ist der Zusammenhang wesentlich komplexer, so dass diese Aussagen lediglich als vereinfachende Darstellung des Zusammenhangs zwischen überhöhter Geschwindigkeit und Unfallgeschehen zu verstehen sind. Auch wenn der von SOLOMON (1964), SHINAR (1998), KLOEDEN/MCLEAN/GLONEK (2002), NILSSON (2004) beschriebene exponentielle Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Unfallrisiko sicherlich um weitere Determinanten wie bspw. die Komplexität des Umfelds ergänzt werden muss (vgl. TAYLOR, 2000), ist prinzipiell davon auszugehen, dass überhöhte Geschwindigkeit auch ein erhöhtes Unfallrisiko mit schwereren Unfallfolgen bedingt.¹

Zur Erhöhung der Verkehrssicherheit und zur weiteren Reduktion der Unfallopfer – insbesondere der Schwerverletzten und Getöteten – stellt die Reduktion der Geschwindigkeit bzw. die bessere Anpassung der Geschwindigkeit an die Verkehrssituation einen wichtigen Baustein dar. Neben Maßnahmen, die darauf abzielen, das Verständnis aller Fahrer für eine grundsätzlich angepasste Geschwindigkeit zu erhöhen (Verkehrserziehung, Verkehrssicherheitskampagnen² etc.), stellen lokale Maßnahmen einen wesentlichen Bestandteil der Verkehrssicherheitsarbeit dar. *„Derzeit werden jährlich über 1.000 Unfallhäufungsstellen je Bundesland nach den aktuellen Regeln der Technik identifiziert, überprüft und bewertet.“* (LANK et al., 2009) Im Rahmen dieser lokalen Unfallanalysen stehen die Unfallkommissionen vor der Aufgabe, die Unfallschwerpunkte zu priorisieren und geeignete Strategien zur Verbesserung der Verkehrssicherheit an diesen Unfallschwerpunkten zu entwickeln. Insbesondere vor dem Hintergrund der weit gesteckten Ziele der Europäischen Union nach WEISSBUCH (2001) und gleichzeitig knappen Haushaltsmittel der Länder und Kommunen bildet die Bereitstellung geeigneter wirksamer und kostengünstiger Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit einen zentralen Punkt innerhalb der aktuellen Forschung. Auf Grundlage der Erkenntnisse über das Unfallgeschehen (DESTATIS, 2009, DVR, 2007) und das Fahrerverhalten auf Landstraßen insbeson-

¹ Im Rahmen einer Studie zur Geschwindigkeit als Risikofaktor bei schweren Unfällen mit der Ursache „Abkommen von der Fahrbahn“ konnte der zitierte exponentielle Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Unfallrisiko nach SOLOMON (1964), SHINAR (1998), KLOEDEN/MCLEAN/GLONEK (2002), NILSSON (2004) zwar nicht nachvollzogen werden, die Autoren DAVIS/DAVULURI/PEI (2006) bestätigen jedoch einen Anstieg des Unfallrisikos mit steigender Geschwindigkeit.

² Ein Beispiel stellt die vom Deutschen Verkehrssicherheitsrat e.V. und vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung initiierte Kampagne „Runter vom Gas“ dar (DVR, 2008).

dere im Annäherungsbereich von Gefahrenstellen müssen gezielte Maßnahmen erarbeitet werden, die zu einer Reduktion der Anzahl und der Folgen von Verkehrsunfällen beitragen. Mit einer Beeinflussung des Fahrerverhaltens in diesen Bereichen kann das Unfallgeschehen und vor allem das Auftreten schwerer Unfälle mit Personenschäden reduziert und somit eine Erhöhung der Verkehrssicherheit erreicht werden.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, eine mögliche Strategie zur Beeinflussung der Geschwindigkeit insbesondere auf Landstraßen im Annäherungsbereich von Gefahrenstellen zu erarbeiten. Eine solche Maßnahme sollte die Verkehrsteilnehmer vorrangig in ihrer Geschwindigkeitswahl beeinflussen. Zusätzlich soll die Aufmerksamkeit der Fahrer erhöht und somit eine bessere Wahrnehmung der Verkehrssituation erreicht werden. Als mögliche Maßnahme wird im Rahmen der Arbeit – basierend auf den Erkenntnissen aus nationalen und internationalen Anwendungen bzw. Untersuchungen und physikalischen und psychologischen Grundlagen – die Beeinflussung des Fahrerverhaltens mit Hilfe haptischer und akustischer Signale untersucht. Durch eine gezielte Modellierung der Fahrbahnoberfläche werden Fahrzeugschwingungen und akustische Signale im Fahrzeuginnenraum erzeugt, die die Fahrer zu einer Anpassung der Geschwindigkeit an ein sicheres Niveau bewegen und ihre Aufmerksamkeit steigern sollen. Im Rahmen von verkehrstechnischen Untersuchungen wird die Wirkung dieser Maßnahme auf das Geschwindigkeitsverhalten untersucht. Die wesentlichen Ziele der Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Entwicklung und Optimierung von Fahrbahnapplikationen zur gezielten haptischen und akustischen Beeinflussung der Fahrer.
- Überprüfung der verkehrlichen Wirksamkeit der entwickelten Maßnahmen.
- Erkenntnisse zur Bedeutung der Fahrzeuginnenraumakustik und Fahrzeugschwingung für die Fahrweise, insbesondere die Geschwindigkeitswahl.

1.3 Vorgehensweise

Die dargestellten Fragestellungen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit schrittweise bearbeitet (siehe Bild 3). Einen ersten Überblick über das Thema liefern eine vergleichende Auswertung von Forschungsliteratur und die Ergebnisanalyse einer Befragung von internationalen Forschungsgesellschaften, Straßenbauverwaltungen und Anwendern. Die Ergebnisse bilden den nationalen und internationalen Stand

der Technik. Aufbauend auf den Erkenntnissen zu etablierten und experimentellen Lösungen zur haptischen und akustischen Beeinflussung werden sinnvolle Varianten für „Rüttelstreifen“ entwickelt und im Hinblick auf ihrer physikalischen und psychologischen Wirkung auf den Fahrer optimiert. Dieser Untersuchungsschritt erfordert vertiefende Erkenntnisse über die psychologischen Abläufe wie Wahrnehmung, Informationsverarbeitung und Risikoverhalten. Diese sowie die physikalischen Grundlagen werden auf der Basis einer ausführlichen Literaturrecherche dargestellt. Abschließend sollen einzelne Maßnahmen auf realen Landstraßen umgesetzt und hinsichtlich ihrer verkehrlichen Wirkung bewertet werden.

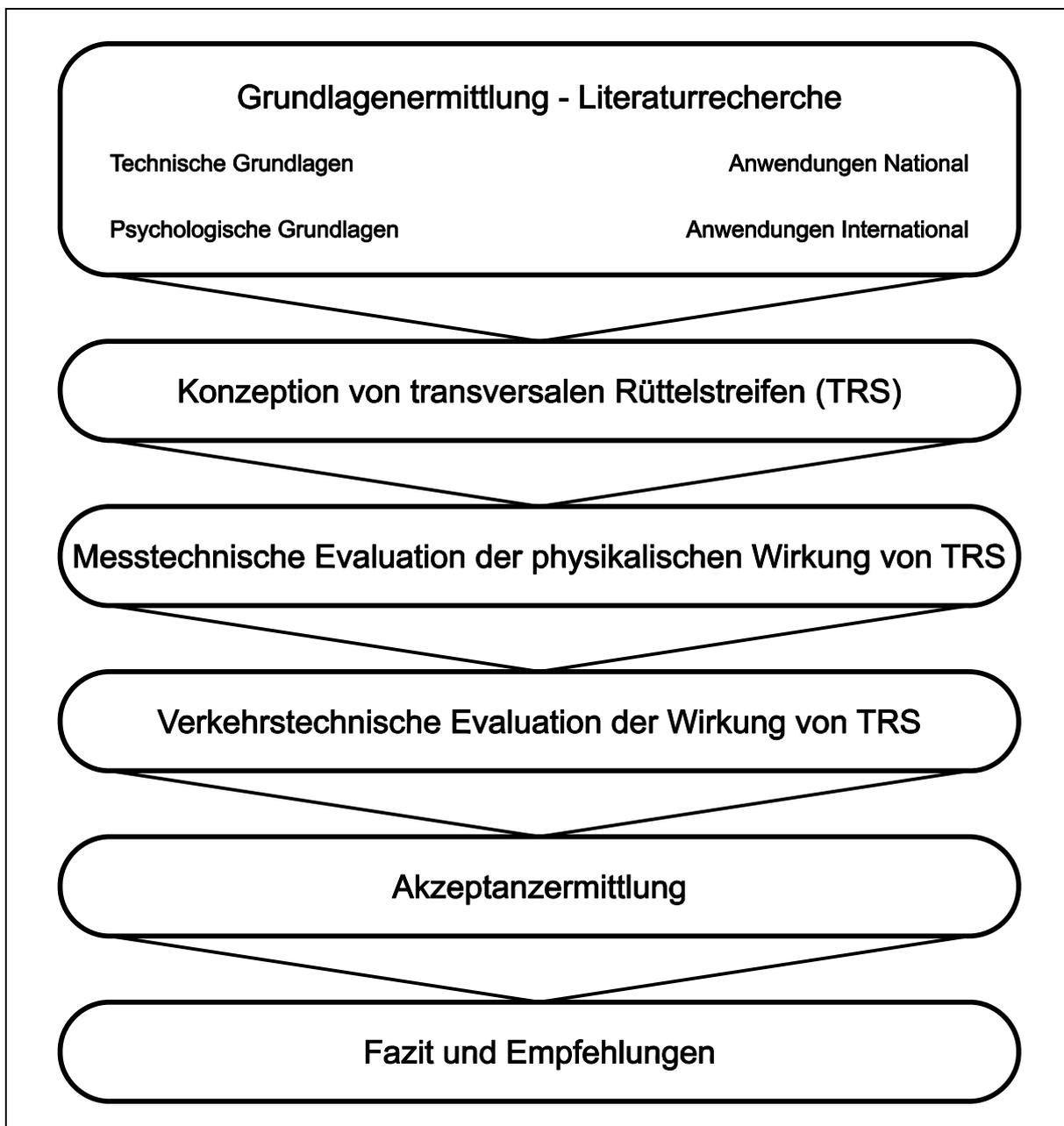


Bild 3: Vorgehensweise

2 Stand der Technik

Der Idee, Fahrer durch gezielte haptische oder akustische Signale auf einen Fahrfehler aufmerksam zu machen, wird bereits seit Längerem nachgegangen. So stellen bspw. profilierte Fahrbahnrandmarkierungen außerhalb von Deutschland eine weit verbreitete Anwendung der Fahrerbeeinflussung durch haptische und akustische Signale dar, die in den letzten Jahren auch in Deutschland verstärkt untersucht wird. Die Hauptanwendung der profilierten Randmarkierung besteht auf Autobahnen und monotonen Landstraßen in der gezielten Warnung von Fahrzeugführern beim unbewussten Verlassen der Fahrbahn. Beim Überfahren der Seitenmarkierung mit einem oder mehreren Reifen werden eine periodische haptische Anregung und ein surrendes Geräusch erzeugt, das den unaufmerksamen Fahrer „wecken“ und wieder auf die Fahrspur leiten soll.

Neben dem Einsatz von Randmarkierungen werden profilierte Markierungen insbesondere in den USA häufig zur Unterstützung der trennenden Wirkung von Mittelmarkierungen genutzt. Im Wesentlichen werden drei unterschiedliche Formen der profilierten Randmarkierung unterschieden: Bei Neubaumaßnahmen können durch ein „Stanzen“ periodische Eindrücke in die Seitenmarkierung eingebracht werden. Nach ähnlichem Prinzip, das auch bei bestehenden Fahrbahnen anzuwenden ist, werden Unebenheiten durch gezieltes Fräsen in die Randmarkierung eingebracht. Während diese beiden Ausführungsvarianten vorrangig in den USA angewandt werden, kommt in Deutschland die erhabene, durch Aufbringung von Strukturmarkierung erzeugte, profilierte Seitenmarkierung zum Einsatz.

Im Rahmen der Arbeit „Stochastische und periodische Unebenheiten auf Fahrbahnen“ untersuchte STEINAUER (1991) die schwingungstechnischen Grundlagen und erarbeitete eine erste Form für profilierte Randmarkierungen in Deutschland, die heute bereits auf vielen Autobahnen eingesetzt und ständig weiterentwickelt wird. Im Jahr 2002 untersuchte bspw. TIEFENTHALER die unterschiedliche Lärmemission von strukturierter und profilierter Fahrbahnmarkierung. Ziel dieser Arbeit war es, die Emissionen für Anwohner zu minimieren und gleichzeitig die Wirkung im Fahrzeug zu maximieren.

Aktuell beschäftigt sich die Bundesanstalt für Straßenwesen mit der „Sicherheitswirkung eingefräster Rüttelstreifen entlang der BAB 24“ (LERNER et al. 2009). Sowohl der Einsatz dieser Form von Rüttel-elementen als auch die aktuellen Untersuchungen zur Optimierung der Herstellung und des Einsatzes bestätigen die positive Wirkung dieser Maßnahmen. Nicht zuletzt die technische Umsetzung der zu Grunde liegenden Idee durch Automobilhersteller in Form von „Lane-Departure-Warning-

Systemen“, welche die Fahrbahnmarkierung detektieren und bei unbewusstem Verlassen der Fahrspur ein haptisches oder auch ein akustisches Signal bereitstellen, bestätigt dieses Konzept (vgl. bspw. HELLA, 2009 oder ITERIS, 2009).

Im Hinblick auf die vorliegende Fragestellung unterscheidet sich die profilierte Randmarkierung jedoch in einem wesentlichen Punkt von den untersuchten Rüttelstreifen: Während hier eine Überfahrunge und damit eine haptisch/akustische Warnung nur bei einem Fehlverhalten der Fahrzeugführer auftritt, soll das in Rahmen dieser Arbeit zu erarbeitende Konzept das gesamte Fahrerkollektiv erreichen. Lediglich in der Signalausprägung führt ein Fehlverhalten zu einer stärkeren haptischen und akustischen Beeinflussung.

2.1 Nationale Anwendungs- und Forschungsergebnisse

Auf nationaler Ebene werden Rüttelstreifen oder verwandte bauliche Maßnahmen bislang eher auf experimentellem Niveau eingesetzt. Insgesamt wurden in Deutschland vier Untersuchungen zur Wirkung von Rüttelstreifen und -strecken durchgeführt, deren wichtigste Ergebnisse im Folgenden zusammengefasst werden.

2.1.1 Verbesserung der Verkehrssicherheit in Ortsdurchfahrten

Im Rahmen einer groß angelegten Studie zur Verbesserung der Verkehrssicherheit in kurzen Ortsdurchfahrten in Nordrhein-Westfalen (MAIER, 1991), durchgeführt vom Verband der Autoversicherer, wurden in den Jahren 1982 bis 1990 verschiedene bauliche Maßnahmen hinsichtlich Ihrer Wirkung und Akzeptanz untersucht. Neben größeren Eingriffen, wie bspw. dem Bau von Verkehrsinseln oder Kreisverkehren in den Ortseinfahrten, wurden auch optische und akustische Bremsen (siehe Bild 4) in unterschiedlichen Orten in Nordrhein-Westfalen eingesetzt. Durch Vorher-Nachher-Untersuchungen wurde deren Wirkung auf das Geschwindigkeitsverhalten und das Unfallgeschehen bewertet. In der Untersuchung wurde die zentrale Frage behandelt, ob der Fahrzeugführer durch unterschiedliche Maßnahmen dazu bewegt wird, die zulässige Höchstgeschwindigkeit einzuhalten und ob die Verkehrssicherheit durch diese signifikant erhöht werden kann.

Als „optische Bremse“ werden quer zur Fahrbahn aufgebrachte Markierungsstreifen bezeichnet, deren Abstand zueinander mit zunehmender Nähe zum Gefahrenpunkt hin abnimmt. Die Streifen haben eine sehr geringe Höhe, so dass davon auszugehen ist, dass es sich um rein optische Elemente handelt, die keine akustische oder haptische Wirkung auf die Fahrzeuginsassen haben (siehe Bild 4 links).

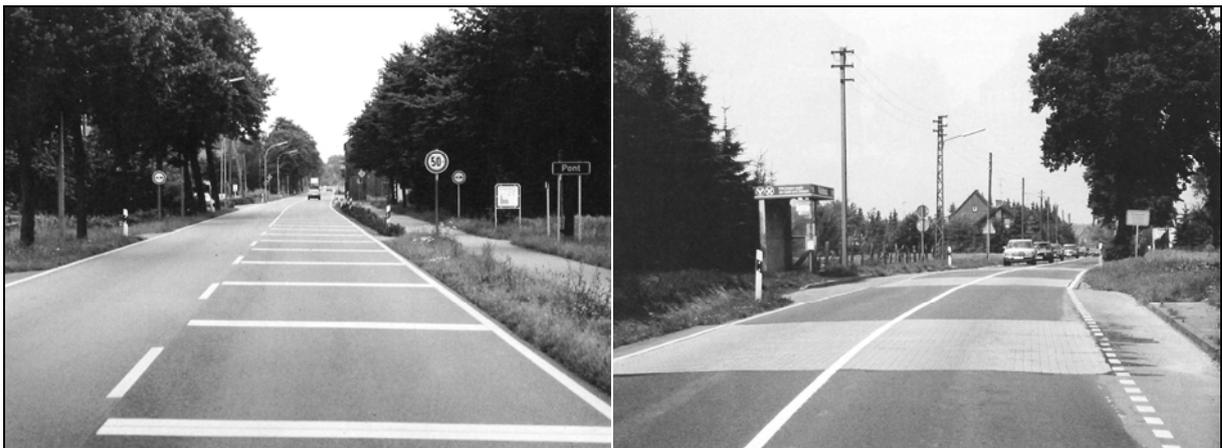


Bild 4: Optische Bremse in der Ortsdurchfahrt Geldern-Pont (B58) (links), Veränderung der Fahrbahnoberfläche an der Ortseinfahrt Wegberg-Rickelrath (L3) durch Pflasterungen (akustische Bremse) (rechts) (MAIER, 1991)

Als „akustische Bremse“ werden ebenfalls quer zur Fahrbahn verlegte Streifen bezeichnet, die sich optisch weniger von der Straßenoberfläche abheben, und ihre Wirkung vielmehr über akustische Signale entfalten. Im Rahmen der hier vorgestellten Studie zu kurzen Ortsdurchfahrten wurden diese Streifen aus Pflastermaterial hergestellt, welches niveaugleich mit der Deckschicht eingebaut wurde (siehe Bild 4 rechts).

Die Wirkung der optischen und akustischen Bremsen wurde durch MAIER (1991) zum einen durch Geschwindigkeitsmessungen³ und zum anderen durch Unfallanalysen jeweils im Vorher-Nachher-Vergleich bewertet: *„Die Fahrgeschwindigkeiten gehen – bei Ausgangsgeschwindigkeiten v_{85} zwischen 50 und 60 km/h vorher – nicht zurück. Bei höheren Ausgangsgeschwindigkeiten um 70 km/h können Rückgänge auftreten. [...] Es ist kein grundsätzlicher Unterschied in der Wirkungsweise von optischen bzw. akustischen Bremsen zu erkennen. [...] Zusammenfassend ist festzustellen, dass optische und akustische Bremsen sich kaum auf das Geschwindigkeitsverhalten auswirken.“* (MAIER, 1991) Sowohl bei Ortseinfahrten mit optischer als auch mit akustischer Bremse konnte eine Änderung des Unfallgeschehens verzeichnet werden.⁴ Inwiefern diese jedoch signifikant ist, kann auf Grund der stark zusammengefassten Ergebnisse nicht nachvollzogen werden. Gegenübergestellt wurden der Zeitraum vor Maßnahmenumsetzung (i.d.R. ein Jahr) sowie unterschiedliche Zeit-

³ In dieser Studie wurde die Geschwindigkeit bei der Messung auf volle 5 km/h gerundet. Hierzu bemerkt MAIER (1991): *„Auch ohne Maßnahmewirkung sind also Unterschiede bis zu 5 km/h im Nachher-Zeitraum nicht auszuschließen.“* Insgesamt müssen *„Veränderungen [der Geschwindigkeit] [...] schon deutlich sein, um mit hinreichender Sicherheit als Maßnahmenwirkung gelten zu können.“* (MAIER, 1991).

⁴ Teilweise ist keine genaue Abgrenzung der Maßnahmenwirkung möglich, da die Installation von optischen oder akustischen Bremsen im Annäherungsbereich der Ortseinfahrt mit Modifikationen der Ortsdurchfahrt (beispielsweise Fahrbahnverengungen) kombiniert wurde.

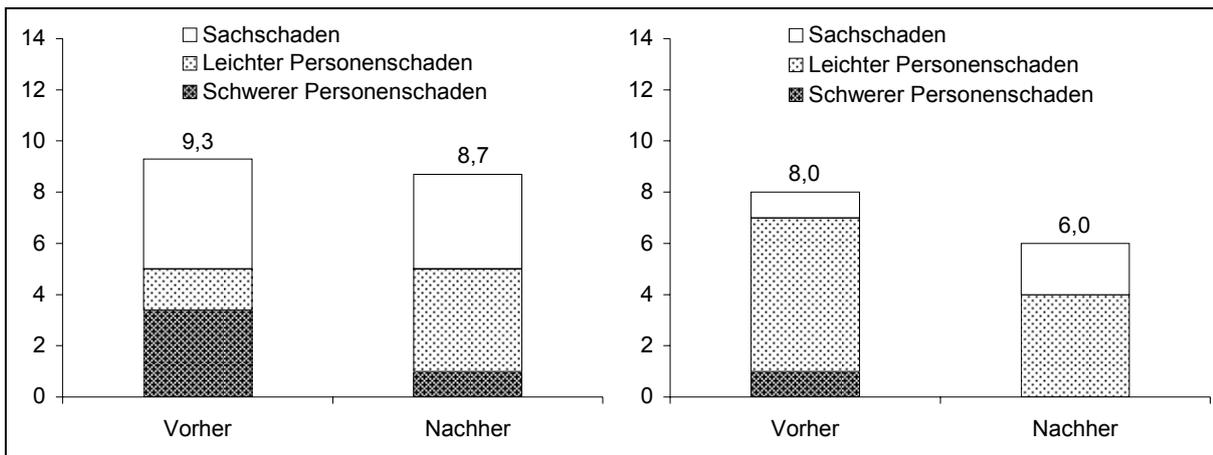


Bild 5: Unfallzahlen vorher/nachher mit Personenschaden und schwerem Sachschaden (links: optische Bremse, rechts: akustische Bremse) (MAIER, 1991)

räume welche frühestens drei Monate nach Maßnahmenumsetzung begannen. Zur statistischen Absicherung wurden diese relativ kurzen Zeiträume der unterschiedlichen Maßnahmen zusammengefasst. Die Ergebnisse sind in Bild 5 dargestellt.

Auch wenn insbesondere bei den schweren Personenschäden prozentual ein gewisser Rückgang zu verzeichnen ist, werden die Maßnahmen „optische Bremse“ und „akustische Bremse“ in dieser Forschungsarbeit als wenig bis nicht wirksam eingestuft: „[...] Vor allem in Hinblick auf die Veränderung in der Kontrollgruppe sind die Veränderungen bei optischen Bremsen nicht aussagefähig. [...] An Stellen mit optischen und akustischen Bremsen sind keine Verbesserungen der Verkehrssicherheit aufgetreten.“ (MAIER, 1991)

Gemessen an der geschwindigkeitsdämpfenden Wirkung der Vergleichsmaßnahmen, wie beispielsweise Aufpflasterungen, Umbau der Ortseinfahrten mit stark versetzten Verkehrsinseln oder gar der Bau von Kreisverkehren in der Ortseinfahrt, ist die Wirkung der akustischen/optischen Bremse als niedrig einzustufen. Aufgrund deutlich höherer Fahrgeschwindigkeiten im Außerortsbereich ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse in den Ortsdurchfahrten auf die hier zu untersuchende Fragestellung zweifelhaft.

2.1.2 Mechanisch-akustische Bremsen in Verbindungsrampen von Autobahnknoten

Auf Grund einer deutlichen Zunahme von Unfällen in Verbindungsrampen von Autobahnknotenpunkten wurde vom Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Energie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen ein Forschungsprojekt initiiert, in dessen Verlauf Versuche mit mechanisch-akustischen Bremsen („Rüttelstreifen“) durchgeführt wurden. Im Fokus der Untersuchung standen die geschwindigkeitsreduzie-

rende Wirkung und die Erhöhung der Verkehrssicherheit durch Rüttelstreifen in Verbindungsrampen von BAB-Knotenpunkten: *„Zum einen wird erwartet, dass die Verkehrsteilnehmer durch die Streifen wachgerüttelt werden und so die Ausfahrten und Rampen mit höherer Aufmerksamkeit befahren. Zum anderen sollen vor allem ortskundige Kraftfahrer, die bewusst Kurven mit hoher Geschwindigkeit anfahren, durch die Rüttelstreifen zur Temporeduzierung angehalten werden.“* (BRILON/BÄUMER/WEISE, 2001) Auf Basis der Erkenntnisse aus dem Ausland – vor allem den Niederlanden – wurden unterschiedliche Bauformen für die Rüttelstreifen entworfen. Unterschieden wurde zwischen erhabenen und eingefrästen Streifenformen. Die Anordnung in Fahrtrichtung erfolgte ebenfalls nach niederländischem Vorbild. Lediglich kleinere Modifikationen wurden im Verlauf der Untersuchung vorgenommen. Eine Ausführungsvariante ist in Bild 6 dargestellt.

Nach Installation der Rüttelstreifen auf ausgewählten Verbindungsrampen von Autobahnkreuzen in Nordrhein-Westfalen wurden diese mit einem Mess-Pkw überfahren, der mit Beschleunigungssensoren und einem Schallpegelmessgerät ausgerüstet war. Die gemessenen Beschleunigungen lagen kurzzeitig im Bereich der zwei- bis fünffachen Erdbeschleunigung. Eine Gesundheitsgefährdung wurde auf Basis der Messergebnisse durch Mediziner des Lehrstuhls für Arbeitsmedizin der Universität Düsseldorf ausgeschlossen. Die akustischen Pegeländerungen lagen bei den Strecken mit einer Kombination aus haptischer und akustischer Anregung (*Rüttelstreifen*) bei bis zu 10 dB(A). Bei einer Vergleichsstrecke mit reiner akustischer Anregung konnte lediglich ein Anstieg um die 3 dB(A) festgestellt werden. BRILON/BÄUMER/WEISE schreiben hierzu, dass *„beim Überfahren der Rüttelstreifen ein eher polterndes Geräusch entsteht, [während] die akustische Bremse [...] ein singendes Reifengeräusch (ähnlich einer profilierten Markierung) [erzeugt]. Möglicherweise wirkt dieses Geräusch stärker, so dass trotz der nur relativ geringen Schallpegelerhöhung die Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer geweckt wird.“*



Bild 6: Rüttelstrecke in Verbindungsrampe (links) und Ausführungsdetail gefräster Rüttelstreifen (rechts) (BRILON/BÄUMER/WEISE, 2001)

Zusammenfassend konnte die erwartete mechanische und akustische Wirkung im Fahrzeug auf allen Versuchsstrecken nachgewiesen werden. *„Voraussetzung für die mechanische Wirkung ist jedoch ein ausreichend großer Höhenunterschied zwischen Rüttelstreifen und Fahrbahnoberkante. Dieser sollte etwa 1,5 bis 2,0 cm betragen. Die dadurch erzeugte Rüttelwirkung wird im Fahrzeug deutlich wahrgenommen.“* (BRILON/BÄUMER/WEISE, 2001)⁵

In einem zweiten Untersuchungsschritt wurde die verkehrliche Wirkung der Rüttelstreifen untersucht. Zum einen wurde mit Videokameras das individuelle Fahrerverhalten beobachtet, und zum anderen wurden Geschwindigkeitsmessungen vorgenommen. Als Ergebnis der Videobeobachtung kann die Überfahrung der Rüttelstreifen für alle Fahrzeugklassen (inklusive Zweiradfahrer) als weitestgehend problemlos eingestuft werden. Vereinzelt wurde ein stärkeres Abbremsen vor den Streifen festgestellt. Des Weiteren wurde an einzelnen Versuchsstrecken ein Umfahren der Rüttelstreifen insbesondere durch ortskundige Fahrer beobachtet. Dieses unerwünschte Fahrerverhalten kann jedoch weitestgehend durch eine Anpassung der Markierung oder ein Verlängern der Streifen über die gesamte Fahrbahnbreite beseitigt werden. Bei der Bewertung des Geschwindigkeitsverhaltens wurden ausschließlich frei fahrende Fahrzeuge berücksichtigt. Die freie Fahrt wurde über die Zeitlücken definiert. Als frei fahrend wurden diejenigen Fahrzeuge bezeichnet, die eine Zeitlücke > 8 s zum vorausfahrenden Fahrzeug einhielten.

Als Leitgröße bei der Bewertung des Geschwindigkeitsverhaltens wurden die v_{15} , die v_{85} und die v_{95} herangezogen. Wünschenswert wäre eine verstärkte Reduzierung hoher Geschwindigkeiten bei geringer Wirkung auf die Geschwindigkeit unterhalb der v_{zul} . Die Messungen lieferten je nach Ortslage sehr unterschiedliche Ergebnisse (siehe exemplarisch Bild 7). An einigen Versuchsfeldern konnte ein leichter Geschwindigkeitszuwachs beobachtet werden, während an anderen Rüttelstrecken massive Geschwindigkeitsrückgänge zu verzeichnen waren. Die einzelnen Geschwindigkeitskennwerte sowie die Ergebnisse der durchgeführten statistischen Analyse sind in Tab. 1 dargestellt.

Wie Tab. 1 zu entnehmen ist, konnte an sechs bzw. (mit Modifikationen) acht der zehn Untersuchungsstrecken eine signifikante Veränderung der Geschwindigkeit nachgewiesen werden. Hiervon sank die mittlere Geschwindigkeit in fünf Fällen. In einem Fall stieg die mittlere Geschwindigkeit nach Aufbringung der Rüttelstreifen signifikant.

⁵ Zur näheren Erläuterung des Zusammenhangs zwischen Schwingungsverhalten, Auslenkungshöhe und Frequenz der Anregung vgl. auch Kapitel 4.2.

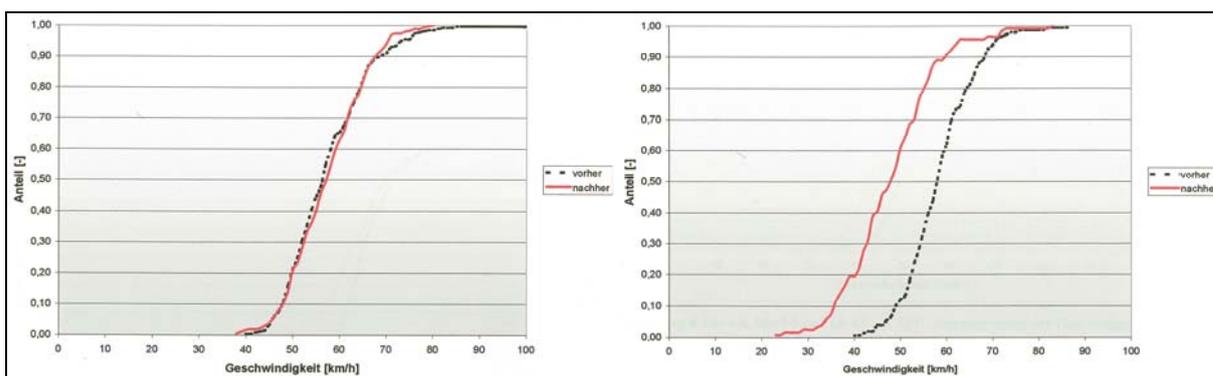


Bild 7: Summenlinie der Geschwindigkeitsverteilung AS Ochtrup (A 31) (links) und der AS Mönchengladbach West (A 61) (rechts) (BRILON/BÄUMER/WEISE, 2001)

Messstellen	V_m [km/h]		V_{15} [km/h]		V_{85} [km/h]		V_{95} [km/h]		Signifikanz
A 3 AS Dinslaken Ohne Modifizierung Mit Modifizierung	55	58 55	48	50 47	66	68 63	68	75 71	ja nein
A 3, AS Königsforst	63	59	55	49	71	69	75	75	ja
A 3, AS Siebengebirge Mit Tempolimit Ohne Tempolimit	60	59 57	50	50 49	70	69 67	76	74 73	nein ja
A 46/A 57, AK Neuss-Süd	66	67	56	55	76	79	84	87	nein
A 61, AS M'gladbach-West ⁽¹⁾	59	48	52	38	67	57	71	63	ja
A 1, AS Kamen Zentrum	65	57	56	46	74	68	80	73	ja
A 31, AS Ochtrup-Nord ⁽¹⁾	57	58	49	50	66	66	74	71	nein
A 45/A 2, AK Dortmund-Nord/West	47	42	38	33	56	48	64	58	ja
A 43/A 52, AK Marl-Nord	56	49	47	41	65	58	71	63	ja
A 44/A 33, AK Wünnenberg-H.	67	69	57	56	80	83	89	92	ja

Tab. 1: Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessungen im Vorher-Nachher-Vergleich (nach BRILON/BÄUMER/WEISE, 2001); ⁽¹⁾ Die Geschwindigkeitsprofile dieser Messstellen sind exemplarisch in Bild 7 dargestellt

Bei fünf der sechs signifikanten Geschwindigkeitsrückgänge sinkt die v_{95} im gleichen Maße wie die Durchschnittsgeschwindigkeit. Auf der Strecke A 3, AS Königsforst, hingegen sinkt zwar die mittlere Geschwindigkeit um 4 km/h, dies ist jedoch vorrangig durch den Rückgang der v_{15} und v_{85} bedingt. Die Gruppe der Schnellfahrer bleibt in Ihrem Geschwindigkeitsverhalten größtenteils unbeeinflusst. Hier konnte keine positive Wirkung durch die Rüttelstreifen nachgewiesen werden.

Zusätzlich zur messtechnischen Erfassung der physikalischen Eingangsgrößen und der Verkehrsgröße „Geschwindigkeit“ wurde das Unfallgeschehen in den Verbindungsrampen differenziert betrachtet. An allen zehn Strecken lagen die Unfalldaten von mindestens drei Jahren vor. Auf Grund der Projektlaufzeit konnte nach Installation der Rüttelstreifen lediglich auf die Unfalldaten eines Jahres zurückgegriffen werden. Die Aussagen zur Veränderung der Verkehrssicherheit sind daher nur bedingt statistisch abgesichert. Insgesamt konnte an allen Strecken (bis auf die AS Siebengebirge) lediglich eine geringfügige Änderung des Unfallgeschehens nachgewiesen werden. BRILON/BÄUMER/WEISE (2001) begründen den geringen Rückgang der Unfallzahlen in ihrer Arbeit mit der Überlagerung durch andere Maßnahmen, die teilweise geringe Wirkung auf das Geschwindigkeitsniveau sowie Einflüssen aus unterschiedlichen Witterungsverhältnissen. Im Rahmen der Unfallanalyse wurden an einzelnen Stellen verstärkt nässebedingte Unfälle (bis zu 65%) registriert: *„Offenbar reicht auf Grund der unzureichenden Griffigkeit der nassen Fahrbahn an diesen Strecken bereits ein geringfügig zu hohes Tempo oder ein Fahrfehler aus, damit es zum Ausbrechen des Fahrzeugs kommt. In diesen Fällen sind Rüttelstrecken auch dann nicht ausreichend wirksam, wenn sie – bei trockener Fahrbahn – eine deutliche Geschwindigkeitsreduzierung hervorrufen.“* (BRILON/BÄUMER/WEISE, 2001)

Zusammenfassend stellt sich die Wirkung von Rüttelstreifen in Verbindungsrampen von Autobahnknoten als in hohem Maße abhängig von den äußeren Gegebenheiten wie der Trassierung oder den Betriebsmerkmalen dar.

2.1.3 Temporäre Warnschwellen vor Arbeitsstellen

Im Rahmen des FE-Projekts *„Einsatz neuer Methoden zur Sicherung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer“* wurden unterschiedliche Modifikationen bzw. innovative Zusatzmaßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit in Arbeitsstellen untersucht (STEINAUER et al., 2004). Für die vorliegende Arbeit ist insbesondere die Wirkung der untersuchten Warnschwellen von Interesse.

Als Warnschwellen (auch „Andreasstreifen“ genannt) werden Polyethylenstreifen bezeichnet, die bei Spurreduktionen vor Arbeitsstellen kürzerer Dauer quer zur Fahr-



Bild 8: Einsatz von Warnschwellen bei einer Arbeitsstelle kürzerer Dauer auf dem Seitenstreifen (links) (STRASSENNRW, 2005) und auf dem rechten Fahrstreifen (rechts) (STEINAUER et al., 2004)

bahn ca. 150 Meter vor den fahrbaren Absperrtafeln auf die Fahrbahn gelegt werden (siehe Bild 8). Die Streifen werden hierzu nicht mit der Straßenoberfläche verklebt, sondern verbleiben auf Grund ihres Eigengewichts von ca. 20 kg und der Reibung zwischen Warnschwelle und Straßenoberfläche an Ort und Stelle.

Schwerpunkt der Arbeit war die Untersuchung der verkehrlichen Wirkung auf der Grundlage von Geschwindigkeitsmessungen und Videobeobachtungen des allgemeinen Fahrerverhaltens sowie eine Akzeptanzerhebung im Nachlauf der Maßnahmen.

Der Fokus bei der Analyse des allgemeinen Fahrerverhaltens lag auf dem Spurwechselverhalten und auf der Beobachtung auffälliger Fahrmanöver. Je nach Ausführung überfuhren nur ca. 6 % (bei Anordnung auf dem rechten Fahrstreifen) bis 10 % (bei Anordnung auf dem linken Fahrstreifen) der Fahrer die Warnschwellen. Ungewöhnliches Fahrerverhalten wie beispielsweise plötzliches starkes Abbremsen oder abruptes Verreißen des Lenkrads ist nicht aufgetreten.

Die Auswertung des Geschwindigkeitsverhaltens ergab keine signifikante Auswirkung. Vor dem Hintergrund des geringen Anteils der Überfahrungen der Streifen ist dieser Sachverhalt jedoch folgerichtig. Neben den messtechnischen Untersuchungen wurden Autofahrer auf Raststätten hinter den Untersuchungsfeldern zu ihrer Akzeptanz gegenüber den Streifen befragt: *„Der überwiegende Teil der befragten Kraftfahrer hält beide Maßnahmen grundsätzlich für sinnvoll. Vor allem der Einsatz von Andreasstreifen wird sehr positiv bewertet und von über drei Viertel der 78 hierzu Befragten als sinnvolle Maßnahme eingestuft.“* (STEINAUER et al., 2004)

Neben der Wirkungs- und Akzeptanzanalyse wurde auch die Verkehrssicherheit in Bezug auf die Überfahrer betrachtet. Insbesondere die Sicherheit von Zweiradfahrern

stand im Fokus dieser erweiterten Analyse. „[...] Zusätzlich zu den im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten Pilotversuchen wurden vom Institut für Straßenwesen Aachen, der Bundesanstalt für Straßenwesen und dem Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen unter Beteiligung des ADAC, weitere Untersuchungen zur Anordnung der Warnschwellen, insbesondere deren Abstand untereinander, durchgeführt. Hierbei wurden mit Einsatzfahrzeugen des Straßenbetriebsdienstes (Lkw, Lfz und Pkw) sowie einem Motorrad der ADAC Pannenhilfe unterschiedliche Anordnungen der Warnschwellen mit verschiedenen Geschwindigkeiten überfahren und die mechanische Wirkung auf den Fahrer bewertet. Auf Grund dieser Versuche wurde der optimale Abstand der Warnschwellen untereinander auf der Fahrbahn auf 3 m (im Gegensatz zu den in den Niederlanden üblichen 5 m) und auf dem Seitenstreifen auf 5 m festgelegt [...].“ (BAIER et al., 2005)

2.1.4 Merkblatt zur Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Motorradstrecken

Auf Basis der Untersuchungen von BRILON (2001) wurde im Jahr 2003 vom Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen auf einer unfallträchtigen Strecke in der Nähe von Minden (B 51) ein Pilotversuch zur Erhöhung der Verkehrssicherheit von Motorradstrecken durchgeführt. Da drastischere Umbaumaßnahmen nicht zu realisieren waren, wurde versucht, eine unfallträchtige Kurve mit Hilfe von Rüttelstreifen zu entschärfen (siehe Bild 9). Mit ähnlichen Bauformen, wie sie BRILON (2001) auf Verbindungsrampen untersuchte, wurde der Zulauf der Kurve ausgestattet. Zu diesem Zweck wurde die Straßendecke ca. 1,5 cm tief und 50 cm breit aufgefräst und Gussasphalt linsenförmig eingebaut. Die maximale Höhe der Streifen über Fahrbahnniveau wurde mit ca. 1,5 cm angesetzt. Die Kosten für diese Maßnahme betragen ca. 30.000 € für insgesamt 52 Querstreifen.



Unfallkategorie	Vorher ⁽¹⁾	Nachher ⁽²⁾
Sachschaden (UK4 bis UK6)	12	7
Leichtverletzte (UK 3)	1	2
Schwerverletzte (UK 2)	4	-
Getötete (UK1)	-	-

Bild 9: Landstraßenkurve mit Rüttelstreifen (MVMOT, 2007) (links) und Unfallgeschehen B 514: Vorher-Nachher-Vergleich; ⁽¹⁾ Vorherzeitraum: 01.2002-11.2003 (22 Monate); ⁽²⁾ Nachherzeitraum: 11.2003-12.2006 (38 Monate)

Das Resultat dieser Maßnahme ist positiv zu bewerten. Die Zahl der Unfälle nahm seit Installation der Rüttelstreifen deutlich ab, wie Bild 9 zu entnehmen ist. Auf Grund der durchaus positiven Erfahrungen bei diesem Pilotversuch, wurde der Einsatz von Rüttelstreifen in das neue „Merkblatt zur Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Motorradstrecken“ MVMOT (2007) eingearbeitet und in eine Regelzeichnung überführt (siehe Anhang A). Die entsprechenden Parameter und Anordnungsempfehlungen wurden dem Feldversuch des Landesbetriebs Straßenbau Nordrhein-Westfalen nachempfunden:

„In Sonderfällen können Rüttelstreifen zur Durchsetzung der verkehrssicheren Geschwindigkeiten in Betracht gezogen werden. Diese Rüttelstreifen dürfen allerdings nur auf der Geraden vor Kurven eingesetzt werden. Zudem sollte noch ein ausreichender Sicherheitsabstand zum Bremsen vor der Kurve vorhanden sein. Um ein Umfahren zu verhindern, sind die Rüttelstreifen über die gesamte Fahrbahn auszubilden.“ (MVMOT, 2007)

2.2 Internationale Anwendungs- und Forschungsergebnisse

Während die in Kapitel 2.1 vorgestellten Forschungs- und Anwendungsaktivitäten sich in Deutschland auf wenige Beispiele beschränken und erst in den letzten Jahren stärker fokussiert wurden, ist der Einsatz von Rüttelstreifen im Ausland teilweise schon länger Gegenstand von Experimenten, Studien und Forschungsprojekten. In den meisten Ländern Europas erfolgt der Einsatz von Rüttelstreifen analog zu Deutschland eher auf experimentellem Niveau. Lediglich in Großbritannien wurde die Wirkung von Rüttelstreifen auf das Fahrerverhalten systematisch untersucht. Die längste Erfahrung mit Rüttelstreifen haben einzelne Staaten der USA und Kanada. Die Vielzahl an Literatur und Ausführungsempfehlungen kann im Rahmen dieser Arbeit nicht erschöpfend aufgearbeitet werden. Im Folgenden soll eine Auswahl der Rechercheergebnisse dargestellt werden.

2.2.1 Einsatz von Rüttelstreifen in Österreich

In Österreich ist derzeit keine normative Regelung zum Einsatz von Rüttelstreifen bekannt. Die Recherche ergab, dass Rüttelstreifen bzw. Rüttelstrecken vereinzelt experimentell eingesetzt werden. Bspw. beschreibt BERGER (1997) in einem Vortrag den Einsatz von Rüttelstreifen am Ausbauende einer Schnellstraße (S 4 zwischen Niederösterreich und dem Burgenland). Die Schnellstraße geht nach ca. 20 km in eine Landstraße ohne Mitteltrennstreifen über, beschreibt eine scharfe Rechtskurve und endet in einer T-Kreuzung mit der B 50. Die plötzliche Trassenänderung führte in der Vergangenheit zu einem auffälligen Unfallgeschehen.

Ein Großteil der Unfälle (ca. 70 %) bestand aus Fahrzeugen, die die T-Kreuzung gerade überfahren (vgl. Bild 10 links). Es ist davon auszugehen, dass die Fahrer das Ende der Strecke nicht bzw. zu spät wahrnahmen. Insgesamt fiel auf, dass die Fahrer die Kreuzung mit überhöhter Geschwindigkeit anfahren und insbesondere bei Nässe nicht rechtzeitig zum Stillstand kamen.

Als Gegenmaßnahme wurde in einem Abstand von 350 Metern vor der Kreuzung eine Überkopfsignalisierung installiert. Zusätzlich wurden mehrere Rüttelflächen von 50 Metern Länge und ca. 2 cm Tiefe mit einem Abstand von 100 Metern in die Straßenoberfläche geätzt, um unaufmerksame Fahrer durch den Rüttelkontakt zu warnen bzw. die Beschilderung durch auditive und haptische Signale zu unterstreichen (vgl. Bild 10 rechts).

Im Nachgang der Maßnahmenumsetzung wurde eine Unfallanalyse vorgenommen. Die Aussagen gelten auf Basis der langen Vergleichsräume (66 Monate vor und 36 Monate nach der Maßnahme) als statistisch abgesichert. Es konnte ein deutlicher Rückgang der Unfälle von fast 90% verzeichnet werden. Darüber hinaus traten im Nachher-Zeitraum keine Unfälle mit Personenschäden auf. Die Kosten der baulichen Umsetzung haben sich damit nach den Berechnungen von BERGER (1997) innerhalb von weniger als 18 Monaten amortisiert. Aussagen des Verfassers zufolge wurde der Rüttelkontakt auf der Strecke gut spürbar in die Fahrzeuge übertragen. Einer Abnutzung der Fräskanten über die Zeit sollte jedoch durch ein „nachscharfen“ begegnet werden.

Bezogen auf die Fragestellung der vorliegenden Arbeit zeigt diese Maßnahme das Potential von Rüttelstreifen zur Unfallreduktion. Eine genaue Wirkungsabgrenzung kann durch den parallelen Einsatz der Überkopfsignalisierung nicht vorgenommen werden.

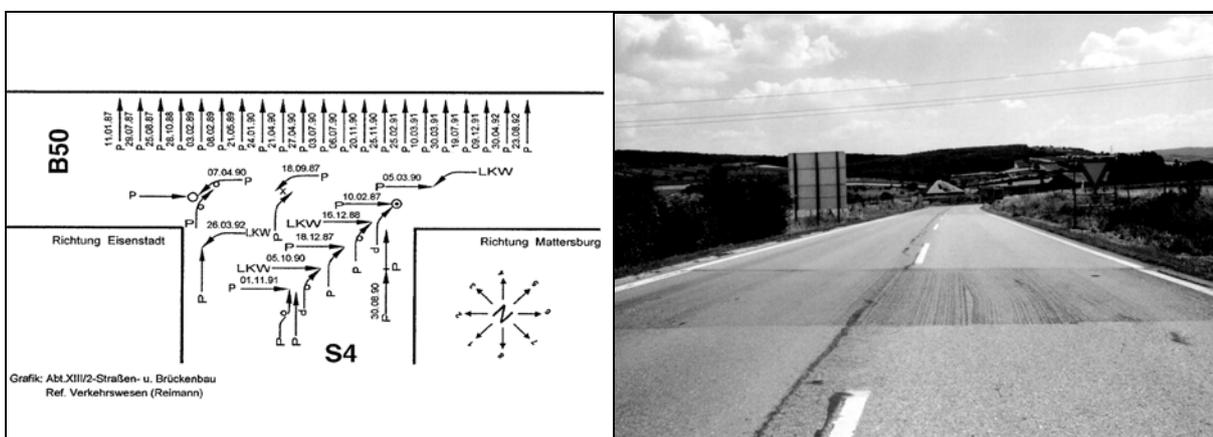


Bild 10: Unfallgeschehen B 50 – S 4 in Österreich im Zeitraum von 01.1987 bis 06.1992 (links) und Querfräsungen auf der S 4 in Österreich (BERGER, 1997)

2.2.2 Einsatz von Rüttelstreifen in Frankreich

In Frankreich werden Rüttelstreifen bereits seit Jahren erfolgreich angewendet. Auf Basis diverser Untersuchungen durch das S.E.T.R.A. und das C.E.T.E. de Rouen wurde vom Ministère de l'Équipement, du Logement, de l'Aménagement du Territoire et des Transports bereits im Juli 1986 ein Merkblatt (C03-18) zum Einsatz und zum Bau von Rüttelstreifen veröffentlicht. Die wesentlichen Inhalte des Merkblatts werden im Folgenden vorgestellt.

Rüttelstreifen werden gemäß Merkblatt C03-18 als statische Maßnahme zur Erhöhung der Aufmerksamkeit von Kraftfahrern vor bekannten Gefahrenstellen definiert. Die Alarmwirkung soll durch zwei Effekte – die visuelle und die haptisch/akustische Wirkung der Streifen – erzeugt werden. Ein direkter Einfluss auf die Geschwindigkeitswahl wird nicht angestrebt – vielmehr soll eine erhöhte Aufmerksamkeit auf die bestehende Beschilderung gerichtet und die Gefahr der Situation unterstrichen werden. Als mögliche Anwendungsgebiete werden Annäherungsbereiche von Kurven und von Kreuzungen, unklare Vorfahrtsregelungen, verminderte Sichtverhältnisse vor Kreuzungen, Betonung von Geschwindigkeitsbegrenzungen sowie Annäherungsbereiche von Mautstationen genannt. Die Rüttelstreifen können nach vorheriger Prüfung (u.a. des Unfallgeschehens) nach den Empfehlungen des Merkblatts C03-18 installiert werden. Der Einsatz der Rüttelstreifen soll dabei jedoch gezielt und dosiert erfolgen, um eine übermäßige Verbreitung und einen damit einhergehenden Verlust der „Glaubwürdigkeit“ zu vermeiden. Bei der Planung und baulichen Umsetzung der Streifen ist der erhöhte Schallemission Rechnung zu tragen. Der Abstand zur nächsten wohnlichen Nutzung muss demnach mindestens 100 Meter betragen. Zusätzlich muss der Oberflächenabfluss gewährleistet werden.

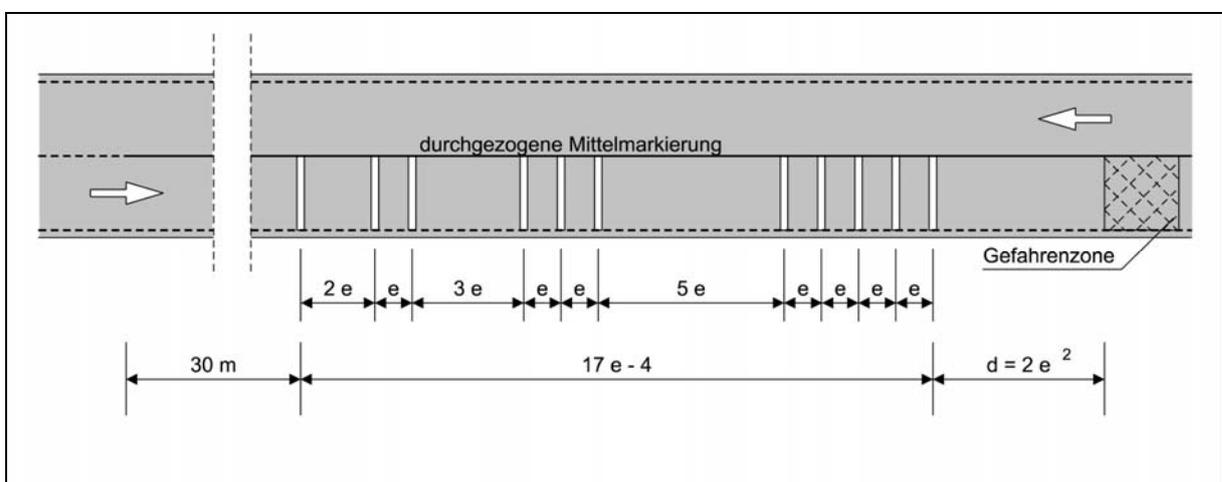


Bild 11: Regelzeichnung zur Anordnung von Rüttelstreifen in Frankreich (nach C03-18)

Im Merkblatt C03-18 wird eine Vielzahl möglicher bautechnischer Ausführungsmöglichkeiten aufgeführt. Im Wesentlichen handelt es sich um Verfahren, die grobe Gesteinskörnungen (6/10-12/18) mit unterschiedlichen Bindemitteln (Bitumen, Epoxidharz, Thermoplaste etc.) in Streifenform auf die Fahrbahnoberfläche applizieren.

Die Rüttelstrecken bestehen im Allgemeinen aus 11 einzelnen Streifen, die mit definiertem Abstand zueinander vor der entsprechenden Gefahrenstelle aufgebracht werden sollen. Die Breite eines einzelnen Streifens beträgt 50 cm und die Höhe ca. 1,5 bis 2,5 cm. Die laterale Anordnung ist in Bild 11 dargestellt. Die Abstände zwischen den einzelnen Streifen sind abhängig von der Geschwindigkeit. Bei einer v_{85} von unter 80 km/h liegt der Abstand bei 5 Metern und steigt bis zu 7 Metern bei einer v_{85} größer als 100 km/h. Die Streifen werden grundsätzlich nicht über die gesamte Fahrbahnbreite verlegt, sondern lediglich in der betroffenen Fahrspur, um Gewöhnungseffekten entgegenzuwirken. Zur Vermeidung möglicher unerwünschter Fahrmanöver wie beispielsweise plötzlichem Bremsen können Beschilderungen „Achtung Rüttelstreifen“ im Annäherungsbereich der Rüttelstrecke angebracht werden. Darüber hinaus sollte die Mittelmarkierung bis ca. 30 Meter vor dem ersten Streifen durchgezogen werden, um möglichem Umfahren der Streifen entgegenzuwirken.

2.2.3 Einsatz von Rüttelstreifen in Spanien

In Spanien werden Rüttelstreifen vorrangig zur Steigerung der Aufmerksamkeit angewandt. Im Folgenden werden die Anforderungen und Ausführungskommentare aus Valencia (COMUNITAT VALENCIANA, 2006) vorgestellt.

Nach den o. g. Empfehlungen werden bis zu 15 Gruppen (Pakete) von jeweils zwei Streifen mit einem Abstand von einem Meter im Vorfeld von Gefahrenstellen aufgebracht. Der Abstand zwischen den einzelnen Gruppen verringert sich mit kleiner werdender Entfernung von der Gefahrenstelle und ist abhängig von der Annäherungsgeschwindigkeit und der erwünschten Zielgeschwindigkeit (siehe Bild 12).

Die laterale Ausdehnung der Rüttelstreifen beträgt – ähnlich wie in den meisten anderen untersuchten Ländern – 50 cm. Die Höhe wird auf 1,5 cm begrenzt, zum Fahrbahnrand hin wird eine Abflachung auf 0,5 cm als sinnvoll erachtet. In Querrichtung sollen die Rüttelstreifen – entgegen den Empfehlungen in Frankreich oder auch Dänemark – über die gesamte Fahrbahnbreite ausgeführt werden. Am Seitenrand ist für Radfahrer ein 75 bis 100 cm breiter Randstreifen frei zu lassen.

Die Rüttelstreifen können aus unterschiedlichen Materialien hergestellt werden. So kommen neben in Harz gebundenen groben Gesteinskörnungen und Streifen aus polymeren Materialien auch Ausführungen in Asphalt zur Herstellung in Frage.

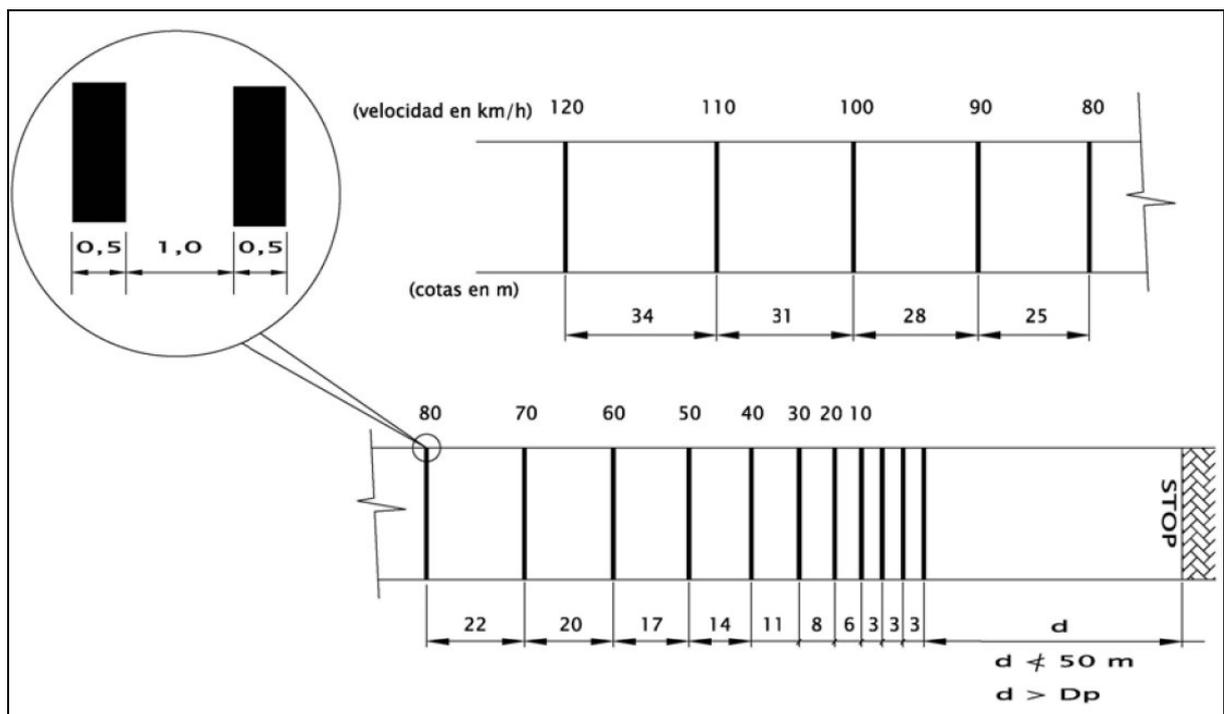


Bild 12: Abstände von Rüttelstreifen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (COMUNITAT VALENCIANA, 2006)

Hinsichtlich der verkehrlichen Kennzeichnung gilt, dass die Rüttelstreifen in weißer Farbe zu halten sind und auf Straßen ohne Randstreifen eine Beschilderung ca. 25 Meter vor dem ersten Streifen zu erfolgen hat. Auf Land- oder Schnellstraßen mit Seitenstreifen kann die Ankündigung durch Verkehrszeichen entfallen. Bei der Anordnung ist darauf zu achten, dass die Rüttelstreifen nicht in der Nähe von Wohngebieten verwendet werden dürfen. Des Weiteren soll der Einsatz in Kurven mit Radien kleiner als 600 Meter vermieden werden, und der letzte Streifen mindestens 50 Meter vor der Gefahrenstelle aufgebracht werden.

2.2.4 Einsatz von Rüttelstreifen in Dänemark

In Dänemark werden Rüttelstreifen auf Landstraßen bereits seit Jahren verwendet. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Anwendungsbeispielen wird beim Einsatz und in der Ausführung von Rüttelstreifen in Dänemark zwischen der Steigerung der Aufmerksamkeit und der Reduzierung der Geschwindigkeit unterschieden.

Zur Steigerung der Aufmerksamkeit sollen zwei bis drei Rüttelstreifenpakete – jedes bestehend aus ca. fünf bis sechs einzelnen Streifen mit einem Einzelabstand von fünf Metern – im Abstand von 50 bis 100 Metern vor der Gefahrenstelle aufgebracht werden. Zur Reduktion der Geschwindigkeit wird eine angepasste Ausführungsform – ähnlich der optischen Bremse – empfohlen. Sowohl der Abstand zwischen zwei Streifen als auch die laterale Ausdehnung der Rüttelstreifenpakete ist gemäß Gl. 1

und Gl. 2 in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit zu wählen. Die Breite der einzelnen Streifen kann als fester prozentualer Anteil der Abstände zwischen den Streifen angenommen werden und liegt zwischen 10 und 100 cm. Bei Breiten größer als 50 cm ist eine Unterbrechung des Streifens aus Entwässerungsgründen vorgeschrieben.

$$L = 0,5 \cdot (V_i + (V_i - a \cdot t)) \cdot t \quad \text{Gl. 1}$$

mit	L	Abstand zwischen zwei Rüttelstreifen [m]
	V_i	Geschwindigkeit am ersten Streifen [m/s]
	a	Verzögerung [m/s ²] (i.d.R. 2 m/s ²)
	t	Fahrzeit zwischen zwei Streifen [s] (i .d. R. 0,5 bis 2,0 Sekunden)

Fehler! Es ist nicht möglich, durch die Bearbeitung von Feldfunktionen Objekte zu erstellen. Gl. 2

mit	S	Laterale Ausdehnung der Rüttelstrecke [m]
	L	Abstand zwischen zwei Rüttelstreifen [m]
	V_i	Geschwindigkeit am ersten Streifen [m/s]
	V_u	Zielgeschwindigkeit am letzten Streifen [m/s]
	a	Verzögerung [m/s ²] (i.d.R. 2 m/s ²)

Die Höhe der einzelnen Streifen liegt zwischen 1,5 und 3,0 cm. Die Streifen sollen aus Fahrbahnmarkierungsmaterial oder ähnlichen Produkten hergestellt werden. Die Farbe der Streifen darf weder weiß, blau noch gelb beinhalten, da diese Farben in Dänemark der Fahrbahnmarkierung vorbehalten sind. Bis auf die Empfehlung, einen ausreichenden Abstand zu eventuellen Wohngebieten einzuhalten, um mögliche Lärmbelastigungen auszuschließen, ergaben die Recherchen keine weiteren Angaben zur Anwendung von Rüttelstreifen.

2.2.5 Einsatz von Rüttelstreifen in Großbritannien

In Großbritannien wurden Rüttelstreifen seit dem „Federal Highway Act“ 1980 auf Außerortsstraßen experimentell angewendet, bis im Jahr 1993 das Transport Research Laboratory (TRL) eine erste Studie zum Einsatz und zur Wirkung von Rüttelstreifen veröffentlichte. Im Rahmen dieser ersten breit angelegten Studie (untersucht wurden 36 Ortstagen) wurde die Wirkung von Rüttelstreifen bzw. Rüttelstrecken anhand bestehender Ausführungen untersucht. Ziel war es, auf Basis dieser Daten die wirksamste Form von Rüttelstreifen zu identifizieren.

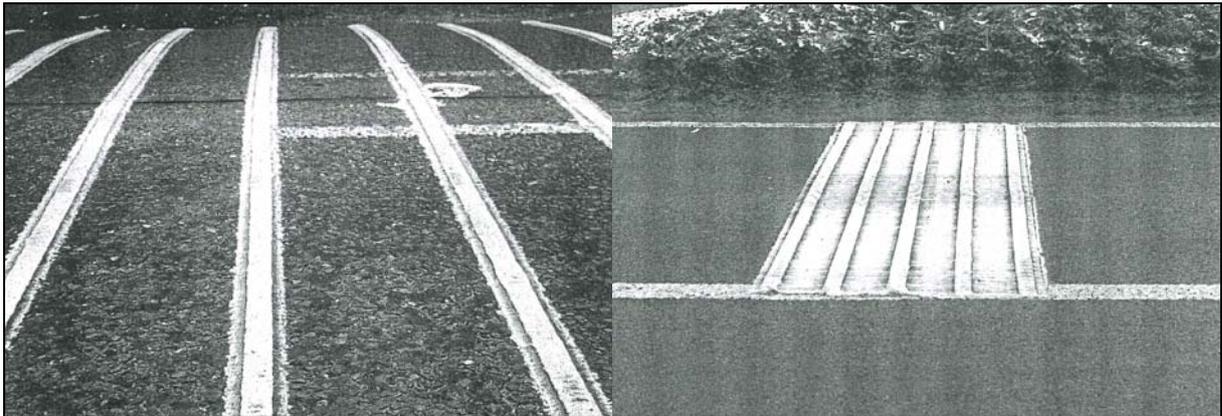


Bild 13: Rüttelstreifen aus thermoplastischem Material bei Hawley Village (links) und bei Bour-ton-on-the-Hill (rechts) (WEBSTER/LAVFIELD, 1993)

Nahezu 70 % der Untersuchungsstrecken befanden sich im Annäherungsbereich von Ortschaften. An diesen Stellen wurde i.d.R. die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 96 km/h (60 mph) auf 48 bzw. 64 km/h (30 bzw. 40 mph) reduziert. Die Rüttelstreifen bzw. Rüttelstrecken bestanden aus unterschiedlichen Materialien. Neben in Epoxydharz gebundenen, groben Gesteinskörnungen, Pflasterbelag und Thermoplasten waren zehn Untersuchungsstrecken aus Asphaltdeckschichten gröberer Körnung (Größtkorn 14 mm) hergestellt. Die Höhe der einzelnen Einbauten bzw. Applikationen variierte zwischen 0,5 cm und 2,0 cm. Die Abstände zwischen einzelnen Streifen betrugen zwischen 20 cm und 5 m. Zwischen einzelnen Streifengruppen konnten Abstände zwischen 12 Metern und 70 Metern festgestellt werden. Die laterale Ausdehnung der einzelnen Streifen war mit 6,0 cm bis 10,0 cm eher kurz gewählt. Bild 13 stellt beispielhaft zwei unterschiedliche Bauformen dar.

Die Wirkung der einzelnen Installationen wurde mittels Geschwindigkeitsmessungen vor und nach Umsetzung der Maßnahmen ermittelt. Bei nahezu allen Untersuchungsfeldern konnten Rückgänge der v_{85} verzeichnet werden. Die Geschwindigkeitsdifferenz lag zwischen 1,5 km/h Zunahme und bis zu 20 km/h Abnahme der Geschwindigkeit. Im Mittel konnte eine Geschwindigkeitsreduktion von 5 km/h beobachtet werden. Insbesondere die hohen Geschwindigkeitsabnahmen traten jedoch bei Maßnahmen auf, die nur kurze Zeit (weniger als drei Monate) installiert waren und dann zurückgebaut werden mussten. Es ist davon auszugehen, dass diese hohen Geschwindigkeitsreduktionen auf Messungen innerhalb der Eingewöhnungsphase zurückzuführen sind. Auf lange Sicht wird die Wirkung der Rüttelstreifen zwar schwächer (Gewöhnungseffekt), die Geschwindigkeitsreduktion wurde jedoch prinzipiell auch langfristig nachgewiesen. Die mittlere Geschwindigkeitsreduktion bei den Untersuchungsstrecken, die über längere Zeit betrieben wurden (24 Stück), lag bei 3,7 km/h. Der Gewöhnungseffekt konnte durch umfangreiche Geschwindigkeitsmessungen an ausgewählten Strecken bestätigt und quantifiziert werden (vgl. Tab. 2).

Tage nach Installation	Geschwindigkeitsänderung	
	ΔV_{85} [km/h]	ΔV_m [km/h]
4	-12,9	-18,2
19	-12,9	-16,9
53	-9,7	-11,4
84	-9,7	-10,8
115	-6,4	-10,6
143	-7,2	-9,5
178	-5,6	-8,9
281	-8,9	-8,9

Tage nach Installation	Geschwindigkeitsänderung	
	ΔV_{85} [km/h]	ΔV_m [km/h]
7	-6,4	-7,6
30	-4,0	-5,8
90	-5,3	-5,6
270	-3,9	-6,3
365	-4,0	-4,8
730	-5,8	-6,0
1095	-4,5	-5,6

Tab. 2: Geschwindigkeitsreduktion über die Zeit, Rüttelstrecke bei Dorket Head (links) und bei Hawley (rechts) (nach WEBSTER/LAVFIELD, 1993)

Neben dem Geschwindigkeitsverhalten wurde an ausgewählten Strecken sowohl das Unfallgeschehen als auch sonstiges Fahrerverhalten analysiert. Zur Unfallanalyse wurden 11 der 36 Strecken herangezogen. Bei nahezu jeder der 11 Strecken wurde ein Vorher-Zeitraum von drei Jahren mit einem Nachher-Zeitraum von acht Monaten bis zu vier Jahren verglichen. Sieben Strecken verzeichneten einen Rückgang der Personenschäden, während jeweils zwei Strecken im Unfallgeschehen stagnierten bzw. leicht zunahmen. Insgesamt konnte ein durchschnittlicher Rückgang der Personenschäden um 27 % ermittelt werden. Im Bericht von WEBSTER/LAVFIELD (1993) wird zusätzlich auf den ebenfalls am TRL durchgeführte Untersuchung von SUMNER/SHIPPEY (1977) verwiesen, die sogar von einer Reduktion der Unfälle von bis zu 39 % berichtet .

Bei den untersuchten Strecken wurden die Streifen entweder über die gesamte Fahrbahn oder über einen Fahrstreifen aufgebracht. Bei den Streifen, die lediglich über einen Fahrstreifen aufgebracht wurden, konnten teilweise Umfahrungen der Streifen beobachtet werden. Darüber hinaus wurde mit dem so genannten „Cattle-Grid-Effect“ ein weiteres Fahrmanöver beobachtet, das gegenläufig zu der Intention von Rüttelstreifen steht: Zur Minimierung der Vibrationen beschleunigten vereinzelte Fahrer und fuhren so mit einer wesentlich höheren Geschwindigkeit über die Streifen als vorher. Plötzliches starkes Abbremsen konnte dagegen nicht beobachtet werden.

Die langjährigen Erfahrungen in Großbritannien mit Rüttelstreifen zeigen, dass Probleme mit der Geräuschemission auftreten können. Während der Untersuchung des TRL musste jede fünfte Untersuchungsstrecke auf Grund von starken Anwohnerbe-

schwerden über die erhöhte Lärmemission zurückgebaut werden. An einzelnen Strecken wurden Schallpegelmessungen vorgenommen und ergaben eine Erhöhung um 1,2 dB(A) bis zu 6,0 dB(A). Als Ergebnis der Lärmmessungen wird empfohlen, die Rüttelstreifen nicht zu nah an Wohngebieten aufzubringen. WEBSTER/LAVFIELD (1993) schränken diese Aussage jedoch selber ein: *„Der Abstand der Rüttelstreifen zur Wohnbebauung ist wichtig, um zu ermitteln, ob es zu Beschwerden kommt. Die Geographie der Umgebung ist ebenfalls von entscheidender Bedeutung. Einige Bau- lastträger empfehlen den Einsatz der Rüttelstreifen auf Grund der Lärmemission nicht unter 250 Metern Entfernung von einzelnen Häusern. [...] Allerdings kann der Lärm von Rüttelstreifen auch bei größeren Abständen eine Beeinträchtigung darstellen. Es wurde davon berichtet, dass Rüttelstreifen auf Grund von Lärmbelästigung entfernt werden mussten, obwohl die nächste Bebauung 800 bis 1.500 Meter entfernt lag.“*

Abschließend kommt die Studie von WEBSTER/LAVFIELD (1993) zu dem Schluss, dass Rüttelstreifen ein probates und vor allem kostengünstiges Mittel darstellen, um die Verkehrssicherheit lokal zu verbessern. Im Wesentlichen wird die Hauptwirkung der Streifen von WEBSTER/LAVFIELD (1993) allerdings nicht in der geschwindigkeitsdämpfenden Wirkung, sondern in der Aufmerksamkeitssteigerung gesehen. Die beobachtete Problematik der Lärmemission führt zu der Forderung nach Weiterentwicklung und dezidierter Untersuchung dieses Phänomens.

Im Jahr 2002 veröffentlichte das TRL eine Studie, die diesen Forderungen nachgeht. Ziel der Arbeit von WATTS et al. (2002) ist die Entwicklung einer neuartigen Fahrbahnoberfläche als Ersatz für die herkömmlichen Rüttelstreifen, die sowohl größere Wirkung hinsichtlich der Geschwindigkeitsreduktion als auch geringere externe Schallpegel erzeugt.

Grundlage des Entwurfsdesigns von WATTS et al. (2002) ist die Annahme, dass lediglich die hochfrequenten Anregungen zu einer merklichen Steigerung der externen Schallimmission führen. Diese sollten demnach vermieden werden. Die Hauptanregung im Innenraum soll gemäß WATTS et al. (2002) durch horizontale Schwingungen erzeugt werden. Diese werden derzeit kaum durch die Fahrzeugindustrie gedämpft und setzen im Fahrzeuginnenraum eine merkliche Vibration und Schallpegelerhöhung frei. Als zielführende Anregungsform wurde ein Sinusverlauf der Oberfläche („Rippleprint“) angenommen. In messtechnischen Vorversuchen wurden in Zusammenarbeit mit Industriepartnern Oberflächen mit unterschiedlichen Wellenlängen zwischen 5 cm und 4,4 Metern hergestellt und mit einem ausgewählten Fahrzeugkollektiv überfahren. Diese Fahrten wurden mit Schwingungs- und Akustikmessungen

im Fahrzeuginneren und mit externen Schallpegelmessungen im Abstand von 7,5 und 30 Metern durchgeführt.

Zusätzlich wurden Untersuchungen zum Handling, zum Fahrerverhalten und psychologische Tests zum Schwingungs- und Schallempfinden durchgeführt. Die Länge der einzelnen Testbeläge betrug 20 Meter und die Breite einen Meter, so dass eine Spur des Fahrzeugs angeregt wurde. Das endgültige Design wurde abschließend auf voller Breite von 3,00 Metern getestet. Die maximale Höhe des Rippleprints betrug bei allen Versuchen zwischen 0,4 cm und 0,84 cm.

Als Bewertungshintergrund der messtechnischen Untersuchung wurden die maximalen Werte des A bewerteten Innenraumpegels (über 0,5 Sekunden gemittelt), der RMS-Wert der Innenraumvibrationen und die maximalen Werte des A bewerteten Außenpegels im Abstand von 7,5 und 30 Metern (über 0,5 Sekunden gemittelt) herangezogen. Zusätzlich zu der messtechnischen Untersuchung wurden Probandenbewertungen der Außen- und Fahrzeuginnengeräusche durchgeführt.

Auf Basis der durchgeführten messtechnischen Analysen und den Probandenbewertungen wurde eine optimierte Bauform des „Rippleprints“ mit einer Länge von 22 Metern auf zwei Straßen im öffentlichen Verkehrsraum aufgebracht. Auf beiden Straßen wurde die zulässige Höchstgeschwindigkeit von ca. 64 km/h (40 mph) auf ca. 48 km/h (30 mph) reduziert. Die Versuchsfläche wurde rot eingefärbt, um eine zusätzliche visuelle Unterstützung der Wirkung hervorzurufen.

In Anlehnung an die messtechnischen Vorversuche wurden externe Schallpegelmessungen durchgeführt. In einem Vergleich zwischen „Vorher“ und „Nachher“ wurden Änderungen zwischen +7,8 dB(A) und -5,3 dB(A) an den nächst gelegenen Hausfassaden (Entfernung zur Teststrecke 13 bzw. 22 Meter) gemessen. Eine exakte Zuordnung der Geräuschemissionen zu den Versuchsfeldern konnte gemäß WATTS et al. (2002) nicht erfolgen. Die starken Schwankungen der Ergebnisse werden auf meteorologische Effekte zurückgeführt. Eine zufrieden stellende Aussage zur Änderung der Emissionsbelastung durch den neu entwickelten „Rippleprint“ war daher nicht möglich.

Zusätzlich zur Immissionsmessung wurde die verkehrliche Wirkung mittels Geschwindigkeitsmessungen überprüft. Im Vergleich zum Zeitraum vor Maßnahmenumsetzung konnte an beiden Versuchsfeldern ein Rückgang sowohl der mittleren Geschwindigkeit als auch der v_{85} beobachtet werden. Die Reduktion lag zwischen 0,3 km/h und 2,6 km/h. Der Anteil der Geschwindigkeitsübertreter sank ebenfalls leicht von 60 % auf 56 % bzw. von 55 % auf 52 %. Erweiterte Untersuchungen der

Polizei, bei denen lediglich die frei fahrenden Verkehrsteilnehmer mit Radarpistolen gemessen wurden, kamen auf eine Reduktion der Geschwindigkeitsübertreter von 61 % auf 33 % bzw. einen mittleren Geschwindigkeitsrückgang von ca. 5,3 bzw. 6,1 km/h. Auf Grund einer fehlenden Beschreibung beider Messmethoden sowie möglicher Verfälschungen durch eine selektive Auswahl bei der Messung durch die Polizei, können die Unterschiede in den Ergebnissen nicht zuverlässig interpretiert werden. Auf Grund der deutlich größeren Stichprobe der wissenschaftlichen Untersuchung (11.000 bzw. 40.000 Messwerte gegenüber 151 bzw. 185) ist eher von einer geringen verkehrlichen Wirkung auszugehen.

Neben den messtechnischen Untersuchungen des Verkehrskollektivs und der Schallemissionen wurde eine Befragung der Anwohner, der Passanten und ausgewählter Verkehrsteilnehmer durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Befragungen sind inkonsistent und spiegeln das unterschiedliche subjektive Empfinden einzelner Personen wider. Beispielsweise wurde die Geräuschemission von einzelnen Anwohnern als stark angestiegen und von anderen als leicht rückgängig bezeichnet. Auf Grund des geringen Stichprobenumfangs wird auf die Ergebnisse der Umfrage nicht weiter eingegangen.

2.2.6 Einsatz von Rüttelstreifen in den Vereinigten Staaten von Amerika

In den USA ist der Einsatz von Rüttelstreifen ähnlich verbreitet wie in Großbritannien. Die Recherche bei den Verkehrsministerien der einzelnen Bundesstaaten der USA (vgl. Bild 14) ergab, dass in nahezu jedem Staat profilierte Randmarkierungen und temporäre Rüttelstreifen in Arbeitsstellen eingesetzt werden.

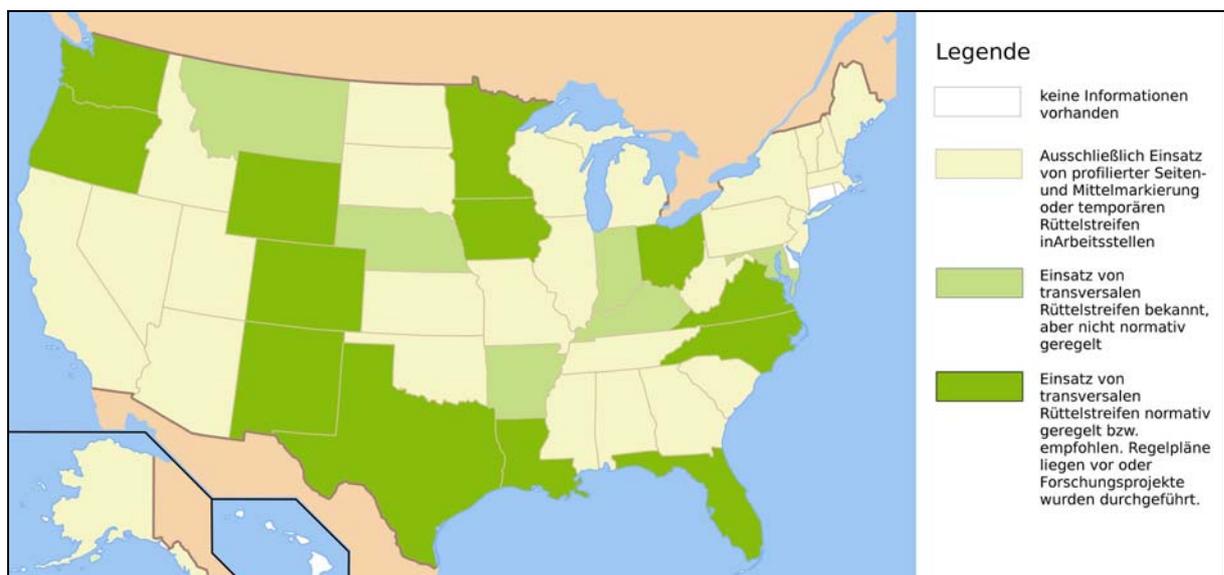


Bild 14: Übersichtsplan zum Einsatz von Rüttelstreifen in den Vereinigten Staaten von Amerika (ohne Maßstab)

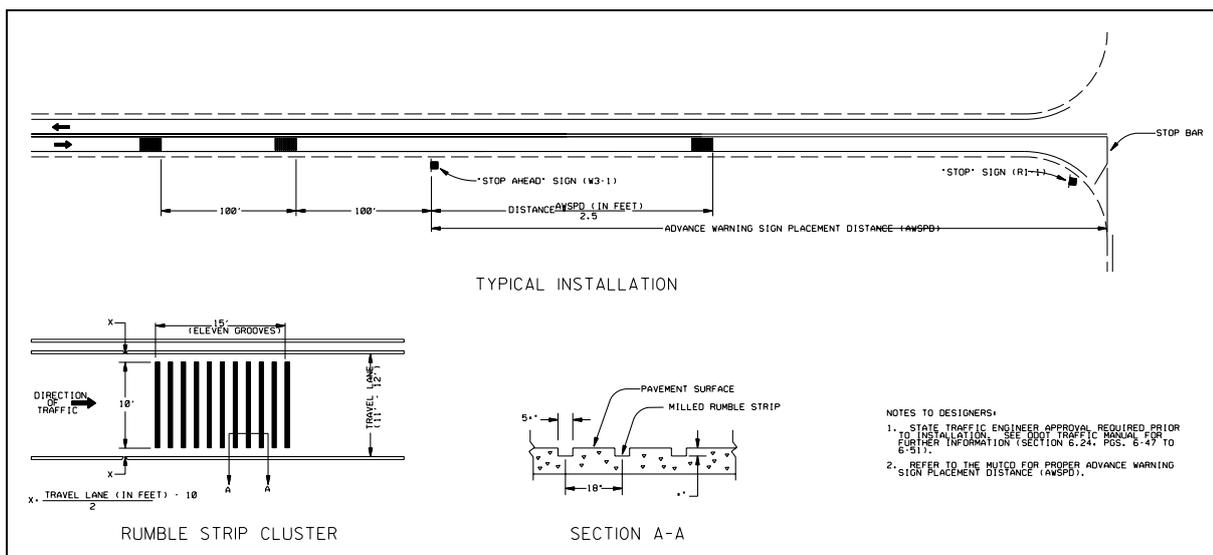


Bild 15: Auszug aus Regelzeichnungen zur Anordnung von Rüttelstreifen in Oregon

Transversale Rüttelstreifen vor Kurven oder Kreuzungen, wie sie im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, werden nicht einheitlich verwendet. In sechs Staaten (Arkansas, Indiana, Kentucky, Maryland, Montana, Nebraska) werden transversale Rüttelstreifen eingesetzt, ohne dass deren Einsatz ausdrücklich vom jeweiligen Verkehrsministerium empfohlen oder geregelt wird. In 13 Staaten (Colorado, Florida, Iowa, Louisiana, Minnesota, New Mexiko, North Carolina, Ohio, Oregon, Texas, Virginia, Washington, Wyoming) existieren entweder Regelzeichnungen, der Einsatz wird im „Road-Safety-Plan“ ausdrücklich als Maßnahme zur Erhöhung der Verkehrssicherheit aufgeführt, oder es wurden wissenschaftliche Untersuchungen zum Einsatz und zur Wirksamkeit von Rüttelstreifen durchgeführt.

Die Regelung zum Einsatz und zur Anordnung der Rüttelstreifen ist in den acht oben genannten Bundesstaaten nahezu einheitlich. Der Einsatz wird vorrangig vor T-Kreuzungen oder Bahnübergängen empfohlen. Die Rüttelstreifen werden in mehreren Paketen zu jeweils fünf bis zwölf Streifen vor der Gefahrenstelle aufgebracht. Unterschieden wird zwischen gefrästen und erhabenen Rüttelstreifen, die aus vorgefertigten thermoplastischen Elementen oder aus Asphaltapplikationen bestehen. Beispielhaft sind Regelpläne der Staaten Colorado, Florida und Oregon in Bild 15 und im Anhang B dargestellt. In den aufgeführten Regelplänen werden die Rüttelstreifen im Abstand von 30 cm, 45 cm bzw. bei thermoplastischen Fertigteilen 150 cm aufgebracht. Der Abstand zwischen den einzelnen Rüttelstreifenpaketen variiert zwischen 23 Metern (75 feet) und 92 Metern (300 feet). Das letzte Streifenpaket sollte je nach Bundesstaat nicht näher als 92 Meter (300 feet) bis 153 Meter (500 feet) vor der Kreuzung bzw. dem Beginn der Kurve liegen. Grundsätzlich werden die Rüttelstreifenpakete an der Lage der Kreuzung/Kurve bzw. der vorwarnenden Beschilderung ausgerichtet. Die Streifen werden in der Fahrspur aufgebracht, wobei darauf zu ach-

ten ist, dass zwischen Rüttelstreifen und Rand- bzw. Mittelmarkierung ein ca. 5 cm breiter Bereich freizuhalten ist. Die Abmessungen einzelner Streifen variieren je nach Bundesstaat und Ausführungsart kaum. In der Regel wird eine Höhe bzw. Tiefe von 1,27 cm (0,5 inch) und eine Breite zwischen 5 cm (2 inch) und 15 cm (6 inch) empfohlen. Die Geschwindigkeitsreduktion durch Rüttelstreifen ist nach RAY et al. (2008) signifikant und liegt in der Größenordnung von 2,1 km/h (1,3 mph). THOMPSON/BURRIS/CARLSON (2005) stellten in einem Vorher-Nachher-Vergleich an fünf Kreuzungen ebenfalls signifikante, jedoch geringe Geschwindigkeitsreduktionen fest.⁶ HARDER/BLOOMFIELD/CHIHAK (2006) beobachteten in Abhängigkeit von Fahrzeugart und Kreuzungstyp sogar Geschwindigkeitsreduktionen von 5,1 km/h (3,2 mph) bis zu 8,8 km/h (5,5 mph). Auf Basis dieser Ergebnisse empfehlen sie insbesondere für unsignalisierte Knotenpunkte, an denen die Hauptfahrbahn schlecht einsehbar ist, den Einsatz von Rüttelstreifen.

Die Aussagen zum Sicherheitsgewinn durch Rüttelstreifen sind inkonsistent. Nach HARWOOD (1993) besteht das Potential, Unfälle zu reduzieren, eine Quantifizierung wird jedoch nicht vorgenommen.⁷ Im Rahmen einer Studie aus Louisiana wurden zwischen 1982 und 1986 mehrere Kreuzungen einer Vorher-Nachher-Untersuchung unterzogen. Nach MOORE (1987) war eine leichte Reduzierung der Unfallzahlen durch die Installation von Rüttelstreifen vor unsignalisierten Kreuzungen zu beobachten. Während bei den tödlichen Unfällen bzw. bei Unfällen mit Verletzten insgesamt lediglich ein geringer Effekt nachweisbar war, konnten Unfälle bei schlechten Sichtverhältnissen deutlich reduziert werden (Nachtunfälle um 50 % und Schlechtwetterunfälle um 35 %). Nach FREEMAN et al. (2008) ist eine Reduktion bestimmter Unfalltypen an unsignalisierten Kreuzungen von bis zu 50 % möglich. FREEMAN et al. (2008) führen dies vor allem auf den Anteil an Fahrzeugen zurück, die der Vorfahrts-Beschilderung („Vorfahrt Achten“ bzw. „Stopp“) folgen, deren Anteil um bis zu 30 % anstieg. BAZZARI (2006) konnte bei der Unfallanalyse einer Kreuzung in North Carolina sogar eine Reduktion der Unfälle um 60 % nachweisen. In den Bundesstaaten, die den Einsatz von Rüttelstreifen im „Road-Safety-Plan“ empfehlen, werden Erwartungswerte hinsichtlich einer Unfallreduktion (so genannte *Crash Reduction Factor - CRF*) genannt. Diese liegen bspw. in Illinois bei 25 % (IDOT, 2006) und in North Ca-

⁶ Die Geschwindigkeitsreduktionen schwanken je nach Tageszeit bzw. Wochentag und Untersuchungsstrecke zwischen 1,0 km/h und 8,0 km/h, werden jedoch von den Verfassern als größtenteils gering eingestuft. Diese Bewertung basiert auf der Annahme, dass neben statistischer Signifikanz auch eine ausreichende Reduktion vorliegen muss. Diese wurde in der Arbeit von THOMPSON/BURRIS/CARLSON (2005) auf mindestens 6,4 km/h (4 mph) festgelegt.

⁷ HERWOOD (1993) stellte in seiner Arbeit unterschiedlich starke Reduktionen des Unfallgeschehens zwischen 14 % und 100 % fest.

rolina bei 30 % (NCDOT, 2007). Auf welche Daten oder Untersuchungen sich diese CRFs stützen, konnte im Rahmen der Recherche nicht eruiert werden.

Die Vielzahl der vorgestellten Studien und Projekte sowie die unterschiedlichen Ausführungsempfehlungen und Bewertungen der Wirkung von Rüttelstreifen zeigen deutlich, dass transversale Rüttelstreifen ein hohes Potential zur Unfallreduktion aufweisen, ein eindeutiger Beweis hinsichtlich ihrer Wirkung bis dato jedoch nicht erbracht werden konnte. Dies kann zum einen daran liegen, dass das Wirkungspotential in starkem Maße von den jeweiligen äußeren Gegebenheiten des Einsatzorts abhängig ist, und zum anderen daran, dass die Ausführungsarten stark variieren und eher experimentellen Charakter aufweisen, also auf Erfahrungen und Annahmen einzelner Ingenieure basieren.

Die ausführlichsten Untersuchungen zum Einsatz von Rüttelstreifen in den Vereinigten Staaten von Amerika sind in den Jahren 2000 bis 2005 vom Department of Transportation in Texas und vom Department of Transportation in Minnesota durchgeführt worden. Die Forschungsaktivität in Minnesota wurde 2005 durch eine Statusquo-Analyse von CORKLE /MONTEBELLO/MARTI (2001) eingeleitet, in der zum einen der Einsatz von Rüttelstreifen in allen 87 Verwaltungsbezirken Minnesotas erhoben und zum anderen der Bedarf an weiteren Forschungsprojekten insbesondere zur Wirkung von transversalen Rüttelstreifen aufgezeigt wurde. Auf Grundlage dieses Projekts wurde in Minnesota das Verhalten an unsignalisierten Knotenpunkten mit Stopp-Schildern von aufmerksamen und unaufmerksamen Fahrern sowohl mit als auch ohne transversalen Rüttelstreifen gegenübergestellt (vgl. HARDER/BLOOMFIELD/CHIHAK, 2001 und HARDER/BLOOMFIELD, 2005). Die dreiteilige Studie wurde durch eine In-depth-Studie (vgl. HARDER/BLOOMFIELD/CHIHAK, 2006) abgeschlossen. In den ersten beiden Projekten von HARDER/BLOOMFIELD/CHIHAK (2001) und HARDER/BLOOMFIELD (2005) wurde die Wirkung von unterschiedlichen Anordnungen von transversalen Rüttelstreifen und die Wirkung auf übermüdete Fahrer in Simulatorstudien analysiert. Die Rüttelstreifen führten unabhängig von ihrer Anordnung zu einer erhöhten Aufmerksamkeit, einer signifikanten Geschwindigkeitsreduktion und einem besseren Anhalteverhalten an den Kreuzungen. Diese Ergebnisse wurden durch die Untersuchung im Realverkehr bestätigt. HARDER/BLOOMFIELD/CHIHAK (2006) beobachteten eine mittlere Geschwindigkeitsreduktion von 3 bis 8 km/h (2 bis 5 mph) sowie ein positiveres Verzögerungsverhalten im Annäherungsbereich und Anhalteverhalten an der Kreuzung. Die Fahrer verzögern früher und stärker, und der Anteil an Fahrern, die die Vorfahrt missachten und ohne Anhalten das Stoppschild überfahren, sank signifikant.

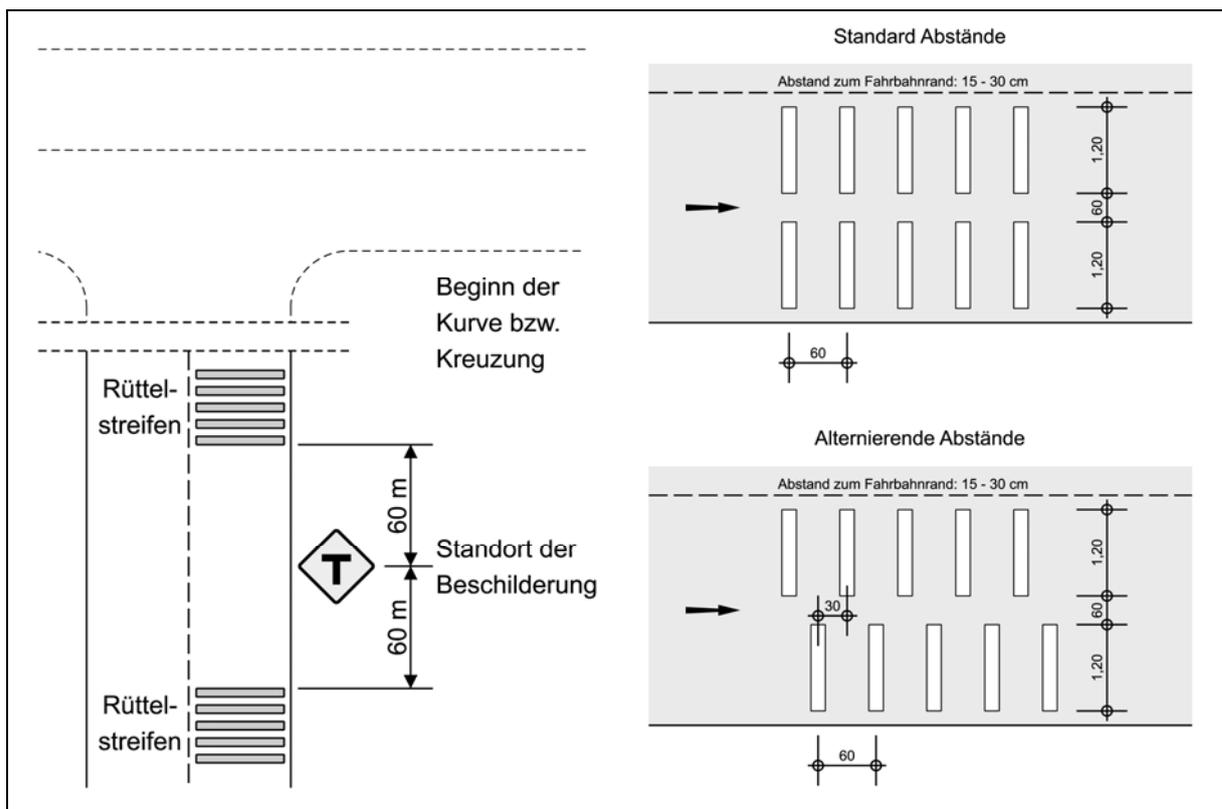


Bild 16: Anordnung der Rüttelstreifen in Texas (USA): örtliche Lage der Rüttelstreifenpakete (links) und Ausführungsdetails der Rüttelstreifenpakete (rechts) (nach MILES/CARLSON/PRATT, 2005)

Auf Grund der Tatsache, dass viele DOTs⁸ auf eine Studie von MILES/CARLSON/PRATT (2005) aus Texas Bezug nehmen, werden die wichtigsten Erkenntnisse dieser Untersuchung im Weiteren ausführlich vorgestellt. MILES/CARLSON/PRATT (2005) untersuchten neben profilierten Randmarkierungen die geschwindigkeitsdämpfende Wirkung von transversalen Rüttelstreifen vor unsignalisierten Knotenpunkten und vor Kurven. Zum Einsatz kamen bei den Untersuchungen vorgefertigte Rüttelstreifen aus thermoplastischem Material, die auf die Straße aufgeklebt wurden. Die Höhe der Streifen lag bei 1 cm (0,4 inch) und die laterale Ausdehnung bei ca. 15 cm (6,3 inch). Die Streifen wurden gemäß Bild 16 aufgebracht. Für den Anwendungsfall „Knotenpunkt“ wurden neun und für den Fall „Kurve“ fünf Untersuchungsstrecken ausgewählt und die Wirkung der Rüttelstreifen mittels Vorher-Nachher-Messungen der Geschwindigkeit und der Verzögerung zwischen Ankündigung und Gefahrenstelle analysiert. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit betrug bei allen Strecken ca. 100 km/h (65 mph) und die Verkehrsbelastung war mit unter 3.000 Kfz/24h niedrig.

⁸ DOT: Department of Transportation; entspricht in Deutschland dem Verkehrsministerium.

Zwischen der Vorher-Messung und der Nachher-Messung lag jeweils ein Zeitraum von drei bis sechs Monaten. Die Dauer der Messungen betrug jeweils ca. drei Tage. Die Messdatenerhebung wurde differenziert nach Wetter, Tageszeit und Wochentagen durchgeführt. Lediglich „frei fahrende“ Fahrzeuge mit einer Zeitlücke größer als 15 Sekunden wurden berücksichtigt. Zusätzlich zur Erhebung der Geschwindigkeitsdaten wurde das Fahrerverhalten mit Hilfe von Videoaufnahmen analysiert. Im Vordergrund stand dabei das Spurhalteverhalten auf Höhe der Rüttelstreifen, d.h., ob und wie diese über- bzw. umfahren wurden.

Sowohl an den untersuchten Knotenpunkten als auch in den Kurven waren die Ergebnisse der Untersuchungen nicht konsistent. Die Geschwindigkeit an den Knotenpunkten sank zwar in allen Fällen signifikant, bei sechs Kreuzungen bewegte sich diese Reduktion jedoch unter 5 km/h (3 mph). Lediglich bei drei Knotenpunkten konnten größere Geschwindigkeitsreduktionen von bis zu 10 km/h (6 mph) beobachtet werden. Das Ausmaß der Geschwindigkeitsänderung variierte dabei je nach Entfernung zur Kreuzung und je nach Tageszeit. Die Ergebnisse der untersuchten Kurven stellen sich analog dar. Während lediglich bei einer Kurve Geschwindigkeitsreduktionen von über 17 km/h (11 mph) erreicht wurden, änderte sich die Geschwindigkeit und das Verzögerungsverhalten bei den übrigen vier Kurven nur geringfügig (unter 3 km/h; 2 mph).

Zusätzlich zum Geschwindigkeits- und Verzögerungsverhalten wurde das allgemeine Fahrerverhalten beobachtet. An keiner der untersuchten Stellen konnten ungewöhnliche oder sogar sicherheitskritische Fahrmanöver beobachtet werden. Es kam zu keinerlei abrupten bzw. übermäßig starken Bremsmanövern, „so dass die Installation von transversalen Rüttelstreifen keinerlei sprunghaften/unberechenbare Fahrmanöver hervorrufen.“ (MILES/CARLSON/PRATT, 2005) Ausweichmanöver wurden an zwei Untersuchungsstrecken differenziert nach Fahrzeugtyp und Art des Ausweichens analysiert. Dabei wurde unterschieden zwischen Pkw, Lkw, Pickups mit Anhängern und motorisierten Zweirädern bzw. zwischen vollständigem und halbseitigem Ausweichen (jeweils differenziert nach rechts und links). An allen Untersuchungsstellen konnten niedrige Anteile an halbseitigen bzw. vollständigen Ausweichmanövern beobachtet werden. An einer Strecke überfuhren 82 % und an der anderen Strecke 93 % die Rüttelstreifen vollständig. Die übrigen Fahrzeuge fuhren halbseitig oder vollständig an den Rüttelstreifen vorbei.⁹ Die erste Strecke verfügte über einen Sei-

⁹ Der Anteil insbesondere an halbseitigen Umfahrungen lässt sich u.a. auf das Design der Rüttelstreifen zurückführen: Während bei den europäischen Ausführungsvarianten vorrangig die gesamte Fahrbahn bzw. Fahrspur mit Rüttelstreifen überbaut wird, kommen in den USA überwiegend Fertigteile

tenstreifen, so dass dort vorrangig rechtsseitige Ausweichmanöver beobachtet wurden. Bei den Zweirädern wählten 100 % dieses Manöver. An der Strecke ohne Seitenstreifen konnten keinerlei Ausweichmanöver durch Motorräder beobachtet werden. Dieser Sachverhalt sowie die starke Streuung innerhalb aller beobachteten Kenngrößen sind ein Indiz für die starke Abhängigkeit der Wirkung von Rüttelstreifen von den äußeren Gegebenheiten, wie Querschnittsgestaltung, Kurvigkeit, Sichtweite etc.

Auch wenn die Ergebnisse der Untersuchung nicht eindeutig waren und die Wirkung auf das Geschwindigkeitsverhalten von den Autoren als tendenziell niedrig eingestuft wurde, stellen MILES/CARLSON/PRATT (2005) transversale Rüttelstreifen auf Basis der Erkenntnisse aus dieser und vorangegangener Studien abschließend als kostengünstige Maßnahme zur Erhöhung der Verkehrssicherheit dar. Vor allem, da keine negativen Effekte beobachtet wurden, wird der Einsatz von Rüttelstreifen vor unsignalisierten Knotenpunkten und unfallträchtigen Kurven von den Verfassern empfohlen. Der Einsatz setzt jedoch zwingend eine Unfallanalyse für den potentiellen Einsatzort voraus und bedarf darüber hinaus weiterer Untersuchungen von Kurven und Knotenpunkten im Vorher-Nachher-Vergleich und der Langzeitbegleitung solcher Maßnahmen zur Verifizierung der Ergebnisse dieser Studie.

2.2.7 Einsatz von Rüttelstreifen in weiteren Ländern

Neben den vorgestellten Studien und Anwendungsempfehlungen aus Deutschland, Europa und den USA werden Rüttelstreifen in vielen anderen Ländern als mögliches Mittel zur Erhöhung der Aufmerksamkeit oder der Geschwindigkeitsreduktion angesehen. Weitere Anwendungsfälle sind bspw. aus Irland, Australien, Israel oder Kanada (vgl. bspw. BAHAR et al., 2005 oder CROWLEY, 1993) bekannt. Da sich die Erkenntnisse und auch die Ausführungsdetails vielfach ähneln, wird auf weitere Ausführungen zum Einsatz von Rüttelstreifen in diesen Ländern verzichtet.

2.3 Zusammenfassung des aktuellen Stands der Technik

Im Rahmen der Analyse ausgewiesener Forschungsliteratur und der Befragung der anwendenden Straßenbauverwaltungen wurde der aktuelle Stand der Technik zum Einsatz von Rüttelstreifen zusammengefasst. Die Recherchen haben viele Gemeinsamkeiten, aber auch Unterschiede im Einsatz von Rüttelstreifen ergeben.

zum Einsatz, die mit einer Länge von 1,2 Metern (4 feet) in der Mitte der Fahrspur einen Streifen von 30 cm (1 foot) Breite frei lassen, der von den Umfahrem genutzt wird (vgl. Bild 16).

Allgemein werden drei wesentliche Rüttelstreifenarten unterschieden:

- Temporäre Rüttel Elemente, die vornehmlich in Baustellen eingesetzt werden¹⁰,
- Fahrbahnbegleitende Rüttelstreifen¹¹ und
- Transversale Rüttelstreifen, die dauerhaft quer zur Fahrbahn aufgebracht werden.¹²

Der Einsatz von Rüttelstreifen basiert dabei nur teilweise auf wissenschaftlichen Untersuchungen. Zum größten Teil werden Rüttelstreifen entweder experimentell eingesetzt oder bestehende Ausführungsvarianten aus benachbarten Ländern adaptiert. Während insbesondere die fahrbahnbegleitenden Rüttelstreifen – unumstritten in ihrer positiven Wirkung auf die Verkehrssicherheit – weite Verbreitung gefunden haben und in zahlreichen wissenschaftlichen Studien weiter optimiert werden, sind die Ergebnisse zu Rüttel Elementen, die quer zur Fahrbahn verlegt werden, weniger konsistent.

Transversale Rüttelstreifen (TRS) werden eingesetzt, um die Geschwindigkeit der Kraftfahrer zu reduzieren und ihre Aufmerksamkeit auf die vorausliegende Situation zu erhöhen. In allen betrachteten Ländern werden TRS vor gefährlichen Kreuzungen oder Kurven eingesetzt, die besonders hohe Unfallzahlen aufweisen. Rüttelstreifen zeichnen sich dabei insbesondere durch den geringen arbeitstechnischen, zeitlichen und finanziellen Aufwand ihrer Installation aus.

Geometrisch bestehen die TRS meist aus gefrästen oder aufgetragenen Streifen mit einer lateralen Ausdehnung zwischen wenigen Zentimetern und mehreren Metern. Am häufigsten sind Streifenbreiten von ca. 50 cm vertreten. Diese werden in Abständen zwischen wenigen Zentimetern und mehreren Metern zueinander installiert. Die Höhe bzw. Tiefe der Streifen liegt zwischen wenigen Millimetern und drei Zentimetern. Am häufigsten konnte im Rahmen des Forschungsüberblicks eine Anordnung von mehreren Paketen – bestehend aus drei bis zehn Streifen geringerer Breite – mit einem Abstand von zehn bis hundert Metern beobachtet werden. Die Abstände zwischen den TRS sind dabei entweder konstant, geschwindigkeitsabhängig oder abhängig von der Distanz zur Gefahrenstelle. In den meisten Ländern wird ein Min-

¹⁰ Vgl. bspw. STEINAUER et al. (2004), BAIER et al. (2005), CARLSON/MILES (2003), MEYER (2006).

¹¹ Vgl. bspw. STEINAUER (1991), TIEFENTHALER/HAMERLE/KAMMERINGER (2002), MILES/CARLSON/PRATT (2005).

¹² Vgl. bspw. MAIER (1991), BRILON (2001), BERGER (1997), WEBSTER/LAVFIELD (1993), MILES/CARLSON/PRATT (2005).

destabstand von 50 Metern, vereinzelt bis zu 150 Metern zwischen den letzten Rüttelstreifen und der eigentlichen Gefahrenstelle gefordert.

Die Wirkung der TRS variiert je nach Studie und Anwendungsfall erheblich. Während die vorrangig erwünschte Wirkung in einer Reduktion der Unfallzahlen liegt, erfolgen die meisten Wirksamkeitsuntersuchungen auf Basis von Geschwindigkeitsmessungen. Es wird erwartet, dass durch eine Reduktion der Geschwindigkeit auch das Unfallgeschehen sinkt. Wissenschaftliche Studien und Untersuchungen der Straßenbehörden haben nachgewiesen, dass Geschwindigkeitsreduktionen bis zu 11 km/h möglich sind. Die meisten Untersuchungen dieser Art sind jedoch nicht statistisch abgesichert bzw. für eine weitere wissenschaftliche Bewertung nicht hinreichend dokumentiert. Hinsichtlich der direkten Wirkung von TRS auf das Unfallgeschehen sind weniger Untersuchungen durchgeführt worden. Die häufigsten Angaben zur unfallreduzierenden Wirkung von TRS finden sich in Quellen aus den USA. Hier wird von einer mittleren Reduktion der Unfälle im Bereich von 25 % ausgegangen. Einzelne Untersuchungen stellten sogar Rückgänge von bis zu 60 % fest.

Neben den Vorzügen von Rüttelstreifen wurde in einigen Ländern auch von negativen Erfahrungen berichtet bzw. konnten einzelne Probleme nicht abschließend geklärt werden. Dies betrifft vor allem unerwünschtes Fahrerverhalten, wie plötzliches Abbremsen, Erhöhung der Geschwindigkeit zur Minimierung des Diskomforts sowie Umfahren der Rüttelstreifen. Ein sehr unterschiedlich beschriebenes Problem stellt die externe Lärmemission durch die Rüttel Elemente dar. Während in den USA kaum Einschränkungen bzgl. des Einsatzes der Elemente gemacht werden, mussten in stärker zersiedelten Gebieten, wie beispielsweise England, einige der Rüttel Elemente auf Grund von Anwohnerbeschwerden zurückgebaut werden. Messtechnische Überprüfungen zeigten jedoch keine oder nur geringe Änderungen des Schallpegels. Anwohnerreaktionen zeigten deutliche Unterschiede in der subjektiven Bewertung. Einige Anwohner empfanden eine erhebliche subjektive Lärmzunahme, andere eine Belästigung durch die Frequenz der auftretenden Geräusche während wieder andere die Beeinträchtigung als gering erachteten.

Zusammenfassend haben die Literaturrecherche und die Befragung der Behörden gezeigt, dass Rüttelstreifen das Potential aufweisen, die Geschwindigkeitwahl und das Unfallgeschehen vor Unstetigkeitsstellen positiv zu beeinflussen. Die Vielzahl vorhandener Ausführungsvarianten und Untersuchungen zu TRS belegt jedoch den zumeist experimentellen Charakter des Einsatzes von Rüttelstreifen und die fehlenden Kenntnisse zu den tatsächlichen technischen wie psychologischen Zusammenhängen.

3 Psychologische Grundlagen

Die ersten Straßenentwürfe basierten ausschließlich auf technischen und ökonomischen Grundlagen. Im Vordergrund standen Aspekte der Fahrdynamik, der Haltbarkeit und des Aufwands zur Herstellung der Straße. *„Die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten ist eine Gerade.“* Von diesem Grundsatz wurde nur abgewichen, um topographischen Gegebenheiten auszuweichen, die einen überproportionalen Arbeitsaufwand bedeutet hätten. Insbesondere in flachen unbewohnten Gegenden ist dieses Entwurfsprinzip noch heute zu erkennen (siehe bspw. Highways in den USA). Modernere Entwurfsansätze haben erkannt, dass der Fahrer mit seinen psychologischen Eigenschaften stärker bei der Planung und dem Bau von Straßen berücksichtigt werden muss. In den derzeit noch gültigen Richtlinien wie der *Richtlinie für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung (RAS-L)* schlägt sich dies in den Entwurfskonzepten nieder. Die Relationstrassierung oder Kapitel über die räumliche Linienführung basieren vorrangig auf psychologischen Aspekten. Die Handlung *„Autofahren“* wird als Schnittmenge aus physikalischen Grundsätzen und psychologischen Aspekten verstanden. Die Entwicklung neuer Regelwerke wie der *Richtlinie für die Anlage von Landstraßen (RAL)* und der *Richtlinie für die Anlage von Autobahnen (RAA)* verfeinern dieses Konzept. Basierend auf der Grundidee der *„selbsterklärenden Straße“* (THEEUWES, 1998, SCHAGEN/JANSSEN, 2000, MATENA et al., 2005) wird der psychologischen Komponente ein noch stärkerer Platz eingeräumt. Nach diesem neuen Entwurfskonzept soll ein Verkehrsraum geschaffen werden, der durch seine Trassierung, seine Querschnittsgestaltung und seine Ausstattungsmerkmale automatisch eine angemessene Fahrweise nahelegt: *„Die Aufgabe der Streckencharakteristik besteht darin, durch eine gleichgerichtete, harmonische Abstufung aller wahrnehmbaren Streckenmerkmale deutlich erkennbare Straßentypen zu schaffen und beim Verkehrsteilnehmer ein für den jeweiligen Straßentyp intuitiv richtiges Fahrerverhalten zu erzeugen, das zu einer Steigerung der Verkehrssicherheit und zu einer Verbesserung des Verkehrsablaufs führt.“* (LEINS, 1969, zitiert nach BUCK, 1992) In den letzten Jahren wurde dieses Konzept von vielen europäischen Ländern in Richtlinien überführt und teilweise bereits im Rahmen von Neubaumaßnahmen und Umgestaltungen des Bestandsnetzes angewendet.¹³

¹³ Während in Deutschland bis dato lediglich die RAA eingeführt wurde und sich die RAL derzeit in der Länderanhörung befindet, wurde das Prinzip der „selbsterklärenden Straße“ in Dänemark und Frankreich bereits in den Richtlinien umgesetzt. In den Niederlanden ist das neue Entwurfskonzept am weitesten umgesetzt. In den letzten Jahren wurden hier bereits Teile des Bestandsnetzes nach den neuen Entwurfsstandards umgestaltet. Die Planung neuer Straßen erfolgt vollständig nach dem Prinzip der Entwurfsklassen.

Alleine auf Grund dieser Entwicklung, aber auch in Bezug auf die vorliegende Fragestellung ist eine Aufarbeitung der wesentlichen verkehrspsychologischen Grundlagen unumgänglich. Das Ziel dieser Arbeit besteht in der Untersuchung der haptischen und akustischen Beeinflussung des Fahrerverhaltens. Es werden also zwei Wahrnehmungskanäle des Menschen angesprochen und es wird davon ausgegangen, dass diese zusätzlichen Informationen so vom Fahrer verarbeitet werden, dass sie die Aufmerksamkeit erhöhen und das Verhalten hinsichtlich der Geschwindigkeit beeinflussen. Im Folgenden sollen die wesentlichen Aspekte der allgemeinen Psychologie und der Verkehrspsychologie im Hinblick auf die vorliegende Fragestellung vorgestellt und diskutiert werden. Da es sich hierbei um ein weites und sehr komplexes Feld handelt, können nicht alle Aspekte in gleicher Ausführlichkeit behandelt werden. Zum besseren Verständnis beschränkt sich diese Arbeit deshalb auf die wesentlichsten Werke und Kernaussagen.¹⁴

Die Wahrnehmung des Menschen und die daraus resultierenden Handlungszyklen können allgemein als Kreislauf verstanden werden, da jede Handlung des Menschen die Umgebung und damit das Reizmuster in irgendeiner Weise beeinflusst. Bild 17 stellt diesen allgemeinen Wahrnehmungs-Handlungszyklus grafisch dar.

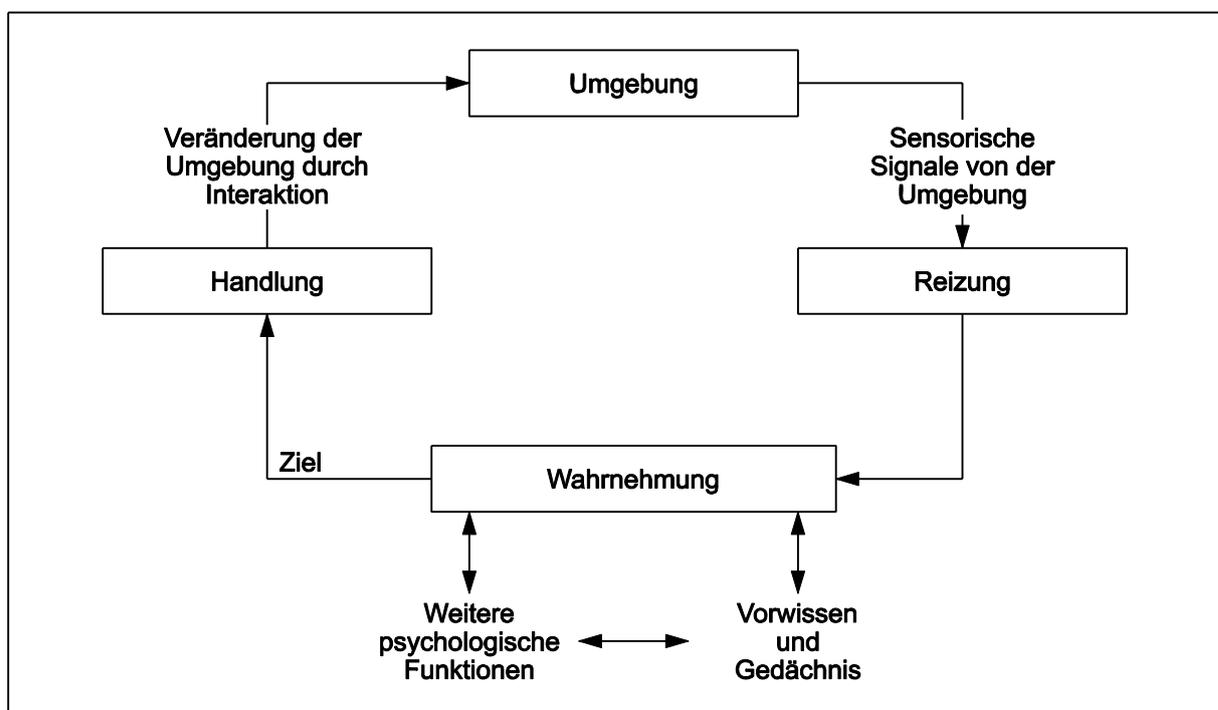


Bild 17: Wahrnehmungs-Handlungszyklus (nach GEGENFURTNER, 2005)

¹⁴ Ausführliche Literaturrecherchen zur Verkehrspsychologie, den so genannten „human factors“ und Fahrermodellen, wurden im Rahmen von Forschungsprojekten der Bundesanstalt für Straßenwesen oder der Europäischen Union durchgeführt und können beispielsweise in BECHER et al. (2006), WELLER et al. (2005), WELLER et al. (2006) oder WELLER (2007) nachvollzogen werden.

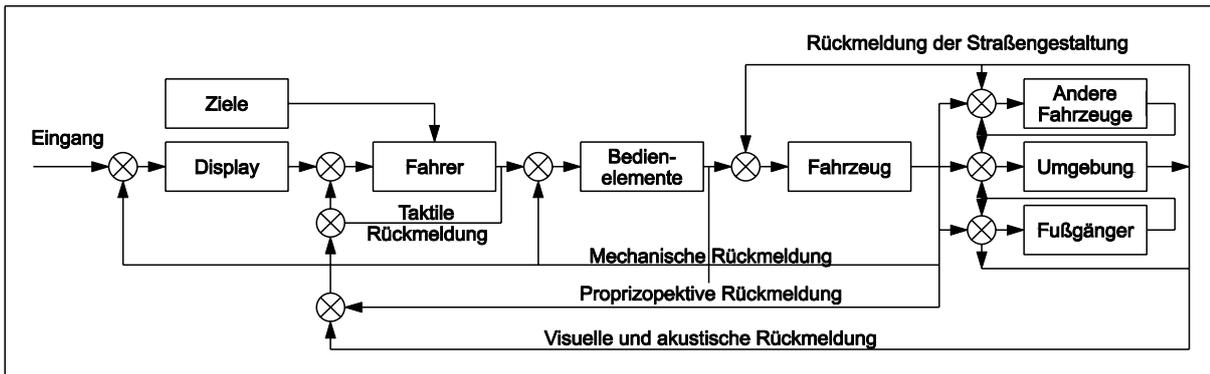


Bild 18: Modell des Fahrerhaltens (nach BRIGGS, 1968)

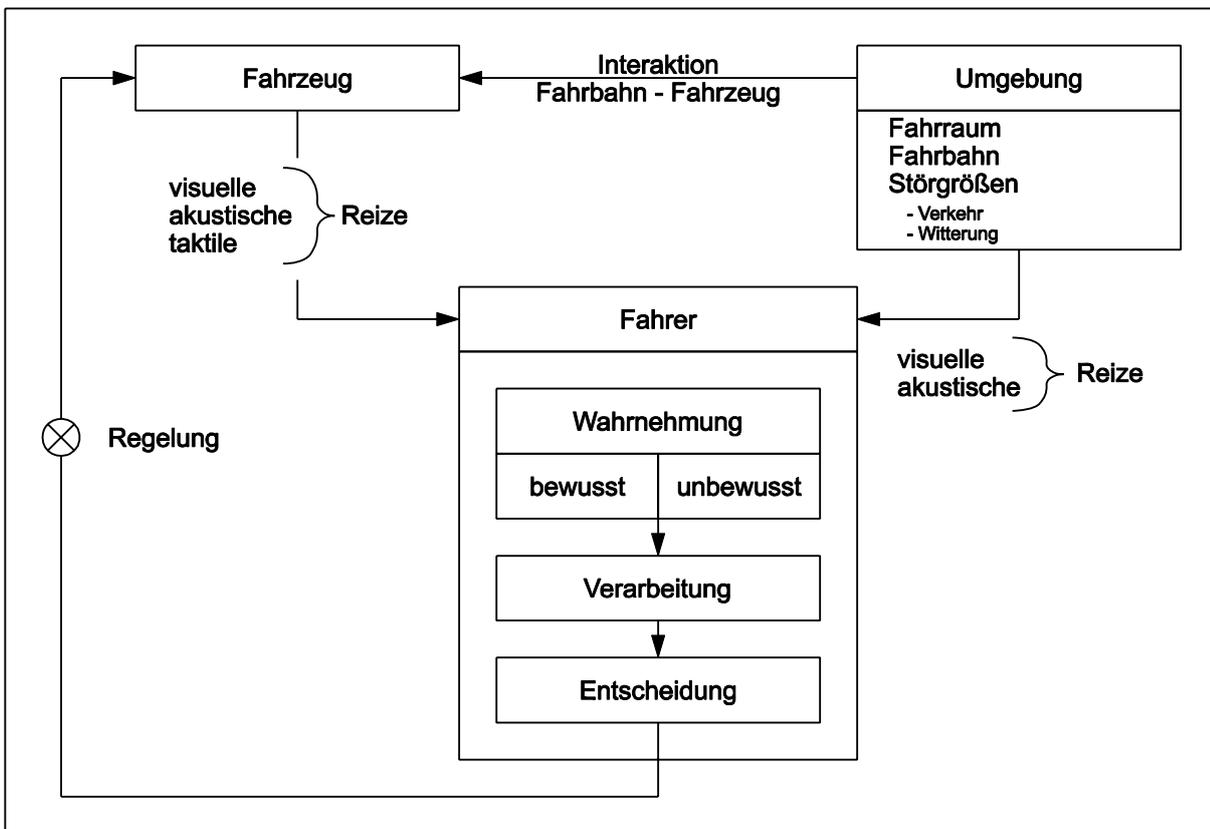


Bild 19: Vereinfachter Regelkreis

In der Verkehrsbeschreibung bzw. der Verkehrspsychologie wird die Aufgabe des Fahrens ebenfalls als Regelprozess verstanden. Der Ablauf „Autofahren“ kann auf unterschiedlichste Art und Weise in Form von Regelkreisen dargestellt werden. Je nach Ausrichtung der Fachdisziplin und der Zielrichtung der jeweiligen Fragestellung kann der Regelkreis unterschiedlich differenziert bzw. mit unterschiedlichen Schwerpunkten ausgearbeitet werden. Einer der ersten und bis heute oft zitierten Regelkreise nach BRIGGS aus dem Jahre 1968 ist in Bild 18 dargestellt.

Vereinfacht kann dieser komplexe Regelkreis auch auf seine Hauptkomponenten reduziert werden. Ein solcher einfacher allgemeingültiger Regelkreis beinhaltet als

Hauptbestandteile den Fahrer, das Fahrzeug und die Straße bzw. die Umgebung (vgl. Bild 19). Das Fahrzeug selbst liefert direkte Informationen an den Fahrer wie bspw. Geschwindigkeitsanzeige, Motordrehzahl oder Uhrzeit. Durch die technische Weiterentwicklung der Fahrzeuge und eine immer stärkere Marktdurchdringung moderner Fahrerassistenzsysteme werden bei immer mehr Fahrzeugen zusätzliche Informationen wie bspw. Abstand, Nässewarnungen, Glatteiswarnungen oder Stauinformationen direkt über visuelle oder akustische Signale bereitgestellt, die den Menschen in seiner Fahraufgabe unterstützen und somit die Verkehrssicherheit und den Komfort erhöhen sollen.

Zwischen Fahrzeug und Straße besteht ein fahrdynamischer Zusammenhang. Bei einer Kurvenfahrt entstehen bspw. Kräfte im Fahrzeug, die durch Fahrzeugkomponenten verändert, kompensiert bzw. verstärkt werden. Aus dieser Interaktion resultieren Rückmeldungen, die vom Fahrzeug an den Fahrer weitergegeben werden. Einige Beispiele hierfür sind die Querschleunigungen, der Querneigungswinkel, Vibrationen oder Wind- und Motorengeräusche. Neben diesen Reizen aus der Fahrzeug-Fahrbahn-Interaktion liefert die Umgebung weitere Reize direkt an den Fahrer. Als die wichtigsten direkten Größen sind hier Einflüsse des Umgebungsverkehrs, das visuelle Umfeld des Straßenraums oder visuelle Eindrücke bspw. in Bezug auf die Witterung oder die Lichtverhältnisse zu nennen. Die Bedeutung dieser Umgebungsreize ist den Verkehrsplanern bereits lange bekannt, wurde u.a durch die RAS-L berücksichtigt und wird in aktuellen Regelwerken wie der RAL, der RAA und durch neue Merkblätter wie *Hinweise zur Visualisierung von Entwürfen für außerörtliche Straßen* (HVIST, 2008) deutlich stärker betont. Prinzipien, wie bspw. eine abgestimmte Linienführung oder räumlich führende Elemente, werden im modernen Straßenentwurf genauso berücksichtigt, wie eine kongruente widerspruchslöse und eindeutige Straßenausstattung. Inwiefern das Reizangebot im Straßenraum reglementiert werden muss bzw. welche Wirkungen ein reizarmer Verkehrsraum oder eine Überfrachtung an unterschiedlichen Reizen auf das Fahrerverhalten und die Verkehrssicherheit hat, wird in den nächsten Kapiteln diskutiert.

Als zentrale Größe des Regelkreises steht der Fahrer im Fokus der meisten aktuellen Untersuchungen. Trotz neuester Erkenntnisse der Physiologie und Psychologie können die komplexen Zusammenhänge und Abläufe auf Seiten des Fahrers bislang nicht hinreichend beschrieben werden. Grundsätzlich werden alle Reize, die das Umfeld bzw. das Fahrzeug bereitstellt, vom Fahrer in unterschiedlicher Dichte und Tiefe wahrgenommen und verarbeitet. Abschließend wird eine Entscheidung hinsichtlich einer Handlung getroffen. Auf Basis dieser Handlungsentscheidung erfolgt die Regelung des Fahrzeugs. Moderne Forschungsansätze versuchen insbesondere mit Blick

auf die Regelkreiskomponente „Mensch“ den größten Einfluss auf das sichere Fahren zu nehmen. Die zuvor beschriebenen Einflüsse aus dem Umfeld, aus dem Fahrzeug und aus der Fahrzeug-Straßen-Interaktion auf den Menschen werden von ihm bewusst oder unbewusst wahrgenommen und verarbeitet. Schlussendlich trifft der Fahrer eine Entscheidung hinsichtlich seines Regelverhaltens. Die wichtigsten Komponenten bei diesem Vorgang sind die

- die Wahrnehmung,
- die Verarbeitung und
- die Entscheidung.

Wesentlichen Einfluss auf die Entscheidung haben dabei

- die Motivation,
- die Persönlichkeitsmerkmale,
- Erfahrungen,
- die kognitiven Einflüsse und
- motivationale Einflüsse.

Eine gezielte Beeinflussung des Fahrerverhaltens setzt voraus, dass die komplexen Zusammenhänge der einzelnen Komponenten bekannt sind.

3.1 Wahrnehmung

„Als Mensch können wir nie die Realität an sich, sondern nur unsere subjektive Wahrnehmung der Realität kennen, jeder Mensch konstruiert seine eigene Wirklichkeit.“ (WATZLAWICK/KREUZER, 1989)

Die Sinneswahrnehmung des Fahrers ist der Schlüssel zu dessen Beeinflussung. Der Mensch nimmt seine Umwelt permanent über alle seine Sinne wahr. In der Psychologie und Physiologie bezeichnet die (Sinnes-)Wahrnehmung die Summe der Schritte:

- Aufnahme,
- Interpretation und
- Auswahl und Organisation von sensorischen Informationen¹⁵

¹⁵ Und zwar nur jener Informationen, die zum Zweck der Adaption (Anpassung) des Wahrnehmenden an die Umwelt oder deren Modifikation aufgenommen werden.

Gemäß dieser Definition sind also nicht alle Sinnesreize Wahrnehmungen, sondern nur diejenigen, die auch geistig verarbeitet werden. Unterschieden werden u.a. die folgenden Wahrnehmungsarten

- visuelle Wahrnehmung,
- auditive Wahrnehmung,
- haptische Wahrnehmung,
- kineästhetische Wahrnehmung (Propriozeption) und die
- taktile Wahrnehmung.

Die mit Abstand größte Bedeutung bei der Informationsdarbietung hat nach heutiger Meinung der visuelle Sinn (SCHWEIGERT, 2003).¹⁶ Erst danach folgen das Gefühl durch die greifenden Hände am Lenkrad und den Druck am Körper (Haptik) sowie durch die Ohren (Akustik) und die über die Muskeln und Gleichgewichtsorgane übermittelte Selbstbewegung des menschlichen Körpers (Propiozeptorik). Die Wahrnehmung ist als Summe all dieser einzelnen Sinne zu verstehen, d. h. alle Wahrnehmungsarten wirken gleichzeitig auf den Fahrer. Der größte Teil der Wahrnehmung wirkt dabei auf einer unterbewussten Ebene. Nur wenige Wahrnehmungen überschreiten infolge des menschlichen Aufnahme- und Verarbeitungsvermögens die Bewusstseinschwelle und werden dem Fahrer gegenwärtig.

Die Aufnahmekapazität ist dabei beschränkt und sinkt mit steigendem Kognitivitätsanteil. Die unbewussten Rezeptoren haben eine Aufnahmekapazität von ca. 10^{11} bit/s. Der optische Kanal umfasst dabei alleine $5 \cdot 10^7$ bit/s. Das Bewusstsein hat im Gegensatz dazu nur eine Aufnahmekapazität von 160 bit/s (KLEBELSBERG, 1982). Aus diesem Grund werden nur die wichtigsten Reize bewusst verarbeitet (siehe Bild 20).

Bei der Aufnahme und Verarbeitung von Stimuli stellt sich die Frage der Kapazität, bzw. der Leistungsfähigkeit des menschlichen Sinnes- und Verarbeitungssystems. Grundlage aller Erklärungsansätze zu diesem Thema sind das *Strukturmodell* und das *Kapazitätsmodell* (vgl. bspw. DORNHÖFER/PANNASCH, 2000).

¹⁶ In der Forschungsliteratur finden sich häufig Aussagen wie: „Der Autofahrer nutzt zu 90% visuelle Reize“. Es mag unbestritten sein, dass dem visuellen Sinneskanal eine immense Bedeutung zukommt, eine Quantifizierung ist jedoch sicherlich unseriös und konnte bisher in keiner Studie belegt werden (vgl. SIVAK, 1996). Die Aufnahmekapazität der einzelnen Sinneskanäle (vgl. KLEBELSBERG, 1982) ist dabei nicht mit der Bedeutung der jeweiligen Stimuli für die Fahraufgabe zu verwechseln. Wie hoch der Anteil der determinierenden Sinneseindrücke in bestimmten Situationen ist, hängt sowohl vom Reizangebot, als auch von der jeweiligen Situation ab. Eine eingehende substantielle Erforschung für quantifizierende Aussagen fehlt bis jetzt jedoch vollständig.

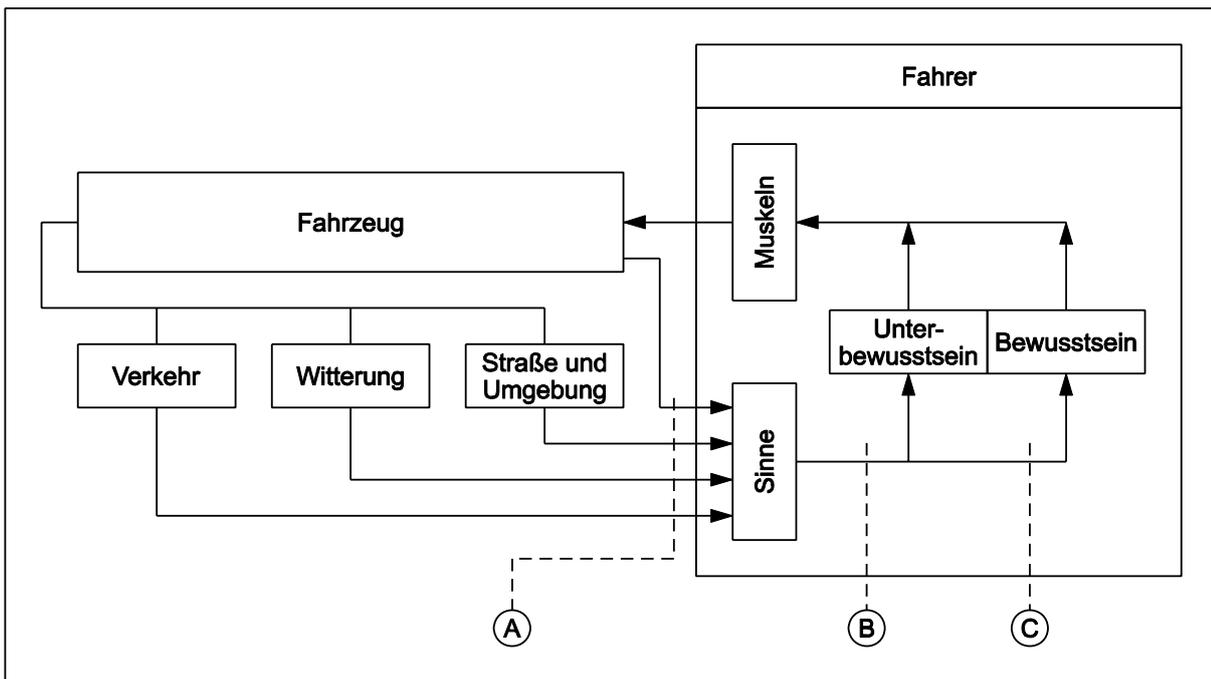


Bild 20: Informationsfluss zwischen Fahrer, Fahrzeug und Straße nach Durh (zitiert nach KLEBELSBERG, 1982)

Das *Strukturmodell* geht davon aus, dass verschiedene Sinnesmodalitäten parallel, ohne Interferenzen durch unterschiedliche Verarbeitungsstrukturen abgearbeitet werden. Am Beispiel eines modernen Computers lässt sich dieser Gedanke gut verdeutlichen: Eine Aufgabe ist bspw. die Darstellung eines Videos. Diese Aufgabe wird vorrangig von der Verarbeitungsstruktur „Grafikkarte“ behandelt. Eine parallel auftretende Aufgabe, wie das Abspielen einer Musikdatei kann ohne Leistungseinbußen von der Verarbeitungsstruktur „Soundkarte“ abgearbeitet werden.

Im Gegensatz dazu geht das *Kapazitätsmodell* davon aus, dass für die Verarbeitung aller Stimuli lediglich eine begrenzte Kapazität zur Verfügung steht. Eine gleichzeitige Verarbeitung unterschiedlicher Sinnesmodalitäten ist nur bis zum Erreichen der Gesamtkapazität möglich. Zwischen den einzelnen Verarbeitungsprozessen besteht eine Abhängigkeit. Diese Annahme wird wieder am Beispiel des Computers verdeutlicht: Ein Programm soll eine komplexe Rechenaufgabe lösen. Ein weiteres Programm soll ein Video abspielen, welches jedoch vorher dekomprimiert werden muss. Beide Prozesse belasten den Hauptprozessor. Es ist also nur dann möglich, beide Aufgaben parallel abzuarbeiten, wenn die Leistung des Hauptprozessors ausreichend ist.

Nach WICKENS (1984) ist ein *multiple resource modell* wahrscheinlicher. Dieser Ansatz beinhaltet beide hier skizzierten Modelle. Auf einer niedrigen Ebene ist eine parallele Verarbeitung unterschiedlicher Stimuli möglich. Mit steigender Komplexität und vor allem Zunahme der kognitiven Beanspruchung findet eine zentrale Verarbei-

tung, limitiert durch eine Ressource, statt (siehe auch SPADA, 1992). Wichtige Voraussetzung für die parallele Verarbeitung einfacher Prozessstrukturen ist zusätzlich eine getrennte Ausgabe, d. h. eine simultane Reaktion ist nur auf unterschiedlichen Ausgängen möglich (siehe auch HACKER, 1986 und BAARS, 1997). Eine interferenzfreie Parallelverarbeitung ist demnach nur durchführbar, wenn sowohl bei der Stimulusanalyse als auch bei der Reaktionsauswahl und der Reaktion keinerlei höhere kognitive Prozesse beteiligt sind. Bezogen auf das Beispiel des Computers lässt sich das *multiple resource modell* wie folgt darstellen: Ein Video und eine Musikdatei können auf einem Computer parallel verarbeitet werden, auch wenn dadurch der Hauptprozessor zu einem gewissen Prozentsatz belastet wird. Die Hauptrechenleistung wird dabei jedoch vom Grafikprozessor und von der Soundkarte erbracht. Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn kein komplexes Rechenprogramm gestartet wird, das den Hauptprozessor stark auslastet. Sollte bspw. eine aufwendige Simulation gestartet werden, wird auch die grafische und auditive Ausgabe des Systems an Performance einbüßen.

Nach dem *multiple resource modell* kann bei der Tätigkeit „Autofahren“ also ein visueller Reiz, wie ein Verkehrsschild, zusätzlich zu einem auditiven Reiz, wie einer Verkehrsnachricht, zeitgleich aufgenommen und verarbeitet werden. Dies setzt jedoch voraus, dass nicht zusätzlich noch eine andere komplexe Aufgabe, wie bspw. Telefonieren oder das Suchen nach einer Route, zu bewältigen ist. Dann würde die Reizaufnahme in minderer Qualität absolviert und Informationen würden unweigerlich verloren gehen. Diese Modellannahme führt zu dem Schluss, dass es möglich ist, ein und dieselbe Information auf mehreren Wegen darzubieten bzw. die Dringlichkeit einer Information durch einen Stimulus auf einem anderen Sinneskanal zu unterstreichen.

Im Zusammenhang mit dem Begriff der Wahrnehmung stellt sich unabhängig von der Modellannahme die Frage, warum bestimmte Verkehrssituationen nicht oder zu spät wahrgenommen bzw. verarbeitet werden. Zum einen besteht die Möglichkeit, dass die Reizinformation unterhalb einer wahrnehmbaren Schwelle liegt oder in einer Menge von Reizen gleicher Bedeutung „untergeht“, zum anderen könnte die dargebrachte Information vom Fahrer zwar wahrgenommen, jedoch als unerheblich eingestuft werden. Eine dritte Möglichkeit besteht in der Annahme, dass für eine erfolgreiche Reizweiterleitung ein gewisser Grad an Aufmerksamkeit bestehen muss. Da der Begriff Aufmerksamkeit sehr vielschichtig ist und eine zentrale Rolle in der Wahrnehmungsforschung spielt, wird er in Kapitel 3.3 näher betrachtet.

Zur Klärung der vorliegenden Fragestellungen und zum Umsetzen des Ziels, den Fahrer durch akustische und haptische Signale zu beeinflussen, steht die akustische

und haptische Wahrnehmung neben den vorgestellten allgemeinen Wahrnehmungsgrundlagen im besonderen Fokus der psychologischen Grundlagenermittlung. In den Kapiteln 4.1 und 4.2 werden hierzu die wichtigsten Grundlagen dargestellt.

3.2 Wahrnehmung paralleler Reize

Bisher wurden die Verkehrsteilnehmer vorrangig über visuelle Reize beeinflusst. Die auditive Beeinflussung beschränkte sich auf Verkehrsfunk und Warnsignale (bspw. „Hupen“). Die haptische Wahrnehmung wurde zur Beeinflussung gar nicht oder nur in Ausnahmefällen (Verkehrsbeeinflussung im Innerortsbereich, speziell in „Zone 30“-Bereichen) berücksichtigt. Neuere Ansätze ziehen diese Sinne ebenfalls zur Fahrerbeeinflussung heran. Strukturierte Seitenmarkierungen oder in die Fahrzeuge integrierte Fahrerassistenzsysteme wirken über haptische Reize und unterstreichen so die Dringlichkeit von visuellen Aussagen oder warnen den Fahrer vor kritischen Manövern.

Inwiefern die Belegung von parallelen Reizkanälen einen Einfluss auf die Wahrnehmung bzw. auf die Aufmerksamkeit hat, wurde in unterschiedlichen Studien untersucht, die jedoch nur z. T. relevante Erkenntnisse für diese Arbeit bereitstellen. Eine Vielzahl dieser Studien untersucht entweder grundlegende Zusammenhänge zwischen den einzelnen Sinnesmodalitäten,¹⁷ oder das haptische bzw. taktile Design von Mensch-Maschine-Schnittstellen oder Bedienelementen.¹⁸ Diese Arbeiten beleuchten zwar die Bedeutung des taktilen Sinneskanals für die Wahrnehmung, werden jedoch nicht vorgestellt, da sie sich zu weit von der hier relevanten Fragestellung der Beeinflussung von Kraftfahrern entfernen.

Weitere Forschungsaktivitäten betrachten die Verbindung von visuellen und akustischen oder haptischen Reizen zur Beeinflussung der Blickrichtung. Damit soll die Zuwendezeit zu relevanten Informationen verkürzt werden,¹⁹ oder eine zusätzliche Information bereitgestellt und die Aufmerksamkeit erhöht werden. Bezogen auf den Prozess „Autofahren“ untersuchten bspw. ERP/VEEN (2004), SCHUMANN/NAAB (1992) oder STEELE/GILLESPIE (2001) die Möglichkeit, die Informationsdarbietung

¹⁷ Bspw. veröffentlichten ZANKER et al. eine Vielzahl von Studien zum Einfluss von Akustik auf die Geschwindigkeitswahrnehmung. Vorrangig handelt es sich dabei jedoch um Grundlagenforschung bzw. Forschung aus dem Bereich Display-Design und nicht um die Wahrnehmung der Eigengeschwindigkeit. Siehe hierzu u.a. ZANKER/BRADDICK (1999), BURNS/ZANKER (2000), ZANKER/BURNS (2001), FELISBERTI/ZANKER (2004), etc.

¹⁸ Vgl. hierzu bspw. HO/TAN/SPENCE (2005), EVES/NOVAK (1998), TAN et al. (2003), BHARGAVA et al. (2005), GILLILAND/SCHLEGEL (1994), SKLAR/SARTER (1999) etc.

¹⁹ Hier stehen insbesondere Arbeitsplätze im Mittelpunkt, die über ausgedehnte visuelle Systeme verfügen, wie bspw. Verkehrsleitzentralen, Überwachungen von Kraftwerken etc.

der Instrumente zu verbessern, dem Fahrer beim Überholmanöver oder in Bezug auf das Abstandsverhalten zu assistieren und dessen Aufmerksamkeit mittels Vibrationen im Lenkrad zu erhöhen. ERP/VEEN (2004) konnten dabei nachweisen, dass die mentale Beanspruchung bei der Bedienung der Messinstrumente durch eine kombinierte Darbietung von visuellen und taktilen Informationen sinkt (siehe Bild 21). Andere Studien untersuchten, inwieweit Probanden durch komplexe auditive Reize wie bspw. mathematische Fragen negativ im Hinblick auf die visuelle Reizaufnahme beeinflusst werden. Die Motivation dieser Studien liegt meist in der Entwicklung oder Erprobung neuer Assistenzsysteme. Diese sollen entweder zusätzliche Informationen bereitstellen oder den stark überlasteten visuellen Kanal (durch bspw. immer aufwendigere Instrumentierungen) entlasten.

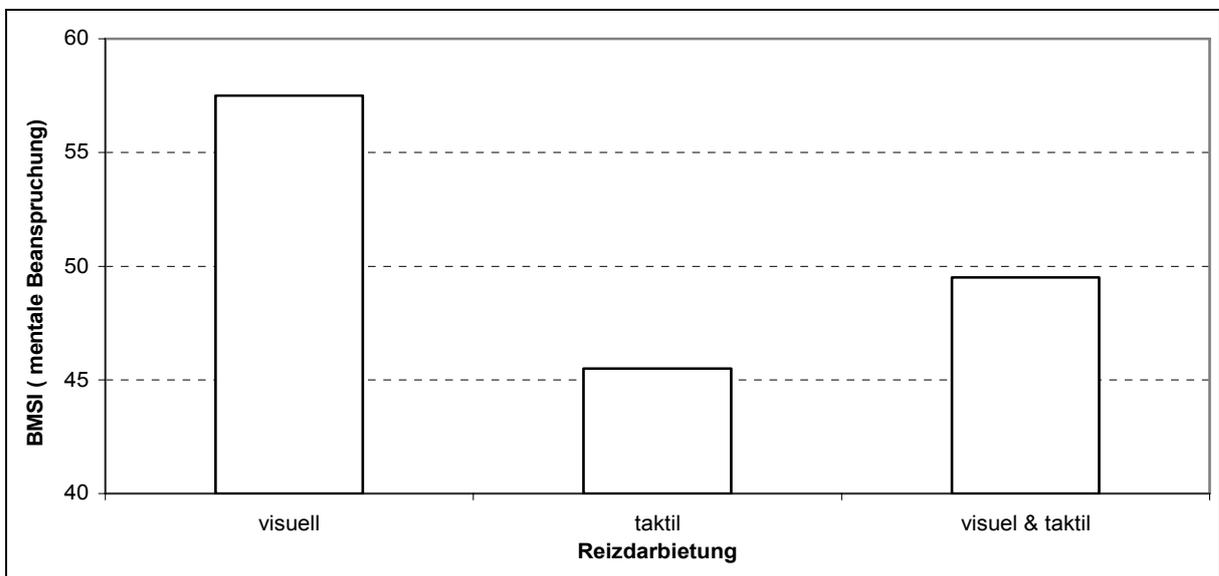


Bild 21: Einfluss unterschiedlicher Reizmodalitäten auf die mentale Beanspruchung(BSMI) (nach ERP/VEEN, 2004)

Eine der ersten Studien zum Einfluss von parallel einwirkenden akustischen und haptischen Signalen auf die Wahrnehmung von „Maschinenführern“ wurde 1984 durch die NASA durchgeführt. LEATHERWOOD/CLEVENSON/HOLLENBAUGH (1984) führten Simulatorstudien zum Komfortempfinden in Helikoptern durch. Der empfundene Diskomfort wurde dabei durch Befragungen von Probanden ermittelt und in Relation zu den dargebotenen Reizen gestellt. Korrelationsanalysen belegten, dass ein einzelner Reiz nicht hinreichend deterministisch für das Komfortempfinden ist (vgl. Bild 22). Durch die Betrachtung sowohl akustischer als auch haptischer Reize ergeben sich folgende Zusammenhänge (siehe Bild 23):

- Bei starken vertikalen Schwingungen hat eine zusätzliche akustische Reizdarbietung nur eine geringe Änderung des Komfortempfindens zur Folge.

- Bei einem geringen Niveau der vertikalen Schwingungen dagegen führt ein zusätzlicher akustischer Reiz zu deutlichen Änderungen des Komfortempfindens.

„Diese Ergebnisse zeigen einen deutlichen interaktiven Effekt zwischen Geräusch- und Vibrationskomponenten.“ (LEATHERWOOD/CLEVENSON/HOLLENBAUGH, 1984)

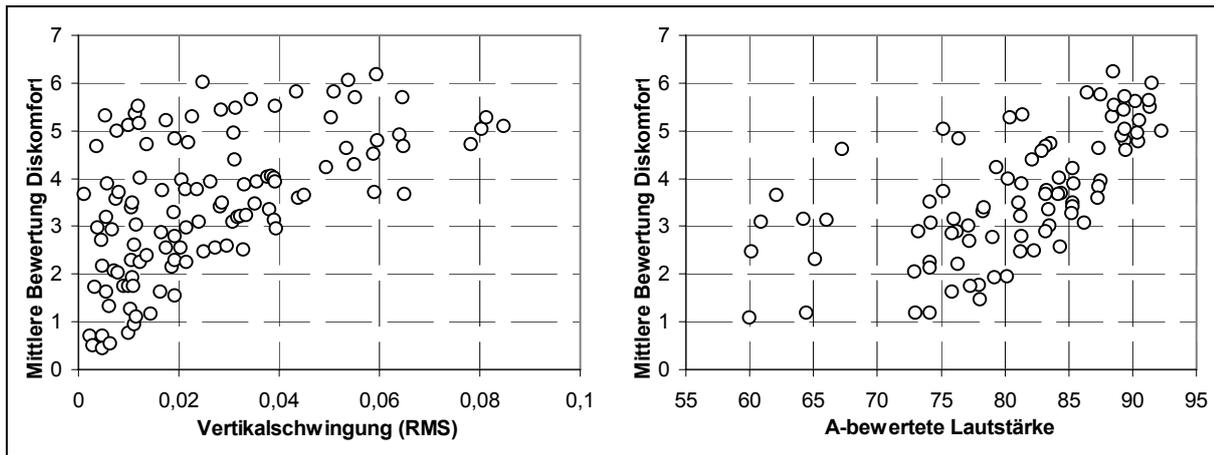


Bild 22: Zusammenhang zwischen Bewertung des Diskomforts und den mittleren frequenzbewerteten Vertikalbeschleunigungen ($r=0,535$) (links) und A bewertetem Innenraumgeräusch ($r=0,650$) (rechts) (nach LEATHERWOOD/CLEVENSON/HOLLENBAUGH, 1984)

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde eine kombinierte Bewertung des Komforts auf Basis von Vertikalschwingungen und Schallimmissionen entwickelt. Den Zusammenhang zwischen NASA Diskomfort Index (DISC) und der subjektiven Bewertung des Diskomforts zeigt Bild 24. Weitere Belege für die Wirkung parallel wirkender Reize finden sich bspw. in der Arbeit von BELLMANN (2001). Im Rahmen von Laboruntersuchungen mit mehreren Probanden konnte BELLMANN nachweisen, dass sich die Wahrnehmungsschwelle von Vertikalschwingungen signifikant verändert, wenn ein paralleler akustischer Reiz (hier ein rosa Rauschen²⁰) dargeboten wird. Die vorgestellten Arbeiten zeigen deutlich, dass ein Zusammenhang zwischen Wahrnehmung und paralleler Reizdarbietung existiert. Die Auswirkung unterschiedlicher oder paralleler Reize auf die hier vorrangig behandelte Geschwindigkeitswahrnehmung wird in Kapitel 3.5 aufgearbeitet. Zunächst sollen jedoch in den Kapiteln 3.3 und 3.4 die Begriffe Aufmerksamkeit und Risiko als weitere Determinanten des Fahrerhaltens erläutert werden.

²⁰ Als „Rosa Rauschen“ (auch „1/f-Rauschen“) wird ein Rauschen bezeichnet, dessen Leistungsdichte mit steigender Frequenz abnimmt. Der Mensch nimmt das „Rosa Rauschen“ als Geräusch wahr, das in allen Frequenzbereichen in etwa gleich laut ist.

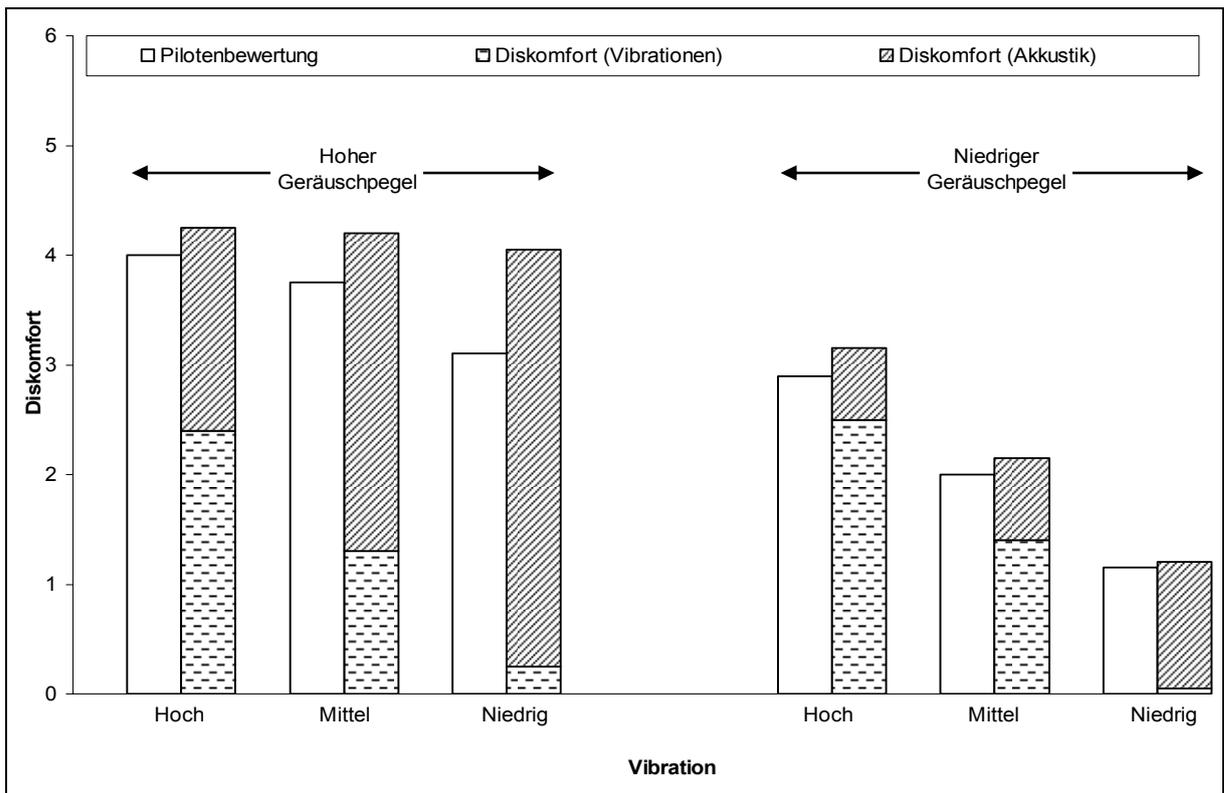


Bild 23: Relative Verteilung von Geräusch und Vibration im Verhältnis zur Diskomfort (rechts) (nach LEATHERWOOD/CLEVENSON/HOLLENBAUGH, 1984)

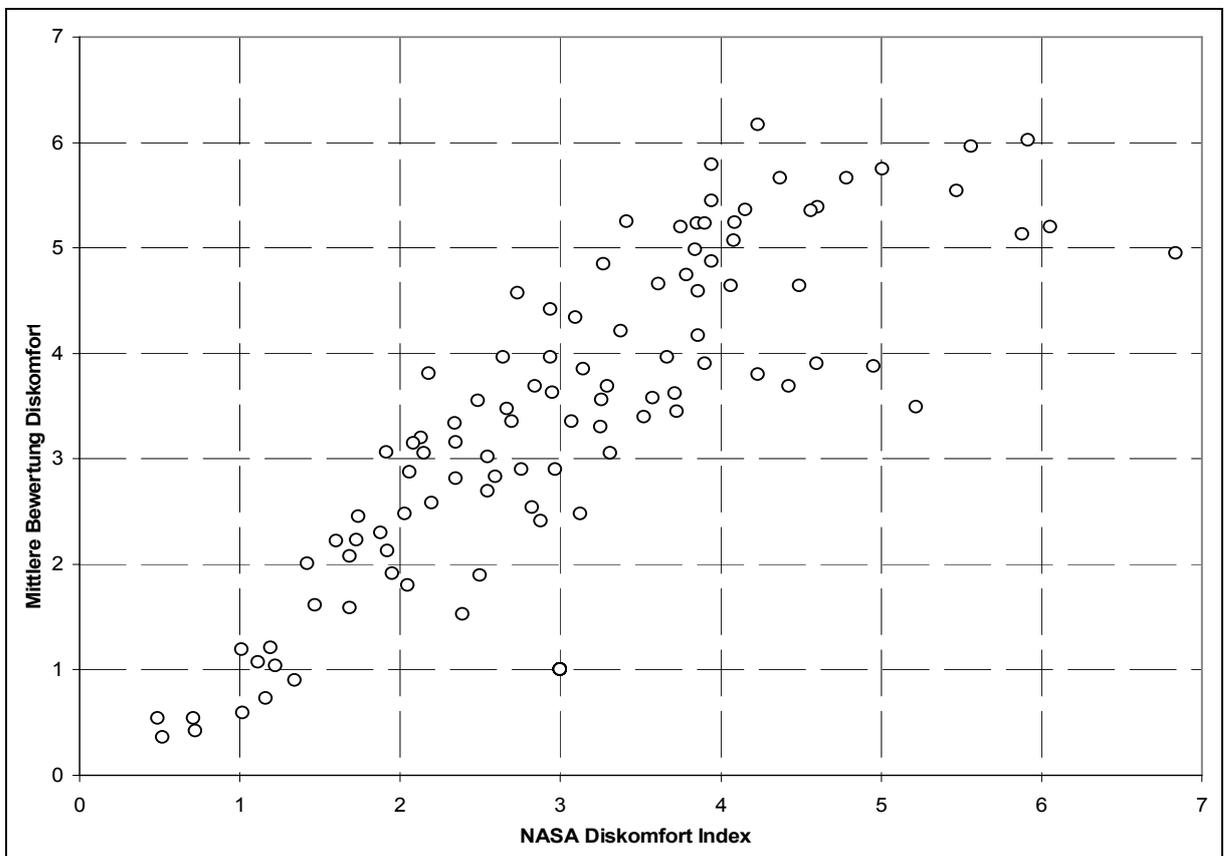


Bild 24: Zusammenhang zwischen Bewertung des Diskomforts und NASA Discomfort Index (DISC) ($r=0,914$) (nach LEATHERWOOD/CLEVENSON/HOLLENBAUGH, 1984)

3.3 Aufmerksamkeit

In der Psychologie ist der Begriff Aufmerksamkeit (engl: „arousal“) mit vielen unterschiedlichen Bedeutungen belegt (vgl. TITCHNER, 1908 oder WICKENS/MCCARLEY, 2008). Eine grobe Einteilung des Begriffs Aufmerksamkeit wurde bspw. von PARASURAMAN/DAVIES (1984) vorgenommen. Die fünf Hauptgruppen werden im Folgenden vorgestellt und mit Beispielen aus dem Bereich der Verkehrspsychologie belegt:

- Focused Attention:** Die gerichtete/gebündelte Aufmerksamkeit bezeichnet die (bewusste) Konzentration auf eine Handlung. *In Bezug auf den Fahrer bspw. die Konzentration auf unterschiedliche Fahraufgaben oder Sinneskanäle.*
- Selective Attention:** Die selektive/auswählende Aufmerksamkeit bezeichnet die (bewusste) Entscheidung für die Kanalisierung der Aufmerksamkeit auf eine Handlung oder einen Sinn. *In Bezug auf den Fahrer bspw. die Entscheidung zwischen einem Überholvorgang und dem Blick auf die Straßenkarte.*
- Switched Attention:** Die wechselnde Aufmerksamkeit ist eng verknüpft mit der selektiven Aufmerksamkeit und bezeichnet den eigentlichen Vorgang des Wechsels zwischen Handlungen oder Sinneskanälen. *In Bezug auf den Fahrer bspw. der Übergang vom Blick auf die Straßenkarte zum Blick auf den Verkehr.*
- Divided Attention:** Während die vorangegangenen Einteilungen von einer „Single Chanel“ Theorie ausgehen, wird durch die geteilte Aufmerksamkeit die Fähigkeit bezeichnet, unterschiedliche Handlungen und Sinnesverarbeitungen parallel zu verarbeiten. *Bezo-gen auf den Fahrer bspw. die Fähigkeit, erfolgreich die Spur zu halten und gleichzeitig die Informationen einer Staumeldung im Radio zu verarbeiten.*
- Sustained Attention:** Die anhaltende/dauerhafte Aufmerksamkeit bezeichnet die Fähigkeit, Sinnesverarbeitungen oder Handlungen für einen langen Zeitraum aufrecht zu erhalten. Hierbei nimmt die optimale „Einstellung“ des Aufmerksamkeitslevels zur erfolgreichen Bewerkstelligung der Aufgabe über einen längeren Zeitraum eine wichtige Rolle ein.

Im Bezug auf die Fahraufgaben bei einer längeren Fahrt über Bundesautobahnen oder Landstraßen muss der anhaltenden Aufmerksamkeit und der wechselnden Aufmerksamkeitszuwendung besondere Rechnung getragen werden. Durch den hohen Grad der Automatisierung bei der Bewältigung der Fahraufgaben wird der Grad der „sustained attention“ auf einem niedrigen Level gehalten. Durch plötzliche, kurzzeitig höhere Anforderungen wie Änderungen der Streckencharakteristik (bspw. Kreuzungen oder scharfe Kurven) oder erhöhtem Bedarf an Interaktion mit dem Umgebungsverkehr (bspw. Überholvorgang, Abstandsregelung bei plötzlicher Verlangsamung des Vorausfahrenden) wird ein Anstieg an Aufmerksamkeit vom Fahrer verlangt. Je größer der Unterschied zwischen Ausgangs- und Bedarfsniveau der Aufmerksamkeit ist, desto langwieriger und fehleranfälliger ist dieser Prozess.

Gemäß Kapitel 3 lässt sich die Handlung „Autofahren“ als Regelungsprozess darstellen. Dabei wird der Mensch als Regler mit Filterfunktionen verstanden. D.h., es werden nicht alle Stimuli durch Regelanforderungen umgesetzt, sondern es erfolgt eine Filterung, die einer Glättung vergleichbar ist. Wie bereits gezeigt, erfolgt diese Filterung mehrstufig. Eingangs wird rein biologisch eine Reizauswahl getroffen, um eine Reizüberflutung zu verhindern. Von der Vielzahl an Informationen aus unserer Umwelt werden nur die relevanten Informationen vom Wahrnehmungsapparat aufgenommen. Bezogen auf die Aufgabe des Fahrens werden bspw. periphere visuelle Stimuli, die für die Fahraufgabe keine Relevanz haben, ausgeblendet. Weitere Stufen der Filterung liegen in der Reizverarbeitung. Auf Grund von Erfahrungswerten entscheidet der Fahrer – mehr oder weniger unbewusst – inwieweit ein Reiz eine Reaktion, also eine Änderung der Regelung erfordert. Ein Regelungsprozess, der auf gefilterten Signalen basiert, hat sowohl in der Technik, als auch in der Psychologie die besondere Eigenschaft, dass er auf eine Änderung der Regelanforderung nur verzögert reagieren kann. In Bild 25 ist ein typischer Verlauf eines gefilterten Reglers dargestellt. Im Ausgangsstadium liegen Regelanforderung, also der Sollwert, und die Regelreaktion, also der Istwert, auf einem Niveau. Bei einer plötzlichen Änderung der Regelanforderung benötigt der Regler eine gewisse Zeit, um zu reagieren und die Regelreaktion an den Sollwert anzupassen. Meist kommt es dabei zu einem leichten Überschwingen bzw. einem Einschwingvorgang, bis der Istwert und der Sollwert wieder identisch sind.

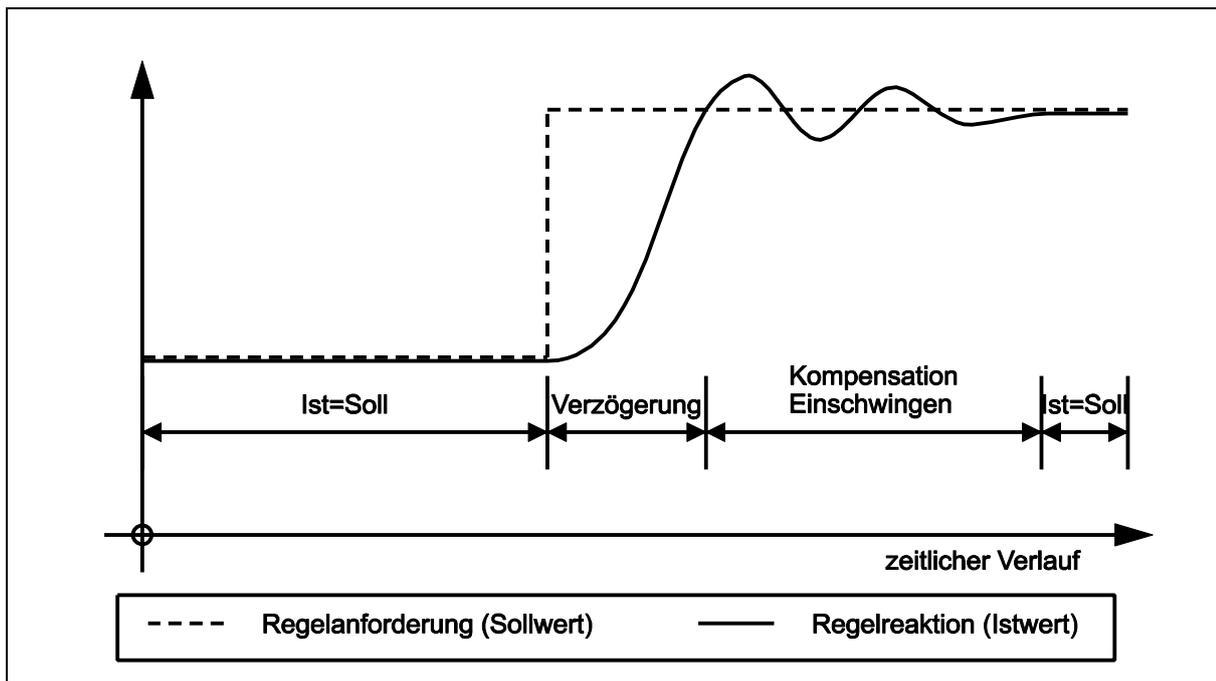


Bild 25: Verlauf von Regelanforderung und Regelreaktion über die Zeit

Bezogen auf die Aufmerksamkeit kann dieser Prozess anhand eines kurzen Beispiels erläutert werden: Bei einer monotonen Fahrt auf einer Autobahn bremst das vorausfahrende Fahrzeug plötzlich. Durch Grenzen in der Wahrnehmung hinsichtlich der Geschwindigkeitsänderung, die Filterung und das niedrige Level der Aufmerksamkeit durch die vorausliegende monotone Fahrt dauert es eine gewisse Zeit, bis der Fahrer des Folgefahrzeugs reagiert und ebenfalls bremst. Der Abstand wird wieder vergrößert – meist auf einen größeren Abstand, als zuvor – um sich im weiteren Verlauf der Fahrt wieder auf das Ausgangsniveau einzuschwingen. (vgl. auch WIEDEMANN, 1974)

In der Vergangenheit gingen Planer und Betreiber von Straßen stets davon aus, dass der Fahrer so wenig wie möglich ablenkenden Reizen ausgesetzt sein sollte. Der gesamte zur Verfügung stehende Sinnes- und Verarbeitungsapparat sollte alleine der Fahraufgabe zur Verfügung stehen. Auf Grund des hohen Grads der Automatisierung der Fahraufgabe führt dieser Ansatz jedoch zu einer permanenten Unterforderung des Fahrers und damit einhergehend zu einer Ermüdung. Dieser Effekt ist nach YERKES/DODSON (1908) in seiner Auswirkung ähnlich negativ für den Grad der Aufmerksamkeit wie eine Reizüberflutung (siehe Bild 26).

In der Diskussion über Unfallursachen wird immer wieder angeführt, „*dass der Fahrer besser hätte aufpassen sollen*“. Diese Einstellung zur fehlenden Aufmerksamkeit als Unfallursache geht an der Realität vorbei und negiert die physischen und psychologischen Vorgänge beim Menschen/Fahrer.

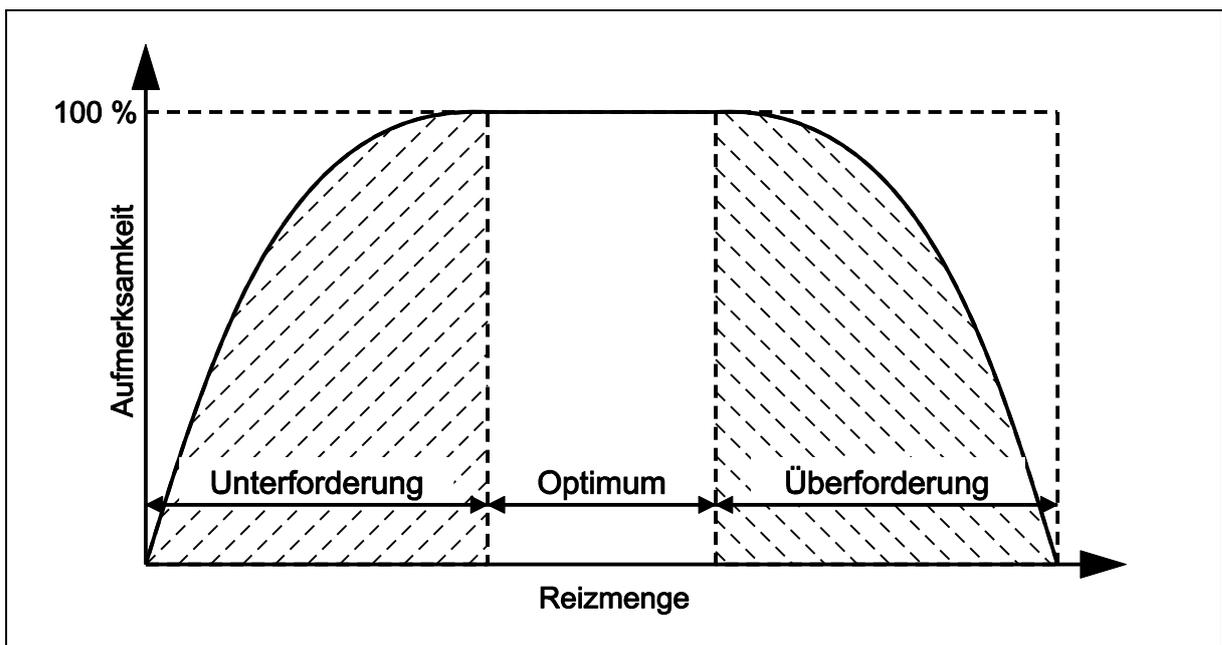


Bild 26: Verlauf der Aufmerksamkeit in Abhängigkeit der Reizmenge nach YERKES/DODSON (1908)

Wie dargelegt besteht die Fahraufgabe aus einer Menge an automatisierten Abläufen. Das Konzentrations- bzw. Aufmerksamkeitsniveau wird dabei automatisch dem Bedarf angepasst. Bei einer längeren Fahrt wird die Ressource „Aufmerksamkeit“ automatisch auf ein niedriges Niveau eingestellt, um die Fahraufgabe auch über einen längeren Zeitraum zu bewältigen. Bei einer plötzlichen Nachfrageänderung hinsichtlich dieser Ressource benötigt der Regler „Mensch“ eine gewisse Zeit, sich der neuen Anforderung an Aufmerksamkeit anzupassen. Dieser Zeitverlust kann bei ungünstigen Konstellationen zu einer sicherheitskritischen Situation und im schlimmsten Fall zu einem Unfall führen. Ziel der Planer und Betreiber von Straßen sollte es also sein, das Level der Aufmerksamkeit auf einem Niveau zu halten, das den Fahrer in seiner Fahraufgabe weder über- noch unterfordert. Es sollte also permanent ein Aufmerksamkeitslevel erzeugt werden, das eine adäquate und zeitnahe Reaktion auf sich ändernde Situationen ermöglicht.

Stehen dem Fahrer auf einer Strecke – insbesondere bei monotonen Fahrverläufen – plötzlich Situationen bevor, die eine erhöhte Aufmerksamkeit benötigen, sollte der Verkehrsingenieur dies ankündigen und die Wahrnehmung des Fahrers auf allen Sinneskanälen ansprechen, um diese gesteigerte Aufmerksamkeit zu gewährleisten. Heute werden vielfach gefährliche Situationen, Unstetigkeiten in der Streckenführung oder baulich geänderte Situationen durch eine aufwendige Beschilderung gekennzeichnet. Dabei wird sich jedoch ausschließlich des visuellen Sinneskanals bedient. Die übrigen Sinne, wie bspw. das haptische Empfinden oder das Hören, werden dabei nicht genutzt.

3.4 Risikowahrnehmung und -verhalten

Neben den vorrangig physiologisch determinierten Größen wie Wahrnehmung oder Aufmerksamkeit²¹ stellen die Risikowahrnehmung und das Risikoverhalten nach aktuellen Erkenntnissen weitere wesentliche Einflussparameter auf das Fahrerverhalten im Allgemeinen und auf die Geschwindigkeitswahl im Besonderen dar. Nach DIN 31004 (1984) bezeichnet das Risiko das Verhältnis, das *„die Wahrscheinlichkeit der Entstehung eines Ereignisses und das zu erwartende Ausmaß eines möglichen Schadens berücksichtigt.“* Wie die Wahl des Begriffs „Risikowahrnehmung“ bereits impliziert, ist die Definition von Risiko in der Realität – insbesondere im psychologischen Sinne – nicht so klar umrissen, sondern hängt vom individuellen Empfinden jedes Einzelnen ab. Im Rahmen dieses Kapitels sollen die wesentlichen Modelle und Erkenntnisse zur Risikowahrnehmung und zum Risikoverhalten beschrieben werden.

Ein relativ einfaches, jedoch bis heute aktuelles und oft zitiertes Konzept stellt das Modell des objektiven und subjektiven Risikos nach KLEBELSBERG (1982) dar. KLEBELSBERG geht in seinem Erklärungsmodell von einer Differenzierung des Sicherheitsbegriffs aus. Er stellt die subjektiv erlebte Sicherheit der objektiven (messbaren) Sicherheit gegenüber. *„Das Erklärungsmodell geht von zwei Annahmen aus: Sicherheit im übergeordneten Sinn hängt nicht allein von der subjektiven Sicherheit und nicht allein von der objektiven Sicherheit ab, sondern stets von der Wechselbeziehung zwischen beiden Sicherheitskomponenten und deren gegenseitiger Relativierung. Angepasstes Verkehrsverhalten wird dadurch gewährleistet, dass die objektive Sicherheit mindestens gleich groß oder aber größer ist als die subjektive Sicherheit; jedenfalls würde das einer erhöhten subjektiven Sicherheit entsprechende Verhalten zu einer Überschreitung physikalischer Grenzwerte führen.“* (KLEBELSBERG, 1982)

Nimmt der Fahrer eine Situation subjektiv als sicherer an, als sie sich objektiv darstellt, steigt das allgemeine Risiko eines Unfalls, während vice versa eine Sicherheitsreserve besteht. Liegen subjektive und objektive Sicherheit auf einem Niveau, ist das Auftreten kritischer Situationen nach KLEBELSBERG weitestgehend ausgeschlossen, es existieren jedoch keinerlei Sicherheitsreserven.

²¹ Auch wenn die Wahrnehmungs- oder Aufmerksamkeitsforschung als Teilgebiet der Psychologie gilt, sind die Randbedingungen, Möglichkeiten und limitierenden Faktoren vorrangig physiologischer Natur. „Lediglich“ die Auswirkungen und Zusammenhänge von Wahrnehmung und Aufmerksamkeit stellen psychologische Kerngebiete dar.

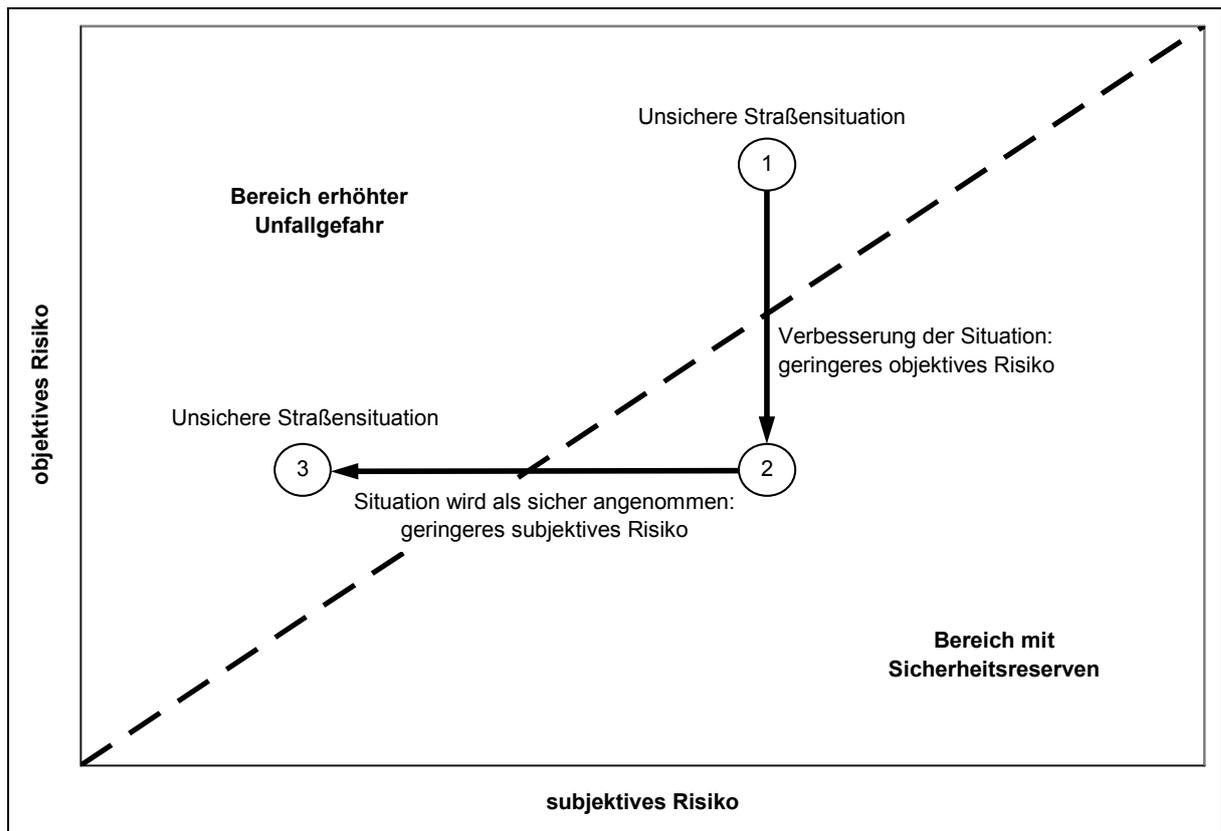


Bild 27: Abhängigkeit zwischen subjektivem und objektivem Risiko basierend auf der Risikotheorie nach KLEBELSBERG (1982)

Ein Problem stellt vor diesem Erklärungshintergrund die Adaption des Sicherheitsempfindens dar (vgl. Bild 27). Wird bspw. eine gefährliche Situation (1) durch einen Straßenausbau oder eine verbesserte optische Führung entschärft (2), also das objektive Risiko gesenkt, besteht die Gefahr, dass der Fahrer sein subjektives Risikoempfinden ebenfalls senkt (3) und somit kein tatsächlicher Sicherheitsgewinn durch die Maßnahme auftritt bzw. im schlimmsten Fall sogar eine Verschlechterung der Situation hervorgerufen wird. Daraus ergibt sich, „dass sich Begriffe wie ‚die sichere Straße‘ oder ‚das sichere Fahrzeug‘ als Fiktion erweisen, solange bei solchen Beurteilungen nicht die jeweilige Rückwirkung jener Teilsysteme auf das Teilsystem Fahrer mit der Systemfunktion ‚subjektive Sicherheit‘ berücksichtigt werden.“ (KLEBELSBERG, 1982)

Das Modell der subjektiven und objektiven Sicherheit nach KLEBELSBERG (1982) wurde von WILDE (1988) weiterentwickelt. WILDE trägt dabei insbesondere der bereits von KLEBELSBERG (1982) angesprochenen Anpassung des subjektiven Sicherheitsempfindens Rechnung. In WILDEs Risiko-Homeostase-Modell wird davon ausgegangen, dass die Anzahl von sicherheitskritischen Situationen und Unfällen – unabhängig von Maßnahmen zur Erhöhung der objektiven Sicherheit – gleich bleiben, da der Fahrer stets sein subjektives Risikoempfinden an die neue Situation an-

passt. Der Fahrer verfügt demnach über ein persönliches Grenz- bzw. Zielrisiko, an das er sein Verhalten angleicht.²²

Ein weiteres Modell zur Erklärung des risikobasierten Fahrerverhaltens wurde von NÄÄTÄNEN/SUMMALA (1976) entwickelt. Entgegen der Meinung von WILDE (1988, 1994) vertreten NÄÄTÄNEN/SUMMALA (1976) den Standpunkt, dass der Fahrer stets versucht, das Risiko auf nahezu Null zu minimieren („*zero-risk-modell*“). Unfälle treten nach Meinung der Autoren nur auf, da das Risiko generell und nicht individuell unterschätzt wird. Dies ist auf Wahrnehmungsdefizite und eine Überschätzung der eigenen Fähigkeiten zurückzuführen.

Während die beschriebenen Modelle von KLEBELSBERG (1982), WILDE (1988, 1994) und NÄÄTÄNEN/SUMMALA (1976) das Risikoverhalten von Kraftfahrern durch eine Gegenüberstellung von subjektivem und objektivem Risiko beschreiben, gehen neuere Arbeiten zu diesem Thema davon aus, dass diese Ansätze zwar in vielen Situationen einen ausreichenden Erklärungsansatz bieten, für eine abschließende Beschreibung des Fahrerverhaltens jedoch nicht ausreichend sind. FULLER (2005) sieht einen deutlichen Unterschied zwischen dem subjektiven Risiko als Ergebnis eines kognitiven Prozesses und dem emotionalen Risikoempfinden. Während nach FULLER (2005) das subjektive Risiko so lange auf einem Level unverändert bleibt, bis eine gewisse Wahrnehmungsschwelle überschritten wird, obliegt das Risikogefühl einer kontinuierlichen Anpassung auch unterhalb der Wahrnehmungsgrenzen. Basierend auf den empfundenen Schwächen der reinen Risikomodelle wird versucht, ein umfassendes Modell für das Fahrerverhalten zu entwickeln. Den zentralen Ansatz stellt das Kapazitätsmodell dar (vgl. auch Kapitel 3.1). Einen guten Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zu diesem Ansatz bieten WELLER et al. (2006).

3.5 Geschwindigkeitswahrnehmung und -verhalten

Die Ausführungen der vorangegangenen Kapitel beziehen sich auf die gesamte Fahraufgabe, also auf Entscheidungen des Fahrers zu seinem Geschwindigkeitsverhalten, der Querführung, zum Überholverhalten oder sogar zur Routenwahl. Im Zentrum dieser Arbeit steht jedoch das Geschwindigkeitsverhalten. Nach heutigem Stand der Technik wird das Geschwindigkeitsverhalten von Kraftfahrern als Hauptdeterminante für das Unfallgeschehen angesehen (vgl. bspw. DESTATIS, 2007).

²² Das Risiko-Homeostase-Modell von WILDE (1988) wurde kontrovers diskutiert. Vgl. hierzu EVANS (1986), MCKENNA (1988) oder ELVIK/VAA (2004).

„Üblicherweise fahren 40 bis 50 % der Kraftfahrer schneller als die zulässige Höchstgeschwindigkeit und 10 bis 20 % überschreiten die zulässige Höchstgeschwindigkeit um mehr als 10 km/h.“ (ERSO, 2007) Wie bereits erläutert, basiert die Geschwindigkeitswahl vorrangig auf der Motivation, den Gewohnheiten, der Risikowahrnehmung und der Risikoakzeptanz der Fahrer. Des Weiteren wird die Geschwindigkeitswahl durch die Charakteristik der Straße, des Straßenbegleittraums und durch die Eigenschaften des Fahrzeugs beeinflusst. Gemäß TRB (1998) (zitiert nach ERSO, 2007) stellt die Geschwindigkeit einen Haupteinflussfaktor bei ca. 10 % der Unfälle und sogar bei 30 % der Unfälle mit Todesfolgen dar. Oft wird in diesem Zusammenhang die Aussage von FINCH et al. (1994) zitiert nach der „eine Steigerung der Geschwindigkeit um 1 km/h eine Steigerung der Unfallzahlen um 3 % nach sich zieht“. Auch wenn der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Unfallwahrscheinlichkeit sich in der Realität komplexer darstellt, kann der Einfluss überhöhter Geschwindigkeit auf das Unfallrisiko und die Unfallfolgen nicht negiert werden. Nach theoretischen und empirischen Untersuchungen von TAYLOR/LYNAM/BARUYA (2000) gibt es keinen einzelnen Faktor, der den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Unfallgeschehen auf Innerorts- und Landstraßen determiniert, vielmehr existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Parameter, die je nach Situation größeren oder kleineren Einfluss auf das Unfallrisiko haben:

- „Je schneller sich der Verkehr im Mittel bewegt, desto mehr Unfälle passieren – die Unfallzahl steigt dabei in etwa proportional mit dem Quadrat der mittleren Geschwindigkeit.“
- „Je größer die Geschwindigkeit um den Mittelwert streut, desto mehr Unfälle sind die Folge – die Unfallzahl steigt dabei exponentiell zum Variationskoeffizienten der Variation der Geschwindigkeit.“
- „Je größer der Anteil der Fahrer, die die zulässige Geschwindigkeit überschreiten, desto höher die Anzahl der Unfälle – die Unfallzahl steigt um 10 % wenn sich der Anteil der Fahrer, die die Geschwindigkeit überschreiten verdoppelt.“
- „Je höher die mittlere Geschwindigkeit der Geschwindigkeitsübertreter, desto höher das Unfallgeschehen – die Anzahl von Unfällen steigt um ca. 19 %, wenn die mittlere Geschwindigkeit der Geschwindigkeitsübertreter um 1,6 km/h (1 Meile/Stunde) steigt.“

Häufig wird versucht, den Zusammenhang zwischen Unfallgeschehen und Geschwindigkeit oder Standardabweichung der Geschwindigkeit mit einem funktionalen Zusammenhang zu beschreiben. Hierbei kommt entweder eine exponentielle oder eine U-förmige Funktion (siehe Bild 28) zum Einsatz, die bspw. von SOLOMON

(1964), CIRILLO (1968) oder FILDES/RUMBOLD/LEENING (1991) im Rahmen von empirischen Untersuchungen als treffendste Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Geschwindigkeit und Unfällen ermittelt wurde. DAVIS/DAVULURI/PEI (2006) hingegen konnten diesen Zusammenhang nicht nachweisen, vermuten jedoch, dass dies auf die Vielzahl möglicher Einflussfaktoren auf das Unfallgeschehen zurückzuführen ist.

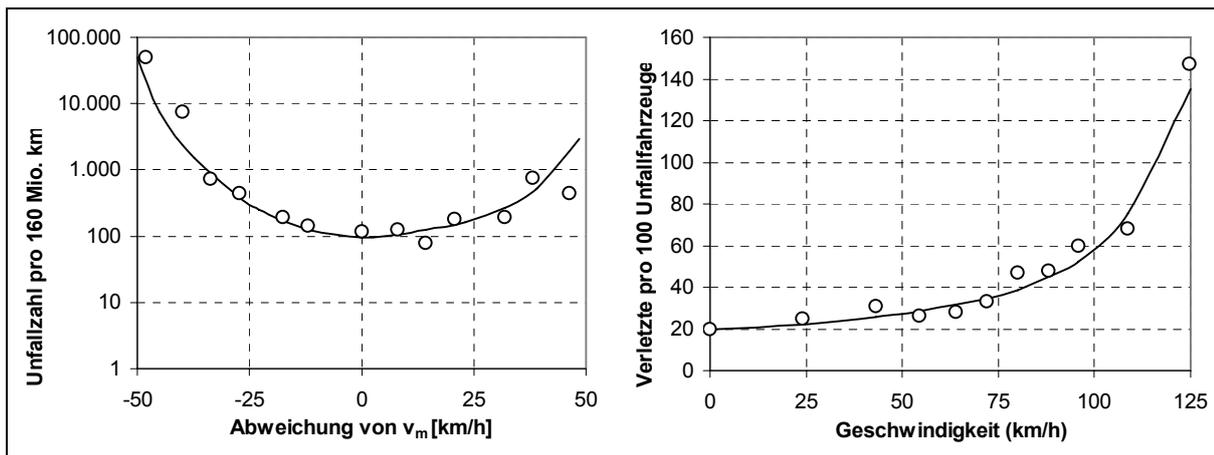


Bild 28: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit bzw. Standardabweichung der Geschwindigkeit und Unfallhäufigkeit (links) und Anteil verletzter Personen per Unfall in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (rechts) (nach SOLOMON, 1964 in SHINAR, 1998)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass eine „Reduktion der Geschwindigkeit der schnellsten Fahrer einen größeren Nutzen im Hinblick auf Unfallvermeidung mit sich bringt, als eine Reduktion der Geschwindigkeit aller Fahrer“. (TAYLOR/LYNAM/BARUYA, 2000) Das Ziel, die Geschwindigkeit im Allgemeinen und die Geschwindigkeit bestimmter Personengruppen, nämlich die der Geschwindigkeitsüberschreiter, zu reduzieren, erfordert vertiefte Kenntnisse über das Geschwindigkeitsverhalten und die Determinanten der Wahl einer (überhöhten) Geschwindigkeit. Eine Vielzahl von Untersuchungen beschäftigt sich aus diesem Grund mit den Ursachen und Motivationen von nicht angepasster Geschwindigkeit. Diese Arbeiten suchen weniger nach theoretischen Ansätzen, die dieses Verhalten beschreiben, sondern vielmehr nach pragmatischen und somit in der Praxis direkt anwendbaren Erkenntnissen zum Geschwindigkeitsverhalten von Kraftfahrern. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird versucht, direkten Einfluss auf die Fahrergruppen zu nehmen, die besonders zu einer überhöhten Geschwindigkeitswahl neigen (vgl. bspw. verkehrserzieherische Maßnahmen des DVR wie „Runter vom Gas“ oder „Raser kommen nicht an“), oder neue Entwurfskonzepte für Straßen zu entwickeln, die die Geschwindigkeitswahl positiv beeinflussen sollen (vgl. bspw. „Self Explaining Road“).

Bei der Beschreibung des Geschwindigkeitsverhaltens von Kraftfahrern werden mehrere Ansätze verfolgt. Zum einen wird das Geschwindigkeitsverhalten nach Perso-

nengruppen oder Fahrzeuggruppen differenziert. Dieser Ansatz geht davon aus, dass sich bestimmte Motivationen oder auch physiologische Eigenschaften je nach Fahrergruppe ändern und somit die Wahl der Geschwindigkeit beeinflussen. Im Kontext der Unfallforschung werden ähnliche Einteilungen vorgenommen (vgl. DESTATIS, 2007: Differenzierung nach Alter, Bildungsstand, Berufsgruppen oder Motorisierung des Fahrzeugs). Zum anderen wird der Einfluss der Straße und des Straßenbegleitraums auf die Geschwindigkeitswahl untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse führen zur Modifikation des heutigen Entwurfskonzepts von Straßen.

Die Selbsteinschätzung und das Risikoempfinden (vgl. Kapitel 3.4) spielen eine weitere wesentliche Rolle bei der Geschwindigkeitswahl. Nach WEBSTER/WELLS (2000) rechtfertigen Kraftfahrer die eigene Geschwindigkeitsüberschreitung mit der Annahme, dass *„sie selber normale, sichere Schnellfahrer und die anderen gefährliche Schnellfahrer“* sind. Die Geschwindigkeitsüberschreitung wird nach REASON et al. (1991) von den meisten Fahrern als weniger schwerwiegendes Vergehen angesehen, als bspw. gefährliche Überholmanöver oder alkoholisiertes Fahren. Neben dieser allgemeinen Einstellung zum Schnellfahren rechtfertigen viele Fahrer ihre überhöhte Geschwindigkeitswahl mit Ortskenntnis (LEVELT, 1998) oder mit ihrer eigenen überdurchschnittlichen Fähigkeit und Erfahrung als Kraftfahrer (vgl. PARKER et al., 1998, SILOCK et al., 1999, STRADLING, 1999). Ähnlich dieser Selbstüberschätzung fühlen sich nach SILOCK et al. (1999) viele Fahrer in der Lage, die Straße und die damit verbundene Grenzgeschwindigkeit besser einzuschätzen, als andere – inklusive der Administrative. Dies führt zu der Annahme, dass die zulässige Geschwindigkeit zu niedrig angesetzt und die Strecke eigentlich mit einer wesentlich höheren Geschwindigkeit befahrbar ist, ohne ein Risiko einzugehen. KÖPPEL/BOCK (1979) stellten in ihrer Untersuchung zwar eine tendenziell höhere Geschwindigkeit von ortskundigen Fahrern fest, eine statistische Signifikanz konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. RUWENSTROTH/KULLER/RADDER (1989) vermerkten dagegen, dass Fahrer *„ihre mangelnde Ortskundigkeit durch merkliche Geschwindigkeitsreduzierungen“* kompensieren. Im Zusammenhang mit dem Spurhalteverhalten wies VOLKENHOFF (2008) einen signifikanten Einfluss der Ortskundigkeit nach. Ortskundige passierten die untersuchten Kurven vorrangig leicht schneidend und damit mit dem Ziel einer hohen Geschwindigkeit. Die drastischsten Aushol- und Schneidemanöver stellte VOLKENHOFF jedoch bei ortsunkundigen Fahrern fest. Neben der motivierten Wahl einer zu hohen Geschwindigkeit, fahren nach CORBETT (1997) über 60 % der Fahrer zu schnell, ohne dies zu realisieren.

Die beschriebenen Einschätzungen der Fahrer hinsichtlich ihres eigenen Geschwindigkeitsverhaltens stellen Ergebnisse aus Befragungen dar. Diese sind zum einen

subjektiv gefärbt und zum anderen nur im Rahmen von aufwendigen Untersuchungen zu erheben. QUIMBY et al. (1999) versuchten in einer groß angelegten Verkehrsstudie (5.000 Datensätze) emanente Charakteristika von Geschwindigkeitsübertretern zu identifizieren. QUIMBY et al. (1999) koppelten hierzu Geschwindigkeitsmessungen mit Befragungen. In Relation zu dem Geschwindigkeitsverhalten konstatierten QUIMBY et al. (1999), dass *„die Schnellfahrer eher junge Personen sind, die jährlich eine hohe Anzahl an Kilometern zurücklegen, große Fahrzeuge fahren (2.000 ccm oder mehr), und bei der Geschwindigkeitsüberschreitung alleine im Fahrzeug saßen.“*

Auf Basis von Polizeidaten untersuchten LIPSCOMBE/WILKINSON (1996) ebenfalls den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsüberschreitung und unterschiedlichen – zumeist demographischen – Faktoren. Auf Basis von 2.000 Datensätzen kamen sie zu dem Schluss, dass die massivsten Geschwindigkeitsüberschreitungen von Männern im Alter zwischen 21 und 29 Jahren verübt werden, die keiner körperlichen, sondern geistiger Arbeit nachgehen. SCHMIDT (1982) führt die hohe Beteiligung junger Fahrer an Unfällen auf die fehlende Fahrpraxis zurück, da es sich bei jungen Fahrern grundsätzlich um Fahranfänger handelt. Als typische Altersgruppe wurden die 25-40-jährigen identifiziert. Das erhöhte Unfallrisiko junger Personen bestätigt sich auch in der Arbeit von RUWENSTROTH/KULLER/RADDER (1989), die das Geschwindigkeitsverhalten auf Außerortsstraßen untersuchten. ELLINGHAUS/STEINBRECHER (2003) ermittelten aus Befragungen zum Fahrspaß auf Landstraßen, dass ältere Fahrer auf Landstraßen eher „gemütlich“ unterwegs sind. Analog zur Altersverteilung von Geschwindigkeitsüberschreitern wiesen RUWENSTROTH/KULLER/RADDER (1989), SCHMIDT (1982) und auch ELLINGHAUS/STEINBRECHER (2003) nach, dass Männer den größeren Anteil unter den schnell Fahrenden einnehmen.²³

Neben den motivationalen Faktoren und demographischen Gruppen stellt das Fahrzeug einen weiteren (wesentlichen) Einflussfaktor auf die Geschwindigkeitswahl dar. QUIMBY et al. (1999) stellten bereits einen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Motorisierung des Fahrzeugs her (s.o.). HIRSCH (1986) konnte im Gegensatz zu vielen anderen Studien den Zusammenhang zwischen bspw. Alter oder Geschlecht nicht bestätigen. Im Rahmen von Regressionsanalysen kommt HIRSCH (1986) zu dem Schluss, dass *„Fahrer von neuen Fahrzeugen signifikant schneller fahren, als Fahrer von alten Fahrzeugen. Dasselbe trifft auf Fahrer von großen Fahr-*

²³ Weitere Untersuchungen zu demographischen oder motivationalen Faktoren für zu schnelles Fahren sind bspw. SARTRE (1998), CORBETT (1997) oder CORBETT/SIMON/O`CONNEL (1998).

zeugen zu, die schneller fahren, als Fahrer von kleinen Fahrzeugen. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Fahrzeugeigenschaften eine vorrangige Rolle bei der Geschwindigkeitswahl einnehmen.“ Diese Ergebnisse sind deckungsgleich mit älteren Studien von bspw. LEFEVE (1954), DE SILVA, (1946), oder GLANVILLE (1955).²⁴ ROSZELL/BRAAKSMA (1980) führen dies darauf zurück, „dass neue Fahrzeuge [technisch] eine höhere Geschwindigkeit fahren können, komfortabler, weicher und leiser fahren, besser zu handeln sind und grundsätzlich in einem besseren technischen Zustand sind.“ In neueren Untersuchungen wie bspw. KÖPPEL/BOCK (1979), RUWENSTROH/KULLER/RADDER (1989) oder BUCK (1992) wird zwar ebenfalls ein Zusammenhang zwischen Motorisierung und Geschwindigkeitsverhalten konstatiert, die statistische Signifikanz wird jedoch nicht nachgewiesen und der Einfluss der Motorisierung auf die Geschwindigkeit als eher niedrig angesehen. VOLKENHOFF (2008) untersuchte das Spurverhalten in engen Kurven auf Landstraßen differenziert nach Fahrzeugklassen. Das Spurverhalten in Kurven korreliert dabei mit der Geschwindigkeit (vgl. auch SPACEK, 1999, oder STEYER, 2004). Einen signifikanten Einfluss der Fahrzeugklasse auf die Spurlage und damit auf die Geschwindigkeit konnte von VOLKENHOFF (2008) nicht nachgewiesen werden.

Neben den beschriebenen Zusammenhängen zwischen Motivation, Fahrzeug und Geschwindigkeit stellen die Straße und deren Umgebung einen weiteren unbestreitbaren Einflussfaktor für die Geschwindigkeitswahrnehmung und -wahl dar. Einen guten Überblick über den Einfluss der Straße und des Seitenraums auf das Fahrerverhalten bieten bspw. BECHER et al. (2006) oder WELLER et al. (2006). Als die wesentlichsten straßenseitigen Einflussfaktoren gelten der Kurvenradius bzw. die Radienfolge, die Fahrbahnbreite bzw. die Fahrstreifenbreite, Ausstattungsmerkmale zur optischen Führung, Sichtweiten und die Seitenraumgestaltung, insbesondere die Seitenraumbepflanzung. Die wesentlichen Aussagen zu diesen Einflussfaktoren werden im Folgenden zusammengefasst (alle Autoren zitiert nach BECHER et al., 2006).

Nach DURTH et al. (1995) und SOSSOUMIHEN (2001) stellt der Kurvenradius besonders im Bereich kleiner Radien (bis etwa 150 Meter) einen entscheidenden Einflussfaktor für die Geschwindigkeitswahl dar. Während die durchschnittliche Geschwindigkeit bis zu einem Radius von 150 Metern ansteigt, bleibt sie darüber hinaus annähernd konstant. Die starke Streuung der empirisch erhobenen Werte weist je-

²⁴ Die Erkenntnisse dieser älteren Studien sind nicht ohne Einschränkung auf die heutige Zeit zu übertragen, da zum einen die Fahrzeugtechnik erhebliche Fortschritte gemacht hat, und zum anderen die Motorleistung aller Fahrzeuge im Durchschnitt steigt. Die Fahrzeugflotte aus den 50er Jahren ist demnach mit der heutigen nicht zu vergleichen.

doch deutlich auf weitere geschwindigkeitsrelevante Einflüsse hin. SOSSOUMIHEN (2001) sieht die Kurvigkeit als entscheidenden Einflussfaktor auf die Geschwindigkeit an (vgl. auch KUPKE, 1977, TRAPP/OELLERS, 1974, AL-KASSAR/HOFFMANN/ZMECK, 1981, DURTH/BIEDERMANN/VIETH, 1983, BUCK, 1992). In Bezug auf die Radienfolge bzw. die Relationstrassierung sind insbesondere die Ergebnisse von KLEINSCHMIDT (2000) und TRAPP/OELLERS (1974) von Interesse. Demnach erwarten Fahrer in der heutigen Zeit zunehmend einen einheitlich guten Ausbaustandard. Plötzliche Unstetigkeiten durch bspw. enge Kurven stellen somit potentielle Gefahrenstellen dar, da die gewählte Geschwindigkeit durch den vorangegangenen Abschnitt i. d. R. zu hoch gewählt wird. Dieser Sachverhalt kann anhand von OTTEN/SCHROIFF (1988) bestätigt werden, die feststellten, dass die größte Verzögerung bei kleinen Kurvenradien eher in der Kurve als im Kurvenannäherungsbereich auftritt. Dies ist auf eine zu späte Antizipation und somit eine falsche Erwartungshaltung an den voraus liegenden Streckenverlauf zurückzuführen.²⁵

Weitere grundlegende Einflüsse auf das Fahrerverhalten stellen Straßenquerschnitt und Fahrbahnmarkierung dar. Diese Erkenntnis führte unter anderen zu dem neuen Entwurfskonzept der RAL. GODLEY/TRIGGS/FILDES (2004) bewirkten in Simulatorstudien eine Reduktion der Geschwindigkeit durch Modifikation der Mittelmarkierung und der Fahrstreifenbreite. Der Einfluss der Fahrbahnbreite auf die Geschwindigkeitswahl wird von BAKABA (2003) auf Basis der Arbeiten von MAIER/MEEWES (1990) und LIPPOLD (1997) bestätigt. HERBERG (1983) stellte fest, dass mit einer ansteigenden nutzbaren Breite der Fahrbahn die Geschwindigkeit ansteigt und DILLING (1973) setzte den Einfluss der Fahrbahnbreite sogar in Relation zum Einfluss des Kurvenradius. LEUTZBACH et al. (1989) ermittelten in ihren Studien ebenfalls einen Zusammenhang zwischen Fahrbahnbreite und Geschwindigkeit. COHEN (1996) führt das unterschiedliche Fahrerverhalten auf verschiedenen breiten Fahrbahnen auf die variierende Komplexität der Fahraufgabe zurück. Wider Erwarten konnten sowohl BRANNOLTE et al. (1992 und 1993) als auch PALM/SCHMIDT (1999) nachweisen, dass schmalere Querschnitte sicherer sind als breitere.

Neben Kurvigkeit und Fahrbahnbreite sind die optische Führung und die Sichtweiten wichtige Faktoren für die Geschwindigkeitswahl. Nach KLEBELSBERG (1982) stellen Elemente der optischen Führung je nach Ausprägung hemmende oder leitende Komponenten der Straße dar. Als eines der zentralen leitenden Elemente wird die

²⁵ Weitere Arbeiten zum Einfluss der Kurvigkeit und von Einzelkurven auf das Fahrerverhalten, Fahrmanöver und mentale Beanspruchung wurden bspw. von SPACEK (1999), HEGGER/WEISE (1997), RICHTER et al. (1998), WAGNER et al. (1997) und HELANDER/SODERBERG (1973) durchgeführt.

Fahrbahnmarkierung angesehen. DAVIDES/DRIEL/GOLDENBELD (2003) führten durch gezielte Entfernung von Fahrbahnmarkierungen eine Reduktion und durch Hinzufügen von Markierungen auf zuvor unmarkierten Strecken eine Erhöhung der Geschwindigkeit herbei. Die Geschwindigkeitsänderungen lagen dabei im Bereich von -6 bis +3 km/h. VAN DEN HORST (1996) wies in Simulatoruntersuchungen ebenfalls eine Reduktion der Geschwindigkeit durch die Modifikation der Mittelmarkierung und eine damit einhergehende Fahrbahnbreitenreduzierung nach. Die Wichtigkeit der Fahrbahnmarkierung wird von SCHÖNBORN (1993) ebenfalls hervorgehoben. Die Änderung der Geschwindigkeit korreliert dabei mit den Erkenntnissen zum Sicherheitsempfinden von Fahrern auf unterschiedlich ausgeprägt markierten Strecken (vgl. RUDINGER/HOLTE, 1994 und WEISE/STEYER, 1999). Weitere Elemente zur optischen Führung sind bspw. Leitpfosten (vgl. BEALL/LOOMIS, 1996, LAND/HORWOOD, 1995, LANDWEHR, 1991). Zum Einfluss von Leitpfosten in Kombination mit Schutzplanken, Markierungen und Leittafeln führten bspw. ZWIELICH/REKER/FLACH (2001) und STEYVERS/DE WAARD (2000) Untersuchungen durch. Während durch Leitelemente in Geraden und Linkskurven eine Geschwindigkeitsreduktion festgestellt wurde, wirken diese Elemente in Rechtskurven beschleunigend. Nach LIPPARD/MEEWES (1994) führte das Anbringen von Leitelementen auf geraden Strecken nach einer Deckenerneuerung zu keinerlei Geschwindigkeitsänderungen, in Kurven hingegen zu einer Geschwindigkeitserhöhung. Wechselwirkungen traten durch Beschilderungen und andere Ausstattungseinrichtungen auf und wirken sich auf diese Ergebnisse in unterschiedlicher Form aus.

Eine weitere optische Führung wird durch die Seitenraumgestaltung und hier insbesondere durch die Seitenraumbepflanzung erreicht. Diese bewirkt jedoch nach BECHER/BAIER (2003), ZWIELICH/REKER/FLACH (2001), MAIER/MEEWES/NEUMANN (1999) oder LIPPARD/MEEWES (1994) weniger eine Veränderung der Geschwindigkeit, als eine Veränderung der Spurlage oder des Reaktionsvermögens. In engem Zusammenhang mit der Krümmung, Elementen der optischen Führung und der Seitenraumgestaltung steht die Sichtweite. Der Nachweis des Einflusses der Sichtweite – getrennt von den anderen Parametern – ist allerdings problematisch. Bspw. konnte BUCK (1992) keinen direkten losgelösten Einfluss der Sichtweite auf die Geschwindigkeit nachweisen. In der Studie von ALKASSAR/HOFFMANN/ZMECK (1981) stellt sich die Sichtweite dagegen als wesentlicher Einflussfaktor dar. Weitere Untersuchungen zum Einfluss der Sichtweite wurden bei veränderten Helligkeits- oder Witterungsverhältnissen durchgeführt (vgl. bspw. COHEN, 1988, oder HARMS, 1993). Die geringe Anzahl der Studien und deren unklare Ergebnisse zum Faktor Sichtweite auf das Fahrerverhalten und die Geschwindigkeitswahl verdeutlichen die Schwierigkeit, deren Einfluss bspw. vom domi-

nanten Parameter „Kurvigkeit“ zu isolieren. Weitere externe Einflüsse auf die Geschwindigkeitswahrnehmung und -wahl stellen bspw. Witterungsbedingungen oder das Umgebungslicht dar. Diese werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet, da Einflussfaktoren im Mittelpunkt stehen, die sich durch den Verkehrsingenieur beeinflussen lassen.

Neben den als primär anzunehmenden Einflussfaktoren auf die Geschwindigkeitswahl stellt die Bedeutung von akustischen und haptischen Reizen auf die Wahrnehmung und somit auf die Wahl einer adäquaten Geschwindigkeit eine wichtige Grundlage für die aktive Beeinflussung der Geschwindigkeitswahl dar. Wohl auch auf Grund der weitläufig verbreiteten Meinung, dass die visuelle Wahrnehmung für die Fahraufgabe und für die Geschwindigkeitswahrnehmung im Speziellen eine dominante Rolle einnimmt (vgl. SIVAK, 1996), existieren zur Bedeutung der akustischen und haptischen Komponente nur wenige zumeist ältere Arbeiten, auch wenn die Bedeutung der anderen Sinnesmodalitäten für die Geschwindigkeitswahrnehmung immer wieder betont wird: *„Will man den Beitrag der einzelnen Sinnesmodalitäten zur Geschwindigkeitswahrnehmung separat bewerten, so kann die Dominanz der Sehvorgänge über die restlichen Sinne eindeutig konstatiert werden. Nicht nur im Allgemeinen, sondern auch im speziellen Fall der Geschwindigkeitswahrnehmung wird der größte Anteil der relevanten Informationen durch den Sehvorgang aufgenommen. Auf der anderen Seite darf man die Rolle der auditiven Wahrnehmung und der übrigen Sinne nicht unterschätzen.“* (COHEN, 1986)

Basierend auf ersten Arbeiten von GIBSON (1954) und der Fragestellung *„Wie sehen die grundlegenden Mechanismen der Geschwindigkeitswahrnehmung aus; vorrangig visuell, akustisch, kinästhetisch oder Kombinationen aus diesen?“* lag der Fokus von DENTON (1966), EVANS (1970), BUBB (1977) und MATTHEWS/COUSINS (1980) auf dem Einfluss unterschiedlicher Sinneskanäle auf die Geschwindigkeitswahrnehmung. Im Rahmen von realen Fahrversuchen verdeckte DENTON (1966) den Tacho und wies die Probanden auf eine bestimmte Geschwindigkeit ein. Beim Erreichen der Zielgeschwindigkeit musste diese von den Probanden (ohne Tachoinformationen) halbiert oder verdoppelt werden. Alle Probanden unterschätzten dabei ihre Geschwindigkeit nach dem Verzögern, fuhren also schneller als ihre halbe Ausgangsgeschwindigkeit, und überschätzten ihre Geschwindigkeit nach dem Beschleunigen, erreichten also nicht die doppelte Ausgangsgeschwindigkeit.

EVANS (1970) wiederholte den Versuch von DENTON und konnte den gleichen Effekt beobachten, wenn auch mit einer größeren Schwankungsbreite als DENTON (1966). Aufbauend auf diesem Vorversuch versuchte EVANS (1970) zu ermitteln, welcher der Sinneskanäle vorrangig für die Geschwindigkeitsschätzung verantwort-

lich ist. In einem mehrstufigen Experiment wurden Probanden auf dem Beifahrersitz aufgefordert, die Geschwindigkeit des Fahrzeugs zu schätzen. Dabei fuhren sie entweder als normale Beifahrer (A), oder ihnen wurden die Augen verbunden (B), also der visuelle Sinneskanal entzogen, oder die Ohren mittels Ohrenschützern verschlossen (C), also der akustische Sinneskanal entzogen, oder in einem letzten Schritt sowohl der visuelle als auch der akustische Reiz entzogen (D). Die mittleren Abweichungen zwischen tatsächlicher Geschwindigkeit und durch die 23 Probanden geschätzter Geschwindigkeit sind in Bild 29 dargestellt.

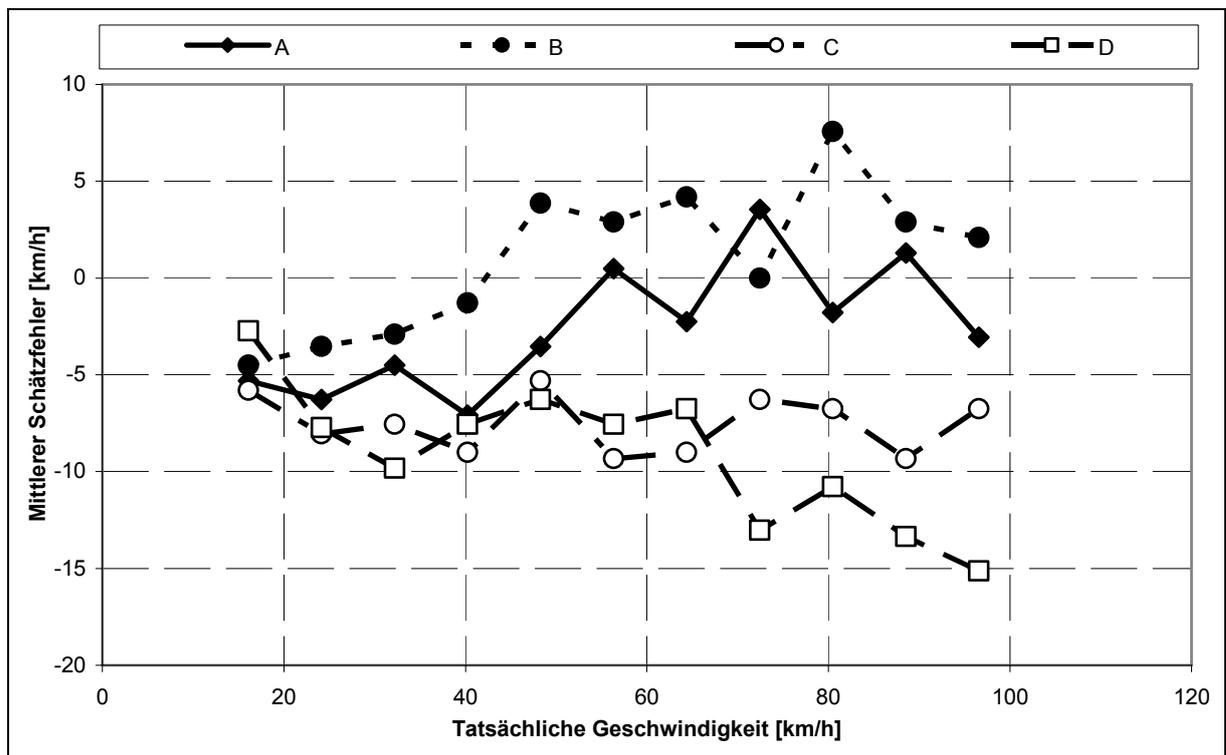


Bild 29: Mittlerer Schätzfehler der Geschwindigkeit nach EVANS (1970) in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Sinneskanäle (A: alle Sinne, B: ohne Sehsinn, C: eingeschränkter Gehörsinn, D: ohne Sehsinn und mit eingeschränktem Gehörsinn)

Während unter normalen Konditionen (A) die Geschwindigkeit bei niedrigen Ausgangsgeschwindigkeiten eher unterschätzt und bei hohen Geschwindigkeiten eher überschätzt wird (wie auch durch SUHR (1957), SUHR/LAUER/ALLGAIER (1958), CHUBB/ERNST (1963) und SNIDER (1967) beschrieben), wirkt sich ein Entzug der akustischen Informationen (alleine (C) oder in Kombination mit einem Entzug des visuellen Sinneskanals(D)) auf der gesamten Geschwindigkeitsbandbreite gleichermaßen aus und die Geschwindigkeit wird um mehrere km/h unterschätzt. Bei einem ausschließlichen Entzug der visuellen Informationen (B) wird die Geschwindigkeit ähnlich der normalen Fahrt (A) nur noch stärker im höheren Geschwindigkeitsbereich überschätzt.

Ebenfalls zu Ermittlung des Einflusses der unterschiedlichen Sinne auf die Geschwindigkeitswahrnehmung führte BUBB (1977) drei geschlossene Versuchsreihen zur Geschwindigkeitsschätzung durch. Analog zur Methodik von DENTON (1966) war der Tachometer während der Versuche für die teilnehmenden Probanden nicht sichtbar und es wurden unterschiedliche Sinneskanäle ausgeblendet. BUBB (1977) führte dabei drei Versuchsreihen durch. In der ersten Reihe mussten die Probanden am Steuer eine vorgegebene Geschwindigkeit ohne Tachoinformationen reproduzieren. Hierbei wurde unterschieden, ob sie alle Informationen zur Verfügung hatten (A), oder ob ihnen der akustische Sinneskanal durch Geräuschschutzklappen verdeckt wurde (B). In der zweiten Versuchsreihe fuhren die Probanden als Beifahrer in einem fremden Fahrzeug der gehobenen Oberklasse mit und mussten die Geschwindigkeit schätzen. Die Sinneskanäle wurden analog zur Methodik von DENTON (1966) ausgeblendet (A: volle Sinnesinformationen, B: visuelle Sinne ausgeblendet, C: akustische Sinne ausgeblendet, D: visuelle und akustische Sinne ausgeblendet). Die dritte Versuchsreihe schließlich wurde in einem Fahrsimulator durchgeführt. Dabei wurden die visuellen und akustischen Aufnahmen aus den Realfahrten dargeboten. Eine haptische bzw. kinästhetische Reizdarbietung erfolgte nicht. Auch bei den Simulatorstudien wurden die Sinne teilweise ausgeblendet (Analog zur zweiten Versuchsreihe die Szenarien A und B). Zusätzlich bot der Simulator die Möglichkeit, gezielte Fehlinformationen zu produzieren. So wurden den Probanden zwei weitere Szenarien vorgespielt, bei denen die akustische gegenüber der visuellen Information um eine Geschwindigkeitsstufe verschoben war (± 20 km/h) (Szenario D) bzw. die optischen und die akustischen Information invertiert wurden, d.h., zum Bild der höchsten Geschwindigkeit wurde das Geräuschbild der niedrigsten Geschwindigkeit abgespielt und vice versa (Szenario E). Die dargestellten Szenarien wurden mit üblichen Geschwindigkeiten und wechselnden/zufälligen Geschwindigkeitsänderungen durchgeführt. Bei allen Szenarien lag der mittlere Schätzfehler um die 10 km/h. Insbesondere bei den Selbstfahrversuchen wurden wie bereits bei DENTON (1966) die niedrigen Geschwindigkeiten unterschätzt, während hohe Geschwindigkeiten eher überschätzt wurden.²⁶ Die Abweichungen zwischen tatsächlicher und geschätzter Geschwindigkeit sind für alle Szenarien in Tab. 3 aufgeführt.

²⁶ BUBB (1977) führt die gute Schätzung der Geschwindigkeiten zwischen 80 km/h und 120 km/h auf deren häufige Präsenz bei den täglichen Fahraufgaben zurück.

	volle Information		ohne Sicht		ohne Ton		ohne Sicht und Ton	
	e	u	e	u	e	u	e	u
Selbstfahrer	9,87	8,98	-	-	11,79	9,35	-	-
Beifahrer	13,16	8,84	10,36	10,36	11,97	9,89	11,25	9,90
Simulator	6,00	8,79	8,36	10,53	8,91	11,21	-	-

Tab. 3: Durchschnittlicher absoluter Fehler gegenüber dem Szenario A (volle Information) getrennt nach erfahrenen (e) und unerfahrenen (u) Fahrern (nach BUBB, 1977)

Auf Grund des Probandenmixes machte BUBB (1977) über die absoluten Aussagen zur Schätzung der Geschwindigkeit hinaus auch Aussagen zum Zusammenhang zwischen Schätzgenauigkeit und Fahrerfahrung. Beim Szenario A (volle Information) schätzten alle erfahrenen Probanden die Geschwindigkeit besser als die Unerfahrenen, während sich das Ergebnis bei eingeschränkten Informationen umkehrte. *„Alle diese Beobachtungen lassen den Schluss zu, dass offensichtlich der erfahrene Fahrer, der aufgrund seiner Verkehrspraxis ein gutes und einigermaßen richtiges Gefühl für die Geschwindigkeit entwickelt hat, dafür die ganze Fülle der relevanten Informationen verarbeitet und, dass er infolgedessen bei einer Reduzierung der Anzahl der Informationskanäle am stärksten beeinträchtigt ist.“* (BUBB, 1977)

BUBB (1977) fasst die Ergebnisse seiner Versuchsreihe dahingehend zusammen, dass die akustische Information eine zuverlässige Erfassung des Geschwindigkeitsniveaus erlaubt. Die charakteristische Veränderung des Geräuschespektrums beim Beschleunigen oder Verzögern gegenüber dem Fahren mit konstanter Geschwindigkeit verursacht die Über- und Unterschätztendenz in Abhängigkeit der Geschwindigkeitsfolge. Der haptische Informationskanal hingegen liefert nach BUBB (1977) keinen wesentlichen Beitrag zum Geschwindigkeitsschätzen.

Basierend auf den Erkenntnissen von DENTON (1966, 1976) und BEERS/HUBERT (1972), eine veränderte oder eingeschränkte akustische Einwirkung auf den Fahrer führe zu einer schlechteren Geschwindigkeitsschätzung, untersuchten MATTHEWS/COUSINS (1980) den Einfluss unterschiedlicher Fahrzeuge und damit unterschiedlicher haptischer und akustischer Reize auf die Geschwindigkeitswahrnehmung.

Dazu wurden die Innenraumgeräusche von drei Fahrzeugen gemessen. Je nach Geschwindigkeit konnten Unterschiede zwischen 1 dB(A) und 10 dB(A) festgestellt werden. Die Frequenzzusammensetzung wurde dabei nicht extra untersucht, sondern lediglich durch die Bewertung mit der A-Filterkurve berücksichtigt. Die Probanden wurden in allen drei Fahrzeugen aufgefordert, eine Zielgeschwindigkeit zu benennen

und diese anzusteuern. Das Ergebnis wurde mit der real gemessenen Geschwindigkeit verglichen. Dieses Vorgehen wurde sowohl mit vollständiger Reizdarbietung als auch mit eingeschränkter Hörfähigkeit durchgeführt. In einer zweiten Versuchsreihe wurde das Experiment mit einer anderen Personengruppe durchgeführt. Hierbei fuhren die Probanden ihre eigenen Fahrzeuge und es erfolgte eine Unterscheidung zwischen „großen“ und „kleinen“ Fahrzeugen.

Als Ergebnis der beiden Versuchsreihen konnten die Studien von DENTON (1966), EVANS (1970) und BUBB (1977) bestätigt werden. Ein vermindertes Reizangebot führt zu einer schlechteren Geschwindigkeitsschätzung. Die Probanden, die größere und somit besser gedämpfte und gefederte Fahrzeuge fuhren, unterschätzten ihre Geschwindigkeit insbesondere im niedrigen Geschwindigkeitsbereich während die Probanden mit kleineren Fahrzeugen diese eher überschätzten. MATTHEWS/COUSINS (1980) schlussfolgern, dass *„der reduzierte sensorische Input zu einer geringeren subjektiv wahrgenommenen Geschwindigkeit führt, welche vom Probanden durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit kompensiert wird.“*

Auch wenn die Versuche von MATTHEWS/COUSINS (1980) den Einfluss der akustischen Reize auf die Geschwindigkeitswahrnehmung als dominierend einstufen, differieren die Ergebnisse für einzelne Fahrzeuge so stark, dass sie weitere Einflussfaktoren wie bspw. Innenraumvibrationen und unterschiedlich ausgeprägte Rückmeldungen von der Fahrbahnoberfläche ebenfalls als relevant vermuten.

3.6 Zusammenfassung der psychologischen Grundlagen

Die Ausführungen der Kapitel 3.1 bis 3.5 zeigen, wie vielseitig die psychologischen Faktoren und Erklärungsansätze für das Verhalten von Kraftfahrern im Straßenverkehr sind. Das Fahrerverhalten wird stets durch eine Kombination aus den psychologischen und physiologischen Ebenen der Wahrnehmung, der Aufmerksamkeit, der Kapazität und der Motivation bestimmt.

Die Wahrnehmung des Fahrers ist durch die Grenzen der Leistungsfähigkeit des Sinnesapparats determiniert. Eine der wichtigsten Erkenntnisse von SANDERS (1997) und WICKENS (1984, 1992) ist die Unabhängigkeit der unterschiedlichen Wahrnehmungsressourcen. Eine Wahrnehmung von parallelen Reizen ist nicht nur möglich sondern führt auch zu erheblichen Verbesserungen in der Performance und Reaktionszeit. Nach LEATHERWOOD/CLEVENSON/HOLLENBAUGH (1984) *„zeigen diese Ergebnisse einen deutlichen interaktiven Effekt zwischen Geräusch- und Vibrationskomponenten.“* Die Unterstützung des visuellen Sinneskanals durch bspw. haptische Reize hat vorrangig eine Reduktion des „Workloads“ und eine verbesserte

Reaktion zum Ziel. *„Wie bereits erwähnt ermöglicht eine Informationsübertragung über den haptischen Sinn dem Menschen die schnellste Reaktion im Vergleich zu allen anderen Sinneskanälen.“* (BUBB, 1977) Diese schnelle Reaktion ist jedoch nur dann uneingeschränkt möglich, wenn der Grad der Aufmerksamkeit des Fahrers auf einem optimalen Level liegt und nicht etwa durch eine monotone Umgebung beeinträchtigt ist. Während die Wahrnehmung und die Aufmerksamkeit vorrangig durch physiologische Faktoren determiniert und begrenzt werden, stellen motivationale Einflüsse wie bspw. das Risikoempfinden weitere wichtige Aspekte bei der Beschreibung des Fahrerverhaltens dar.

Zusätzlich zu diesen – vorrangig theoretischen – Beschreibungsansätzen des Fahrerverhaltens wurde eine Vielzahl von empirischen Studien durchgeführt. Sowohl die Unfallstatistiken als auch Forschungsarbeiten bestätigen den Zusammenhang zwischen nicht angepasstem Geschwindigkeitsverhalten und Unfallgeschehen. Vertiefte Erkenntnisse zur Geschwindigkeitswahrnehmung und zum Geschwindigkeitsverhalten bieten demnach das größte Potential zur Erhöhung der Verkehrssicherheit. In Anlehnung an die Regelkreise (vgl. Kapitel 3) erfolgt eine Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens getrennt nach Einflüssen aus der Psychologie und der Wirkung des Straßenraums auf den Fahrer.

Auf der Fahrerseite existiert eine Vielzahl möglicher Einflussfaktoren, wie Alter, Bildungsstand, Fahrerfahrung, Ortskundigkeit, und damit verbundenen limitierenden Faktoren wie Wahrnehmung und Risikoempfinden. Der Einfluss der Straßengestaltung bzw. des Straßenumfelds wurde jüngst in ausführlichen Studien (vgl. BECHER et al., 2006, und WELLER et al., 2006) analysiert. Als wesentlichste Einflussfaktoren wurden dabei die Kurvigkeit der Strecke, die Radienfolge, die Fahrbahnbreite und Ausstattungsmerkmale zur optischen Führung aufgeführt. Geringe Aufmerksamkeit wurde bei diesen Untersuchungen dem Einfluss von haptischen und akustischen Wahrnehmungen und Komfortempfinden gewidmet: *„Wenig beachtet, aber von hoher Bedeutung für das Fahrgefühl ist die akustische Wahrnehmung der Geräuschkulisse. Wie Untersuchungen gezeigt haben [...] sind vor allem die Wahrnehmung der Umströmungsgeräusche für die richtige Schätzung der Geschwindigkeit wichtig.“* (BUBB, 1977) Insbesondere erfahrene Fahrer scheinen die akustischen und haptischen Informationen unbewusst für die Geschwindigkeitswahrnehmung heranzuziehen.

Zusammenfassend stellt sich die Beschreibung des Fahrerverhaltens als hochkomplexe Aufgabe dar, die durch eine Vielzahl unterschiedlicher – meist nicht klar voneinander zu trennender, und je nach Situation in ihrer Bedeutung wechselnder – Faktoren determiniert wird. Eine aktive Fahrerbeeinflussung kann sich demnach nicht auf eine einzelne Komponente oder ein einzelnes Modell beschränken, sondern muss al-

le relevanten Größen vereinen und bestenfalls optimal nutzen. In riskanten Situationen muss bspw.

- die Aufmerksamkeit des Fahrers erhöht werden, was durch unterschiedliche Wahrnehmungskanäle möglich ist,
- der aufmerksame aber risikofreudige Fahrer durch geeignete Maßnahmen in seiner Geschwindigkeitswahl beeinflusst werden,
- alle Maßnahmen sowohl für junge, wie alte Personen, für große wie kleine Fahrzeuge wirksam sein und
- der entsprechenden Straßengestaltung bzw. Straßensituation angepasst sein.

4 Technische Grundlagen

Ziele der vorliegenden Arbeit sind Erkenntnisgewinne zum Einfluss von Fahrzeugschwingung und Innenraumgeräusch auf die Geschwindigkeitswahl sowie die Entwicklung geeigneter Maßnahmen zu deren Beeinflussung. Neben den Kenntnissen über die psychologischen Möglichkeiten der Einflussnahme sind somit auch die Grundlagen und Zusammenhänge der Fahrzeugakustik und Fahrzeugschwingung erforderlich. Im Weiteren werden die für diese Arbeit relevanten Grundlagen erläutert.

4.1 Grundlagen der Akustik

„Akustische Reize sind letztendlich Luftdruckänderungen, die durch Schwingungen von Objekten [...] hervorgerufen werden. Diese Schwingungen führen dazu, dass an manchen Stellen der Luftdruck hoch ist und an anderen Stellen niedrig. Die Veränderung zwischen hohem und niedrigem Luftdruck erfolgt mal mehr und mal weniger schnell. Ihre Frequenz wird in Schwingungen pro Sekunde (Hertz, Hz) gemessen. Ähnlich wie beim Sehen sind wir auch hier nicht für alle Frequenzen gleichermaßen empfindlich.“ (GEGENFURTNER, 2006) Das menschliche Gehör deckt einen Schalldruckbereich von ca. 130 dB und den Frequenzbereich zwischen 16 Hz und 20 kHz ab. Dabei kann ein Unterschied von 1 dB gerade noch, ein Unterschied von 3 dB deutlich wahrgenommen werden. Eine Änderung von 10 dB entspricht ca. einer Verdopplung bzw. Halbierung der subjektiv empfundenen Lautstärke.

„Physikalisch gesehen kann man die Akustik als die Lehre von den mechanischen Schwingungen in festen, flüssigen und gasförmigen Medien definieren.“ (VEIT, 2005)

Die wichtigsten physikalischen Größen der Akustik sind nach VEIT (2005)

- Schalldruck P $[N/m^2]$,
- Schallschnelle v $[m/s]$,
- Schallfluss q $[m^3/s]$,
- Schallintensität J $[W/m^2]$,
- Schalleistung P_a $[W]$ und
- Schallstrahlungsdruck II $[N/m^2]$.

„In der Akustik werden die linearen Schallfeldgrößen (Schalldruck und Schallschnelle) und die Schalleistung üblicherweise nicht unmittelbar gemessen und angegeben. Die dabei auftretenden Zahlenwerte würden größenordnungsmäßig zu weit auseinander liegen, so dass ihre praktische Handhabung sehr umständlich wäre. [...] Man

hat daher auch in der technischen Akustik absolute Pegel eingeführt, insbesondere den Schalldruckpegel und den Schalleistungspegel.“ (VEIT, 2005)

Schalldruckpegel und Schalleistungspegel sind die am weitesten verbreiteten Größen in der angewandten Akustik. Sie sind wie folgt definiert:

$$L = 20 \cdot \lg \cdot \frac{p}{p_0} \quad \text{Gl. 3}$$

Mit L Schalldruckpegel [dB]
 p Schalldruck [N/m²]
 p₀ 2 · 10⁻⁵ N/m² Bezugsschalldruck [N/m²]
 (Schalldruck an der Hörschwelle des Menschen bei 1.000 Hz)

$$L_p = 10 \cdot \lg \cdot \frac{P_a}{P_{a0}} \quad \text{Gl. 4}$$

mit L_p Schalleistungspegel [dB]
 P_a die von einer Schallquelle abgestrahlte Schalleistung [W]
 P_{a0} 10⁻¹² W Bezugsschalleistung [W]

Schalldruckpegel L und Schalleistungspegel L_p sind somit Verhältnissgrößen. Das Verhältnis zwischen Schalldruckpegel und Schalldruck kann auch über das Monogramm nach Bild 30 (links) direkt abgelesen werden. Da sich der Schalldruck, den das menschliche Gehör wahrnehmen kann, über einen weiten Bereich erstreckt (bspw. bei 1.000 Hz von 2 · 10⁻⁵ N/m² bis 20 N/m²), wird hierfür der logarithmische Maßstab verwendet.

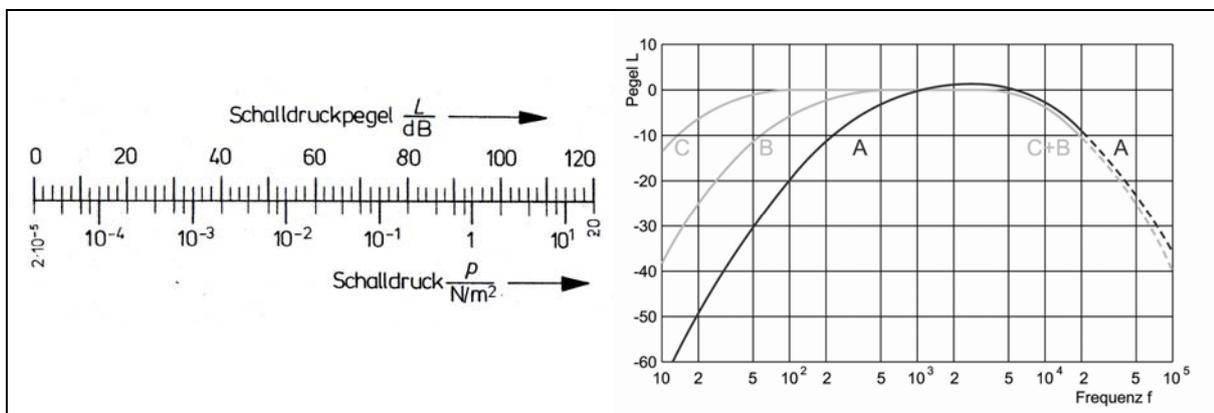


Bild 30: Schalldruck-Schalldruckpegel-Umrechnung (rechts) und international festgelegte Bewertungskurven für Schallpegelmesser mit den Bewertungsfiltern A, B und C gemäß IEC (nach VEIT, 2005) (rechts)

Neben den dargestellten Größen hat die Frequenz der Schwingung einen entscheidenden Einfluss auf die Akustik. Mechanische Wellen unterschiedlicher Frequenzen lassen sich in drei Hauptkategorien einteilen: Extrem niederfrequente Schwingungen werden als Infraschall bezeichnet und treten bspw. bei Erschütterungen oder Beben auf. Mittelfrequente Schwingungen werden als Schall und hochfrequente Schwingungen als Ultraschall bezeichnet. Das menschliche Gehör ist nicht in jedem dieser Frequenzbereiche gleich empfindlich. Diesen Sachverhalt berücksichtigen heute Mess- und Auswertesysteme durch einen Bewertungsfilter (A, B oder C). Die international festgelegten Bewertungskurven sind in Bild 30 dargestellt. Die größte Empfindlichkeit besitzt das menschliche Ohr im Frequenzbereich zwischen etwa 700 und 6.000 Hz (siehe VEIT, 2005). Versuche haben ergeben, dass in der Regel zwischen ca. 1.000 Hz bis 4.000 Hz das Maximum der Gehörempfindlichkeit liegt. Weitere Berücksichtigung finden die Frequenzverteilungen des Schalls vor allem in der Psychoakustik.

Da akustische Parameter in der Regel bezüglich ihrer Auswirkung auf den menschlichen Organismus betrachtet werden, wurden die wichtigsten Parameter in so genannten „psychoakustischen Messgrößen“ zusammengefasst. Der Begriff Messgröße ist dabei irritierend, da es sich um abgeleitete Kenngrößen und nicht um native Messwerte handelt. Basierend auf Messungen u.a. des Schalldrucks und der Frequenzzusammensetzung werden nach ZWICKER (1982) folgende psychoakustischen Größen induziert:

- | | | | |
|---|-------------------|---------|-------------------------------|
| • | Lautheit | [sone] | (wahrgenommene Lautstärke) |
| • | Schärfe | [acum] | (Anteil der hohen Frequenzen) |
| • | Schwankungsstärke | [vacil] | (Schwankung der Lautstärke) |
| • | Rauhigkeit | [asper] | (hörbare Geräuschmodulation) |

Des Weiteren werden die Parameter Tonhaltigkeit und Impulshaftigkeit häufig zu den psychoakustischen Parametern gezählt und stellen Eingangparameter für bspw. die Bildung des Beurteilungspegels²⁷ dar.

Den größten Einfluss bei der Ermittlung des „auditiven Komforts“ haben die beiden Parameter Lautheit und Schärfe.

- Lautheit bezeichnet „Die Empfindungsgröße der zur Schallstärke gehörenden Intensitätsempfindung [...]“. Sie wird bestimmt durch Beantwor-

²⁷ Der Beurteilungspegel beschreibt die Schallimmission, die an einem bestimmten Ort einwirkt. Durch den Beurteilungspegel soll die Belastung von Menschen durch Lärm gekennzeichnet werden.

tung der Frage, wievielmals lauter oder leiser ein zu messender Schall im Vergleich zu einem Standardschall ist. Dabei wird von der Versuchsperson entweder ein Verhältnis gesucht oder über ein Verhältnis von Empfindungsgrößen eine Aussage getroffen. Die so gefundene Empfindungsgröße wird daher genauer als Verhältnislautheit bezeichnet.“ (VEIT, 2005)

- Schärfe ist eine Größe, die bei schmalbandigen Geräuschen auftritt. Hierbei handelt es sich um eine Verhältnisgröße zwischen hohen und tiefen Spektralanteilen. *„Die Schärfe ändert sich in Abhängigkeit vom Pegel wesentlich weniger als in Abhängigkeit von der spektralen Zusammensetzung.“ (VEIT, 2005)* Der Wert der Schärfe ist dabei umso höher je mehr hochfrequente Anteile im Signal enthalten sind. Die Signalschärfe kann allgemein formuliert auch als eine Art „Schwerpunkt“ des Lautheits-Spektrums interpretiert werden. (vgl. VORLÄNDER, 2007)

In dieser Arbeit werden im Rahmen der messtechnischen Voruntersuchung sowie der Akzeptanzuntersuchung vorrangig die Größen Lautheit, Schärfe und Rauigkeit zur Beurteilung der Akustik herangezogen.

Neben den allgemeinen akustischen Grundlagen ist insbesondere die Fahrzeuginnenraumakustik von Interesse für die vorliegenden Fragestellungen. Die Geräuschemission von Fahrzeugen setzt sich vorrangig aus den drei Komponenten „aerodynamische Geräusche“, „Antriebsgeräusche“ sowie „Rollgeräusche“ zusammen, wobei die Rollgeräusche den Hauptanteil am gesamten Geräuschpegel ausmachen (vgl. hierzu Bild 31).

Da die Fahrzeugakustik und vor allem die Fahrzeuginnenraumakustik hoch-komplex und durch die Weiterentwicklungen im Fahrzeugbau ständigen Änderungen unterworfen sind, sollen sie hier lediglich in ihren Grundfunktionen dargestellt werden. Durch steigende Kundenansprüche und markenprägende Faktoren haben sich die Bemühungen der Fahrzeugindustrie im Bereich Entwicklung und Design der Fahrzeugakustik in den letzten Jahrzehnten erheblich gesteigert.

Das Fahrzeuginnenraumgeräusch steht am Ende einer Wirkungskette von Entstehung (Fahrbahnbelag – Reifen), Übertragung (Reifen – Radaufhängung – Karosserie – Innenraum) bis hin zum messbaren und wahrnehmbaren Schallereignissen am Ohr des Fahrers. Sowohl bei der Entstehung der Geräusche als auch bei ihrer Übertragung aus bspw. der Interaktion zwischen Reifen und Fahrbahn in die Fahrgastzelle wirken mehrere Komponenten wechselseitig zusammen.

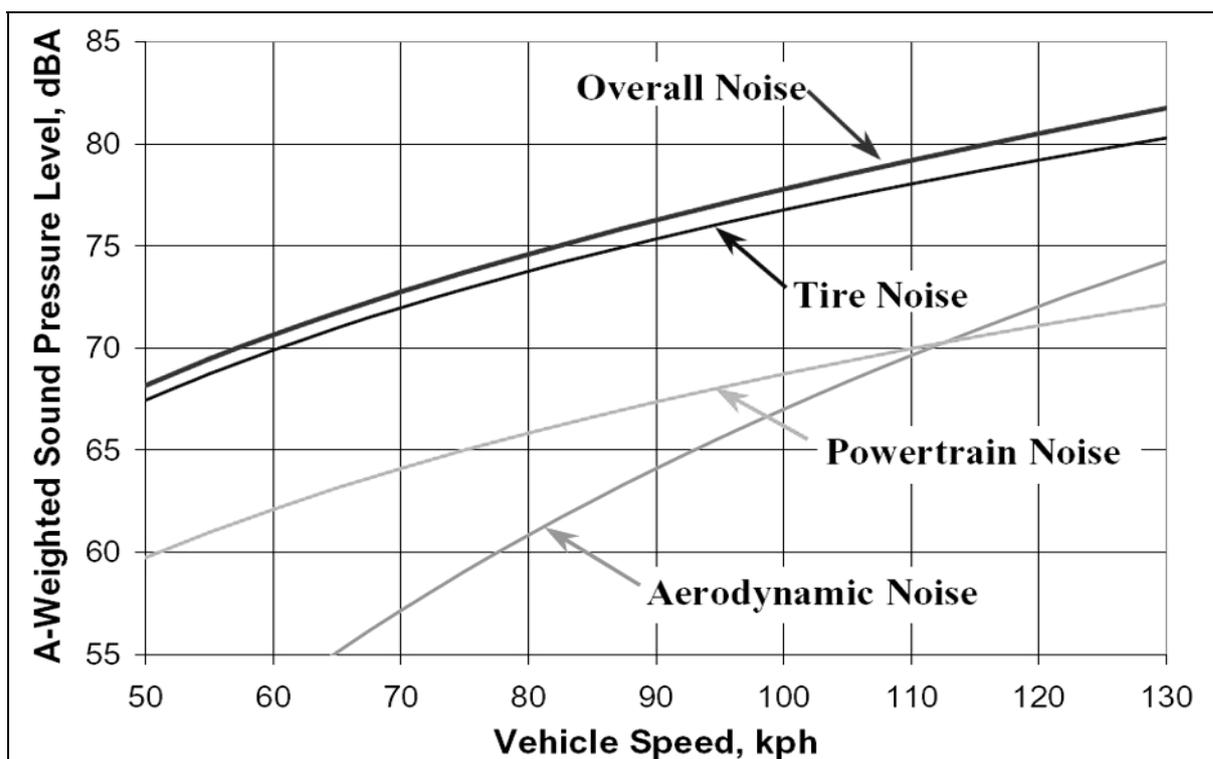


Bild 31: Verteilung der unterschiedlichen Quellen der Lärmemission des Straßenverkehrs (DONAVAN/RYSER, 2003)

Das Zusammenspiel aus Reifen und Fahrbahnoberfläche ist für die Entstehung des Rollgeräuschs verantwortlich. Die Entstehung basiert auf einer Kombination aus der Anregung durch mechanische Schwingungen des Reifens sowie aus der Auslösung aerodynamischer Vorgänge in der Kontaktfläche. Dabei werden die Anregungsmechanismen der Schwingungen nochmals unterteilt in radiale und tangentiale Schwingungen des Reifenprofils, Adhäsionseffekte durch den „Stick-Snap“-Effekt²⁸, Seitenwand- und Gürtelschwingungen, sowie den „Stick-Slip“-Effekt.²⁸ Insbesondere die mechanische Anregung durch radiale Schwingungen des Reifenprofils und die Gürtelschwingung bzw. Mantelschwingung, die durch die Verformungen des Reifens beim Rollvorgang entsteht (siehe Bild 32), wird bei der gezielten akustischen Beeinflussung durch Rüttelstreifen genutzt.

²⁸ Stick-Snap-Effekt: Auflösung der Adhäsion zwischen Reifenprofilkörpern und Straßenoberfläche. Stick-Slip-Effekt: Tangentiale Bewegung von Reifenprofilkörpern entlang der Straßenoberfläche. Air-Pumping-Effekt: Schnelle Kompression und Dekompression von Luft vor bzw. hinter dem Reifen. Für tiefgreifendere und vollständige Definitionen und Erläuterungen der einzelnen Effekte siehe bspw. LFU (2004), BECKENBAUER (2003), SANDBERG (2002) oder CROCKER (2007).

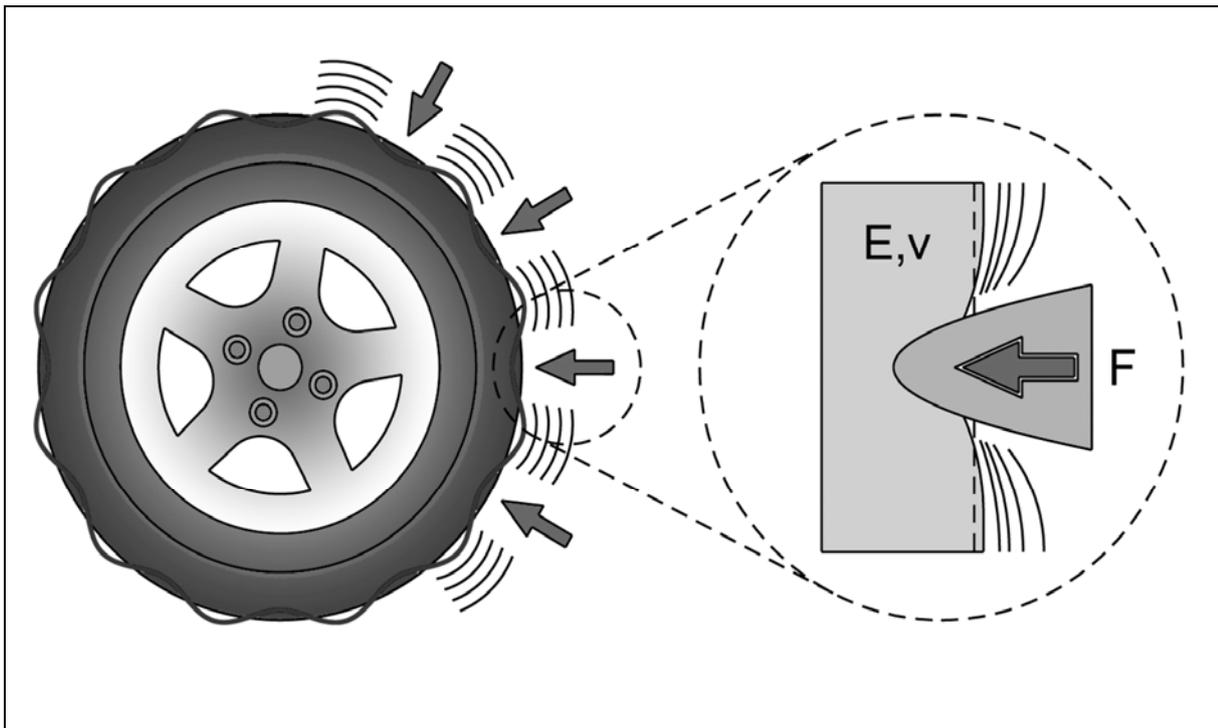


Bild 32: Modell der akustischen Anregung durch Mantelschwingung

Die aerodynamischen Entstehungsmechanismen unterteilen sich in „Air-pumping“,²⁸ Hohlraumresonanzen im Radreifen, den Horneffekt, Helmholtzresonanzen und Röhrenresonanzen im Reifenprofil. Auf Grund der Vielzahl und Komplexität der einzelnen Effekte wird hier auf eine weitere Ausführung aller Mechanismen verzichtet²⁸ (In Anhang C sind die einzelnen Effekte grafisch dargestellt).

Die durch die Fahrbahn-Reifen-Interaktion erzeugten akustischen Schwingungen werden über den Reifen, die Radaufhängung und schließlich die Karosserie in den Fahrzeuginnenraum geleitet, wo wiederum ein Wechselspiel aus Absorption, Schallspiegelung und Schallverteilung den Schall zum menschlichen Ohr überträgt. Auf diesem Weg wird der Schall durch Dämmung, Dämpfung und Absorption verändert und durch die Entwicklungen der Fahrzeugindustrie gezielt beeinflusst (vgl. Bild 33).

Der Schallpegel und seine Frequenzzusammensetzung im Innenraum müssen also als Eigenschaft des gesamten Fahrzeugs gesehen werden. Die Ausprägung der Geräusche ist von Fahrzeugtyp zu Fahrzeugtyp unterschiedlich und wird in seiner Ausprägung durch Reifen, Radaufhängung, Karosseriestruktur und Innenraumausstattung beeinflusst. Umso schwerer ist es, die Innenraumgeräusche der Fahrgastzellen durch Oberflächenmodifikationen auf der Straße zu beeinflussen – insbesondere vor dem Hintergrund der Forderung einer nachhaltigen Lösung.

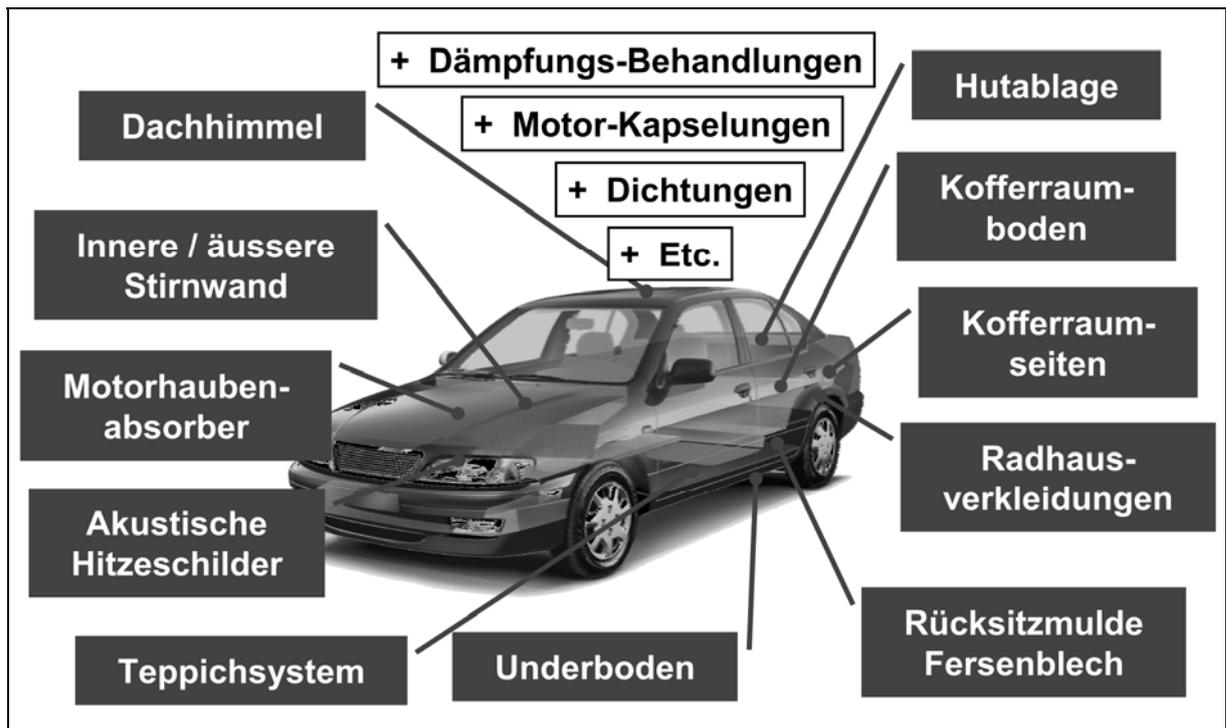


Bild 33: Elemente der Schalldämmung und -absorption des Kraftfahrzeugs (BLOEMHOF, 2002)

4.2 Grundlagen der Haptik

Neben der akustischen stellt die haptische Wahrnehmung eine wichtige Größe für die Einflussnahme auf den Kraftfahrzeugführer dar. Die haptische Wahrnehmung (griechisch: haptikos = greifbar, umgangssprachlich auch „Tastsinn“ genannt) bezeichnet den Teil der Sinneswahrnehmung, mit dem mechanische Reize vom Menschen erkannt werden. Im Allgemeinen wird unterschieden zwischen

- taktiler Wahrnehmung (Oberflächensensibilität) und
- kienästhetischer Wahrnehmung (Tiefensensibilität).

In dieser Arbeit steht die kienästhetische Wahrnehmung im Vordergrund. Sie bezeichnet die Komponenten der haptischen Wahrnehmung, durch die eine Bewegungsempfindung und das Erkennen der Bewegungsrichtung ermöglicht werden. Die kienästhetische Wahrnehmung ist entscheidend für das Komfortempfinden des Menschen. Die Schwingungseinwirkung auf den Menschen wird detailliert in der VDI-Richtlinie 2057 behandelt. Obwohl die Richtlinie primär auf die schädigende Wirkung von Schwingungen eingeht, kann das dort definierte Bewertungsverfahren für diese Arbeit als vergleichender Parameter herangezogen werden.

„Mechanische Schwingungen, die vorwiegend über das Gesäß und den Rücken des sitzenden Menschen [...] übertragen werden, werden Ganzkörper – Schwingungen (GKS) oder auch Ganzkörper – Vibrationen genannt. Diese GKS sind oft stochas-

tisch oder beinhalten verschiedene Frequenzen. Sie sind möglicherweise durch Stoßhaltigkeit gekennzeichnet, kommen in zahlreichen Richtungen vor und variieren zeitabhängig.“ (VDI 2002-1) „[Neben den GKS ist der Fahrzeugführer] [...] der Einwirkung mechanischer Schwingungen auf das Hand-Arm-System ausgesetzt.“ (VDI 2002-2) Diese Schwingungen werden ähnlich den GKS bewertet. Das Berechnungsverfahren ist im Teil 2 der VDI Richtlinie 2057 geregelt.

Schwingungen werden im Allgemeinen als Beschleunigungen gemessen und aufgezeichnet. Die Gravitationskonstante g [m/s^2] stellt dabei die Grundeinheit dar. Die Beschleunigungen „schwingen“ um Null (vgl. Bild 46), weshalb eine direkte Bewertung oder ein Vergleich von Schwingungen schwierig ist. Da neben dem Absolutwert der Schwingung die Frequenz eine entscheidende Bedeutung bei der Schwingungsanalyse einnimmt, kommen neben dieser Darstellung auch Spektraldarstellungen oder Pegeldarstellungen (siehe Bild 52) zum Einsatz. Weitere Berechnungsgrößen zur Bewertung von Schwingungen werden in Kapitel 7.3 dargestellt.

Die Schwingungen eines Fahrzeugs entstehen durch das komplexe Zusammenwirken zwischen Fahrzeug und Straße und innerhalb des Fahrzeugs durch das Zusammenspiel unterschiedlicher Feder Dämpfer-Systeme. Aus den Schwingungen resultieren Kräfte, die auf den Körper der Fahrzeuginsassen einwirken (siehe Bild 34).

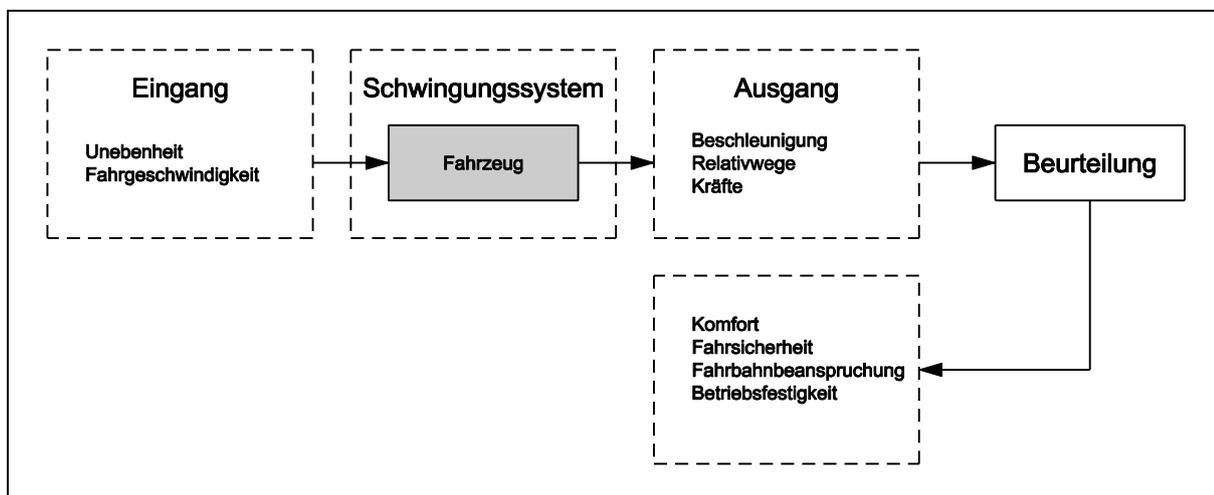


Bild 34: Blockschaubild des Schwingungssystems Fahrzeug (nach MITSCHKE, 1984)

Ebenso wie die Fahrzeugakustik stellt sich auch die Fahrzeugschwingung und Fahrzeugvibration als sehr komplexes Feld dar. Die Schwingungsvorgänge eines Fahrzeugs im realen Fahrbetrieb sind hochgradig stochastisch und weisen zum Teil große individuelle Schwankungen zwischen unterschiedlichen Fahrzeugmodellen und Baujahren auf. Eine weitere Variation der Fahrzeugschwingungen entsteht durch unterschiedliche Beladungszustände, Geschwindigkeiten sowie sonstige äußere Ein-

flüsse (selbst wechselnde Windverhältnisse haben einen, wenn auch geringen Einfluss auf das Schwingungsverhalten). Ähnlich wie bei der Fahrzeuginnenraumakustik bemüht sich die Fahrzeugindustrie, möglichst schwingungsarme komfortable Fahrzeuge zu entwickeln. Auf Grund der Komplexität soll hier nur eine kurze Einführung in diese Thematik gegeben werden.

Ein Fahrzeug besteht im weitesten Sinne aus Einzelmassen, Federn und Dämpfern und kann demnach in ein Mehrmassenschwinger-System überführt werden. Je nach Aufgabenstellung und Detaillierungsgrad variieren Fahrzeugmodelle in ihrer Komplexität und damit auch in den Freiheitsgraden der zu lösenden Gleichungssysteme. Es ist bspw. möglich, ein Fahrzeug annähernd auf ein Viertel-Fahrzeug zu reduzieren. In diesem Fall besteht das Ersatzmodell lediglich aus 3 Massen (vgl. Bild 35 links). Der Achsabstand wird als unendlich groß angenommen. Wank- und Nickbewegungen können nicht abgebildet werden. Aus solch einfachen Modellen können jedoch anschaulich die Eigenfrequenzen der einzelnen Massen (Rad, Aufbau, Sitz) und die korrespondierenden Wellenlängen abgeleitet werden (vgl. Bild 35 rechts).

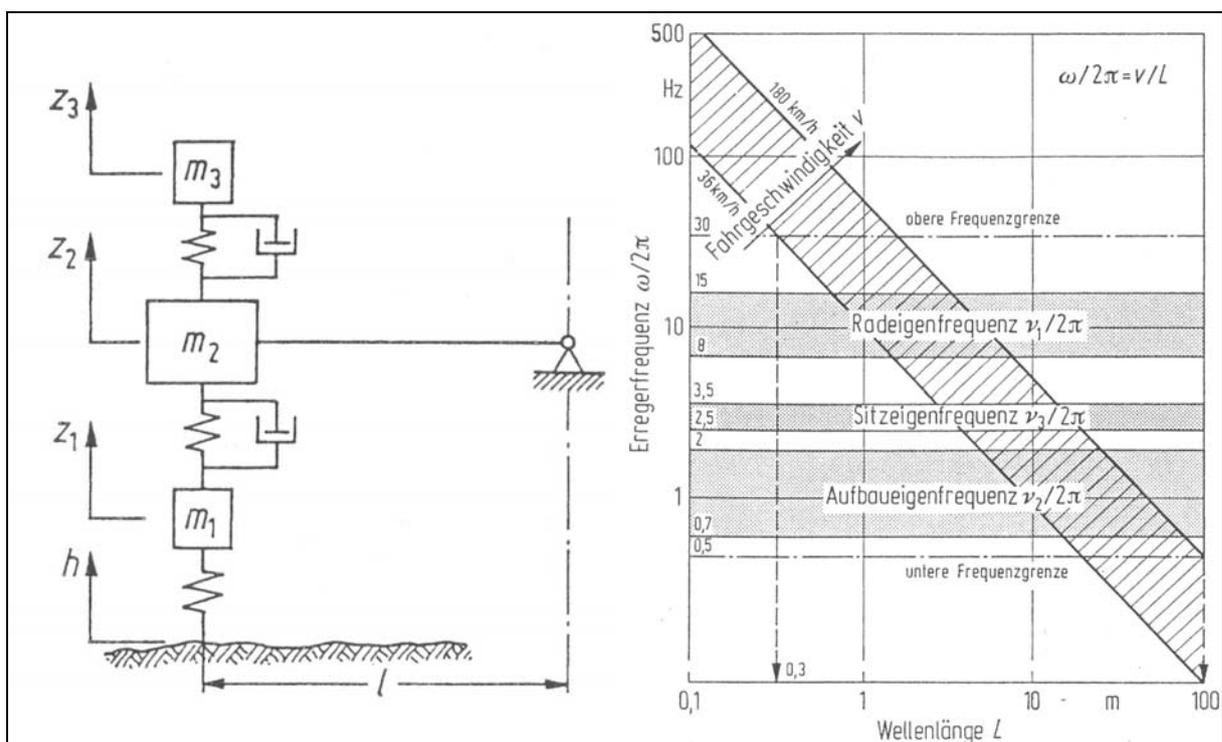


Bild 35: Drei-Massen-Ersatzsystem für ein Viertelfahrzeug (links) und aus Eigenfrequenzen und Fahrgeschwindigkeiten resultierende Bereich für Erregerfrequenzen und Wellenlängen von Unebenheiten (rechts) (MITSCHKE, 1984)

Bei steigenden Ansprüchen und insbesondere bei Betrachtungen, in denen das Wankmoment stärkeren Einfluss auf die Ergebnisse erwarten lässt oder die Anregung über Wellenlängen im Bereich des Achsabstandes erfolgt, reichen derart vereinfachte Modelle nicht aus. Nach MITSCHKE (1984) stellt sich die Schwingstärke im

Fahrzeug nicht nur als abhängig von der Fahrgeschwindigkeit, sondern auch von dem Achsabstand und der damit verbundenen Phasenverschiebung der Anregung in den Achsen dar. Zur Darstellung derartiger Zusammenhänge wird die Modellierung von Halb- oder Voll-Fahrzeugen nötig (vgl. bspw. Bild 36).

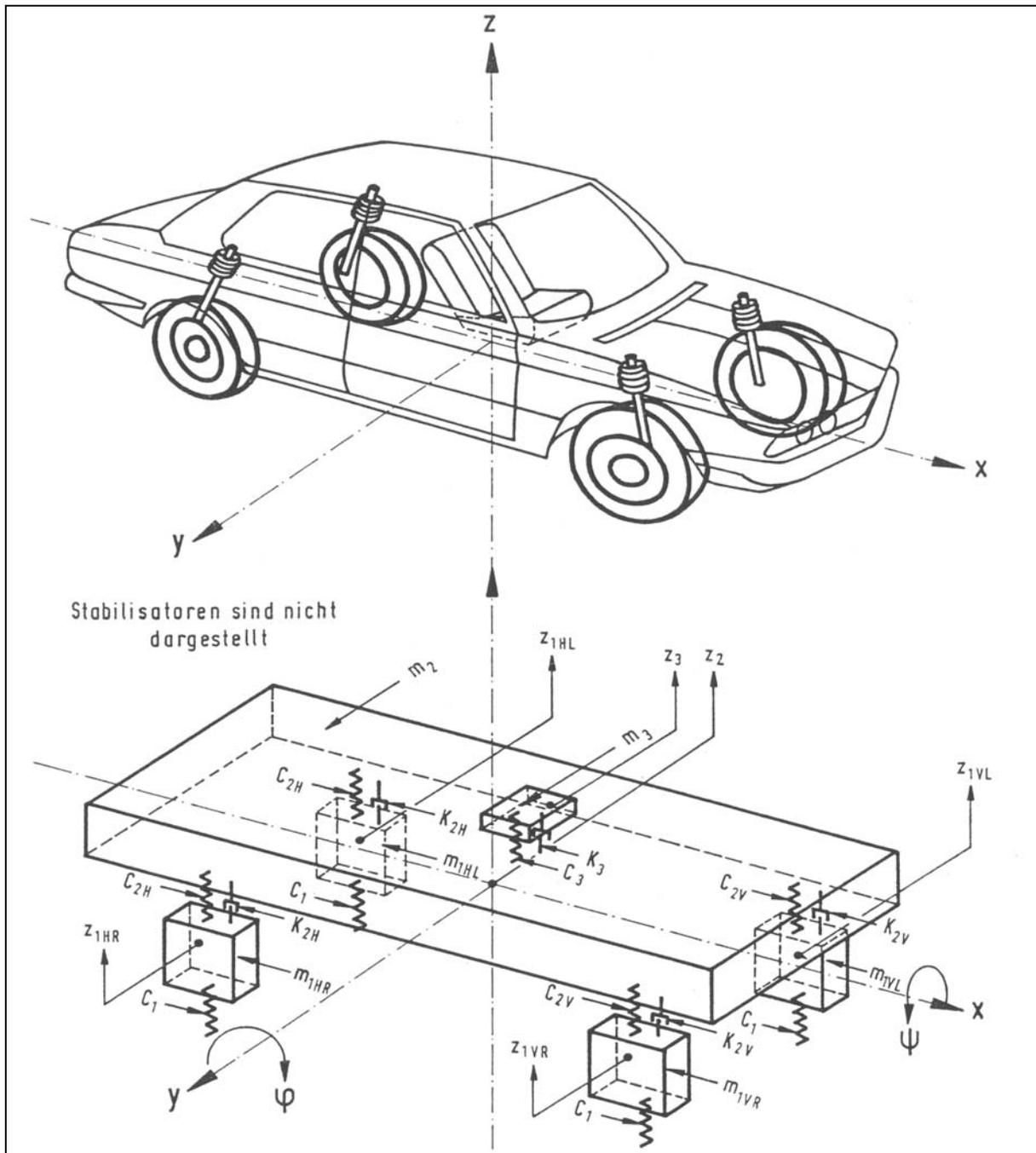


Bild 36: Repräsentatives Vollfahrzeug und Schwingungsersatzsystem (STEINAUER, 1991)

Sollen detailliertere Fragen, wie bspw. der Einfluss bestimmter Einzelkomponenten auf den Schwingungsablauf, untersucht werden, gewinnen die Modelle an Komplexität. Hier kommen aufwendige Mehrkörper oder Finite-Elemente-Modelle zum Einsatz

Im Rahmen dieser Arbeit steht nicht die physikalische Betrachtung der Fahrzeug-schwingung im Vordergrund, sondern die Analyse ihrer Wirkung auf den Menschen. Von besonderer Bedeutung sind daher nicht die einzelnen detaillierten Schwin-gungszusammenhänge im Fahrzeug, sondern lediglich die wahrnehmbaren Schwin-gungen im Sitz, Fußraum und am Lenkrad, also an allen Kontaktpunkten des Fahrers mit dem Fahrzeug. Die Wirkung dieser Schwingung auf den Fahrer ist abhängig von der

- absoluten Größe der Beschleunigung und der
- Frequenzzusammensetzung.

Dieser Zusammenhang wird durch den Begriff des Schwingungskomforts beschrie-ben. Zur Beantwortung der Frage, bei welcher Anregungsfrequenz sich der Fahrkomfort am deutlichsten gegenüber der Fahrbahn ohne Rüttelelemente ändert, müssen die Vergrößerungsfunktionen von Fahrzeug und Mensch betrachtet werden. Für re-präsentative Fahrzeuge sind die Vergrößerungsfunktionen i. d. R. bekannt (vgl. bspw. STEINAUER, 1991). Die Vergrößerungsfunktionen zeigen, in welchem Maße Vertikalbeschleunigungen bestimmter Frequenzbereiche bei unterschiedlichen Fahr-geschwindigkeiten vom Anregungsort (Kontaktpunkt Reifen Fahrbahn) bis zum Emp-fangsort (menschlicher Körper) übertragen und durch das Feder-Dämpfer-System ggf. verstärkt oder abgeschwächt werden.

Neben der rein physikalischen Übertragung der Schwingungen vom Einleitungs- bis zum Empfangsort, kommt der Empfindlichkeit des Menschen bzgl. bestimmter Fre-quenzen von Schwingungen eine wesentliche Bedeutung zu. Ähnlich wie die Bewer-tung von Schallereignissen können Schwingungen unterschiedlicher Frequenzen hinsichtlich ihrer Wahrnehmbarkeit durch den Menschen bewertet werden. D.h., die Wirkung bestimmter haptischer Anregungen auf den Menschen hängt in entschei-dendem Maße von

- der physikalischen Übertragung und der
- Wahrnehmung durch den Menschen

ab. Fasst man diese beiden Kriterien nach STEINAUER (1991) zu einer übergreifen- den Bewertungsgröße zusammen, erhält man die frequenzabhängige Komfortemp- findlichkeit. Die Komfortempfindlichkeit berücksichtigt also sowohl den Übertra- gungsweg als auch das Empfinden der Schwingung durch den Menschen und er- möglicht eine gute Einschätzung der Wirkung bestimmter Anregungsfrequenzen auf das Komfortempfinden des Fahrers.

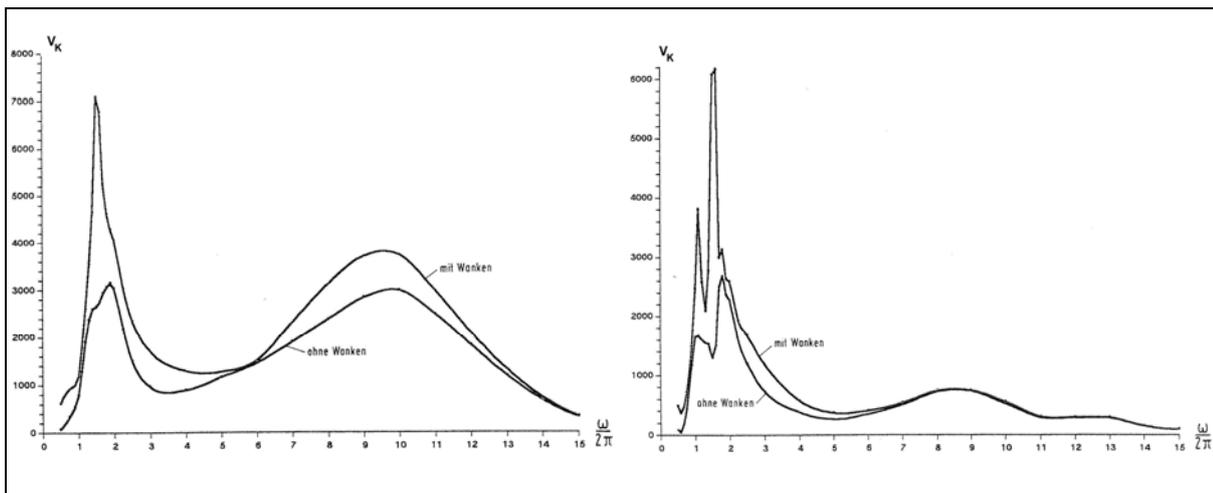


Bild 37: Komfortempfindlichkeit V_K für einen repräsentativen Pkw (links) und für einen repräsentativen Lkw (rechts) (STEINAUER, 1991)

Bei einem Vergleich der in Bild 37 dargestellten Komfortempfindlichkeitskurven, können zum einen die leicht verschobenen Bereiche sowie zum anderen der unterschiedliche absolute Betrag der größten Übertragung/Empfindung von Schwingungen bei Pkw- und Lkw-Fahrern erkannt werden. Soll also bei einem Lkw-Fahrer der gleiche Diskomfort erzeugt werden, wie bei einem Pkw-Fahrer, wird eine größere Anregungsleistung und eine andere Anregungsfrequenz benötigt. Die Übertragung von Schwingungen wird im Wesentlichen in die Schwingungsformen Vertikalschwingung, Horizontalschwingung sowie Nicken und Wanken differenziert. In Bild 37 ist der Unterschied zwischen der Wirkung einer reinen Vertikalschwingung und einer Kombination aus Vertikalschwingung und Wanken deutlich zu erkennen. Da es sich bei der Anregung durch transversale Rüttelstreifen um symmetrische Anregungen des Fahrzeugs durch vorrangig vertikale Schwingungen handelt, beschränken sich die weiteren Ausführungen auf diese reinen vertikalen Schwingungen.

Neben der Differenzierung nach der Frequenz unterscheiden die Bewertungsfunktionen nach dem Einleitungsort der Schwingung in den Körper. Der Torso eines Menschen reagiert anders auf Schwingungen als die Extremitäten, wie bspw. die Hände. In Bild 38 ist dieser Zusammenhang sehr anschaulich dargestellt. Diese Bewertungsfunktionen nach MITSCHKE (1984) wurden im Laufe der Zeit weiterentwickelt und angepasst. Die Berechnungen in dieser Arbeit basieren auf den aktuellen Bewertungsfunktionen nach VDI-Richtlinien 2002-1/2 (siehe Anhang D). Sowohl für den Lkw als auch den Pkw sind in Bild 37 eindeutig empfindliche Bereiche zu erkennen. Der stärkste Anstieg der Komfortempfindlichkeit V_K liegt bei beiden Fahrzeugtypen zwischen 1 und 2 Hz. Dieses Maximum ist jedoch sehr schmal. Zusätzlich zum schmalen abgedeckten Frequenzbereich dieses ersten Maximums sind hier die größten Dämpfungsbemühungen der Automobilindustrie zu erwarten. Ein weiteres, we-

sentlich breiteres Maximum liegt beim Pkw zwischen 9 und 11 Hz und beim Lkw zwischen 7,5 und 9,5 Hz. Diese Bereiche kennzeichnen nach MITSCHKE (1984), STEINAUER (1991) oder auch WILLUMEIT (1998) die Eigenfrequenzbereiche der Vorderachse. Es wird also gerade der Resonanzfall erreicht, in dem der Energieübertrag auf das schwingungsfähige System „Fahrzeug“ maximal ist. Die Amplitude des angeregten Systems kann auf ein Vielfaches der Erregeramplitude ansteigen. Um den eingeschwungenen Zustand zu erreichen, sind nach STEINAUER (1991) ca. fünf Anregungen notwendig.

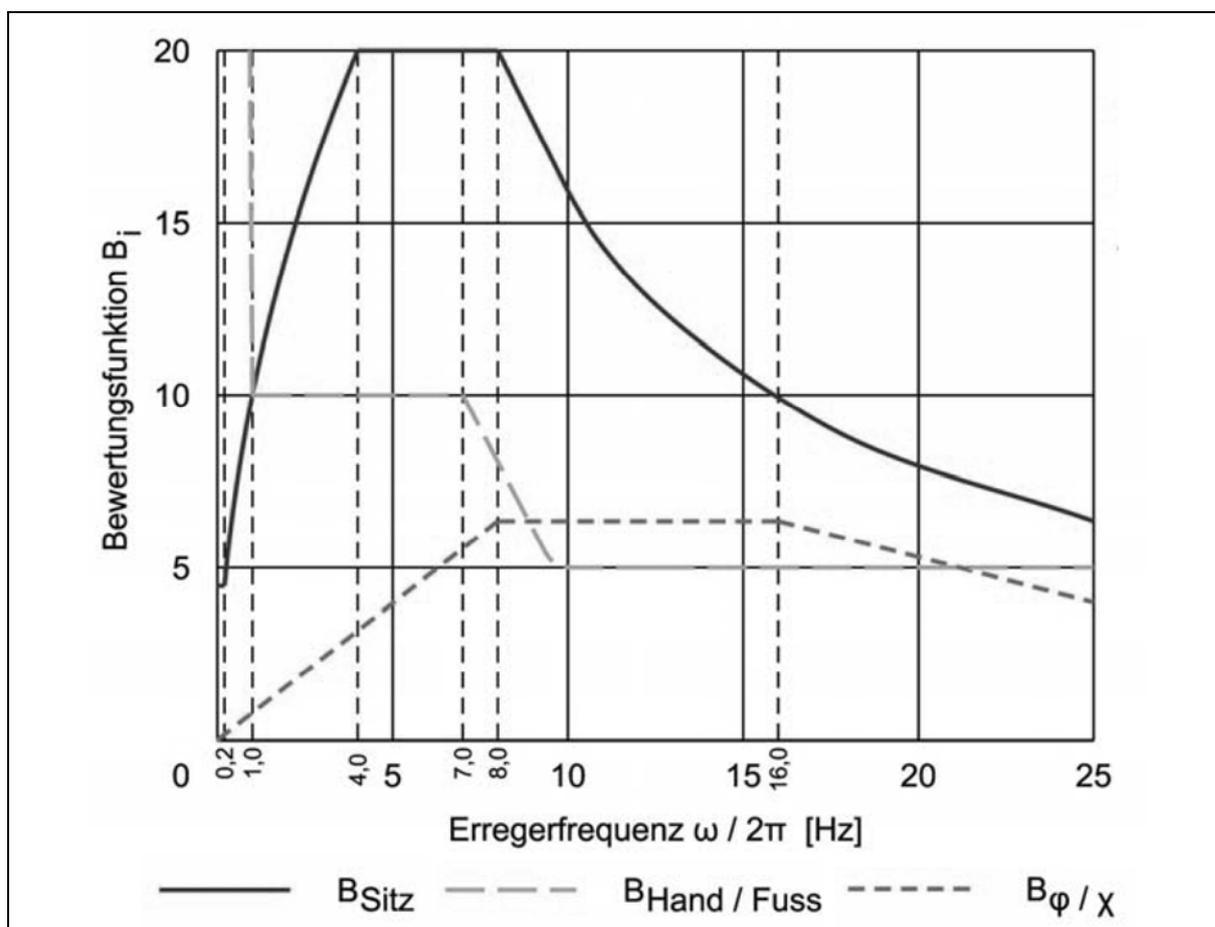


Bild 38: Bewertungsfunktionen zur Beurteilung der Einwirkung von Kraftfahrzeugschwingungen auf den Menschen (nach MITSCHKE, 1984)

Durch die TRS sollen Schwingungen erzeugt werden, die eine möglichst optimale, d.h. große Wirkung auf den Kraftfahrer entfalten. Bei der Konzeption der Streifenanordnung muss der Zusammenhang zwischen Abstand der einzelnen Streifen und Frequenzbereich der Komfortempfindlichkeit berücksichtigt werden.

In diesem Kontext stellen sich zum einen die „Breite“ der beschriebenen Maxima der Komfortempfindlichkeit sowie zum anderen die Unterschiede im Schwingungsverhalten von Pkw und Lkw als grundsätzliche zu berücksichtigende Parameter dar. Wer-

den die TRS so konzipiert, dass Frequenzen erzeugt werden, die im Bereich des erste Maximums, also zwischen 1 und 2 Hz, liegen, können zwar sowohl Pkw als auch Lkw gleichermaßen stark beeinflusst werden, dieser Bereich stellt sich jedoch als sehr schmal und damit „schwer zu treffen“ dar. Es wird erwartet, dass unterschiedliche Fahrzeuge ein vom repräsentativen Pkw abweichendes Schwingungsverhalten aufweisen. Bei leichten Abweichungen besteht die Gefahr, dass die erzeugten Schwingungen in Frequenzbereichen liegen, die eine niedrige Komfortempfindlichkeit und damit eine geringe Wirkung auf den Menschen aufweisen.

Ziel der Konzeption der lateralen Anordnung der TRS sollte es demnach sein, das zweite Maximum der Komfortempfindlichkeit zu erreichen, d. h. den Resonanzbereich der Vorderachse zu treffen. Als gedämpfte Eigenfrequenz der Vorderräder bzw. der Vorderachse wurden von STEINAUER (1991) in ausführlichen Parameterstudien 9,9 HZ für Pkw und 9,3 Hz für Lkw ermittelt. *„Es ist nicht möglich, für alle Fahrzeugtypen und Beladungszustände gleich optimale Anregungsabstände zu finden. Es empfiehlt sich daher, den Mittelwert der Achseigenfrequenzen ungefähr bei 9,5 Hz als Ausgangswert zu wählen. Die maximalen Schwingbeanspruchungen periodischer Anregungen > 5 Hz der repräsentativen Fahrzeuge liegen [...] im Mittel 0,5 HZ unter den Vorderachseigenfrequenzen. Als Bezugsfrequenz zur Ermittlung der Profilierungsabstände auf Randmarkierungen von Autobahnen werden deshalb 9,0 Hz vorgeschlagen. Der Abstand hängt unter dieser Vorgabe nur noch von der [...] mittleren Geschwindigkeit [...] ab.“* (STEINAUER, 1991) Aus diesen Überlegungen leitete STEINAUER (1991) unterschiedliche optimale, d.h. wirkungsvollste Abstände zwischen den Profilierungen von Randmarkierungen ab. In Abhängigkeit der zu erwartenden Geschwindigkeit variiert dieser Abstand nach STEINAUER (1991) zwischen 2,00 Metern (bei $v = 70$ km/h) und 4,00 Metern (bei $v = 130$ km/h).

Die vorgeschlagenen Profilierungsabstände nach STEINAUER (1991) werden der Konzeption von TRS zu Grunde gelegt. Im Hinblick auf die zu erwartenden Geschwindigkeiten auf Landstraßen erfolgt eine messtechnische Verifizierung dieser theoretischen und simulationsbasierten Erkenntnisse (vgl. Kapitel 5 und 7.5).

4.3 Zusammenfassung der technischen Grundlagen

Sowohl die Akustik als auch die Haptik entstehen vorrangig durch die Interaktion des Fahrzeugs mit der Straße.²⁹ Hier entstehen Schwingungen,³⁰ die durch die Bestandteile des Fahrzeugs, wie Radaufhängung und Karosserie, in den Fahrzeuginnenraum geleitet werden. Die Schwingungen werden dabei durch die einzelnen Komponenten verändert. Einzelne Pegel oder Frequenzen werden reduziert und andere werden verstärkt. Im Fahrzeuginnenraum werden die Schwingungen über den Fahrersitz, das Bodenblech und das Lenkrad an den Fahrer weitergegeben. Die Schallwellen werden im Fahrzeuginnenraum durch bspw. Sitze oder Innenauskleidungen absorbiert oder in ihrer Frequenzzusammensetzung verändert. Die so umgewandelten Schallwellen wirken auf den Menschen ein.

Der Fahrer – und natürlich auch alle anderen Insassen des Fahrzeugs – sind sowohl akustisch als auch haptisch für Reize bestimmter Frequenzen unterschiedlich empfindlich. Zur Bewertung der Wirkung von Schwingungen oder Schallereignissen auf den Menschen, müssen die Frequenzen dieser Größen analysiert und mit Bewertungsfunktionen belegt werden, die diese unterschiedliche Empfindlichkeit berücksichtigen. Im Hinblick auf die Konzeption der TRS sind die Frequenzbereiche von Interesse, in denen der Mensch besonders sensibel reagiert. Im Rahmen der Konzeption (Kapitel 5) und der messtechnischen Vorversuche (Kapitel 7) werden Anordnungsvarianten untersucht, von denen eine (akustische wie haptische) Schwingungserzeugung erwartet wird, die in diesen – für den Menschen besonders gut wahrnehmbaren – Frequenzbereichen liegen. Eine ausschließlich theoretische Festlegung dieser Bereiche ist nicht ausreichend, da die unterschiedlichen Fahrzeuge in ihrem Schwingungsverhalten, in ihrer akustischen Dämmung sowie in der Übertragung von akustischen und haptischen Anregungen aus der Fahrbahn-Fahrzeug-Interaktion stark variieren, und durch die TRS weniger eine langwellige harmonische, als vielmehr eine stark impulshafte Anregung erzeugt wird.

²⁹ Der Antriebsstrang und der Wind stellen auch einen nicht unwesentlichen Anteil dar, werden hier jedoch nicht näher betrachtet, da diese Geräusche und Vibrationen durch den Verkehrsingenieur nicht zu beeinflussen sind.

³⁰ Sowohl akustische wie auch haptische Schwingungsanteile.

5 Konzeption von Rüttelstreifen

Bereits heute werden in vielen Ländern transversale Rüttelstreifen eingesetzt. Dies erfolgt zumeist auf Basis pragmatischer oder experimenteller Ansätze und nur selten auf der Grundlage von wissenschaftlichen Untersuchungen oder Empfehlungen, wie bereits ausführlich in Kapitel 2 dargestellt. Die psychologischen und technischen Grundlagen der Kapitel 3 und 4 zeigen, dass es eine Vielzahl von Einflussfaktoren und Ansatzmöglichkeiten für die Beeinflussung des Fahrers gibt. Darüber hinaus stellen betriebliche und wirtschaftliche Voraussetzungen weitere Randbedingungen für eine optimierte Bauform und Anordnung von Rüttelstreifen dar. Die Konzeption einer optimierten Ausführungsvariante von transversalen Rüttelstreifen berücksichtigt

- den Stand der Technik,
- die psychologischen Grundlagen,
- die technischen Grundlagen,
- straßenbautechnische Grundsätze,
- betriebliche Randbedingungen und
- wirtschaftliche Faktoren.

Die Vielzahl der bekannten Ausführungsvarianten (vgl. Kapitel 2) von Rüttelstreifen bietet teilweise widersprüchliche Konzeptansätze, teilweise auch Erkenntnisse, die bei einer optimierten Ausführungsvariante Berücksichtigung finden müssen. In den meisten Ländern bestehen TRS aus einer Anordnung von mehreren Streifen im Zulauf von potentiellen Gefahrenstellen, die in der Vergangenheit durch ein überdurchschnittliches Unfallgeschehen auffällig wurden. Die Streifen werden dabei meist in mehreren „Paketen“ – bestehend aus drei bis fünfzehn Streifen – mit größerem Abstand untereinander aufgebracht. Vor der eigentlichen Gefahrenstelle bleibt ein ausreichender Raum frei von Rüttelstreifen, um ein störungsfreies Bremsen zu gewährleisten. Dieses Ausführungskonzept wird für die vorliegende Arbeit als Grundidee übernommen. Die einzelnen Rüttel Elemente können auf dreierlei Arten hergestellt werden: Entweder werden die Streifen in die Deckschicht eingefräst, sie werden auf die Straße „aufgeklebt“ oder sie werden – bautechnisch aufwendiger – hergestellt, indem zuerst ein Aussparung in die Straßendecke gefräst wird, die anschließend durch bspw. Gussasphalt gefüllt wird.

Das Hauptziel beim Einsatz von Rüttelstreifen ist die Erhöhung der Verkehrssicherheit an lokalen Unfallschwerpunkten. Dies kann durch die Ansprache unterschiedlicher psychologischer Mechanismen erfolgen. Es wird davon ausgegangen, dass der größte sicherheitsfördernde Effekt durch eine Reduktion der Geschwindigkeit und ei-

ne Erhöhung der Aufmerksamkeit erfolgt. Auf Grund der theoretischen Grundlagen-ermittlung wird die Wirkungsweise von TRS als wesentlich komplexer angesehen, als in der bisherigen Praxis berücksichtigt. Als Hauptaspekte werden

- die Erhöhung der Aufmerksamkeit,
- die Verdeutlichung der vorausliegenden Situation und
- die Steigerung des Diskomforts

angenommen. Durch die Kombination dieser Wirkungsweisen wird gewährleistet, dass verschiedene Fahrerkollektive mit unterschiedlichen physiologischen und psychologischen Voraussetzungen gleichermaßen erreicht werden. Unaufmerksame Fahrer werden durch die haptischen und akustischen Signale aus ihrer „Lethargie geweckt“. Ihnen wird verdeutlicht, dass der vorausliegende Streckenabschnitt ein erhöhtes Maß an Aufmerksamkeit und Zuwendung zur Fahraufgabe erfordert. Auf diese Weise werden vorrangig ortsfremde und unerfahrene Fahrer auf den kommenden Streckenabschnitt vorbereitet. Durch eine Steigerung des Diskomforts werden zusätzlich ortskundige, erfahrene Fahrer und Personen mit einer falschen Risikowahrnehmung bzw. einem falschen Risikoverhalten beeinflusst. Durch den Diskomfort, der durch die Vibrationen und den Fahrzeuginnenraumgeräuschpegel entsteht, wird erwartet, dass diese Fahrer ihre Risikokalkulation neu vornehmen und zu Gunsten einer sicheren Fahrweise anpassen. Eine gezielte Ansprache dieser psychologischen Funktionen gelingt nur dann, wenn die physikalische Wirkung der TRS optimal auf die Ziele „*Steigerung der Aufmerksamkeit*“ und „*Erhöhung des Diskomforts*“ abgestimmt ist. Ziel ist es demnach, eine möglichst starke wahrnehmbare Veränderung des Schwingungsverhaltens und der Fahrzeuginnenraumakustik herbeizuführen, die im besten Fall eine Handlungsweise impliziert. Erst hier greifen die zuvor beschriebenen Mechanismen der Wahrnehmung, Verarbeitung und Entscheidungsfindung.

Das Konzept der Rüttelstreifen sieht vor, dass die haptische und die akustische Modulation von Signalen weitestgehend getrennt erfolgen. Die TRS werden zu diesem Zweck aus zwei einzelnen Komponenten zusammengesetzt. Die Grundform der Streifen ist vorrangig für die Erzeugung der haptischen Anregung verantwortlich. Durch eine vertikale Auslenkung werden Schwingungen erzeugt. Durch die Wiederholung dieser Anregung in geeigneten Abständen wird das Signal soweit verstärkt, dass sich eine ausreichend starke Vibration im optimalen Frequenzbereich auf den Menschen überträgt. Zusätzlich zu dieser haptischen Anregung werden Oberflächenmodulationen untersucht, die den – durch die Überfahrt des haptischen Anregungskörpers – entstehenden Schall so weit verändern, dass im Fahrzeuginnenraum ein möglichst starker Anstieg der Lautstärke mit einem Signaltoncharakter entsteht.

Die haptische Grundform und die akustische Oberfläche werden abschließend zu einem TRS kombiniert und in einem optimalen Abstand zueinander auf der Straße aufgebracht. Basierend auf den Erkenntnissen der technischen Grundlagenstudie (Kapitel 4) werden die Abstände zwischen den TRS so gewählt, dass im relevanten Geschwindigkeitsbereich Schwingungen im – für den Menschen besonders gut wahrnehmbaren – Frequenzbereich von 5 bis 10 Hz erzeugt werden (vgl. MITSCHKE, 1984, STEINAUER, 1991). Die Oberflächenmodulation wird derart ausgebildet, dass Reifenmantelschwingungen – und damit akustische Signale – im Frequenzbereich zwischen 400 und 1.000 Hz erzeugt werden. Schwingungen mit dieser Frequenzzusammensetzung werden von der Fahrzeugindustrie weniger stark gedämpft, so dass davon auszugehen ist, dass sie den Menschen mit maximaler Wirkung erreichen. Die getroffenen theoretischen Annahmen werden auf Basis der messtechnischen Voruntersuchungen (Kapitel 7) verifiziert.

Rüttelstreifen werden meist an Stellen eingesetzt, die sonst nur mit größerem finanziellem Aufwand so verändert werden können, dass sich eine verkehrssichere Situation einstellt. Die TRS sollen sich bautechnisch schnell und kostengünstig herstellen lassen. Von einem Einfräsen in die Deckschicht oder sogar in tiefere Schichten des Straßenkörpers wird abgesehen. Zum einen wird durch das Einfräsen die Straßensubstanz nachhaltig geschädigt, und zum anderen könnten sich in den gefrästen Rüttelrinnen Schmutz oder Wasser sammeln, welche sich insbesondere bei niedrigen Temperaturen äußerst negativ auf das Griffigkeitsverhalten der Straße auswirken. Rüttelstreifen, die durch Fräsen und nachträgliches Verfüllen mit bspw. Gussasphalt hergestellt werden, verletzen ebenfalls den Straßenkörper und erzeugen erhöhte Kosten bei der Herstellung. Untersucht werden demnach ausschließlich TRS, die auf die Straße aufgebracht werden, ohne in die Deckschicht eingelassen zu werden. Auf Basis der Literaturrecherche und Befragung zum Stand der Technik (Kapitel 2) werden Materialien aus dem Bereich der Fahrbahnmarkierung zur Herstellung der TRS genutzt. Insbesondere modifizierte Zwei-Komponenten-Kaltplasten ermöglichen eine kostengünstige und schnelle Herstellung mit bekannten und erprobten Verfahren. Die geplanten Strukturen der TRS lassen sich mit diesem Material gut nachbilden. Darüber hinaus bieten Fahrbahnmarkierungsmaterialien den Vorteil, dass eine Zulassung für den Einsatz im Verkehrsraum besteht und somit davon ausgegangen werden kann, dass wichtige Parameter wie bspw. die Griffigkeit in ausreichender Qualität eingestellt werden können.

Neben den psychologischen, physikalischen und finanziellen Einflussparametern müssen die betrieblichen Belange berücksichtigt werden. Die Rüttelstreifen müssen ohne weitere Nachteile in den Straßenbetrieb integrierbar sein. Eine besondere Her-

ausforderung in Deutschland stellt dabei der Winterdienst dar. Durch die Wahl von erhabenen Rüttelstreifen besteht die Gefahr, dass das Räumschild im Winterdienst entweder Schneekeile zwischen den Streifen hinterlässt (siehe Bild 39), die ebenfalls zu einer Beeinträchtigung der Griffbarkeit führen, oder dass die Rüttelstreifen dem Räumschild eine so große Angriffsfläche bieten, dass sie durch den Winterdienst starken mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Dieser Sachverhalt ist sowohl bei der Formwahl als auch bei der Wahl eines geeigneten Abstands zu berücksichtigen. Der Räumschild sollte dabei soweit aufschwimmen, dass die mechanische Beanspruchung minimiert wird und trotzdem eine ausreichende Räumung erfolgt (vgl. Bild 40).

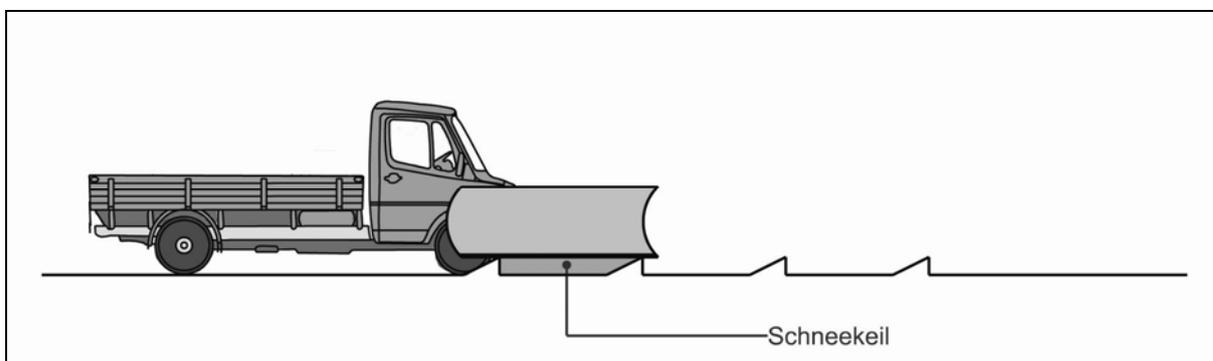


Bild 39: Gefahr der Schneekeilbildung im Winterdienst

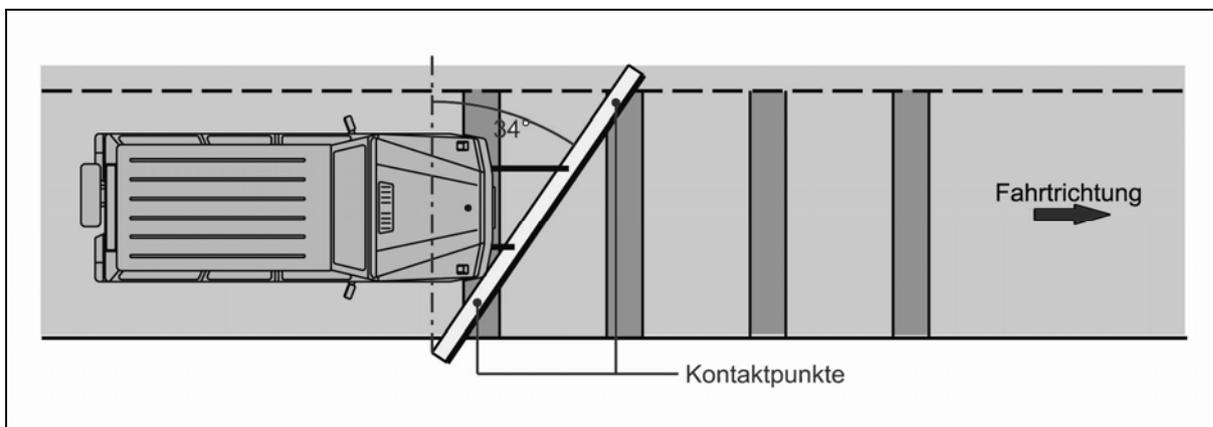


Bild 40: Aufschwimmen des Räumschildes zur Minimierung der mechanischen Beanspruchung

Zur Gewährleistung eines schlüssigen Gesamtkonzepts werden in technischen Vorversuchen einzelne Formen von Rüttelstreifen, einzelne akustische Oberflächen sowie Abfolgen von TRS mit unterschiedlichem Abstand zueinander messtechnisch untersucht und die optimale Ausführungsvariante im Hinblick auf die erwünschte Wirkungsweise und die Randbedingungen ausgewählt. Deren Wirkung auf den Verkehr wird in Feldversuchen analysiert.

6 Methodik der messtechnischen und verkehrstechnischen Untersuchung

Die Untersuchung der Wirkung von TRS auf das Fahrerverhalten unterteilt sich in zwei Hauptteile (siehe Bild 41). Auf Basis der bekannten Ausführungsvarianten von TRS und den physikalischen und psychologischen Grundlagen wurden unterschiedliche Grundformen für TRS konzipiert. Diese sind vorrangig für die Entstehung der haptischen Signale verantwortlich. Analog wurden unterschiedliche Oberflächen zur Erzeugung und Modulation der akustischen Signale entwickelt. Die haptischen Grundformen und akustischen Oberflächen wurden in messtechnischen Vorversuchen hinsichtlich ihrer Wirkung im Fahrzeug analysiert (vgl. Kapitel 7). Aus diesen Versuchsreihen konnte eine optimierte Bauform für Rüttelstreifen abgeleitet werden, die in einer zweiten Versuchsreihe hinsichtlich ihres Abstands untereinander analysiert wurde. Durch diese Vorgehensweise wird ausgeschlossen, dass eine fehlerhafte bzw. nicht optimale Konzeption und Formgebung von TRS die Wirkung herabsetzt und somit fälschlicherweise auf den gesamten Einsatz von Rüttelstreifen bezogen wird.

Aus den technischen Vorversuchen wurde ein Entwurfskonzept entwickelt, das im Rahmen von verkehrstechnischen Analysen hinsichtlich der tatsächlichen Wirkung auf das Fahrerverhalten untersucht wurde.

Die verkehrstechnische Untersuchung (vgl. Kapitel 8) gliedert sich ebenfalls in mehrere Teile. Zum einen erfolgte eine Bewertung der Änderung des Geschwindigkeitsverhaltens auf Basis eines Vorher-Nachher-Vergleichs von Geschwindigkeitsmessungen mit Seitenradargeräten. Zum anderen wurde das allgemeine Fahrerverhalten mit Hilfe von Videoanalysen beurteilt. Abschließend erfolgte eine Akzeptanzanalyse auf Basis von Befragungen der Anwohner und Verkehrsteilnehmer. Sowohl die Geschwindigkeitsdaten, als auch die Videodaten und Akzeptanzbefragungen wurden miteinander verknüpft. Auf diese Weise wurden vertiefte Kenntnisse zum Verhältnis des Geschwindigkeitsverhaltens und des allgemeinen Fahrerverhaltens ermittelt. Des Weiteren wurden die psychologischen Annahmen insbesondere im Hinblick auf das Risikoverhalten und die Selbstwahrnehmung der Kraftfahrer durch die Daten der Fahrerbefragung verifiziert und erweitert.

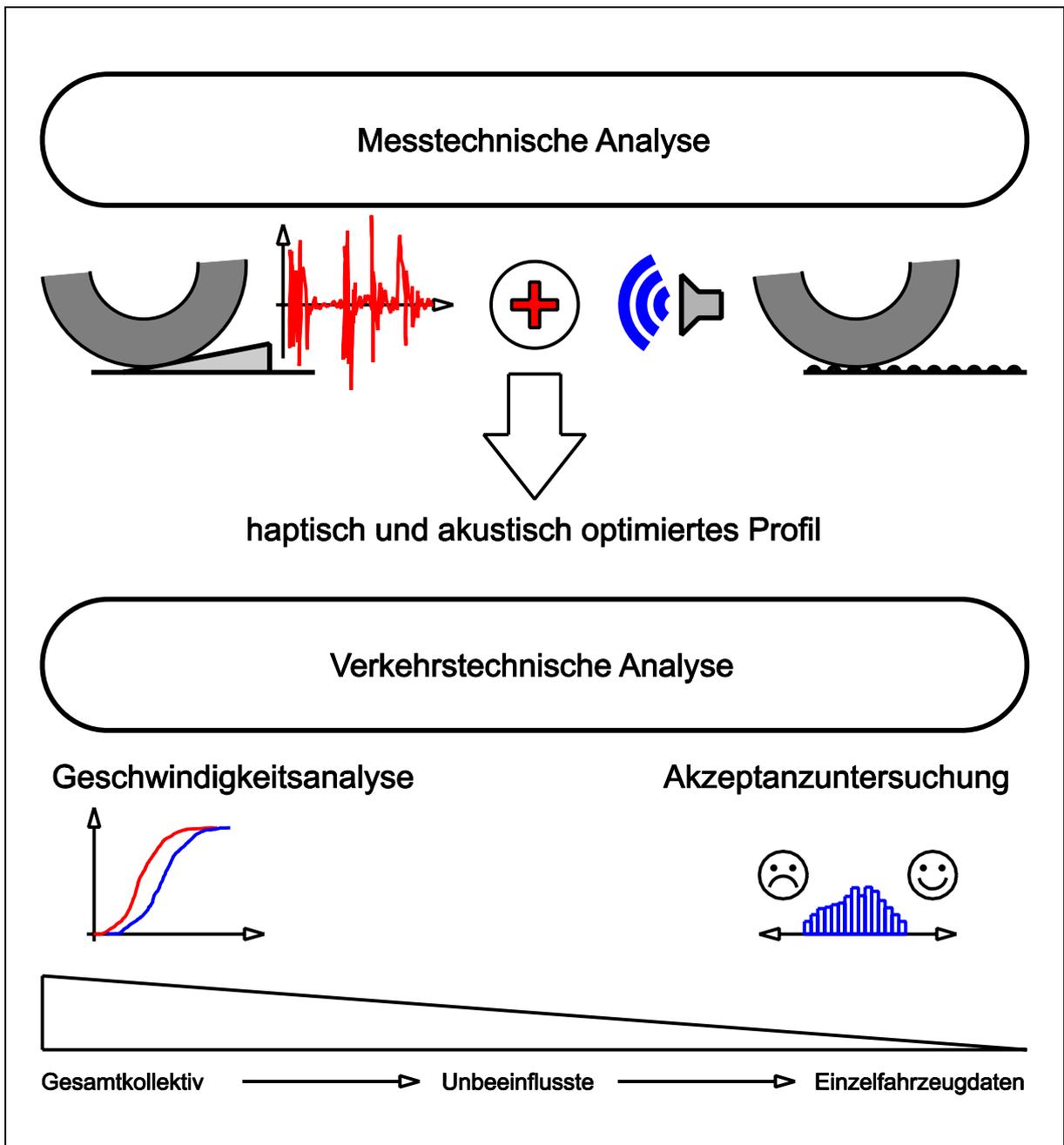


Bild 41 : Methodik der messtechnischen und verkehrstechnischen Untersuchungen

7 Messtechnische Voruntersuchungen

Die psychologischen Grundsätze (vgl. Kapitel 3) und die Komplexität der technischen Zusammenhänge bei der Entstehung und Weiterleitung von Akustik und Schwingungen im Fahrzeuginnenraum (vgl. Kapitel 4) führen zu dem Schluss, dass vor einer Überprüfung der Wirksamkeit von TRS ein Optimierungsprozess vorgelagert werden muss. Die Konzeption von Rüttelstreifen zur Beeinflussung des Geschwindigkeitsverhaltens von Kraftfahrern allein auf theoretischen Analysen und Erfahrungen der Beteiligten zu stützen stellt einen unbefriedigenden Sachverhalt dar.

Um neue Erkenntnisse im Bereich Schwingungsentwicklung und Fahrzeuginnenraumakustik durch TRS zu erlangen, wurden daher messtechnische Voruntersuchungen durchgeführt. Diese Feldversuche gliedern sich in mehrere aufeinander aufbauende Stufen:

- Einzelne Grundformen von Rüttelstreifen werden hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Fahrzeugschwingung untersucht.
- Einzelne Oberflächenmodulationen werden hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Fahrzeuginnenraumakustik untersucht.
- Aus den ersten beiden Untersuchungen ergibt sich eine Einzelform, die optimale Eigenschaften hinsichtlich Schwingungs- und Geräuschentwicklung aufweist.
- Mehrere Streifen der so identifizierten optimalen Einzelform werden mit unterschiedlichen Abständen untersucht, um die optimale Anordnung in lateraler Richtung zu ermitteln.

Die Überprüfung der Wirkung sowohl von Einzelelementen als auch einer Abfolge von mehreren Elementen erfolgt dabei streng objektiv, d. h. ausschließlich auf Basis von messtechnischen Datenerfassungen und Analysen. Eine subjektive Bewertung der Wirkung wurde nicht vorgenommen, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Das Grundkonzept der TRS in dieser Arbeit geht davon aus, dass sich die haptische und akustische Wirkung von TRS weitestgehend getrennt voneinander betrachten lässt. Ein einzelner Rüttelstreifen setzt sich aus zwei Grundkomponenten zusammen. Die Grundform ist vorrangig für die Entwicklung von Vertikalschwingungen verantwortlich. Die Anteile an der Entwicklung von akustischen Signalen sind sekundär. Die Modulation eines akustischen Signals erfolgt über die gezielte Veränderung der Oberfläche eines Rüttelstreifens. Abschließend wird auf Basis der schwingungstechnischen Grundlagen aus Kapitel 4.2 die Vertikalschwingung eines einzelnen Strei-

fens in Abhängigkeit von Anzahl und Abstand entweder durch eine positive Überlagerung der einzelnen Schwingungsanregungen verstärkt oder durch eine negative Überlagerung gedämpft. Dieser Sachverhalt wird in Kapitel 7.5 näher erläutert und analysiert.

7.1 Versuchsaufbau

Die messtechnischen Voruntersuchungen wurden auf einer abgesperrten Teststrecke ohne Verkehr durchgeführt. Bei der Strecke handelt es sich um eine ehemalige Landstraße mit sehr gutem Zustand, d. h. geringen Längsunebenheiten und keinerlei Schadens- oder Flickstellen. Die Strecke verfügt über eine ausreichende Länge für Beschleunigungsvorgänge und einen geraden Abschnitt, der als eigentliches Versuchsfeld aufbereitet wurde.

Im Bereich des Versuchsfelds wurden die unterschiedlichen Rüttelstreifenformen mit Fahrbahnmarkierungsmaterial³¹ hergestellt. Hierzu wurden Schablonen für die jeweiligen Formen aus Stahlblech angefertigt. Mit diesen wurden die Streifen mit Hilfe eines Markierungsschuhs auf die Straße aufgebracht (vgl. Bild 42). Zur Gewährleistung einer schadensfreien Entfernung der Streifen wurde die Straße zuvor mit einem Trennmittel behandelt.

Der Beginn und das Ende des Versuchsfelds wurden mittels Reflexionsfolie gekennzeichnet, mit der die Messtechnik automatisch gesteuert wurde (vgl. Kapitel 7.2). Die Anordnung der Rüttelstreifen auf dem Versuchsfeld ist in Form einer Prinzipskizze in Bild 43 dargestellt.

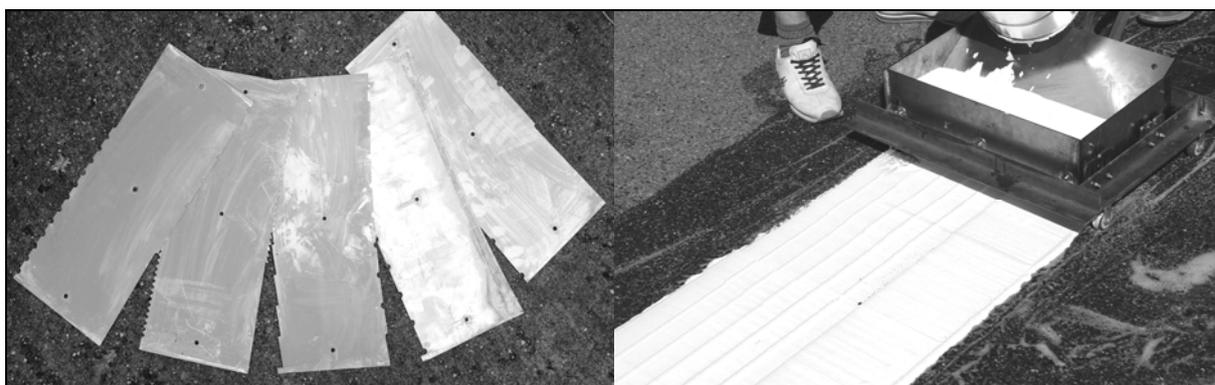


Bild 42: Schablonen aus Stahlblech (links) und Herstellung TRS mittels Markierungsschuh (rechts)

³¹ Die Materialwahl basiert auf Laborversuchen. Das Fahrbahnmarkierungsmaterial stellte sich als optimal hinsichtlich sämtlicher Gebrauchseigenschaften und der Verarbeitbarkeit dar. Zum Einsatz kam eine Zweikomponenten Kaltplastik der Firma „Limburger Lackfabrik“ (Limboplast D480), welche hinsichtlich ihrer Fließseigenschaften leicht modifiziert wurde.

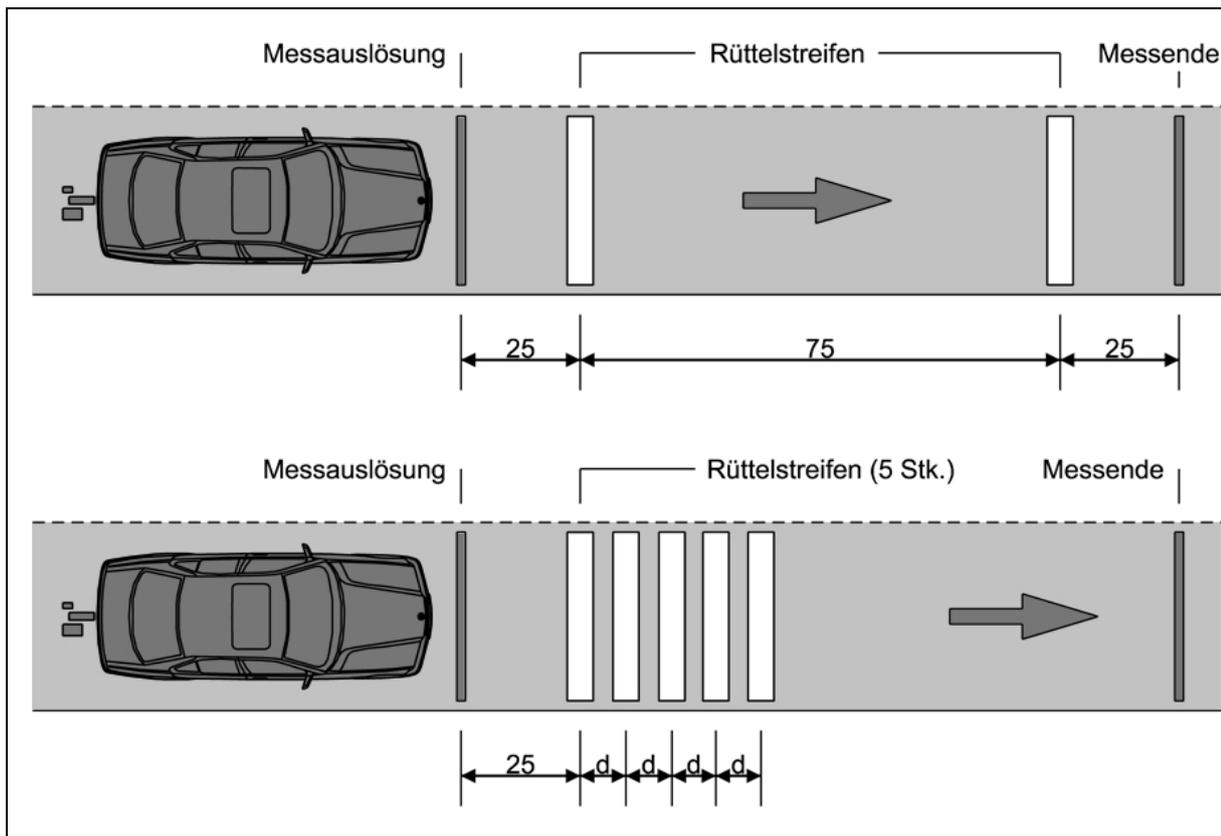


Bild 43: Versuchsanordnung zur Untersuchung einzelner Rüttelstreifen (oben) und einer Folge von fünf Streifen (unten) (LANK/STEINAUER/BUSEN 2009)

Untersucht wurde die akustische und haptische Wirkung in zwei unterschiedlichen Fahrzeugklassen – Pkw (Ford Mondeo) und Kleinlaster (Daimler Chrysler Atego, 7,5 to). Diese wurden mit entsprechender Messtechnik ausgestattet. Anschließend wurde die Versuchsstrecke in mehreren Geschwindigkeitsstufen überfahren.

Zur Gewährleistung einer statistisch fundierten Messung wurden je Geschwindigkeit mindestens fünf Messungen durchgeführt. Die Geschwindigkeiten, die verprüft wurden, liegen in für Landstraßen üblichen Bereichen. Für den Pkw wurden Geschwindigkeiten zwischen 60 und 120 km/h und für den Lkw zwischen 50 und 80 km/h erhoben.

7.2 Messtechnik

Das Ziel der messtechnischen Vorversuche liegt in der Erhebung und Bewertung der haptischen und akustischen Signale im Fahrzeuginnenraum. Im Einzelnen wurden fünf primäre Parameter ausgewählt:

- Vertikalschwingungen in der Sitzschiene des Fahrersitzes,
- Vertikalschwingungen in der Sitzfläche des Fahrersitzes,
- Vertikalschwingungen des Lenkrads,

- akustische Parameter auf Höhe des Beifahrerkopfs und
- gehörgerichtete akustische Parameter auf Höhe des Fahrerkopfs.

Zusätzlich zu diesen Primärgrößen wurden Bezugsgrößen, wie Geschwindigkeit, Ortslage und Triggerdaten erhoben und zeitsynchron zu den Primärgrößen aufgezeichnet. Zu diesem Zweck wurden die Versuchsfahrzeuge mit Messtechnik ausgerüstet.

Die Erfassung der Vertikalschwingung erfolgte mittels PCB-Beschleunigungssensoren mit integrierter Mikroelektronik. Diese wurden entweder mit der Sitzschiene, mit dem Lenkrad oder mit der Sitzfläche des Fahrersitzes kraftschlüssig verbunden (vgl. Bild 44 links).

Die Innenraumakustik wurde mit zwei unterschiedlichen Messsystemen aufgezeichnet. Zum einen wurden die physikalischen Größen mit sehr hoher Genauigkeit mit einem kalibrierten Messmikrofon aufgezeichnet, welches weitestgehend schwingungsfrei auf Höhe der Kopfstütze des Beifahrersitzes angebracht wurde. Zum anderen erfolgte eine gehörgerichtete Aufzeichnung der Akustik mit einem binauralen Headset (vgl. Bild 44 rechts).

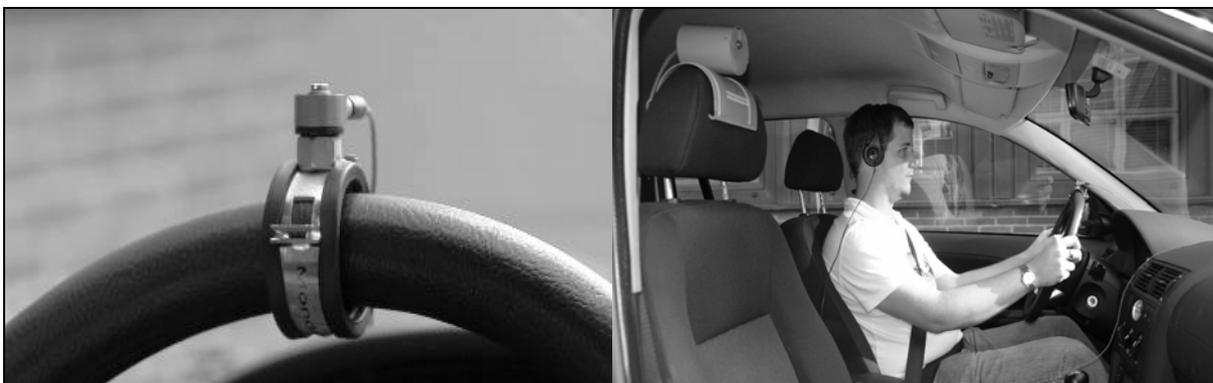


Bild 44: Beschleunigungssensor am Lenkrad (links) und Messmikrofon und binaurales Headset (rechts)

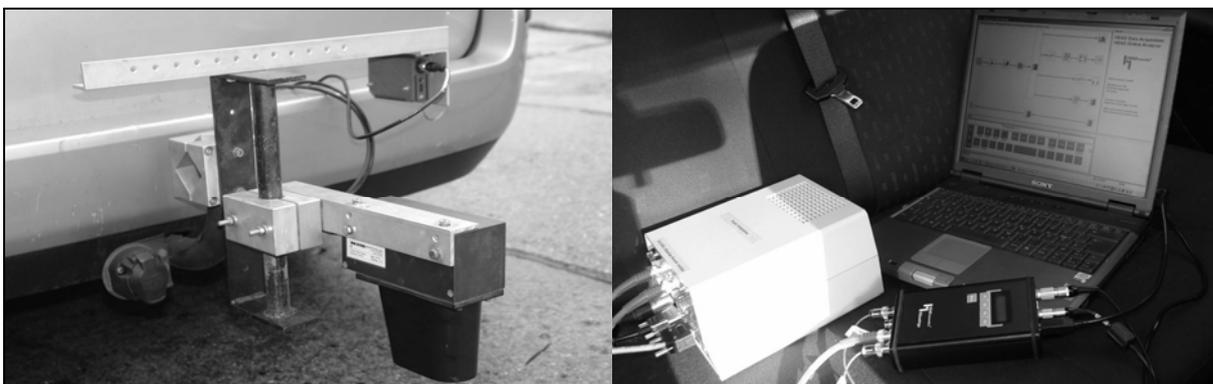


Bild 45: Retroreflexsensor und Geschwindigkeitssensor (links) und Realtime Data-Logger und Synchronisationseinheit (rechts)

Die Sekundärgrößen Geschwindigkeit, Ortslage und Triggerdaten wurden über externe Sensoren erfasst. Die Geschwindigkeit und Ortslage wurden mit einem optischen Geschwindigkeits-/Wegsensor erfasst (siehe Bild 45 links). Dieser bietet die Möglichkeit, die Messgrößen ohne Fehleinflüsse durch bspw. Schlupf oder Tachountgenauigkeiten zu erfassen. Die Messungen wurden automatisch durch einen Trigger gestartet und beendet. Hierzu diente ein Retroreflexsensor, der auf die Reflexionsstreifen am Anfang und Ende der Versuchsstrecke reagiert (siehe Bild 45 links).

Die Messdaten der Primärsensorik und der Hilfsgrößen wurden mittels einer Synchronisationseinheit zeitgleich gekoppelt und durch einen Realtime Data-Logger aufgezeichnet (siehe Bild 45 rechts).

Die Koppelung mit spezieller Software machte es möglich, unmittelbar nach der Messung die Daten zu konditionieren, auszuwerten und zu visualisieren und so hinsichtlich Messfehlern oder Übersteuerung zu überprüfen. Unbrauchbare Messreihen konnten so während der Messung identifiziert und wiederholt werden.

7.3 Auswertemethodik

Aus den messtechnischen Versuchsreihen resultierte eine Vielzahl unterschiedlicher Messreihen, da bei jeder Fahrt mehrere Messkanäle aufgezeichnet wurden. Insgesamt wurden über 2.500 einzelne Messreihen analysiert.

Die Auswertung der Messreihen erfolgte mit einer Kombination aus MatLab³² und Artemis.³³ Die zeitabhängigen Rohdaten wurden in einem ersten Schritt mittels Artemis unterschiedlichen Analysen unterzogen. Bei den akustischen Signalen erfolgten Bewertungen mit der A-Filter-Kurve sowie psychoakustische Auswertungen der Schärfe, Lautheit und Rauheit. Die haptischen Eingangssignale in der Sitzschiene, der Sitzfläche und dem Lenkrad wurden unter Berücksichtigung der frequenzabhängigen Bewertungsfunktionen nach VDI 2057 in bewertete Schwingungen überführt. Die Ergebnisse dieser Analysen sind einzelne Messreihen physikalischer Größen unter Berücksichtigung der Wirkung auf den Menschen.

Auf Grund der Vielzahl der einzelnen Datenreihen und der abgeleiteten Parameter wurden die Messreihen zu Einzelwerten akkumuliert. Bei den akustischen Parametern A-bewerteter Schalldruckpegel (dB(A)), Lautheit, Rauheit und Schärfe wurden

³² MATLAB ist ein eingetragenes Warenzeichen von The Math Works Inc., Natick, Ma, Vereinigte Staaten von Amerika.

³³ ARTEMIS (Advanced Research Technology for Measurement and Investigation of Sound and Vibration) ist ein eingetragenes Warenzeichen der Head Acoustics GmbH, Aachen, Deutschland.

sowohl der Mittelwert als auch der Maximalwert der Messabschnitte der einzelnen Messreihe extrahiert (vgl. Bild 46).

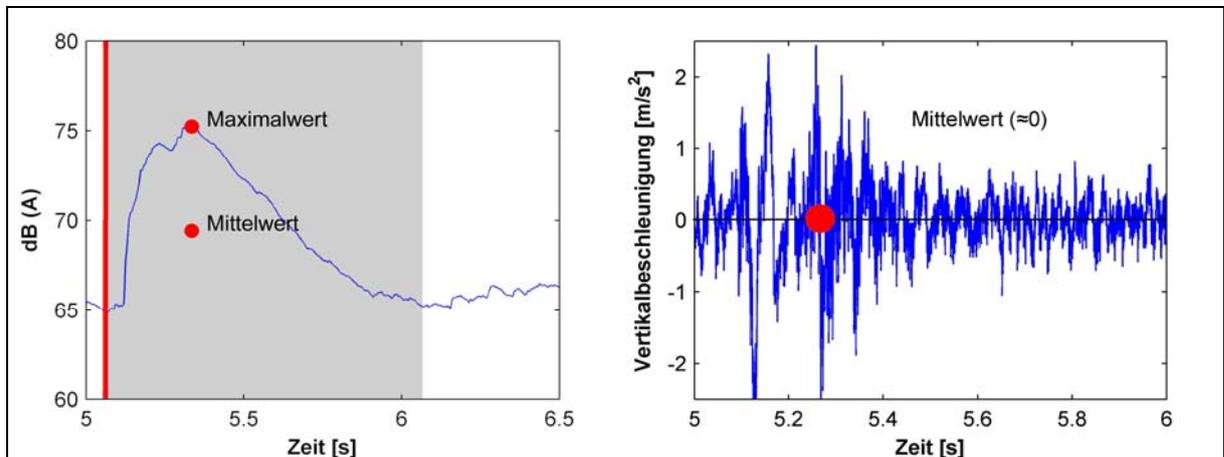


Bild 46: Auswertungsrelevanter Bereich am Beispiel der A-bewerteten Lautstärke mit Maximalwert und Mittelwert (links) und beispielhafte Darstellung der Vertikalbeschleunigung im Fahrzeuginnenraum (Mittelwert ungefähr Null) (rechts) (LANK/STEINAUER/BUSEN, 2009)

Bei den haptischen Parametern handelt es sich um Schwingungen um den Null-durchgang. Eine Mittelwertbildung stellt sich als nicht zielführend dar, weil sich die positiven und negativen Schwingungsanteile tendenziell gegenseitig aufheben. Der Mittelwert läge unabhängig von der Schwingungsamplitude bei Null (vgl. Bild 46 rechts). Für Bewertungen von Schwingungen findet daher der Effektivwert Anwendung. Liegt ein reelwertiges Signal mit bekannter Periodendauer vor, berechnet sich der Effektivwert nach Gl. 5. Liegt eine stochastische Wertereihe vor, wie im Fall der Vertikalbeschleunigung durch Fahrbahnunebenheiten, kann der Effektivwert mit dem Näherungsverfahren nach Gl. 6 berechnen werden. Vereinfachend wird der Effektivwert oft mit „Wurzel aus dem Mittelwert der Quadrate“³⁴ bezeichnet.

$$s_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} s^2(t) dt} \tag{Gl. 5}$$

- Mit:
- s_{eff} Effektivwert [l]
 - t_0 Startzeitpunkt [s]
 - T Einwirkungsdauer [s]
 - s Signal [l]

³⁴ Teilweise hat sich auch der englische Begriff „root mean square“ in Deutschland etabliert.

$$s_{eff} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=0}^n x_i^2} \quad \text{Gl. 6}$$

Mit: s_{eff} Effektivwert [I]
 n Anzahl der Einzelwerte [-]
 x_i Einzelwert [I]

Neben dem hier beschriebenen Effektivwert wird in der Industrie oder im englischsprachigen Raum zum Vergleich von Schwingungsbelastungen bei instationären Ereignissen häufig der von GRIFFIN (1990) vorgeschlagene „Vibration Dose Value“ verwendet. Dieser berechnet sich aus der frequenzbewerteten Beschleunigung³⁵ nach dem 4. Potenz-Gesetz (siehe Gl. 7).

$$VDV = \sqrt[4]{\int_0^T a_w^4 dt} \quad \text{Gl. 7}$$

Mit: VDV Vibration Dose Value nach Griffin [m/s^{1,75}]
 a_w bewertete Schwingungssignal [m/s²]
 T Einwirkdauer [s]

Da es sich bei der Schwingungsanregung durch Einzelereignisse (Rüttelstreifen) um einen instationären Vorgang handelt, der im hohen Maße durch seine Impulshaftigkeit geprägt ist, wurde zunächst vermutet, dass mittels dem VDV eine bessere Beurteilung der haptischen Wirkung von Rüttelstreifen möglich ist. Vergleiche von einzelnen Messreihen haben jedoch gezeigt, dass sich die Aussagen auch durch die Verwendung der vierten Potenz beim VDV nach Griffin nicht ändern. Als wesentlicher Nachteil des VDV hat sich herausgestellt, dass seine Größe zeitabhängig ist, d. h., im Gegensatz zum Effektivwert wird das Integral der quadrierten Messreihe abschließend nicht durch die Integrationsdauer geteilt. Je länger also das Messsignal ist, desto größer – unabhängig von der tatsächlichen Einwirkung – wird der VDV nach Griffin. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher auf eine Analyse beider Größen verzichtet und ausschließlich auf den Effektivwert nach Gl. 5 Bezug genommen.

Als weiteres Bewertungskriterium für die Wirkung der haptischen Signale wurde der maximale Ausschlag herangezogen. Entgegen dem Effektivwert und dem VDV nach Griffin wird die zeitliche Dauer des Maximalausschlags hierbei nicht berücksichtigt. Mit der Ergänzung um den Maximalwert wird der Tatsache Rechnung getragen, dass noch nicht abschließend geklärt ist, inwieweit die Einwirkdauer bei extrem kur-

³⁵ Die Schwingungssignale wurden – wie bereits beschrieben – in einem ersten Schritt bereits mit den VDI-Bewertungsfunktionen (siehe Anhang D) in frequenzbewertete Beschleunigungen überführt.

zen, impulshaften Schwingungsereignissen Auswirkungen auf die Bewertung durch den Menschen hat.

Zusammenfassend wurden die Messreihen hinsichtlich Maximalausschlag unabhängig von der zeitlichen Dauer und hinsichtlich Mittelwert über einen zeitlichen Bereich analysiert. Auf diese Weise wurden die Messreihen in Einzelwerte überführt. Da es sich beim Fahrzeug um ein komplexes Modell handelt, streuen diese Werte auch dann, wenn alle Randbedingungen wie bspw. die Geschwindigkeit gleich bleiben. Die Einzelwerte wurden in einem weiteren Schritt in Mittelwerte überführt (siehe Gl. 8).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i \quad \text{Gl. 8}$$

Mit: \bar{x} Mittelwert [l]
 x_i Einzelwerte [l]
 n Anzahl der Einzelwerte [-]

$$\sigma_x = \frac{1}{n} \sqrt{\text{VAR}(X)} \quad \text{Gl. 9}$$

Mit: σ_x Standardabweichung [l]
 n Anzahl der Einzelwerte [-]
 VAR Varianz [l]

$$\bar{x} - 2 \cdot \sigma_x < x_i < \bar{x} + 2 \cdot \sigma_x \quad \text{Gl. 10}$$

Mit: x Mittelwert [l]
 σ_x Standardabweichung [l]
 x_i Einzelwert [l]

Neben der Überprüfung der Messreihen auf Übersteuerung, die bereits während der Messung erfolgte (vgl. Kapitel 7.2), wurde bei der Überführung der Einzelwerte in Mittelwerte die Standardabweichung (siehe Gl. 9) als Maß für die Messgüte herangezogen. Mit Hilfe der Standardabweichung wurde ein einfacher „Ausreißertest“ durchgeführt. Als Vertrauensbereich wurde nach Gl. 10 der Bereich zwischen dem Mittelwert plus/minus doppelter Standardabweichung festgelegt. Mit 95,4 % Sicherheit müssen die Messwerte in diesem Bereich liegen, wenn sie nicht mit zufälligen Fehlern behaftet sind. Wenn eine Messreihe gegen diese Bedingung nach Gl. 10 verstieß, wurde sie verworfen. Da die Daten bereits während der Messung voranalysiert und hinsichtlich Übersteuerung und Plausibilität überprüft wurden, mussten lediglich vier Messreihen auf Grund dieses Kriteriums ausgeschlossen werden.

7.4 Ergebnisse zur Wirkung von Einzelementen

Die erste messtechnische Versuchsreihe dient der Identifikation der Einzelform eines Rüttelstreifens mit der größten haptischen Wirkung. Auf Grund der Literaturrecherche und theoretischen Überlegungen zum Herstellungsprozess der Streifen und zum Betrieb von Straßen wurden unterschiedliche Formen ausgewählt (vgl. Bild 47). Jede dieser Formen wurde sowohl mit dem Pkw als auch mit dem Lkw gemäß der beschriebenen Methodik mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten mehrfach überfahren und die relevanten Messgrößen aufgezeichnet.

Profilname	Querschnitt
Profil 10 (Kreissegment)	
Profil 11 (Keilprofil / Sägezahn)	
Profil 12 (Sinusprofil)	

Bild 47: Haptische Profilformen

Die zweite messtechnische Versuchsreihe wurde analog durchgeführt. Hier lag jedoch das Augenmerk auf der Modulation eines Tons durch die gezielte Veränderung der Oberfläche. Hierzu wurden Profile gemäß Bild 48 hergestellt und ebenfalls mehrfach mit beiden Fahrzeugen überfahren. Abschließend wurde die wirksamste haptische Form mit einer akustischen Oberflächenmodulation versehen und ebenfalls den oben beschriebenen Versuchen unterzogen. Die Mittelwerte der maximalen Vertikalschwingungen in der Sitzschiene des Pkw sind in Bild 49 dargestellt.³⁶ Die haptischen Profile erzeugen erwartungsgemäß höhere Schwingungssignale als die rein akustischen Profilformen. Die Ausprägung der Schwingungssignale stellt sich bei Einzelementen als nahezu unabhängig von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs dar.

³⁶ Es werden hier lediglich die maximal auftretenden Vertikalschwingungen dargestellt. Die RMS Werte dienen der Verifikation und der Berücksichtigung der zeitlichen Dauer des Schwingungssignals. Die Darstellung der maximalen Schwingungssignale ist in ihrer Aussagekraft deutlicher. Die Darstellung der RMS-Werte aller Messungen ist zusätzlich in Anhang E aufgeführt.

Profilname	Querschnitt
Profil 02-025 (Rillenprofil d = 25 mm)	
Profil 03-050 (Rillenprofil d = 50 mm)	
Profil 04-075 (Rillenprofil d = 75 mm)	
Profil 05-100 (Rillenprofil d = 100 mm)	
Profil 06 (Sinusprofil d = 10 mm)	
Profil 07 (Sägezahnprofil d = 25 mm)	

Bild 48: Akustische Oberflächenmodifikationen

Auch dieser Sachverhalt entspricht den Erwartungen, da der größte Einfluss auf die Anregungsfrequenz und damit die Schwingungswirkung im Fahrzeug bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten von der Anordnung mehrere TRS mit unterschiedlichem Abstand erwartet wird (vgl. Kapitel 7.5). Die Analysen haben gezeigt, dass die haptischen Signale weniger von der Bauform der Einzelelemente abhängen, als vielmehr von deren Höhe. Die haptische Wirkung der Sägezahnform steigt proportional mit der maximalen Auslenkung in vertikaler Richtung. Eine starke Differenzierung durch unterschiedliche Bauformen konnte nicht erfolgen. Lediglich die Variation der Höhe könnte größere Differenzen zwischen den einzelnen TRS bewirken.

Ebenfalls in Bild 49 sind die Mittelwerte der A-bewerteten Lautstärke und der Lautheit im Pkw-Innenraum dargestellt. Im Gegensatz zur Analyse der Vertikalschwingungen ist bei den akustischen Parametern eine deutliche Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Fahrzeuge zu erkennen. Je schneller die Profile befahren werden, desto stärker steigen die Lautstärke bzw. die psychoakustischen Parameter wie die Lautheit. Bei den meisten Profilen ist dieser Zusammenhang annähernd linear. Entgegen

der ursprünglichen Konzeption wird der größte Anteil der akustischen Signale nicht durch die Oberflächenmodulation erbracht. Der Hauptanteil der akustischen Signale wird durch das plötzliche „Herabfallen“ des Reifens am Ende des Streifens erzeugt. Die Oberflächenmodulation hat indes nur geringeren Anteil an der Lautstärke und Tonhaltigkeit (Rauheit, Schärfe) des akustischen Signals. Insbesondere die Auswertung der Lautheit (vgl. Bild 49 unten rechts) zeigt deutlich, dass die haptischen Profilformen einen wesentlich höheren Anteil am Anstieg der psychologisch empfundenen Lautstärke haben, als die reine akustische Oberflächenmodulation. Die Kombination aus haptischer und akustischer Profilform (blaue Linie) stellt sich als deutlich wirksamste Form im Hinblick auf die haptische und akustische Signalausprägung dar. Der maximale Unterschied zwischen „Nullmessung“ ohne Rüttelstreifen und der lautesten Profilform liegt zwischen 5 dB(A) bei den Mittelwerten und 12 dB(A) bei den Maximalwerten. Die Differenz zwischen unterschiedlichen Profilformen ist hingegen mit 3,5 dB(A) bzw. 8,5 dB(A) niedriger.

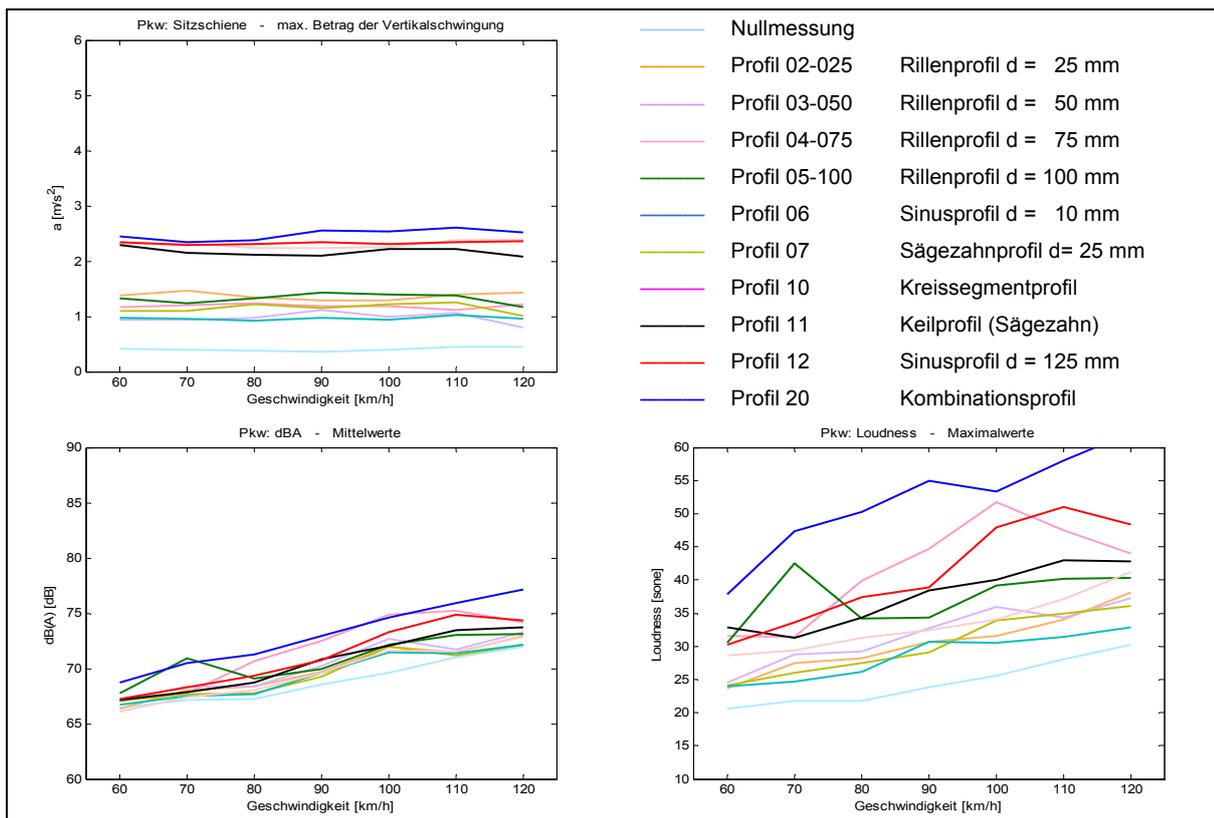


Bild 49: Ergebnisse der Messungen von Einzelelementen: maximale Vertikalschwingungen in der Sitzschiene (oben links); Mittelwerte der A bewerteten Lautstärke (unten links) und der Maximalwerte der Lautheit (unten rechts) im Pkw-Innenraum (LANK/STEINAUER/BUSEN, 2009)

Die akustische Einwirkung auf den Fahrer kann demnach als eine kurzzeitige Verdoppelung der Lautstärke interpretiert werden. Die anfangs konzipierte gezielte Modellierung eines Tons durch die Oberflächenform konnte mit den Rüttelstreifen je-

doch nicht erreicht werden. Subjektiv kann das durch die Rüttelstreifen erzeugte Geräusch als „polternd“ bezeichnet werden, was sich in allen untersuchten Geschwindigkeitsbereichen ähnlich darstellt. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Erkenntnissen von BRILON (2001): *„Durch Rüttelstrecken wird demnach eine deutlich größere Schallpegelerhöhung als durch rein akustische Bremsen bewirkt. [...] Während beim Überfahren der Rüttelstreifen ein eher polterndes Geräusch entsteht, erzeugt die akustische Bremse [...] ein singendes Reifengeräusch (ähnlich einer profilierten Markierung).“*

Die beschriebene Wirkung der Profilformen auf die Vertikalschwingung und die Innenraumakustik kann in dieser Form nur für die Signale im Pkw nachgewiesen werden. Analog wurden alle Formen mit einem Lkw (zulässiges Gesamtgewicht 7,5 to) überfahren. Die Ergebnisse dieser Messreihen stellen sich differenzierter dar: Während die Vertikalschwingung im Mittel über den gesamten Geschwindigkeitsbereich nahezu konstant bleibt, in ihrer maximalen Ausprägung mit steigender Geschwindigkeit sogar leicht abnimmt, steigen die akustischen Parameter mit steigender Geschwindigkeit analog zum Pkw an (vgl. Anhang E). Die Unterschiede zwischen der Referenzmessung und den einzelnen Profilformen fallen jedoch wesentlich geringer aus als beim Pkw. Die stark abweichenden Ergebnisse der Messwertanalyse des Lkw sind auf die starken Unterschiede im Schwingungssystem und in der akustischen Dämpfung des Motorraums zurückzuführen. Die Fahrerkabine des Lkw ist schwingungstechnisch stark vom Fahrwerk des Lkw entkoppelt. Die Vertikalschwingungen im Lkw werden demnach wesentlich stärker verändert und gedämpft, als im Pkw. Die geringen Unterschiede der Lautstärke in der Lkw-Fahrerkabine sind auf eine starke Dominanz des Motorengeräuschs im Lkw zurückzuführen. Während bei Personenkraftwagen durch aufwendige Dämmkonzepte ein optimaler Fahrkomfort und durch eine Einkapselung des Motors eine Minimierung der Geräuschkulisse erreicht wird, steht der Fahrkomfort bei Lastkraftwagen weniger im Vordergrund.

Das Grundkonzept der TRS sieht vor, dass durch eine Modulation der Oberfläche eine gezielte „Formung“ eines Signaltons erfolgt und die haptischen und akustischen Parameter vorrangig in einem schmalen Geschwindigkeitsband ansteigen. Fahrer, die sich an die zulässige Höchstgeschwindigkeit halten, sollen kaum durch die TRS beeinträchtigt werden, während Fahrer, die die v_{zul} deutlich überschreiten, durch einen maximalen Anstieg der Schwingungen und der akustischen Kenngrößen vorrangig beeinflusst werden sollen. Diese Ziele konnten im Rahmen der messtechnischen Vorversuche nicht erfüllt werden. Die Eingrenzung der haptischen und akustischen Wirkung auf schmale Geschwindigkeitsbereiche war nicht möglich, was zur Folge hat, dass alle Fahrzeugführer in nahezu gleichem Maße den Signalen durch die TRS ausgesetzt werden.

Für die Tatsache, dass die Modulation eines Tons bzw. einer bestimmten Frequenz des erzeugten Tons nur bedingt gelingt und das erwartete „pfeifende“ Geräusch ausbleibt, gibt es mehrere Erklärungsansätze. Die wahrscheinlichste Ursache für das fehlende Tonverhalten liegt in der geringen Anregungsdauer des Reifens. Der Signalton soll vorrangig über Reifenschwingungen erzeugt werden. Für den Reifen gilt analog zum haptischen Gesamtsystem, dass er in eine Schwingung versetzt werden muss (vergleiche Bild 32). Bei den untersuchten Profilen liegt eine laterale Ausdehnung der akustisch wirksamen Oberfläche von 32,5 cm mit Abständen zwischen den einzelnen akustischen Teilprofilen von 2,5 bis 7,5 cm vor. Bei einem mittleren Reifendurchmesser von 40 bis 50 cm ergibt sich ein Reifenumfang von $U = 125$ bis 160 cm. Das bedeutet, dass ein Reifen beim Überrollen des Rüttelstreifens auf maximal 25 % seiner Abwicklung eine akustische Anregung erfährt (siehe Bild 50 rechts). Eine Überlagerung einzelner Schwingungen erfolgt kaum, so dass das System nicht in Eigenschwingung versetzt wird. Der Reifen fungiert demnach bei dieser kurzen Anregung nicht als Resonanzkörper.

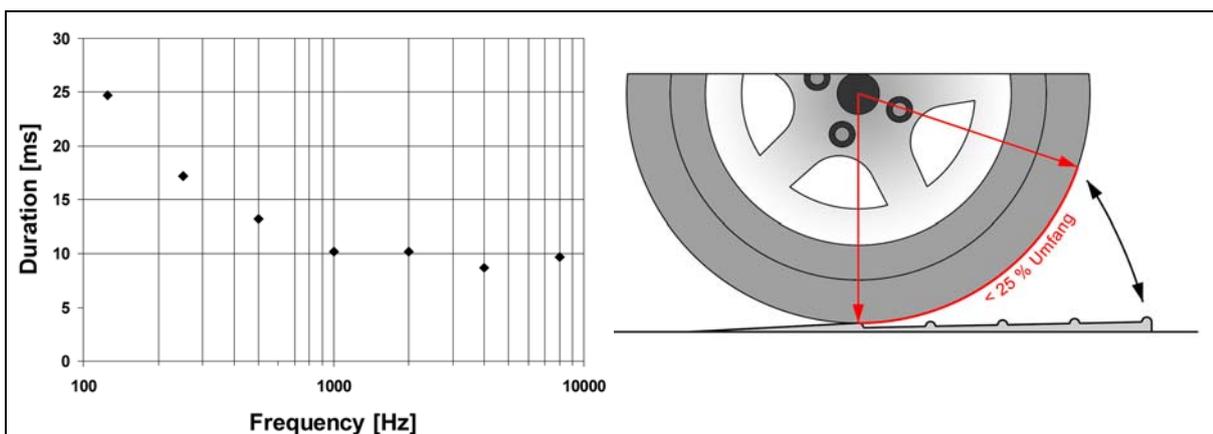


Bild 50: Mindestlängen von Sinustönen die notwendig sind, damit der jeweilige Reiz von Probanden als tonal erkannt wird, in Abhängigkeit von der Frequenz des akustischen Reizes nach TRUAX (1999) (links) und Abwicklung des Reifens beim Überrollen eines Rüttelstreifens (rechts)

Ein weiterer Grund liegt weniger in der Systemeigenschaft des Reifens, als vielmehr in der Wahrnehmungspsychologie des Menschen. Die Wahrnehmung eines Tons setzt eine gewisse Dauer des Schallereignisses voraus. TRUAX untersuchte 1999 diesen Sachverhalt am Beispiel von reinen Sinustönen. Die Ergebnisse sind in Bild 50 links dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im gesamten wahrnehmbaren Frequenzbereich eine minimale Dauer von 10 Millisekunden als Voraussetzung für die tonale Erkennbarkeit anzusehen ist. Bei der Überrollung eines Rüttelstreifens dauert die Tonanregung bei einer Geschwindigkeit von 100 km/h und einer lateralen Ausdehnung der akustisch wirksamen Oberfläche von 32,5 cm lediglich 12 Millisekunden. Somit liegt die Anregungsdauer nur knapp über der absolut unte-

ren Grenze der tonalen Erkennbarkeit. Dieser Sachverhalt kann ebenfalls als mögliche Ursache für die geringen Unterschiede im Bereich der psychoakustischen Parameter angesehen werden. STEINAUER (1991) erreichte mit seinem Design von profilierten Randmarkierungen eine tonale Anregung indem er die haptische von der akustischen Anregung entkoppelte. Zwischen einzelnen tropfenförmigen haptischen Profilen mit einem Abstand von 3 Metern wurden akustische Oberflächenmodifikationen mit einer lateralen Ausdehnung von einem Meter aufgebracht. Ein derartiges Design ist jedoch auf die vorliegende Problemstellung nicht übertragbar, da der Herstellungsaufwand überproportional ansteigen und somit der Forderung nach einer kostengünstigen, schnell umsetzbaren Lösung widersprechen würde.

Als Fazit der Untersuchungen von Einzelformen können sowohl für die haptische als auch für die akustische Anregung grundlegende Ergebnisse formuliert werden, die eine optimierte Beeinflussung des Fahrers erwarten lassen:

Die haptisch und betrieblich optimierte Grundform eines Streifens stellt, so das Ergebnis der Analysen, der „Sägezahn“ dar. Auf diese Grundform wird eine modellierte Oberfläche zur gezielten Erhöhung der Lautstärke im Fahrzeuginnenraum aufgebracht (vgl. Bild 51). Die Wirkung einer solchen Kombination aus haptischem Profil und akustischer Oberflächenmodulation konnte im Rahmen der messtechnischen Vorversuche als maximal im Hinblick auf Vertikalschwingung und psychoakustische Parameter identifiziert werden (vgl. Bild 49). Darüber hinaus stellt sich diese Form aus Gründen des Winterdienstes am zweckmäßigsten dar (vgl. Kapitel 5).

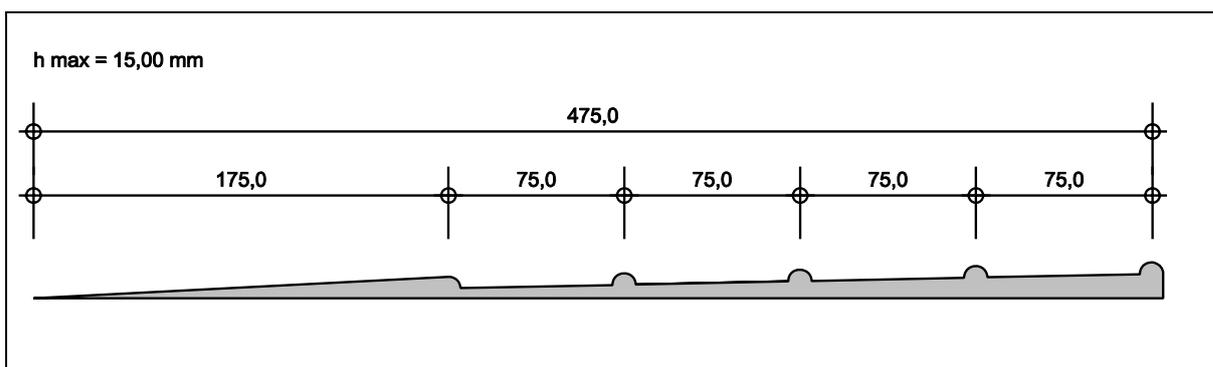


Bild 51: optimierte Form eines einzelnen Rüttelstreifens im Schnitt (alle Angaben in mm)

7.5 Ergebnisse zur Wirkung periodischer Anregungen

Nachdem in der ersten messtechnischen Versuchsreihe die wirksamste Einzelform identifiziert wurde, soll im zweiten Teil die Optimierung der Abstände zwischen den einzelnen Rüttelstreifen erfolgen.

Wie bereits in Kapitel 4.2 theoretisch dargestellt, wird die schwingungstechnische Wirkung der TRS auf den Menschen weniger durch die Form eines einzelnen Streifens beeinflusst, als vielmehr von der Frequenz der Anregung; D.h., von dem Abstand zwischen den einzelnen Streifen bzw. dem Verhältnis zwischen Anregungs- und Eigenfrequenz des Schwingungssystems. Die Abstände zwischen den einzelnen Anregungen durch die TRS stellen demnach weniger für die akustische, als vielmehr für die haptische Signalausprägung eine entscheidende Rolle dar.

Nach STEINAUER (1991) ist die größte und zuverlässigste Ansprache der TRS auf den Menschen bei einer Anregungsfrequenz im Bereich der Eigenfrequenz der Vorderachse zu erwarten. Diese liegt nach MITSCHKE (1984) für Pkw zwischen 8 und 15 Hz. STEINAUER (1991) wies in seiner Arbeit eine optimale Anregungsfrequenz von 9,0 Hz nach. Ziel war es also, den Abstand zwischen den Rüttelstreifen so zu wählen, dass die Schwingungen insbesondere in den Frequenzbereichen verstärkt werden, die im Bereich der Achseigenfrequenz liegen und gleichzeitig vom Menschen besonders gut wahrgenommen werden können. Da es sich bei den Schwingungen um zeitabhängige Signale handelt, wurde erwartet, dass ein gleicher Abstand zwischen den Streifen je nach Geschwindigkeit beim Überfahren zu unterschiedlich ausgeprägten Schwingungsanregungen führt.

Basierend auf diesen Erkenntnissen und den Grundlagen aus den Kapiteln 2 und 4 wurde der Abstand zwischen den einzelnen Rüttelstreifen zwischen zwei und fünf Metern in Schritten von einem Meter variiert. Für jeden dieser Abstände wurden fünf einzelne Streifen mit der – in der ersten Versuchsreihe als optimal identifizierten – Profilform aufgebracht und analog zur ersten Versuchsreihe mit dem Pkw und dem Lkw in allen relevanten Geschwindigkeitsbereichen mehrfach überfahren. Es wurde erwartet, dass durch eine Anregung im Bereich der Achseigenfrequenz der eingeschwingene Zustand des Systems und hierdurch die größte Schwingungswirkung erreicht wird. Zum Nachweis dieser Annahme wurden die einzelnen Messdaten durch eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) in einzelne Frequenzbereiche aufgeteilt, mit den Bewertungsfunktionen nach VDI bewertet und rücktransformiert. Diese bewerteten Schwingungssignale wurden im Hinblick auf ihren betragsmäßig maximalen Pegel ausgewertet.

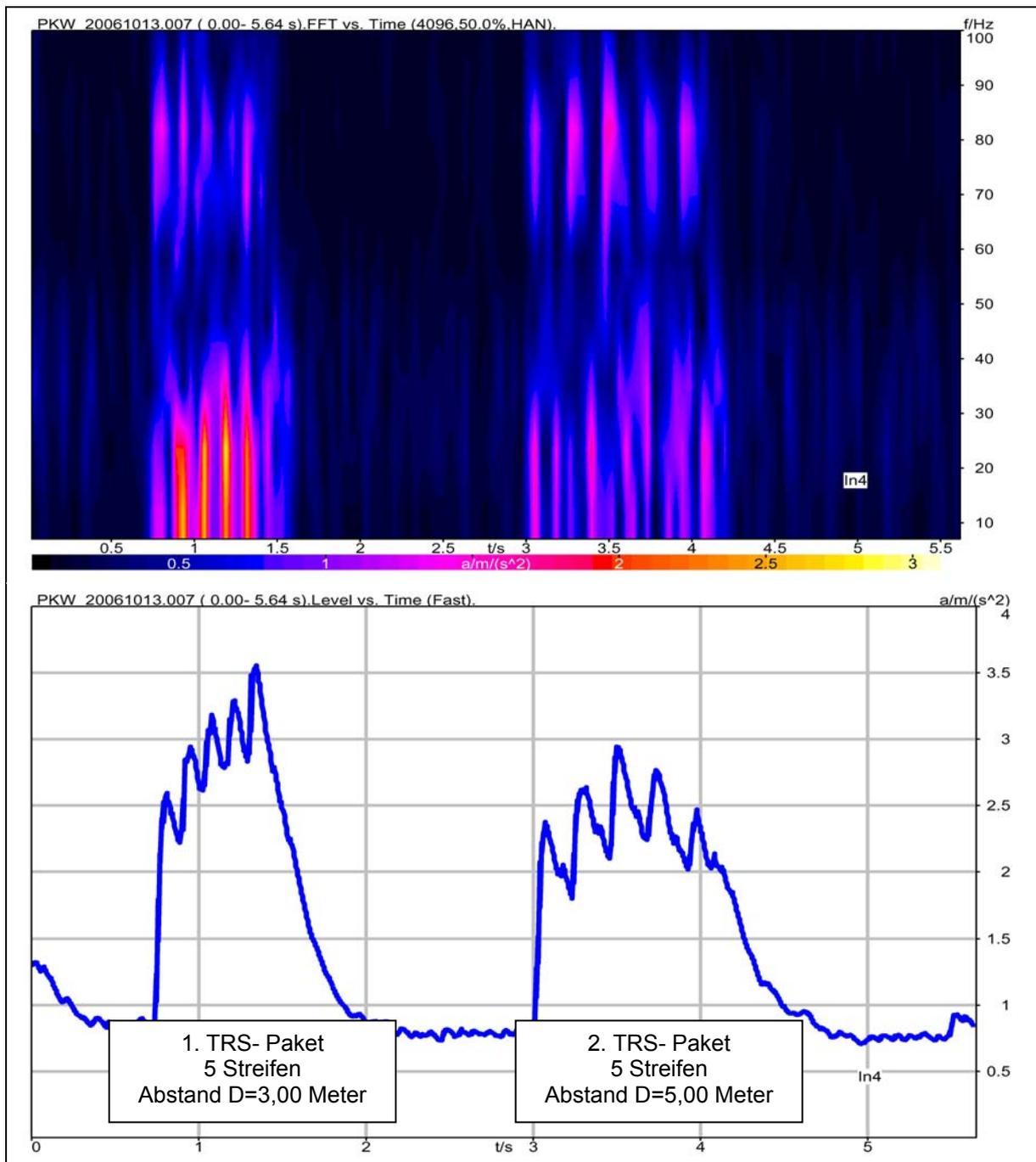


Bild 52: Beispielhafte Darstellung der Schwingung in der Sitzschiene eines Pkw ($v = 50 \text{ km/h}$) dargestellt als Fast-Fourier-Analyse (FFT vs. time) (oben) und dargestellt als Pegel (unten)

In Bild 52 ist im oberen Bereich ein Beispiel für eine derartige Auswertung dargestellt. Die rötlichen bzw. hellen Bereiche kennzeichnen Frequenzbereiche, in denen starke Vertikalschwingungen auftreten. Während bei dem ersten Paket von 5 Streifen diese Bereiche besonders stark im Frequenzspektrum unter 30 Hz auftreten und damit nach MITSCHKE (1984) für Menschen besonders gut wahrnehmbar sind, stellt sich die Schwingungsantwort des zweiten Pakets im gesamten Frequenzspektrum deutlich niedriger und insgesamt gleichmäßiger dar. Stellt man diese Messung – ähnlich den akustischen Analysen – als Pegel dar (siehe Bild 52 unten), wird der Ef-

fekt noch deutlicher. Die Streifen des ersten TRS-Pakets erzeugen einen stärkeren Schwingungspegel als die Streifen des zweiten Pakets. Der gewählte Abstand stellt sich demnach als wirkungsvoller bzgl. der haptischen Anregung dar als bei der zweiten Variante. Auf Basis der theoretischen Grundlagen wurde angenommen, dass mit dem gewählten Abstand bei der hier zu Grunde liegenden Fahrgeschwindigkeit die Anregung durch die TRS näher am Bereich der Eigenfrequenz liegt als beim Abstand des zweiten TRS-Pakets und die Wirkung auf den Menschen hierdurch maximiert wird. Beim zweiten TRS-Paket ist der Abstand weniger günstig gewählt und die maximal auftretende Vertikalbeschleunigung dementsprechend niedriger.

Da die Vielzahl der unterschiedlichen Messungen (> 500 Stück) auf Basis der FFT- oder Pegeldarstellung kaum vergleichbar ist, wurden die Messreihen gemäß der in Kapitel 7.3 beschriebenen Methodik ausgewertet und zusammengefasst. Daraus ergeben sich dreidimensionale Darstellungen gemäß Bild 53 für den Pkw und gemäß Bild 54 für den Lkw, die den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, TRS-Abstand und Schwingungsantwort in der Sitzschiene und der Sitzfläche bzw. die Fahrzeuginnenraumakustik verdeutlichen.

Die theoretischen Grundlagen ließen insbesondere für die haptischen Signale einen Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit, Abstand der TRS und Wirkung auf den Menschen erwarten, welcher von STEINAUER (1991) im Rahmen von Mehrkörper-Simulationen nachgewiesen wurde. Durch eine Anregung im Bereich der Eigenfrequenz von einzelnen Bauteilen des Fahrzeugs wie Vorderachse, Aufbau oder Sitz soll eine maximale Schwingungsantwort generiert werden. Durch den Zusammenhang zwischen Abstand, Frequenz und Geschwindigkeit nach Gl. 11 stellt sich der optimale Abstand zwischen den einzelnen Anregungen durch die TRS als ausschließlich abhängig von der Geschwindigkeit der Fahrzeuge dar (vgl. auch Tab. 4).

$$D = \frac{v}{3,6 \cdot f} \quad \text{Gl. 11}$$

Mit: D Optimaler Abstand zwischen einzelnen Anregungen [m]
 v Geschwindigkeit [km/h]
 f Optimale Anregungsfrequenz [1/s]

Geschwindigkeit [km/h]	60	80	90	100	110	120
Profilabstand [m]	1,85	2,47	2,78	3,09	3,40	3,70

Tab. 4: Günstigste Profilierungsabstände von Randmarkierungen für die mechanische Warnung in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit (STEINAUER, 1991)

Diese Erwartungen konnten im Rahmen der messtechnischen Untersuchung von periodischen Anregungen durch TRS jedoch nicht vollständig bestätigt werden. Die bewertete Vertikalschwingung in der Sitzschiene und der Sitzfläche stellte sich sowohl für den Pkw als auch für den Lkw als weitaus geschwindigkeitsunabhängiger dar, als erwartet. Für den Pkw ergeben sich sowohl in der Sitzfläche, als auch in der Sitzschiene eindeutige Maxima der Vertikalschwingungen. Über den gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich (80 km/h bis 120 km/h) entfalten die Rüttelstreifen mit einem Abstand von 3 Metern eine optimale Wirkung. Die hier auftretenden maximalen Vertikalbeschleunigungen liegen mit $2,5 \text{ m/s}^2$ bis $3,0 \text{ m/s}^2$ im Bereich der Sitzschiene um $0,5 \text{ m/s}^2$ bis $1,0 \text{ m/s}^2$ über den Ergebnissen der Messungen mit kleineren oder größeren Abständen zwischen den einzelnen Streifen. Im Bereich der Sitzfläche stellt sich die Schwingungsantwort mit maximal $1,5 \text{ m/s}^2$ insgesamt niedriger dar. Bei einem Abstand von 3 Metern liegt die maximale Schwingungsantwort hier jedoch wie bei der Sitzschiene um $0,5 \text{ m/s}^2$ bis $1,0 \text{ m/s}^2$ höher als bei Anregungen durch Streifen mit anderen Abständen.

Bei den Messungen der haptischen Signale im Lkw stellen sich die Ergebnisse differenzierter dar. Während im niedrigen Geschwindigkeitsbereich sowohl in der Sitzschiene als auch in der Sitzfläche ein lokales Maximum bei TRS-Abständen von 3 Metern zu erkennen ist, treten die absoluten maximalen Schwingungssignale über den gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich von 50 km/h bis 80 km/h bei einem Abstand von 5 Metern zwischen den einzelnen TRS auf. Insgesamt sind beim Lkw die größten Vertikalbeschleunigungen im niedrigen und mittleren Geschwindigkeitsbereich (50 km/h bis 70 km/h) zu verzeichnen. Im oberen Geschwindigkeitsbereich (70 km/h bis 80 km/h) entfalten die TRS beim untersuchten Lkw geringere Wirkungen im Hinblick auf die haptischen Signale.

Betrachtet man die akustischen Eigenschaften der TRS, so zeigen die Ergebnisse, dass diese vorrangig durch die Form und die Oberflächeneigenschaft eines einzelnen Streifens beeinflusst werden. Diese wurden bereits in der ersten Versuchsreihe (vgl. Kapitel 7.4) optimiert. Die Entwicklung der Fahrzeuginnenraumakustik ist also erwartungsgemäß sowohl für den Lkw als auch den Pkw vorrangig von der Geschwindigkeit und weniger vom Abstand der Rüttelstreifen untereinander abhängig. Beim Pkw (vgl. Bild 53 oben) ist im unteren Geschwindigkeitsbereich eine leicht erhöhte Wirkung bei einem Abstand von drei Metern zu erkennen, beim Lkw ist die Akustik – analog zu den Ergebnissen der ersten Versuchsreihe – ausschließlich von der Geschwindigkeit abhängig. Insgesamt werden das Motorengeräusch und die aerodynamischen Geräusche bei steigender Geschwindigkeit als dominant eingestuft.

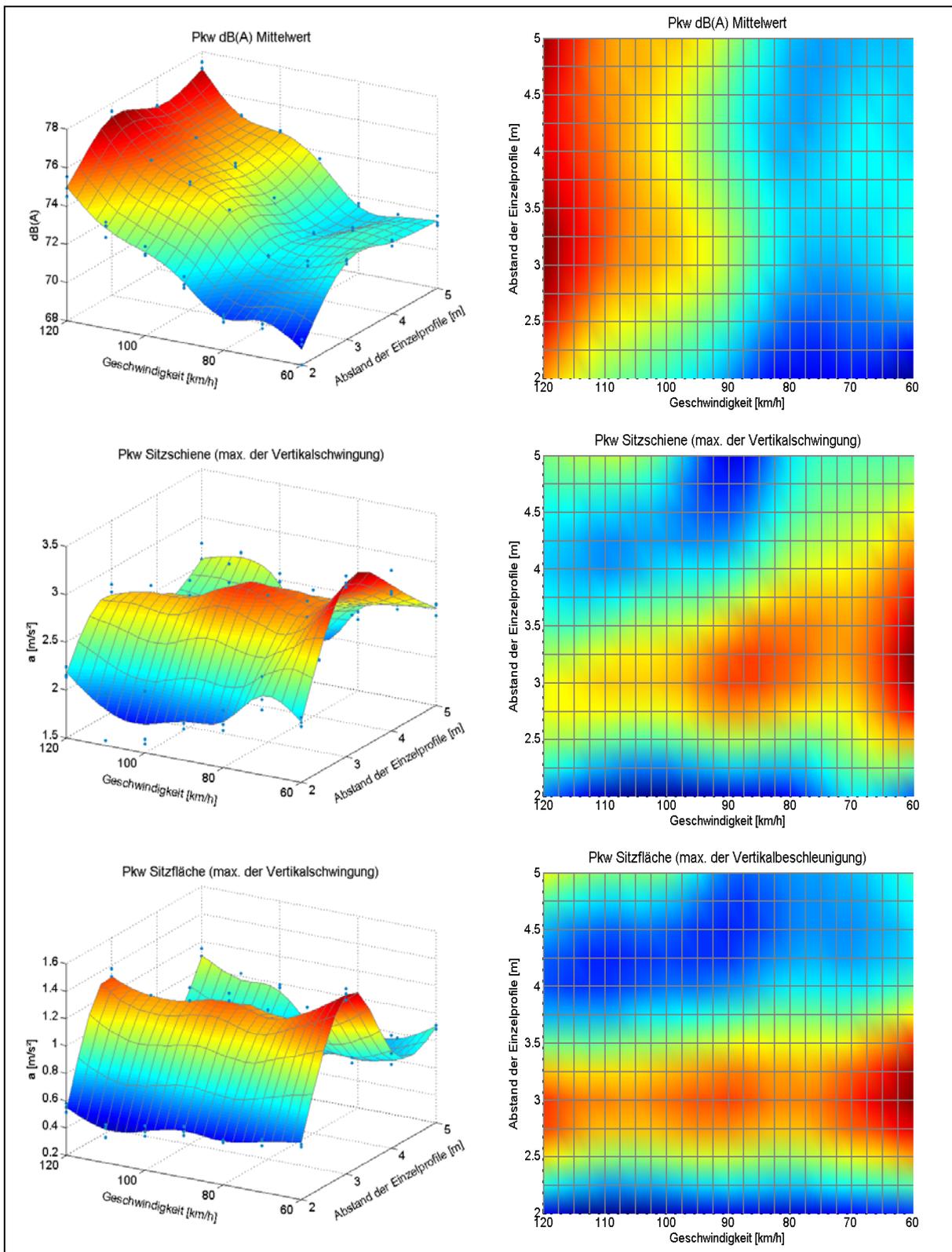


Bild 53: Akkumulierte Messergebnisse Pkw in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Abstand zwischen den Einzelelementen: Mittelwert der A-bewerteten Lautstärke (oben); Maximalwerte der Beschleunigung in der Sitzschiene (Mitte); Maximalwerte der Vertikalbeschleunigungen im Sitz (unten)

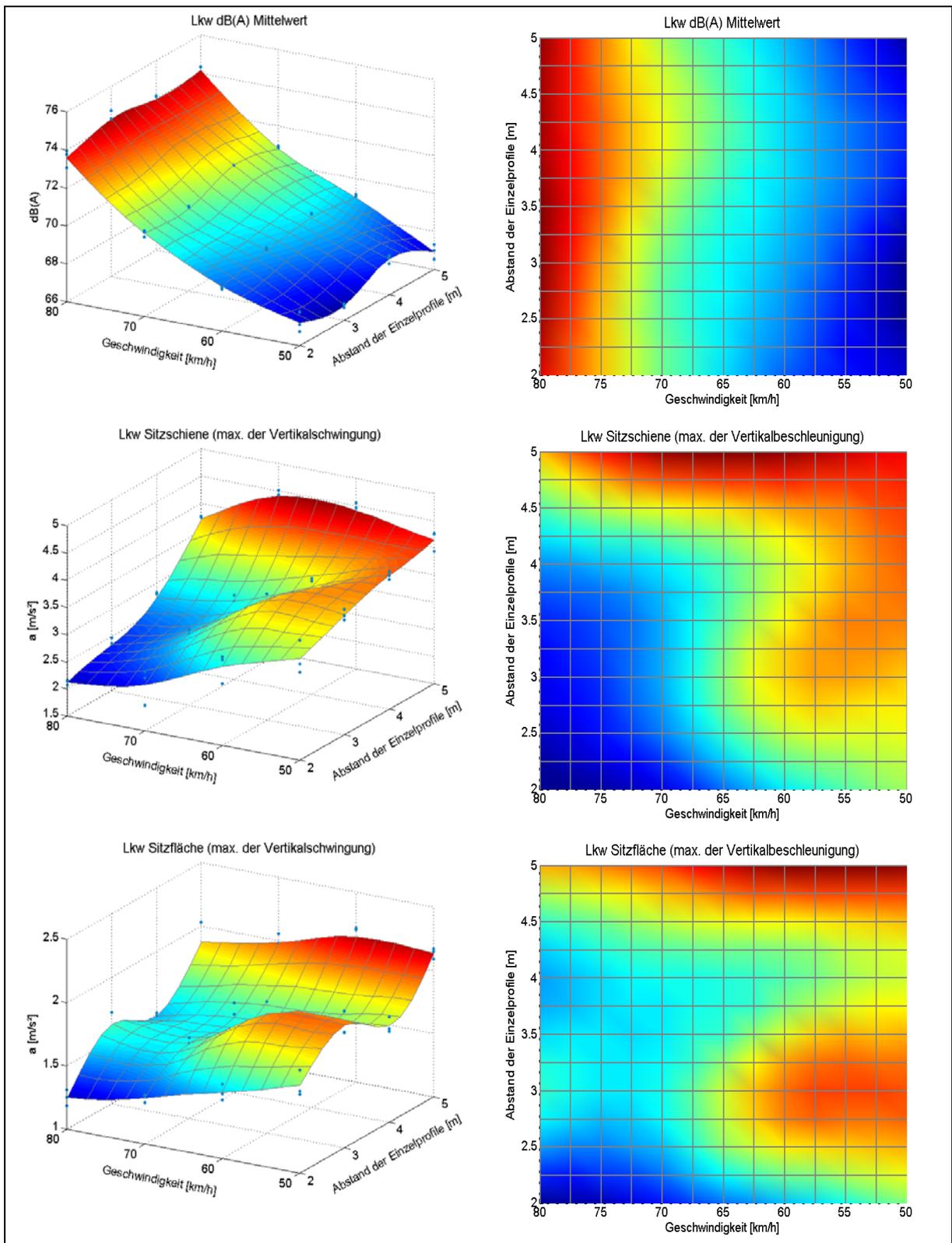


Bild 54: Akkumulierte Messergebnisse Lkw in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Abstand zwischen den Einzelelementen: Mittelwert der A-bewerteten Lautstärke (oben); Maximalwerte der Beschleunigung in der Sitzschiene (Mitte); Maximalwerte der Vertikalbeschleunigungen im Sitz (unten)

Die Messungen von periodischen Anregungen durch TRS mit unterschiedlichen Abständen zwischen den einzelnen Streifen konnten sowohl für den Pkw als auch für den Lkw keine geschwindigkeitsabhängige Verschiebung des Maximums, also der haptischen Wirkung auf den Fahrer, nachweisen, die auf Grund der theoretischen Grundlagen und der Gl. 11 bzw. Tab. 4 zu erwarten gewesen wären. Das ursprüngliche Konzept, durch eine optimale Abstandswahl ausschließlich die Fahrer in ihrem Geschwindigkeitsverhalten zu beeinflussen, die die v_{zul} überschreiten, ließ sich im Rahmen der messtechnischen Untersuchungen nicht bestätigen. Die TRS entfalten ihre haptische Wirkung im gesamten untersuchten Geschwindigkeitsspektrum in nahezu gleicher Ausprägung. Die Messergebnisse weisen darauf hin, dass die theoretischen Grundlagen und Erkenntnisse zu periodischen Anregungen nur bedingt auf die vorliegende Fragestellung übertragbar sind. Durch die TRS wird weniger eine langwellige harmonische als vielmehr eine stoßartige Anregung erzeugt. Die maximale Wirkung der TRS entsteht also nicht primär durch Resonanzeffekte, sondern durch die Überlagerung mehrerer impulshafter Anregungen. Ein Beleg stellt das Zusammenfallen von wirkungsvollstem Abstand zwischen einzelnen Rüttelstreifen und dem Achsabstand der Messfahrzeuge dar. Beim Pkw (Achsabstand: 2,70 Meter) ergab sich das Maximum der Vertikalbeschleunigung bei einem TRS-Abstand von 3 Metern und beim Lkw (Achsabstand: 4,80 Meter) bei einem TRS-Abstand von 5 Metern. Durch die gleichzeitige Einbringung eines Impulses in der Vorder- und Hinterachse der Fahrzeuge wird also eine maximale Vertikalschwingung erzeugt, die in ihrer Ausprägung stärker ist, als Effekte aus der Eigenfrequenz.

Die Messergebnisse ergaben einen optimalen Abstand zwischen den einzelnen TRS von 3 Metern für Pkw und 5 Metern für Lkw. Auf Grund des wesentlich höheren Anteils von Pkw am Verkehrsaufkommen auf Landstraßen und dem Unfallgeschehen sowie der größeren Variation der Bauformen von Lkw, wird die Beeinflussung von Pkw fokussiert. Als Resultat der zweiten Versuchsreihe wird demnach der Abstand von drei Metern als optimierte Bauform identifiziert.

7.6 Zusammenfassung der technischen Voruntersuchungen

Ziel der technischen Voruntersuchungen war die Optimierung der Ausführung von TRS hinsichtlich ihrer akustischen und haptischen Wirkung auf den Kraftfahrer. Die Bewertung der Wirkung erfolgte auf Basis von physikalischen Messwerten, die mit psychologischen Bewertungsfunktionen kombiniert wurden. Die messtechnische Untersuchung teilte sich in zwei Versuchsreihen. In der ersten Reihe wurden die Form einzelner Rüttelstreifen und eine geeignete Oberflächemodulation ermittelt, die im Rahmen der betrieblichen Randbedingungen eine optimale Wirkung auf den Fahrer

entfalten. Als Resultat ergibt sich das Keilprofil mit einer aufgetragenen Oberflächenstruktur als optimierte Bauform eines einzelnen Rüttelstreifens.

Diese Vorzugsvariante wurde als Grundform für die zweite Versuchsreihe verwendet, in der der Abstand der einzelnen Streifen untereinander optimiert wurde. Die theoretischen Grundlagen ließen erwarten, dass die größte haptische Wirkung erreicht wird, wenn das Fahrzeug durch die TRS in den eingeschwungenen Zustand versetzt wird. Zur Identifikation des optimalen Abstands zwischen den einzelnen Streifen wurden jeweils fünf Streifen in unterschiedlichen Abständen zwischen 2 und 5 Metern auf der Versuchsstrecke aufgebracht und mit den Messfahrzeugen überfahren. Die Analysen der aufgezeichneten Messreihen konnten die theoretischen Annahmen zwar nicht vollständig bestätigen, ergaben jedoch einen eindeutigen Bereich maximaler Schwingungen für Pkw bei einem Abstand von 3 Metern und für Lkw bei 5 Metern. Auf Grund des niedrigen Lkw-Anteils auf Landstraßen wurde eine Anordnung der optimierten Bauform für Einzelstreifen mit einem Abstand untereinander von 3 Metern als Vorzugsvariante für die verkehrstechnischen Untersuchungen (vgl. Kapitel 8) identifiziert (siehe Bild 55).

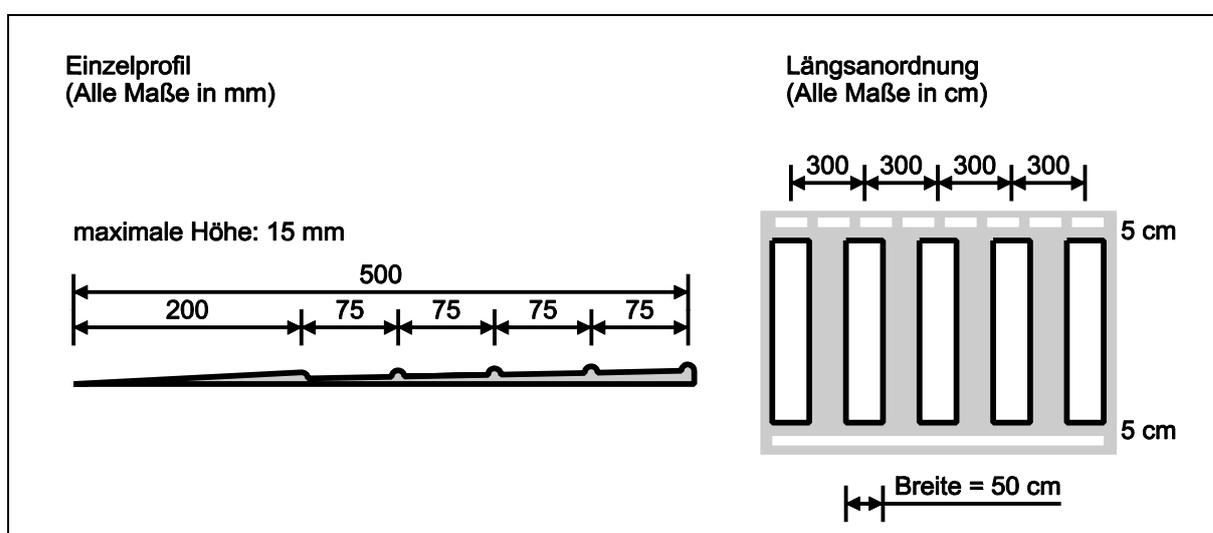


Bild 55: Optimiertes Einzelprofil und Anordnung in Längsrichtung

Die akustische und haptische Wirkung dieser Vorzugsvariante im Vergleich zu einer unbehandelten Straße (Nullfall) auf den Fahrer ist in Bild 56 dargestellt. Die fünf keilförmigen Streifen mit Oberflächenmodulation und einem Abstand von drei Metern untereinander bewirken sowohl für die akustischen als auch die haptischen Parameter eine deutliche Erhöhung des Pegels über den gesamten untersuchten Geschwindigkeitsbereich. Die A-bewertete Lautstärke im Fahrzeuginneren steigt durch die Rüttelstreifen um ca. 10 dB(A) und die psychologische Lautheitszunahme um 25 bis 30 sone. Die maximale Vertikalschwingung steigt durch die Rüttelstreifen von ca.

0,2 m/s² auf 3 bis 4 m/s². Sowohl die messtechnischen Aufzeichnungen, die psychologisch orientierten Auswertungen, als auch der subjektive Eindruck, der vom Messpersonal geschildert wurde verdeutlichen, dass durch die TRS in der vorgestellten Ausführung eine deutlich alarmierende Wirkung ausgeht, die sich – sogar bei Hintergrundgeräuschen wie bspw. eingeschaltetem Radio – klar vom Geräuschpegel und vom Schwingungsverlauf einer normalen Fahrt auf einer durchschnittlich ebenen Asphaltstraße abhebt. Die ermittelte Ausführung der Rüttelstreifen lässt eine optimale Wirkung auf die meisten Verkehrsteilnehmer erwarten.

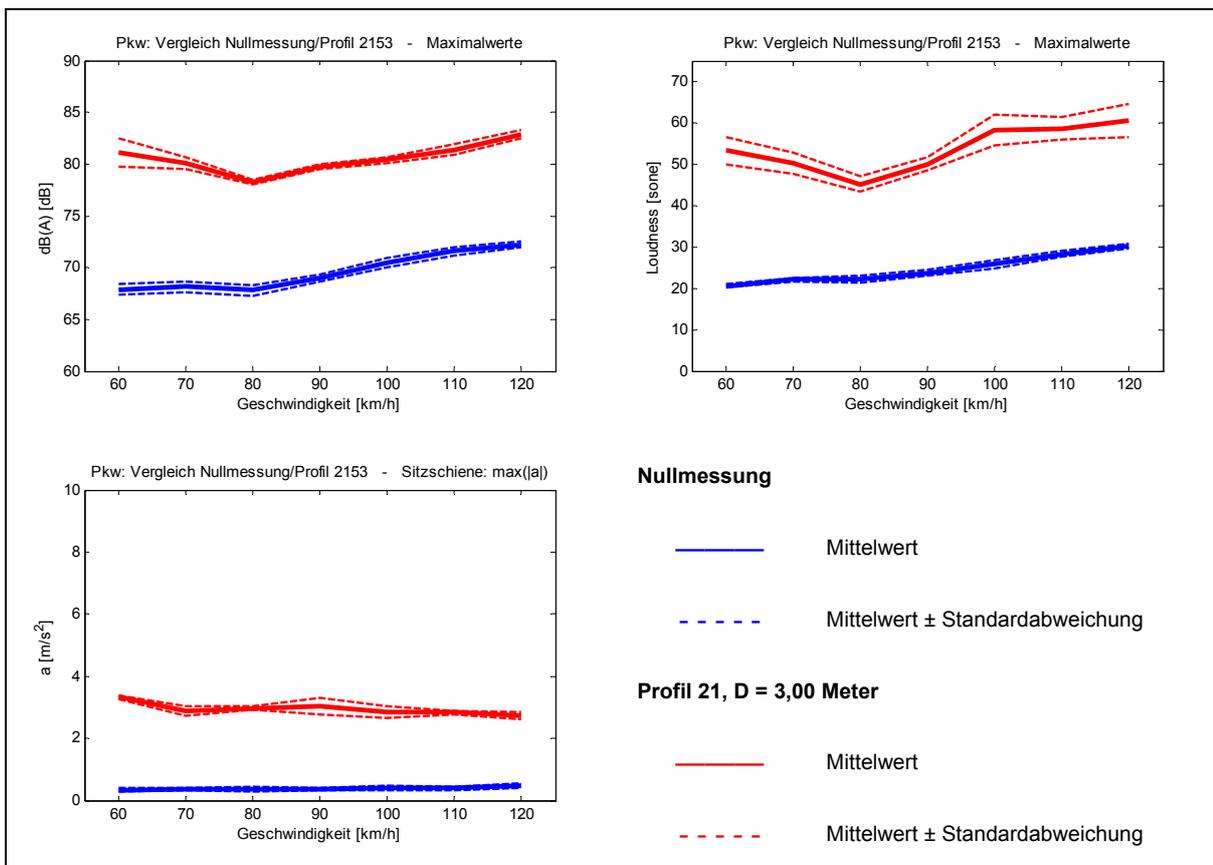


Bild 56: Vergleich der Wirkung der Vorzugsvariante (Profil 21, Abstand D = 3,00 Meter) mit der Nullmessung; maximale A-bewertete Lautstärke (oben links); maximale Lautheit (oben rechts) und maximale Vertikalschwingung in der Sitzschiene (unten links) (nach LANK/STEINAUER/BUSEN, 2009)

8 Verkehrstechnische Wirkungsanalyse

Im Rahmen der messtechnischen Voruntersuchungen (Kapitel 7) wurden Einzelformen und Abstände für eine optimierte Ausführung von Rüttelstreifen herausgearbeitet. Diese wurden im Rahmen der verkehrstechnischen Wirkungsanalyse auf drei Landstraßen im Kreis Düren vor gefährlichen, unfallträchtigen Kurven umgesetzt (vgl. Bild 57 und Bild 58). Die ausgewählten Strecken repräsentieren unterschiedliche Landstraßencharaktere, weisen eine geringe Verkehrsbelastung und eine überproportionale Anzahl von Unfällen durch Geschwindigkeitsübertretungen auf.

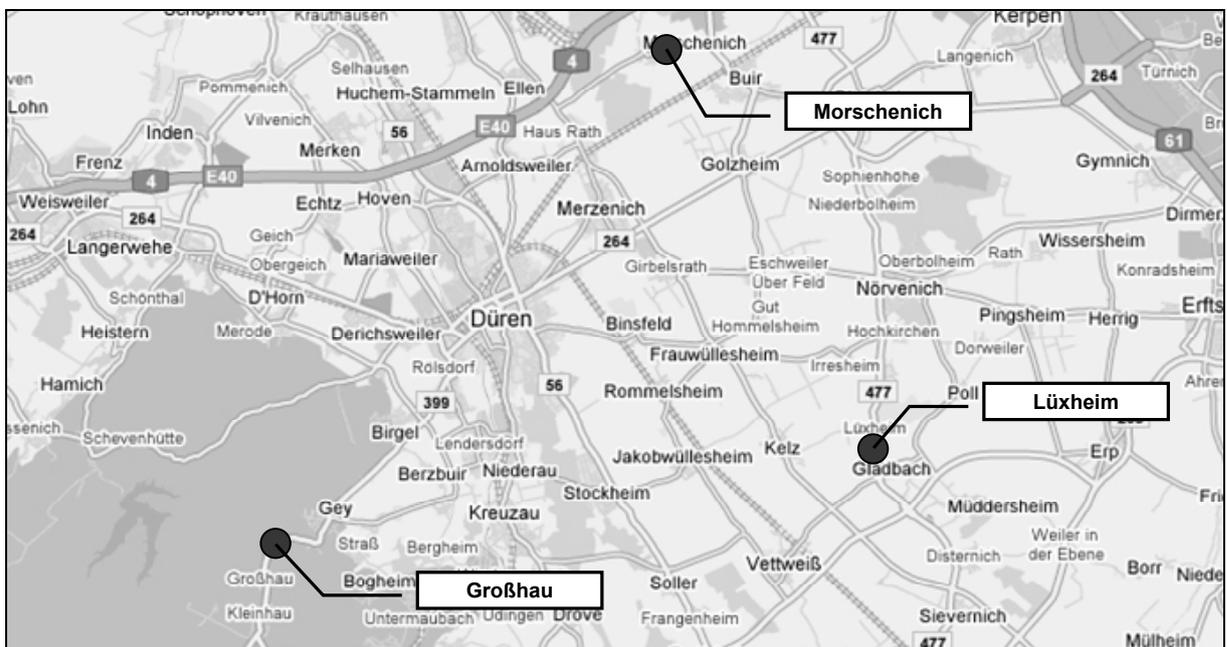


Bild 57: Übersichtslageplan Strecken der In-Situ-Untersuchung (Quelle: www.maps.google.de)

Die Strecke zwischen Morschenich und Buir (L 257) ist eine klassische „gewachsene“ Landstraße, die sich entlang der Flurgrenzen bewegt. Zwischen lang gezogenen Kurven und Geraden mit Sichtweiten über 650 Metern liegt eine Kurve mit einem extrem geringen Radius von ca. 100 Metern. Dieser stellt sich als Unfallschwerpunkt dar. Die B 477 ist über viele Kilometer mit einem überbreiten Querschnitt ausgebaut und großzügig trassiert. Zwischen Eggersheim und Luxheim wird der Querschnitt vor einer Rechtskurve auf einen regulären RQ 10,5 reduziert. In diesem Bereich treten vermehrt Unfälle auf. Die B 399 zwischen Großhau und Gey schließlich stellt sich als klassische Vorgebirgsstrecke dar, die sich stark an der Topographie orientiert. Enge Radien und geringe Sichtweiten, bedingt durch den dichten Baumbestand, sind charakteristisch. Im Bereich einer lang gezogenen Kurve mit Sichtweiten unter 150 Metern ereignen sich regelmäßig Unfälle. Luftbilder der Strecken sind im Anhang F aufgeführt.



Bild 58: Untersuchungsstrecken (links Annäherungsbereich; rechts: Gefahrenstelle)
 L 257 Fahrtrichtung Buir
 L 257 Fahrtrichtung Morschenich
 B 477 Fahrtrichtung LUXHEIM
 B 399 Fahrtrichtung Gey



Bild 59: Ausführung der TRS auf den Untersuchungsstrecken am Beispiel der L 257 FR Buir-

Auf den einzelnen Strecken wurden die Rüttelstreifen gemäß der in Kapitel 7 als optimal ermittelten Bauform und Anordnung von einer Fachfirma aus Zwei-Komponenten-Kaltplaste aufgebracht (vgl. Bild 59). In Abhängigkeit von den äußeren Gegebenheiten wie bspw. Radienfolge, einmündende Wege und Beschilderung wurde die Ausführung der einzelnen Rüttelstrecken leicht variiert. Die Ausführungspläne sind in Anhang F aufgeführt.

8.1 Messmethodik und -aufbau

Die Wirkung der Rüttelstreifen auf die Verkehrssicherheit konnte auf Grund des kurzen Betrachtungszeitraums nicht anhand von Unfallanalysen vollzogen werden. Ersatzweise wurde die Wirkung auf das Geschwindigkeitsniveau der Verkehrsteilnehmer analysiert. Eine signifikante Reduzierung der Geschwindigkeit und insbesondere des Anteils der Geschwindigkeitsübertretungen wird als Indikator für eine Erhöhung der Verkehrssicherheit interpretiert.

Im Rahmen der Untersuchung wurden Vorher-Nacher-Messungen auf allen Strecken durchgeführt. Im Annäherungsbereich der Gefahrenstellen und in den Kurven wurden Seitenradargeräte angeordnet, mit deren Hilfe die Geschwindigkeit der einzelnen Fahrzeuge an mehreren Tagen vor und nach der Applikation der Rüttelstreifen erhoben wurde. Zur Abgrenzung der Wirkung der TRS von Zufallsschwankungen des

Geschwindigkeitsverhaltens wurden Kontrollmessungen ca. zwei Kilometer vor den Untersuchungsstrecken durchgeführt. Ergänzend wurde sowohl der Annäherungsbereich als auch die Kurve videotechnisch überwacht. Dies diente der Erhebung des allgemeinen Fahrerverhaltens und bildet die Grundlage für die detaillierte Analyse von Einzelfahrzeugdaten (vgl. Kapitel 8.5 ff.). Der Messaufbau ist in Form einer Prinzipskizze in Bild 60 dargestellt.

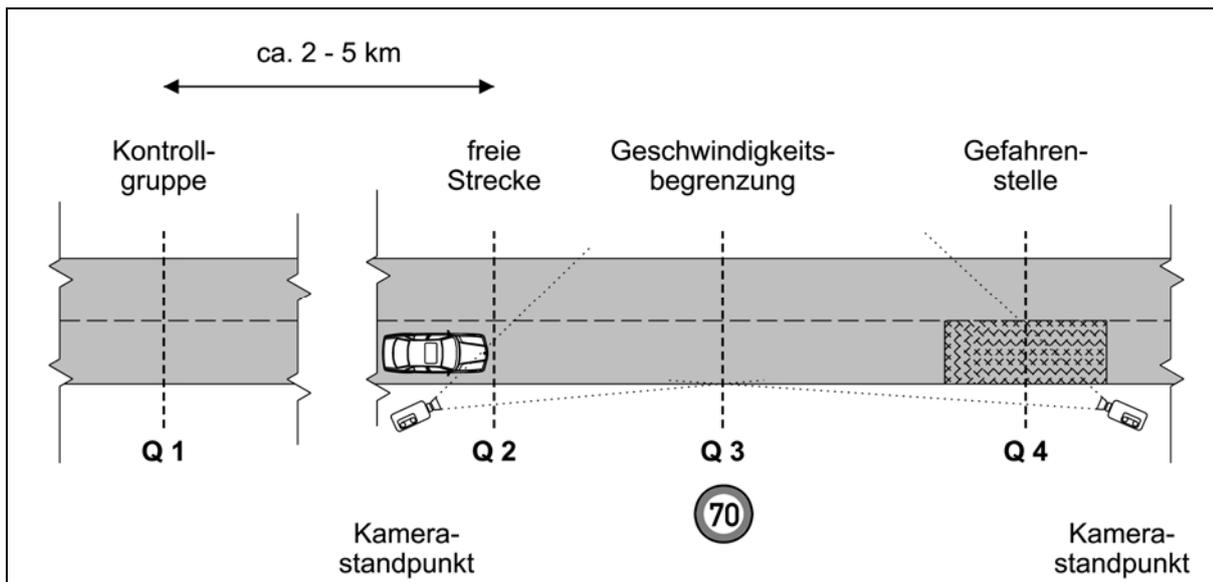


Bild 60: Prinzipskizze Messaufbau zur verkehrstechnischen Erhebung (LANK/STEINAUER/ BUSSEN, 2009)

Neben der verkehrstechnischen Datenerhebung wurden an allen Strecken sowohl Anwohnerbefragungen als auch Befragungen der Verkehrsteilnehmer durchgeführt, mit denen die Akzeptanz gegenüber den Rüttelstreifen bewertet wurde. Die verkehrstechnische Wirkungsanalyse wurde in mehrere Teile gegliedert:

- Verkehrstechnische Analyse des Gesamtkollektivs,
- Verkehrstechnische Analyse von Einzelfahrzeugen und
- Akzeptanzuntersuchung.

Aufbauend auf einer ersten allgemeinen Erhebung und Auswertung wird der Detaillierungsgrad im Rahmen der vorliegenden Arbeit durch die Abgrenzung und Analyse einzelner Fahrergruppen bzw. einzelner Fahrer gesteigert.

8.2 Messzeitraum und -dauer

Die verkehrstechnischen Erhebungen erfolgten sowohl vor der Applikation der Rüttelstreifen als auch danach. In beiden Messblöcken wurden mehrere Messungen gemäß EVE 91 durchgeführt: „Für Zählungen und Erfassungen des Tagesverkehrs

haben sich die Monate April, Mai, Juni, September und Oktober bewährt (die Schulferien sind jeweils zu berücksichtigen). Es sollten nur Wochen ohne Feiertage ausgewählt werden. Als Zähltag sind die Tage Dienstag bis Donnerstag (so genannte Normalwerktag) geeignet, wobei die örtlichen Gegebenheiten zu beachten sind. [...] Für die Erfassung der täglichen Verkehrsabläufe werden Zählungen während der folgenden Zeiten empfohlen: Tagesverkehr 6.00 – 22.00 Uhr [...]“ (EVE 91) Die Messzeiträume der einzelnen Strecken sind Tab. 5 und Tab. 6 zu entnehmen. Insgesamt standen damit für die Analysen Messdaten von 75 Stunden vor und 70 Stunden nach Applikation der Rüttelstreifen zur Verfügung.

Strecke	Datum	Wochentag	Zeitraum	
			von	bis
L 257 FR Buir	06.09.07	Do	07:30	18.30
L 257 FR Buir	12.09.07	Mi	07:00	18.30
L 257 FR Morschenich	11.10.07	Do	10:45	18.30
B 477 FR LUXHEIM	05.09.07	Mi	07:00	18:30
B 477 FR LUXHEIM	11.09.07	Di	07:00	18.30
B 399 FR Gey	13.09.07	Do	08:00	18.30
B 399 FR Gey	10.10.07	Mi	07:45	18.30

Tab. 5: Messzeiträume der Vorher-Messungen

Strecke	Datum	Wochentag	Zeitraum	
			von	bis
L 257 FR Buir	22.11.07	Do	09:15	17:00
L 257 FR Buir	27.08.08	Mi	08:45	18:00
L 257 FR Morschenich	21.11.07	Mi	09:30	17:00
L 257 FR Morschenich	28.08.08	Do	08:45	17:45
B 477 FR LUXHEIM	17.06.08	Di	08:15	18:15
B 477 FR LUXHEIM	07.10.08	Di	08:15	18:00
B 399 FR Gey	04.06.08	Mi	08:15	17:45
B 399 FR Gey	10.06.08	Di	08:45	18:15

Tab. 6: Messzeiträume der Nachher-Messungen

8.3 Analyse des Gesamtkollektivs

In einem ersten Schritt erfolgte eine klassische Verkehrsanalyse aller Fahrzeuge in Form von Vorher-Nachher-Vergleichen der Geschwindigkeit. Die einzige Einschränkung bezog sich dabei auf den Betrachtungszeitraum. Auf den einzelnen Strecken wurden ausschließlich die Zeiträume verglichen, zu denen sowohl bei der Vorher-Messung als auch bei der Nachher-Messung Daten vorlagen und auf Grund der Kontrollgruppenmessung externe Fehleinflüsse ausgeschlossen werden konnten. Eine Differenzierung nach Fahrzeugklassen erfolgte zunächst nicht. Der Schwerverkehr lag auf allen Strecken mit 10 % in einer typischen Größenordnung und „*wenn bei einer bestimmten Ausgangsgeschwindigkeit ein Rückgang [der Geschwindigkeit] erwartet werden kann, so trifft dies sowohl für Pkw als auch für den Schwerverkehr in gleichem Maße zu.*“ (MAIER, 1991)

8.3.1 Größe des Untersuchungskollektivs

Die Messzeiträume nach Kapitel 8.2 wurden hinsichtlich Störeinflüssen wie bspw. Feuchtigkeit auf Grund von nächtlichem Regen und Schwankungen innerhalb der Kontrollgruppe analysiert und teilweise eingeschränkt. Die Schnittmenge aus unbeeinflussten Zeiträumen, zu denen sowohl Vorher- als auch Nachher-Daten vorlagen, wurde der weiteren Analyse zugeführt. Insgesamt basiert die Analyse des Gesamtkollektivs damit auf ca. 12.000 Einzelfahrzeugdaten für den Vorher-Fall und auf ca. 10.000 Einzelfahrzeugdaten für den Nachher-Fall. Bei den direkten Gegenüberstellungen des Vorher- und des Nachher-Falls werden ausschließlich Zeiträume betrachtet, für die sowohl vorher wie nachher Messdaten vorliegen. Durch diese Methodik verringert sich die Datenmenge weiter um ca. 20 %. Eine detaillierte Aufteilung der Anzahl von Fahrzeugdaten auf die einzelnen Strecken ist Tab. 7 zu entnehmen.

Strecke	Vorher [Kfz]		Nachher [Kfz]	
L 257 FR Buir	3.000	(1.920)	1.920	(1.870)
L 257 FR Morschenich	1.180	(890)	2.070	(1.600)
B 399 FR Gey	4.540	(3.640)	3.600	(3.350)
B 477 FR LUXHEIM	3.330	(2.870)	2.670	(2.620)
Summe:	12.050	(9.320)	10.260	(9.440)

Tab. 7: Größe des Untersuchungskollektivs differenziert nach Strecken [Kfz] (Anzahl Fahrzeuge für direkten Vorher-Nachher-Vergleich während gleicher Stunden in Klammern)

8.3.2 Bewertungsmethodik und -maßstäbe

Die Bewertung der verkehrlichen Wirkung von Rüttelstreifen erfolgte vorrangig auf Basis von Geschwindigkeitsdaten. Der erwartete Effekt der Rüttelstreifen – eine Geschwindigkeitsreduktion – wurde durch einen Vergleich aller Vorher- und Nachhermessungen analysiert. In einem ersten Schritt wurde die Geschwindigkeitsverteilung aller Messungen auf statistisch signifikante Unterschiede getestet. In weiteren Schritten wurde die Ausprägung der Geschwindigkeitsunterschiede anhand unterschiedlicher Quantilswerte analysiert. In der Forschungsliteratur haben sich bei ähnlichen Fragestellungen die Kenngrößen v_{50} und v_{85} als praktikable Bewertungsmaßstäbe erwiesen. In vielen Studien wurde zusätzlich der Anteil der Geschwindigkeitsübertretungen bzw. der Anteil der signifikanten Geschwindigkeitsüberschreitungen³⁷ als Bewertungsgröße ergänzt.

Zur Herleitung angemessener Bewertungsmaßstäbe muss die Unfallursache betrachtet werden. In erster Linie sind Unfälle auf Landstraßen auf die Ursache „nicht angepasste Geschwindigkeit“ zurückzuführen (DESTATIS, 2009). Zur Reduktion der Unfallzahlen und insbesondere der schweren Unfallfolgen muss weniger die Durchschnittsgeschwindigkeit aller Fahrer, als vielmehr die Senkung der höchsten Geschwindigkeiten bzw. des Anteils der Schnellfahrer erfolgen. Das Fahrerkollektiv, das sich an die Geschwindigkeitsbegrenzungen hält,³⁸ sollte nach Möglichkeit weitestgehend unbeeinflusst bleiben.

Neben der statistischen Signifikanz wurden demnach die Quantilswerte zur Bewertung herangezogen. Optimale Wirkung entfalten die Rüttelstreifen, wenn die v_{85} , die v_{95} , die Durchschnittsgeschwindigkeit und der Anteil der Geschwindigkeitsübertreter sowie der signifikanten Geschwindigkeitsübertreter sinken. Die v_{15} und die v_{50} sollten dabei nach Möglichkeit auf dem gleichen Niveau liegen wie vor der Applikation der Rüttelstreifen, da eine Reduktion des Teilkollektivs der langsam fahrenden Personen keine Verbesserung der Verkehrssicherheit erwarten lässt. Ein weiteres Kriterium stellt die Standardabweichung der Geschwindigkeiten dar. Bei geringeren Standardabweichungen der Geschwindigkeit stellt sich ein homogeneres Verkehrsverhalten ein, welches i. d. R. ebenfalls zu einer Verbesserung der Verkehrssicherheit führt.

³⁷ Als signifikante Geschwindigkeitsüberschreitung wird im Rahmen dieser Arbeit eine Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von mehr als 10 km/h angenommen.

³⁸ Hier wird angenommen, dass die zulässige Geschwindigkeit eine dem jeweiligen Streckenabschnitt angemessene Geschwindigkeit repräsentiert. Eine fehlende Geschwindigkeitsbegrenzung als Unfallursache wird somit ausgeschlossen.

Zusammenfassend erfolgte die Bewertung auf Basis der vier Kriterien

- Verteilungsfunktion der Geschwindigkeiten (Signifikanztest),
- Quantilswerte der Geschwindigkeitsverteilung (V_{15} , V_{50} , V_{85} , V_{95}),
- Anteil und Durchschnittsgeschwindigkeit der Geschwindigkeitsüberschreiter und
- Standardabweichung der Geschwindigkeiten.

Neben der Analyse der Geschwindigkeitsdaten erfolgte eine Bewertung des allgemeinen Fahrerverhaltens. Parallel zu den Geschwindigkeitsmessungen wurde das Fahrerverhalten im Annäherungsbereich und innerhalb der Kurve mit Videotechnik aufgezeichnet. Das besondere Interesse lag dabei auf dem Fahrerverhalten der Kraftfahrer auf Höhe der Rüttelstreifen. Auf Basis der Videodaten wurde untersucht, ob Fahrer den TRS unter Benutzung der Gegenfahrbahn ausweichen oder vor den Rüttelstreifen zu plötzlichen Verzögerungen neigen. Ein weiteres Indiz für eine Verbesserung der Verkehrssicherheit stellt das Spurhalteverhalten innerhalb der gefährlichen Kurven dar. Durch die enge Verknüpfung von Geschwindigkeitsverhalten und Kurvenschneiden stellt ein verbessertes Spurhalteverhalten ebenfalls ein Indiz für ein homogeneres, kontrolliertes und i. d. R. niedrigeres Geschwindigkeitsverhalten dar. Das Spurhalteverhalten wurde ebenfalls auf Basis von Videodaten analysiert, quantifiziert und bewertet.

8.3.3 Ergebnisse der Analyse

Die Analyse des Fahrerverhaltens bzw. der Änderung des Fahrerverhaltens durch die Applikation von Rüttelstreifen erfolgt in drei Schritten. Zunächst werden die Geschwindigkeitsdaten der Kontrollgruppe hinsichtlich signifikanter Unterschiede analysiert. Im Anschluss werden die Geschwindigkeitsmessungen vor und nach Applikation der TRS einander gegenübergestellt und ebenfalls hinsichtlich signifikanter Unterschiede untersucht. Abschließend erfolgt eine Bewertung des allgemeinen Fahrerverhaltens auf Basis von Videodaten des Annäherungs- und des Kurvenbereichs der Strecken.

8.3.3.1 Geschwindigkeitsanalyse der Kontrollgruppe

Im Vorlauf der Untersuchungsstrecken wurden Kontrollgruppenmessungen während der Untersuchung durchgeführt, um Einflüsse von bspw. Witterung, Verkehrsüberwachungen oder maßgeblichen Änderungen innerhalb des Untersuchungskollektivs auszuschließen bzw. zu quantifizieren. Bei ausreichend großem Stichprobenumfang, unverändertem Untersuchungskollektiv und fehlenden Störeinflüssen dürfen die Geschwindigkeitsverteilungen an unterschiedlichen Messtagen keine signifikanten Un-

terschiede aufweisen. Zum Nachweis wurden Signifikanztests auf Abhängigkeit zweier empirischer Verteilungen mit Hilfe des Kolmogorow-Smirnow-Tests (KS-Test) durchgeführt. Der KS-Test zeichnet sich durch seine scharfe Abgrenzung und die Verteilungsunabhängigkeit aus.

Die Messungen an den unterschiedlichen Standorten der Kontrollgruppen ergaben an allen Tagen ein für Landstraßen stabiles Geschwindigkeitsverhalten für das untersuchte Kollektiv. Die Quantilswerte der Geschwindigkeitsverteilung v_{15} , v_{50} und v_{85} wiesen einen Schwankungsbereich von 0,50 bis maximal 2,30 km/h auf (vgl. Tab. 8). Die mittleren Unterschiede in den einzelnen Stützstellen für den Kreuzvergleich aller Messungen untereinander lagen in noch engeren Schwankungsbereichen. Die mittleren Schwankungen lagen bis auf den Wert der v_{50} auf der Strecke L 257 Fahrtrichtung Buir unter 1 km/h. Die Geschwindigkeitsverteilungen der Kontrollgruppen wurden sowohl für das Gesamtkollektiv als auch für die frei Fahrenden statistisch analysiert. Als Ergebnis musste zwar ungefähr die Hälfte der Kontrollgruppenvergleiche des Gesamtkollektivs (7 von 12 Messvergleichen) als signifikant unterschiedlich bezeichnet werden, bei den frei Fahrenden unterschied sich dahingegen lediglich eine Kontrollgruppenmessung signifikant von den übrigen Messungen.

Strecke	Datum	Anzahl Fzg.	v_{15}	v_{50}	v_{85}
L 257 FR Morschenich	11.10.2007	1.535	62,38	74,66	87,34
	21.11.2007	1.498	62,07	74,30	88,12
	28.08.2008	1.075	61,57	73,45	85,84
L 257 FR Buir	12.09.2007	1.197	69,34	78,44	91,53
	22.11.2007	2.065	70,56	79,98	92,46
	27.08.2008	2.108	69,98	79,93	92,35
B 399 FR Gey	10.10.2007	1.197	69,34	78,44	91,53
	04.06.2008	2.065	70,56	79,98	92,46
	10.06.2008	2.108	69,98	79,93	92,35
B 477 FR LUXHEIM	11.09.2007	1.581	68,31	80,40	92,92
	17.06.2008	1.603	68,86	79,52	92,83
	07.10.2008	1.557	67,74	79,01	92,43

Tab. 8: Kennwerte der Geschwindigkeitsverteilung innerhalb der Kontrollgruppen

Das Ergebnis der KS-Tests hinsichtlich statistischer Signifikanz muss jedoch nicht zwingend auf externe Einflüsse hinweisen. Zum einen wurden die Nullhypothesen lediglich „knapp“ verfehlt und zum anderen reichen bei großen Stichprobenumfängen bereits kleinste Unterschiede in der Geschwindigkeitsverteilung zum Ablehnen der Verteilungsgleichheit. In Bild 61 ist der Vergleich zweier Verteilungen der Kontrollgruppe dargestellt, die auf Basis des KS-Tests ($\alpha=0,05$) als signifikant unterschiedlich gelten. Es ist klar erkennbar, dass dieser Unterschied zwar statistisch signifikant sein mag, jedoch in seiner Ausprägung kaum relevant ist. Die Änderung der mittleren Geschwindigkeit im dargestellten Beispiel beläuft sich auf unter 2 km/h.

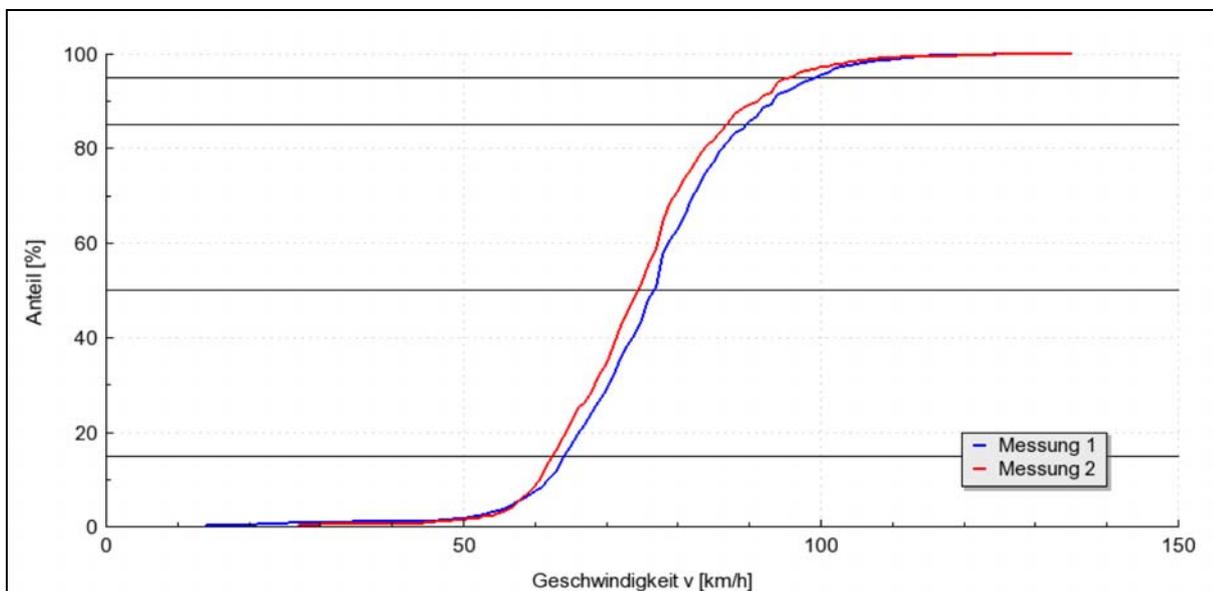


Bild 61: Vergleich der Kontrollgruppenmessung L 257 Fahrtrichtung Morschenich Vorher am 11.10.2007 (Messung 1) und Nachher am 28.08.2008 (Messung 2)

In vorangegangenen Studien wurde gezeigt, dass das Geschwindigkeitsverhalten insbesondere auf kurvigen Landstraßen an unterschiedlichen Tagen ohne erkennbaren Grund stark schwanken kann. Bereits KLEBELSBERG (1982) beschreibt das Auftreten abweichender Geschwindigkeiten auf Landstraßen an unterschiedlichen Tagen. Bei einer vergleichbaren Gegenüberstellung zweier Verteilungen der Kontrollgruppenmessung, die statistisch signifikant aus einer Grundgesamtheit stammen, beträgt die Änderung der mittleren Geschwindigkeit ebenfalls nahezu 2 km/h. Lediglich der Datenumfang dieses zweiten Beispiels ist ausschlaggebend für das unterschiedliche Ergebnis. Wie stark der Einfluss des Datenumfangs auf die statistischen Analysen tatsächlich ist, zeigt auch die Analyse der unbeeinflussten Fahrer (vgl. Kapitel 8.4.3).

Die Kontrollgruppenmessungen wurden dahingehend interpretiert, dass die Abweichung zwischen den einzelnen Messtagen klein genug ist, um wesentliche externe

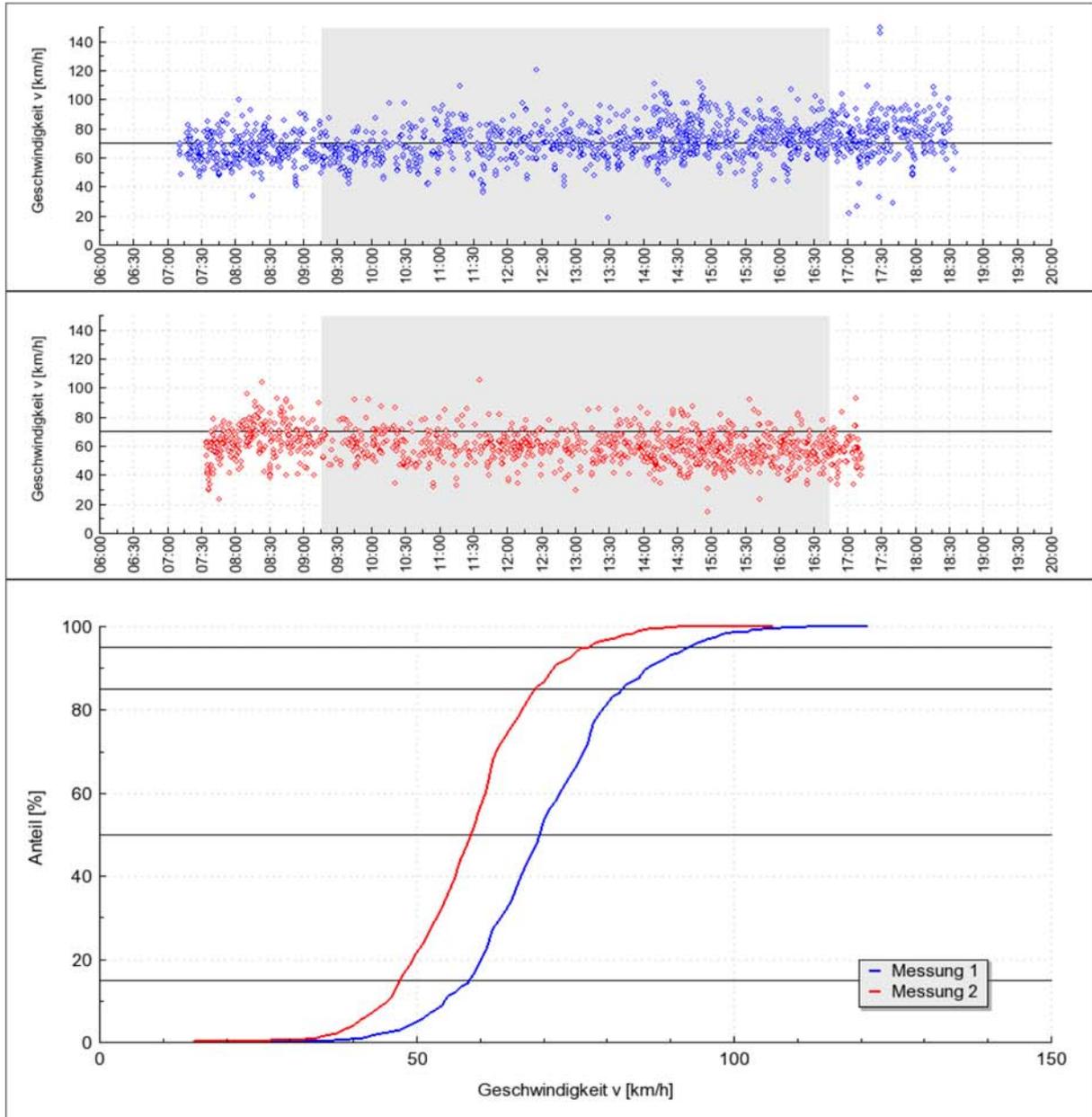
Einflüsse, die den Vorher-Nachher-Vergleich verfälschen könnten, auszuschließen. Die Analyse der unbeeinflussten Fahrer ergab, dass sich das Geschwindigkeitsverhalten an den untersuchten Tagen – bis auf eine Ausnahme – statistisch nicht signifikant unterscheidet.

8.3.3.2 Geschwindigkeitsanalyse des Untersuchungskollektivs

Die Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens der Kraftfahrer und der Einfluss der TRS auf die Geschwindigkeitswahl erfolgte analog zur Untersuchung der Kontrollgruppe zunächst durch eine statistische Analyse der Geschwindigkeitsverteilung vor und nach der Applikation der Rüttelstreifen. Hierzu wurden an den einzelnen Querschnitten die Geschwindigkeitsverteilungen von je zwei Tagen gegenüber gestellt und mittels KS-Tests statistisch analysiert. Zusätzlich wurden die wesentlichen Quantilswerte der Geschwindigkeitsverteilungen und die Kennwerte der Geschwindigkeitsüberschreiter gegenübergestellt (vgl. Bild 62). Bis auf zwei Fälle sind alle Verteilungsfunktionen der Geschwindigkeit auf allen Strecken und an allen Stationierungen signifikant ($\alpha=0,05$) voneinander verschieden (vgl. auch Anhang G).

Neben der statistischen Signifikanz stellt die Ausprägung der Geschwindigkeitsänderung einen wesentlichen Bewertungsparameter dar. Die Auswirkungen der TRS stellen sich auf den einzelnen Strecken unterschiedlich dar. Während auf der B 477 in Fahrtrichtung LUXHEIM die stärksten Geschwindigkeitsrückgänge beobachtet wurden – je nach Station sank die v_{85} um bis zu 21 km/h – veränderte sich das Geschwindigkeitsniveau auf der B 399 Fahrtrichtung GEY nur geringfügig. Hier sank die v_{85} lediglich um maximal 7 km/h. Die Geschwindigkeitsänderung auf der L 257 liegt in beiden Fahrtrichtungen mit ca. 6 bis 15 km/h über den gesamten Untersuchungsbereich auf einem mittleren Niveau. Grund für die variierenden Auswirkungen der TRS auf die Geschwindigkeit ist neben den unterschiedlichen Streckencharakteristika wie bspw. Kurvigkeit, Sichtweite oder Querschnittstyp vor allem die unterschiedliche Eingangsgeschwindigkeit.

Messung 1	Messung L257 Morschenich-Buir - 2007-09-06 - ohne Streifen Auswertzeitraum: 09:15:00 bis 16:45:00 Uhr	Station: 655.00
Messung 2	Messung L257 Morschenich-Buir - 2007-11-22 - mit Streifen Auswertzeitraum: 09:15:00 bis 16:45:00 Uhr	v _{zul} = 70 km/h



Geschwindigkeiten	v ₁₅ [km/h]	v ₅₀ [km/h]	v ₈₅ [km/h]	v ₉₅ [km/h]
Messung 1 (Q = 969 Kfz)	57,42	68,41	81,48	91,82
Messung 2 (Q = 877 Kfz)	46,40	57,62	67,72	76,22
Änderung (M1 - M2)	-11,02	-10,79	-13,76	-15,60

Überschreiter	> v _{zul}		> v _{zul} + 10 km/h	
	Anteil [%]	v ₀ [km/h]	Anteil [%]	v ₀ [km/h]
Messung 1	46,75	81,18	18,68	89,56
Messung 2	13,23	77,06	3,42	85,53
Änderung (M1 - M2)	-33,52	-4,12	-15,26	-4,03

Bild 62: Vergleich Vorher-Nachher am Beispiel der L 257 Fahrtrichtung Morschenich (Auswertzeitraum grau gekennzeichnet) (LANK/STEINAUER/BUSEN, 2009)

Auf der Strecke B 399 mit dem geringsten Effekt liegen die niedrigsten Eingangsgeschwindigkeiten vor. Die hohe Kurvigkeit und die geringen Sichtweiten stellen bereits starke Einflussfaktoren auf die Geschwindigkeit dar. Die Fahrer können auf Grund dieser Faktoren kaum die eigene Wunschgeschwindigkeit wählen. Auf der Strecke B 477 liegen die höchsten Ausgangsgeschwindigkeiten vor. Die großzügige Trassierung in Kombination mit dem überbreiten Querschnitt gibt den Kraftfahrern die Möglichkeit, ihre Wunschgeschwindigkeit frei zu wählen. Der Diskomfort durch die TRS stellt demnach beim Nachher-Fall einen dominanteren Einflussfaktor auf die Geschwindigkeitswahl dar als auf der Strecke B 399. Der Zusammenhang zwischen Ausgangsgeschwindigkeit und Geschwindigkeit nach der Maßnahme bzw. prozentualem Geschwindigkeitsrückgang ist für alle Strecken und alle Messquerschnitte in Bild 63 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die v_{85} bei hohen Ausgangsgeschwindigkeiten stärker reduziert wird als bei niedrigen.

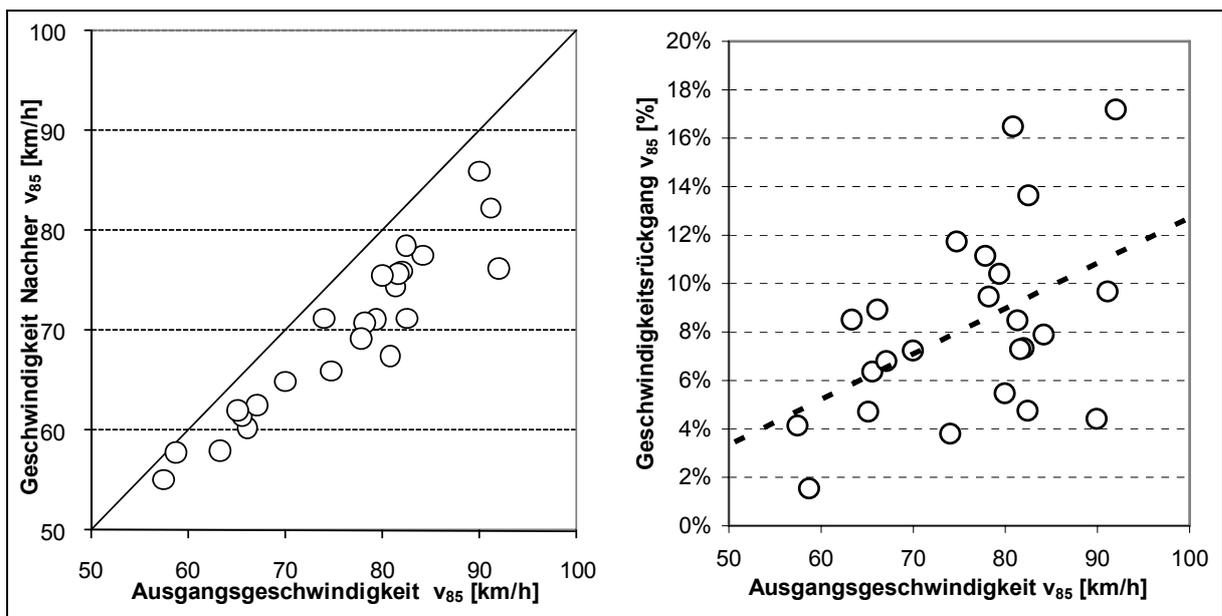


Bild 63: Mittlere Geschwindigkeit v_{85} im Vergleich Vorher-Nachher (links) und prozentualer Geschwindigkeitsrückgang in Abhängigkeit der Ausgangsgeschwindigkeit (rechts) für alle Strecken und Messquerschnitte

Der stärkste Effekt der TRS konnte in der Gruppe der schnellsten Fahrer – gekennzeichnet durch die v_{95} und den Anteil bzw. die Durchschnittsgeschwindigkeit der Geschwindigkeitsüberschreiter – beobachtet werden. Auszugsweise sind diese Kennzahlen in Tab. 9 und Tab. 10 dargestellt. Die geringe Auswirkung der TRS auf den prozentualen Anteil der Übertreter der v_{zul} um mehr als 10 km/h auf der Strecke B 477 bei gleichzeitig großem Effekt auf die Geschwindigkeit lässt sich durch die v_{zul} von 100 km/h erklären. Inwieweit die zulässige Höchstgeschwindigkeit im Gefahrenpunktannäherungsbereich auf dieser Strecke richtig gewählt wurde, muss diskutiert werden. Analog lässt sich die Diskrepanz zwischen dem geringen Rückgang der

Quantilswerte bei gleichzeitig starkem Effekt auf die Geschwindigkeitsüberschreiter auf der B 399 erklären. Hier liegt mit 50 km/h eine niedrige v_{zul} vor, die von den Verkehrsteilnehmern vor Applikation der Rüttelstreifen nicht akzeptiert wurde. Durch die Maßnahme wird bei relativ geringer Geschwindigkeitsreduktion der Anteil der starken Geschwindigkeitsüberschreiter stark reduziert.

Strecke	Im Bereich der TRS		Im Bereich der Kurve	
	$\Delta \max$	$\Delta \emptyset$	$\Delta \max$	$\Delta \emptyset$
L 257 FR Buir	-14,0	-7,9	-11,7	-8,0
L 257 FR Morschenich	-7,0	-3,6	-9,7	-4,4
B 399 FR Gey	-6,3	-6,1	-3,2	-0,9
B 477 FR LUXheim	-15,2	-13,8	-13,0	-8,7

Tab. 9: Maximale und mittlere Änderung der v_{95} durch die TRS [km/h]

Strecke	Im Bereich der TRS		Im Bereich der Kurve	
	$\Delta \max$	$\Delta \emptyset$	$\Delta \max$	$\Delta \emptyset$
L 257 FR Buir	-13,0	-7,9	-1,7	-1,4
L 257 FR Morschenich	-10,2	-7,1	-1,2	+0,1
B 399 FR Gey	-23,7	-21,0	-11,1	-3,1
B 477 FR LUXheim	-0,3	-0,3	-0,2	-0,1

Tab. 10: Maximale und mittlere prozentuale Änderung des Anteils der Überschreiter der v_{zul} um mehr als 10 km/h [%]

Von besonderem Interesse ist, neben der statistischen Signifikanz und der Geschwindigkeitsreduktion, die Änderung des Geschwindigkeitsverhaltens im Annäherungsbereich und der Gefahrenstelle, d.h. die Änderung des Verzögerungsverhaltens. Die Ganglinien des 85 %-Quantils aller Messungen sind in Bild 64 dargestellt. Deutlich erkennbar ist sowohl die Reduktion der Geschwindigkeit als auch der Ort der größten Geschwindigkeitsreduktion. Während die Fahrzeugführer die Geschwindigkeit ohne Rüttelstreifen erst kurz vor der Kurve reduzieren, wird der Punkt der größten Verzögerung durch die Aufbringung der TRS im Annäherungsbereich vorgezogen. Die Fahrer reduzieren ihre Geschwindigkeit nach der Applikation der TRS wesentlich früher. Am stärksten ist dieser Effekt auf der Strecke B 477 Fahrtrichtung LUXheim zu beobachten.

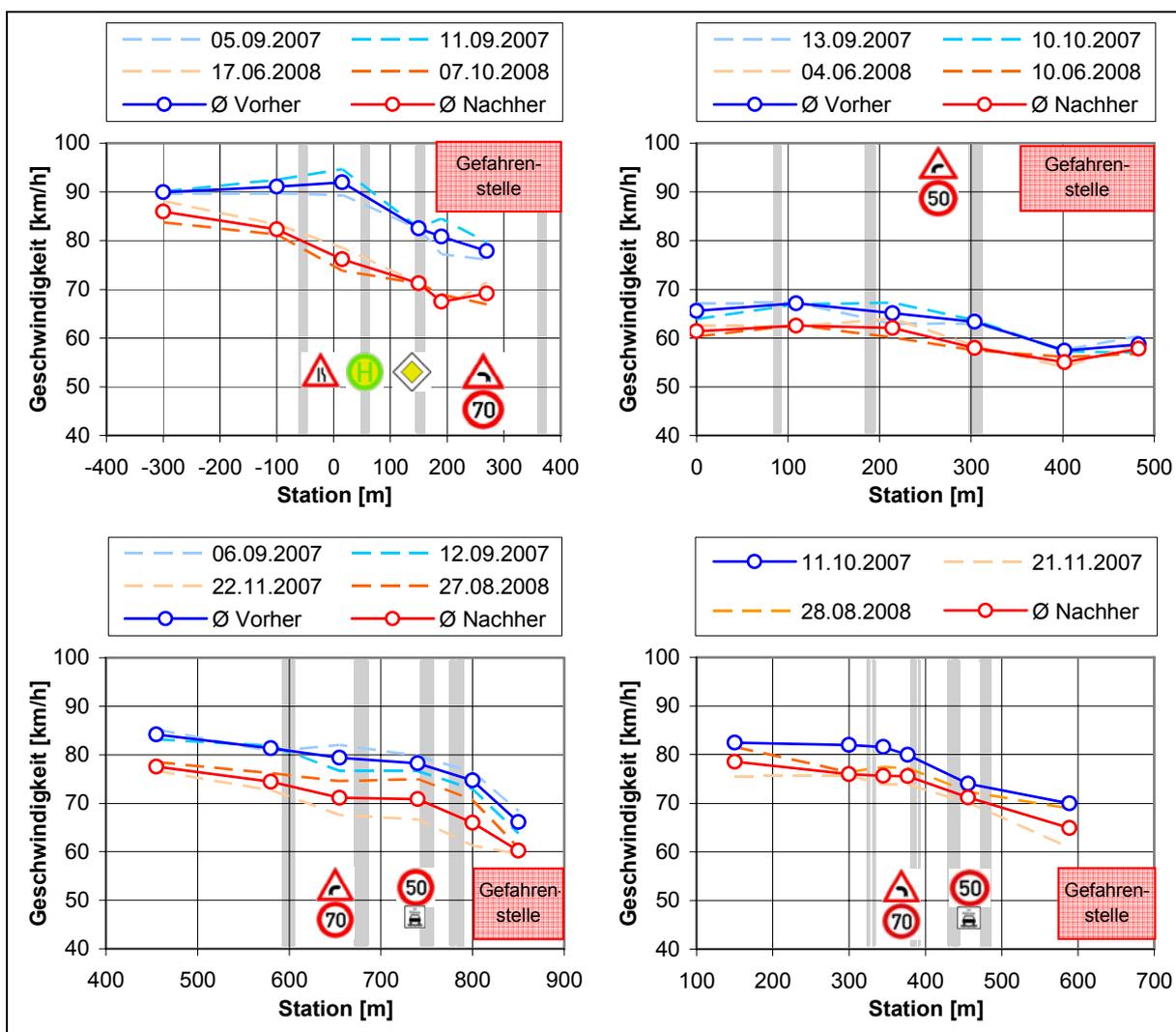


Bild 64: Vergleich der v_{85} vor und nach Applikation der Rüttelstreifen: B 477 Fahrtrichtung LUXHEIM (oben links); B 399 Fahrtrichtung GEY (oben rechts); L 257 Fahrtrichtung BUIR (unten links); L 257 Fahrtrichtung MORSCHENICH (unten rechts) (blau: Messungen vorher, rot: Messungen nachher; grau: Position der TRS)

Sowohl auf der Strecke B 399 als auch auf der B 477 sinkt die Annäherungsgeschwindigkeit zwar, im Bereich der eigentlichen Gefahrenstelle, der Rechtskurve, steigt die Geschwindigkeit jedoch wieder leicht an. Dieses Geschwindigkeitsverhalten zeigt deutlich das Bestreben der Verkehrsteilnehmer, durch ein frühes „Herausbeschleunigen“ aus der Kurve die Wunschgeschwindigkeit möglichst schnell wieder zu erreichen. Auf der L 257 ist dieser Effekt in beide Fahrrichtungen weniger ausgeprägt. Dies ist wahrscheinlich auf die kurze Reststrecke nach der Kurve bis zum Ortseingang Morschenich bzw. bis zur Einmündung in die L 256 Fahrtrichtung Buir zurückzuführen. Bestätigt wird diese Vermutung auch durch das – im Verhältnis zu den anderen Untersuchungsstrecken – stärkere Absinken der Geschwindigkeit am Beginn des Annäherungsbereichs. Die Verkehrsteilnehmer – vorrangig ortskundige Bewohner der umliegenden Dörfer – beschleunigen in Erwartung der TRS nach

der Ortsausfahrt weniger exzessiv und wählen eine geringere Streckengeschwindigkeit.

Ein weiteres Indiz für eine Steigerung der Verkehrssicherheit durch die TRS stellt die Homogenisierung des Verkehrsflusses dar. Eine Reduktion der Spitzengeschwindigkeiten führt zu einer Homogenisierung, die sich anhand der Standardabweichung der Geschwindigkeiten verdeutlichen lässt. Analog zu den Auswirkungen auf die v_{85} konnte auf den Strecken ein Rückgang der Standardabweichung in unterschiedlicher Ausprägung beobachtet werden (vgl. Anhang H). Der stärkste Rückgang wurde auch hier auf der B 477 beobachtet. Auf der B 399 reduzierte sich die Standardabweichung kaum. Die größte Homogenisierung des Verkehrsflusses trat bei den Untersuchungsstrecken im Bereich direkt vor und innerhalb der Kurve auf. Die im Vergleich zur v_{85} geringer ausfallende Wirkung der TRS auf die Standardabweichung ist darauf zurückzuführen, dass – entgegen der Grundkonzeption – nicht nur die hohen Geschwindigkeiten reduziert werden, sondern auch ein – wenn auch geringerer – Einfluss auf die langsameren Fahrer zu verzeichnen ist. Die Verteilungsfunktion wird also nicht primär hinsichtlich ihrer Form verändert, sondern in den unteren Geschwindigkeitsbereich verschoben (vgl. hierzu beispielhaft Bild 65).

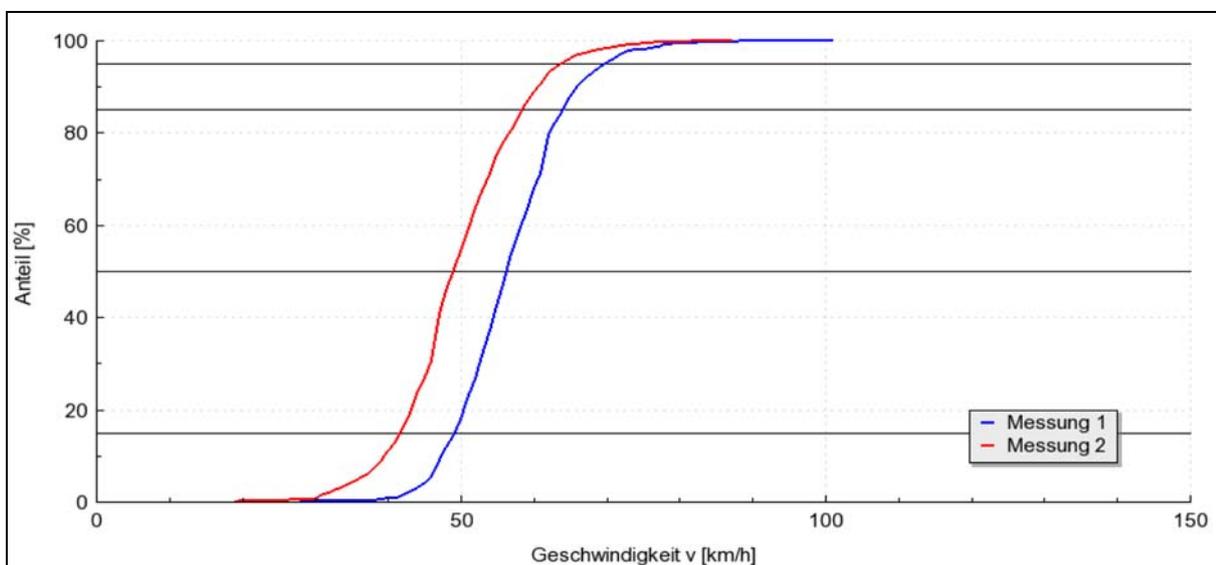


Bild 65: Beispielhafte Darstellung einer Änderung aller Geschwindigkeitsbereiche (Verschiebung der Verteilungsfunktion) (Messung 1: Vorher; Messung 2: Nachher)

8.3.3.3 Analyse des allgemeinen Fahrerverhaltens

Die Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens und die damit verbundene Wirkung der TRS bilden den zentralen Bewertungshintergrund für die Wirkung der Rüttelstreifen auf die Verkehrssicherheit. Darüber hinaus muss jedoch auch das allgemeine – nicht primär geschwindigkeitsbezogene – Fahrerverhalten untersucht werden. Zu diesem Zweck wurden die Strecken nach der Applikation der TRS mittels Videotechnik beo-

bachtet. Ziel dieser Datenerhebung war die Identifikation potentiellen Fehlverhaltens der Verkehrsteilnehmer, das durch die TRS hervorgerufen wird. In vergleichbaren Studien (vgl. Kapitel 2) wurden teilweise unerwünschte Manöver wie

- Umfahren der TRS,
- plötzliches abruptes Verzögern vor den TRS und
- der so genannte „Cattle-Grid-Effect“

beobachtet. Nach der Applikation der Rüttelstreifen wurden die Videodaten des Annäherungsbereichs und der eigentlichen Gefahrenstelle im Hinblick auf diese möglichen Manöver analysiert. Auf allen vier untersuchten Strecken bzw. Fahrrichtungen kam es zu Umfahrungen der Rüttelstreifen. Das Umfahren der TRS wurde in fünf Typen unterschieden (vgl. Bild 66 links). Während zwischen 87 % und 96 % der Fahrer die Rüttelstreifen mit allen vier Rädern ohne Verlassen der eigenen Fahrspur überfahren, wichen je nach Strecke zwischen 2,5 % und 12,6 % der Autos über die Gegenfahrbahn aus.

① ② ③ ④ ⑤	Strecke	Q [Kfz/h]	Befahrertypen [%]				
			1	2	3	4	5
	L 257 FR Morsch.	90	-	-	89,6	1,3	9,2
	L 257 FR Buir	127	-	-	87,4	0,3	12,3
	B 399	257	-	-	95,0	2,4	2,6
	B 477	132	4,3	1,5	89,2	0,1	4,9

Bild 66: Typisierung der Befahrung der Rüttelstreifen (links) und deren Anteil (rechts)
 Typ 1: Umfahren über den Seitenstreifen; Typ 2: halbes Umfahren über den Seitenstreifen;
 Typ 3: Optimales Spurverhalten (kein Umfahren) ; Typ 4: halbes Umfahren über die
 Gegenfahrbahn; Typ 5: Umfahren über die Gegenfahrbahn

Auf der B 477 Fahrtrichtung Lühheim fuhren jeweils ca. 5 % der Fahrer links oder rechts an den Rüttelstreifen vorbei. Das Ausweichen über die rechte Seite trat nur auf dieser Strecke auf, da die anderen Strecken über keinen Seitenstreifen verfügen. Die höchsten Umfahrerquoten sind auf der L 257 zu beobachten. Mit über 10 % neigen auf dieser Strecke doppelt so viele Fahrer zum linksseitigen Umfahren der TRS wie auf der B 477. Auf der B 399 traten trotz oder gerade wegen der höchsten Verkehrsstärke die geringsten Ausweichmanöver auf – hier wichen den TRS nur 2,6 % der Fahrer unter Einbeziehung der gesamten Gegenfahrbahn aus. Alle drei Untersuchungsstrecken werden vorrangig von ortskundigen Fahrern befahren, die, je nach psychologischer Veranlagung und Motivation, mit der Zeit Strategien entwickeln, um den Diskomfort durch die Rüttelstreifen zu minimieren. Auf der Strecke L 257 herr-

schen eine geringe Kurvigkeit bei gleichzeitig sehr hohen Sichtweiten und eine geringe Verkehrsbelastung vor. Die Fahrer, die die Rüttelstreifen umfahren möchten, können einen ausreichend langen vorausliegenden Streckenabschnitt einsehen, um den Rüttelstreifen gefahrlos und ohne Interaktion mit dem Gegenverkehr auszuweichen. Diese Ausweichmanöver werden wie ein normales Überholmanöver bewertet. Die Wirkung der Rüttelstreifen auf diese Fahrer entfällt durch das Ausweichmanöver aus Sicht des Verfassers nicht, da – im Vergleich zur monotonen Fahrt über den vorliegenden Streckenabschnitt – durch ein komplexes Manöver wie dem Ausweichen der Streifen die Aufmerksamkeit und die Zuwendung zur Fahraufgabe erhöht wird. Der Einfluss der Sichtweite, der Kurvigkeit und des auftretenden Gegenverkehrs wird auch auf der B 399 deutlich. Auf dieser extrem kurvigen Strecke mit Sichtweiten von maximal 150 Metern liegen die geringsten Ausweicherquoten vor. Die zumeist ortskundigen Fahrer können die Strecke nicht weit genug einsehen, um gefahrlos zu überholen. Dies wird durch die hohe Wahrscheinlichkeit auftretenden Gegenverkehrs verstärkt. Auf der dritten Strecke, der B 477, wurde neben moderatem Ausweichverhalten über die Gegenfahrbahn auch ein Ausweichen über den Seitenstreifen beobachtet.

Das Gefährdungspotential durch das Ausweichen wurde detaillierter bewertet, indem die Zeitlücken zwischen Ausweichenden und Gegenverkehr aus den Videodaten ermittelt wurden. Auf keiner der Strecken konnten nach abgeschlossenem Manöver Zeitlücken zwischen einem entgegenkommenden Verkehrsteilnehmer und dem Ausweicher unter drei Sekunden beobachtet werden. Lediglich ein einziger Zweiradfahrer hatte das Ausweichmanöver mit einer Zeitlücke von 2 Sekunden zum Gegenverkehr abgeschlossen.

Einen weiteren Bewertungsmaßstab für das Gefährdungspotential durch Umfahren der Rüttelstreifen stellt die Differenzierung nach „vollständigem“ und „teilweisem“ Umfahren der Rüttelstreifen (Bild 66) und der Abstand zur Gefahrenstelle dar (Bild 67). Während auf der L 257 bei sehr guten Sichtverhältnissen fast alle Umfahrer den TRS auch vollständig ausweichen, versuchen auf der B 399 bei niedrigen Sichtweiten zwar 5 % den Rüttelstreifen auszuweichen, lediglich die Hälfte dieser Fahrer weicht den TRS dabei vollständig aus. Durch dieses „defensive“ Umfahren der TRS wird deutlich, dass ein Anteil der Verkehrsteilnehmer zwar den Diskomfort durch die Rüttelstreifen minimieren möchte, sich des Risikos einer Nutzung der Gegenfahrbahn bei geringen Sichtweiten jedoch durchaus bewusst ist. Dieses Risiko übt einen höheren Druck auf den Fahrer aus, als der Diskomfort durch die TRS. Dieses „gesunde“ Sicherheitsempfinden der Verkehrsteilnehmer wird auch deutlich, wenn betrachtet wird, welche Rüttelstreifen vorrangig umfahren wurden: Während die meis-

ten Verkehrsteilnehmer das erste Streifenpaket regelkonform überfahren, nahm die Umfahrerquote beim zweiten Paket zu. Bei weiterer Annäherung an die Kurve sinkt die Bereitschaft zum Umfahren wieder ab. Bei der Videoanalyse fiel des Weiteren auf, dass die meisten Fahrer nur einzelne Rüttelstreifenpakete umfahren. Ein Ausweichen aller Streifen wurde nur vereinzelt – bei vollständigem Ausbleiben von Gegenverkehr – beobachtet.

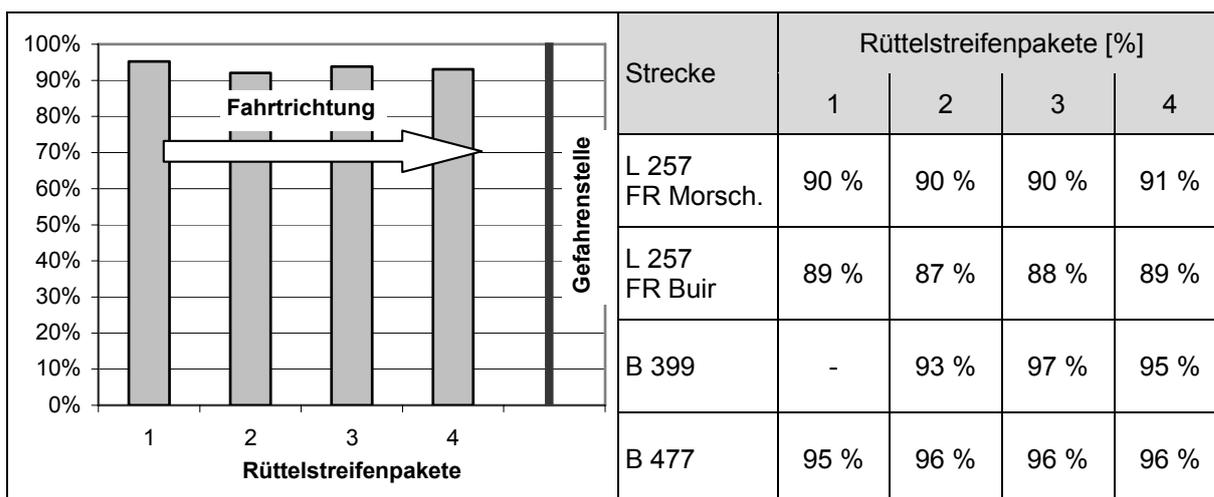


Bild 67: Anteil der regelkonform überfahrenen Rüttelstreifen (Typ 3) als Durchschnittswert aller Strecken (links) und als Einzelwerte (rechts) (Beobachtungszeitraum je 4h)

Weitere Effekte durch die TRS, die in anderen Studien benannt wurden, konnten auf den drei hier untersuchten Strecken nicht beobachtet werden. Während der verkehrstechnischen Analyse wurde auf keiner Strecke ein abruptes Abbremsen vor oder hinter den TRS beobachtet. Auch der in England aufgetretene „Cattle-Grid-Effect“ – das Beschleunigen zur Minimierung der Vibrationen im Fahrzeug – ließ sich weder in den Videodaten noch durch die Geschwindigkeitsmessungen nachweisen.

Zusätzlich zur Wirkung der TRS auf das Geschwindigkeitsverhalten wurde an einer Strecke, der L 257 Fahrtrichtung Morschenich, das Spurhalteverhalten der Verkehrsteilnehmer in der Linkskurve videotekhnisch ausgewertet. Das Spurhalteverhalten in Kurven kann nach STEYER (2004) unterschieden werden nach dem „normalen Pendeln um die Ideallinie“ und dem „gefährlichen Spurhalteverhalten“, also dem Schneiden der Kurve. In seiner Untersuchung zur Verknüpfung des Spurhaltens in Kurven und dem Unfallgeschehen definierte SPACEK (1999) sechs unterschiedliche Typen des Spurhalteverhaltens in Linkskurven (vgl. Bild 68). Nach STEYER (2004) treten insbesondere bei engen Radien verstärkt die Spurhaltetypen „Schneiden“ und „Ausholen“ auf. Sowohl beim Schneiden als auch beim Ausholen nutzt der Fahrer den Verkehrsraum der Gegenrichtung zur Vergrößerung des eigenen Kurvenradius. Dieser Vorgang dient vornehmlich der Erhöhung der eigenen Geschwindigkeit in der Kurve und ist sowohl im Hinblick auf das Unfallrisiko des Fahrers als auch der ande-

ren Verkehrsteilnehmer kritisch zu bewerten. Auf Grund des engen Zusammenhangs zwischen Fahrgeschwindigkeit und Spurhalteverhalten in der Kurve wird erwartet, dass die geschwindigkeitsdämpfende Wirkung der TRS auch einen Einfluss auf das Spurhalteverhalten hat.

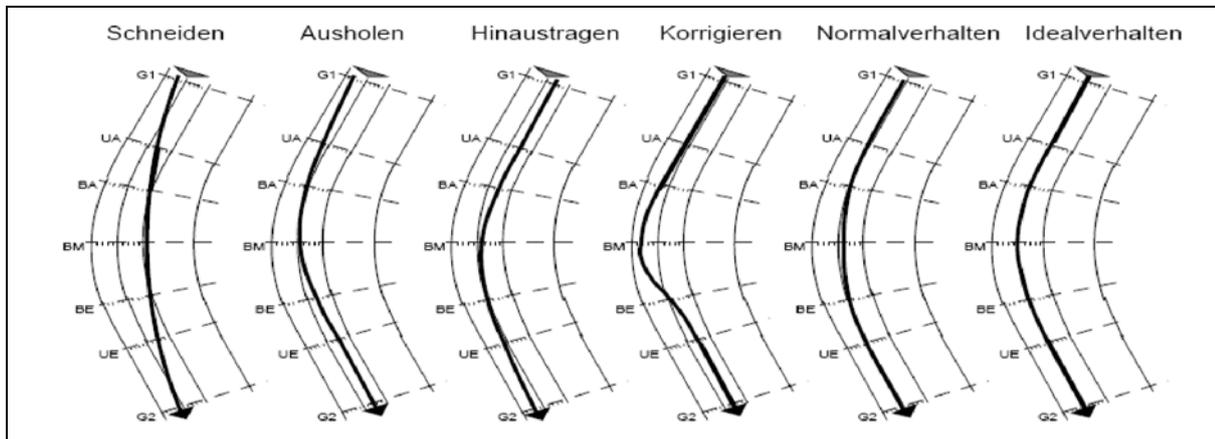


Bild 68: Typen des Spurhalteverhaltens in Linkskurven (SPACEK, 1999)



Bild 69: Klassifizierung der Spurhaltetypen (oben links: extremes Schneiden; oben rechts: starkes Schneiden; unten links: moderates Schneiden; unten rechts: Normalverhalten)

Zur Klärung dieser Fragestellung wurde das Videomaterial vor und nach Installation der TRS im Hinblick auf das Spurhalteverhalten analysiert. Zu diesem Zweck wurde die Spurlage in der Kurve in fünf Klassen unterteilt. Die Fahrer, die die Kurve unter Mitbenutzung der Gegenrichtung schneiden, werden unterteilt in die Typen modera-

tes Kurvenschneiden, starkes Kurvenschneiden und extremes Kurvenschneiden. Die übrigen Fahrer nutzen ausschließlich die eigene Fahrspur. Hier wird unterschieden, ob die eigene Fahrspur tendenziell eher zur Kurveninnenseite oder zur Kurvenaußenseite hin durchfahren wird. In Bild 69 sind Beispiele für die einzelnen Spurhalte-typen aufgeführt.

Wie durch die Reduktion der Geschwindigkeit (vgl. Kapitel 8.3.3.2) zu erwarten, ändert sich auch das Spurhalteverhalten der Verkehrsteilnehmer in der Kurve. Während vor der Installation der TRS über 50 % der ca. 1.900 beobachteten Fahrer die Kurve unter Mitnutzung der Gegenspur durchfahren, also zum Kurvenschneiden neigten, reduzierte sich dieser Anteil nach der Installation der TRS auf unter 40 % (ebenfalls bei $N \approx 1.900$). Insbesondere die Anteile der extremen und starken Kurvenschneider halbierten sich in diesem Zeitraum (vgl. Bild 70).

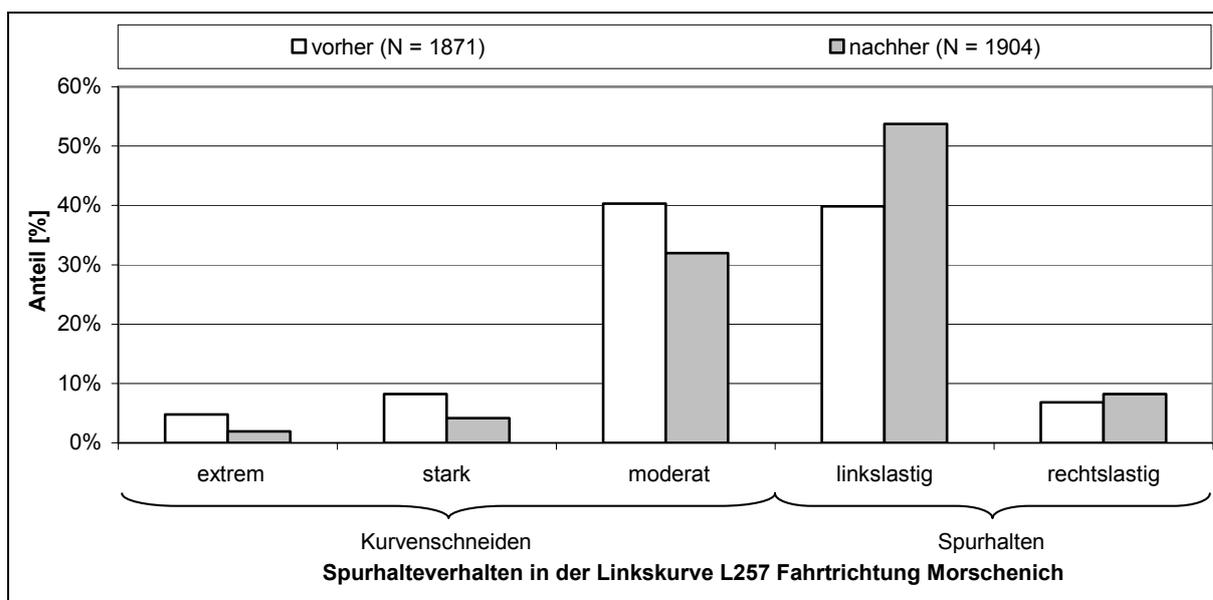


Bild 70: Vergleich des Spurhalteverhaltens in der Linkskurve auf der L 257 zwischen Buir und Morschenich vor und nach der Installation von Rüttelstreifen

Das Fahrerverhalten ändert sich demnach nicht nur vor der Gefahrenstelle, indem der Bremspunkt in den Kurvenannäherungsbereich vorgezogen wird, sondern auch innerhalb der Gefahrenstelle deutlich. Sowohl die Menge der beobachteten Fahrzeuge als auch die Deutlichkeit der Ergebnisse schließt – auch ohne messtechnische Quantifizierung und statistische Analyse – eine Zufälligkeit der Ergebnisse aus.

In der Summe wird das allgemeine Fahrerverhalten nach Applikation der Rüttelstreifen als unkritisch eingestuft. Deutlich wird jedoch die starke Abhängigkeit der Reaktion auf die Rüttelstreifen von der Streckencharakteristik. Dies bestätigt die Ergebnisse der Geschwindigkeitsanalysen aus Kapitel 8.3.3.2.

8.4 Analyse differenziert nach Zeitlücken

Neben den relativ allgemeinen Betrachtungen des Gesamtkollektivs ist eine dezidierte Betrachtung von Teilkollektiven nötig, um Aussagen über die Wirkung der Maßnahmen zu spezifizieren. Im Rahmen der Verkehrsuntersuchung ist das Geschwindigkeitsniveau von unbeeinflussten Fahrern von besonderem Interesse. Entgegen der Ergebnisse einer gesamtheitlichen Betrachtung, wie in Kapitel 8.3.3 dargestellt, kann bei den unbeeinflussten Fahrern davon ausgegangen werden, dass sie ihr Geschwindigkeitsverhalten frei wählen (vgl. auch FGSV, 2000). Die Geschwindigkeitswahl hängt also primär von

- der Streckencharakteristik,
- den technischen Möglichkeiten des Fahrzeugs sowie
- der persönlichen Motivation

ab. Diese Einflussgrößen der Geschwindigkeitswahl werden bei der Betrachtung des Gesamtkollektivs durch den Umgebungsverkehr beeinflusst und ggf. verzerrt. Durch die Differenzierung des Gesamtkollektivs auf Basis der Zeitlücken kann diese Beeinflussung weitestgehend ausgeschlossen werden, da ausschließlich frei fahrende Fahrzeuge analysiert werden, die als unbeeinflusst gelten.

8.4.1 Bewertungsmethodik und -maßstäbe

Die Abgrenzung von unbeeinflussten und beeinflussten Fahrern auf Basis von Zeitlücken wurde in mehreren Arbeiten berücksichtigt. BUCK (1992) führte in seiner Arbeit einen Vergleich verschiedener Frontzeitlücken durch, in der er die Geschwindigkeitsverteilung bei Zeitlücken von fünf, sieben und neun Sekunden miteinander verglich. Als Grenzzeitlücke definierte er fünf Sekunden. KREBS/DAMIANOFF (1983) definierten ein Fahrzeug als unbeeinflusst, wenn die Bruttozeitlücke nach vorne größer oder gleich fünf Sekunden und zugleich die Differenzgeschwindigkeit kleiner als 10 km/h ist. Im Rahmen einer Untersuchung der Geschwindigkeit in Kurven ermittelten KÖPPEL/BOCK (1979) die Zeitlückenverteilung zwischen frei fahrenden und beeinflussten Fahrzeugen. Hierbei wurden sowohl die Zeitlücken nach vorne wie nach hinten betrachtet. Für unterschiedliche Zeitlücken nach hinten und nach vorne wurden mittlere Geschwindigkeiten der Fahrer ermittelt. Diese wurden in einem dreidimensionalen Diagramm aufgetragen. Das erste lokale Maximum der mittleren Geschwindigkeit diente dabei als Abgrenzungskriterien der unbeeinflussten Fahrer. Die Ergebnisse von KÖPPEL/BOCK (1979) liegen für Frontzeitlücken zwischen sieben und zehn und für Zeitlücken nach hinten zwischen drei und zehn Sekunden. Auf Grund der geringen Geschwindigkeitsänderungen bei großen Zeitlücken definierten KÖPPEL/BOCK

(1979) für ihre Arbeit sieben Sekunden nach vorne und vier Sekunden nach hinten als Grenze zwischen beeinflussten und unbeeinflussten Fahrern.

WEISE/STEYER (1999) nutzen in ihrer Arbeit zu Gestaltungskriterien von Landstraßenkurven die gleichen Zeitlücken. BRANNOLTE/HOLZ (1983) testeten Frontzeitlücken zwischen acht und fünfzehn Sekunden und rückwärtige Zeitlücken von vier und fünf Sekunden, und definierten als Resultat dieser Analyse die kleinste untersuchte Zeitlücke von acht Sekunden als ausreichend. BASELAU (2005) und DILLIING (1973) nutzen ebenfalls Zeitlücken von acht Sekunden, ohne ihre Wahl weiter zu begründen. Eine Übersicht über unterschiedliche verwendete Zeitlücken zur Abgrenzung von beeinflussten und unbeeinflussten Fahrern ist in Tab. 11 aufgeführt.

Autor	Zeitlücke hinten [s]	Zeitlücke vorne [s]	Differenzgeschw. [km/h]
DILLIING (1973)	-	8	-
KÖPPEL/BOCK (1979)	4	7	-
BRANNOLTE/HOLZ (1983)	5	8	-
KREBS/DAMIANOFF (1983)		5	10 km/h
BUCK (1992)	-	5	-
WEISE/STEYER (1999)	4	7	-
BASELAU (2005)	-	8	-

Tab. 11: Kriterien zur Abgrenzung von beeinflussten und unbeeinflussten Fahrern

VOLKENHOFF (2008) untersucht das Fahrerverhalten von unbeeinflussten und beeinflussten Fahrern im Annäherungsbereich der hier untersuchten Kurven. Dabei nutzt er die gleiche Methodik zur Abgrenzung wie KÖPPEL/BOCK (1979). VOLKENHOFF (2008) führt die Untersuchung der Zeitlücken für alle Strecken getrennt durch, wobei er die Einzelfahrzeugdaten aller Messtage und aller Messquerschnitte in einem Diagramm zusammenführt (vgl. beispielhaft Bild 71). Als Ergebnis dieser Analysen definiert VOLKENHOFF (2008) je nach Strecke Zeitlücken nach vorne zwischen drei und fünf Sekunden und nach hinten zwischen vier und zehn Sekunden zur Abgrenzung von unbeeinflussten Fahrern. Diese Grenz-Zeitlücken testet VOLKENHOFF (2008) mittels KS-Test auf statistische Plausibilität. Hierzu definiert er drei Gruppen von Fahrzeugen:

- Alle Fahrzeuge (Mindestzeitlücken nach vorne und hinten jeweils eine Sekunde)

- Unbeeinflusste Fahrzeuge nach hier definierter Grenze (Mindestzeitlücken nach vorne und hinten: vier Sekunden)
- Unbeeinflusste Fahrzeuge nach sehr sicherer Definition (Mindestzeitlücken nach vorne und hinten: fünfzehn Sekunde)

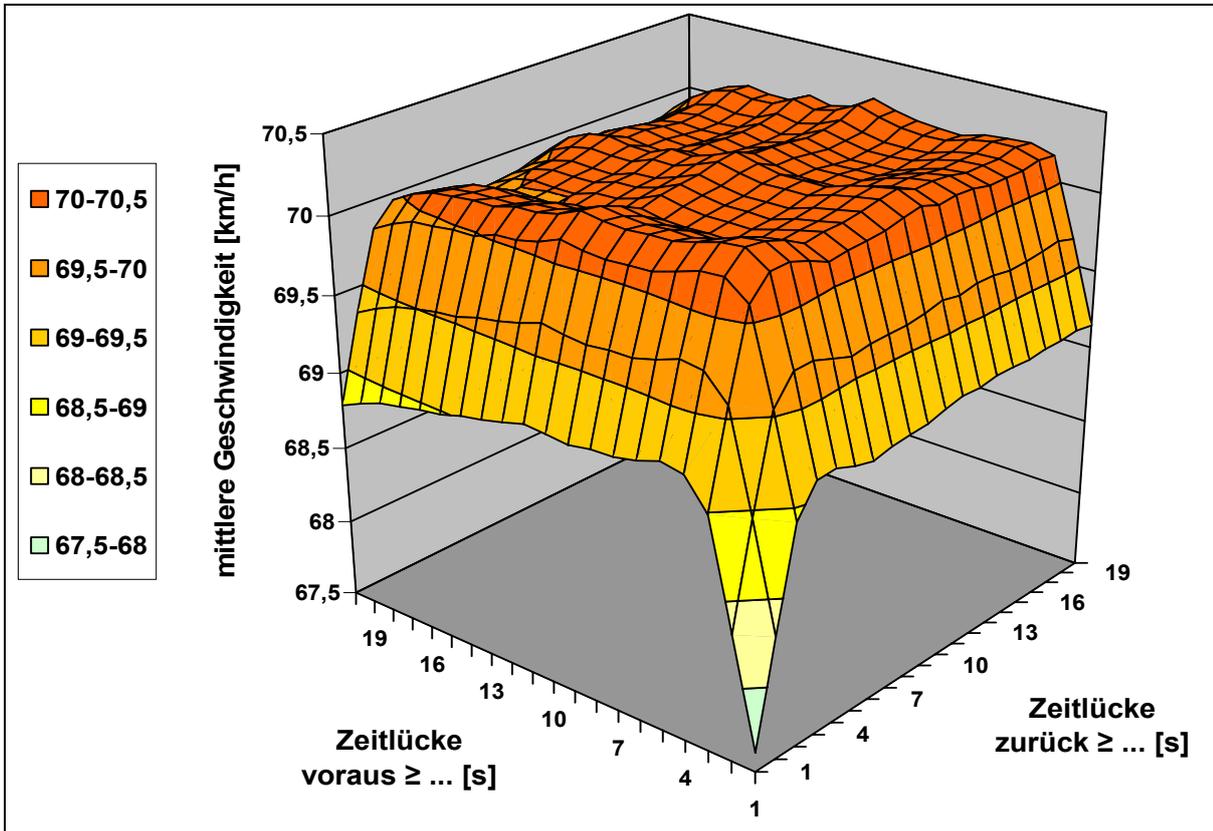


Bild 71: Abgrenzung beeinflusster und unbeeinflusster Fahrer auf Basis der Zeitlücken nach der Methodik von KÖPPEL/BOCK (1979) für die L 257 FR Morschenich (VOLKENHOFF/LANK/BECHER 2009)

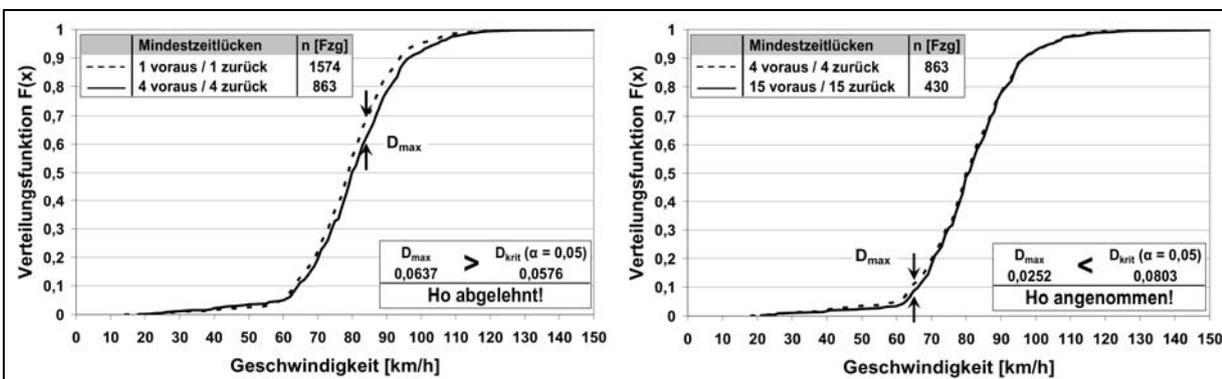


Bild 72: KS-Test zur statistischen Verifikation der gewählten Zeitlücken (VOLKENHOFF, 2008)

Während sich die ersten beiden Gruppen in ihrem Geschwindigkeitsverhalten signifikant unterscheiden ($\alpha = 0,05$), wurde zwischen der hier getroffenen Abgrenzung und einer sehr sicheren Grenze von fünfzehn Sekunden kein signifikanter Unterschied nachgewiesen (siehe beispielhaft Bild 72). In weiteren statistischen Analysen konnte

VOLKENHOFF (2008) nachweisen, dass sich die Geschwindigkeit von frei fahrenden, also unbeeinflussten Kraftfahrern signifikant unterscheidet. Dieses Ergebnis bestätigt die anfängliche Vermutung, dass eine gesonderte Analyse der Änderung des Geschwindigkeitsverhaltens von unbeeinflussten Fahrern erfolgen muss.

Analog zu den Untersuchungen der Kapitel 8.3.1 bis 8.3.3 wurde die Änderung des Geschwindigkeitsverhaltens für die unbeeinflussten Fahrer durchgeführt. Auch wenn VOLKENHOFF (2008) nachweisen konnte, dass für die betrachteten Strecken Grenzeitlücken von jeweils vier Sekunden voraus und zurück ausreichend zur Abgrenzung der unbeeinflussten Fahrer sind, wird hier zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit mit anderen Arbeiten (vgl. Tab. 11) abweichend eine Grenzeitlücke von vier Sekunden nach hinten und acht Sekunden nach vorne gewählt. BRANNOLTE/HOLZ (1983) weisen auf eine mögliche Reduktion des Untersuchungskollektivs durch zu groß gewählte Zeitlücken hin. „Werden die Mindestzeitlücken [...] zu groß gewählt, [...] so reicht häufig der Umfang der Messungen nicht mehr aus, um repräsentative Stichproben zu ermitteln.“

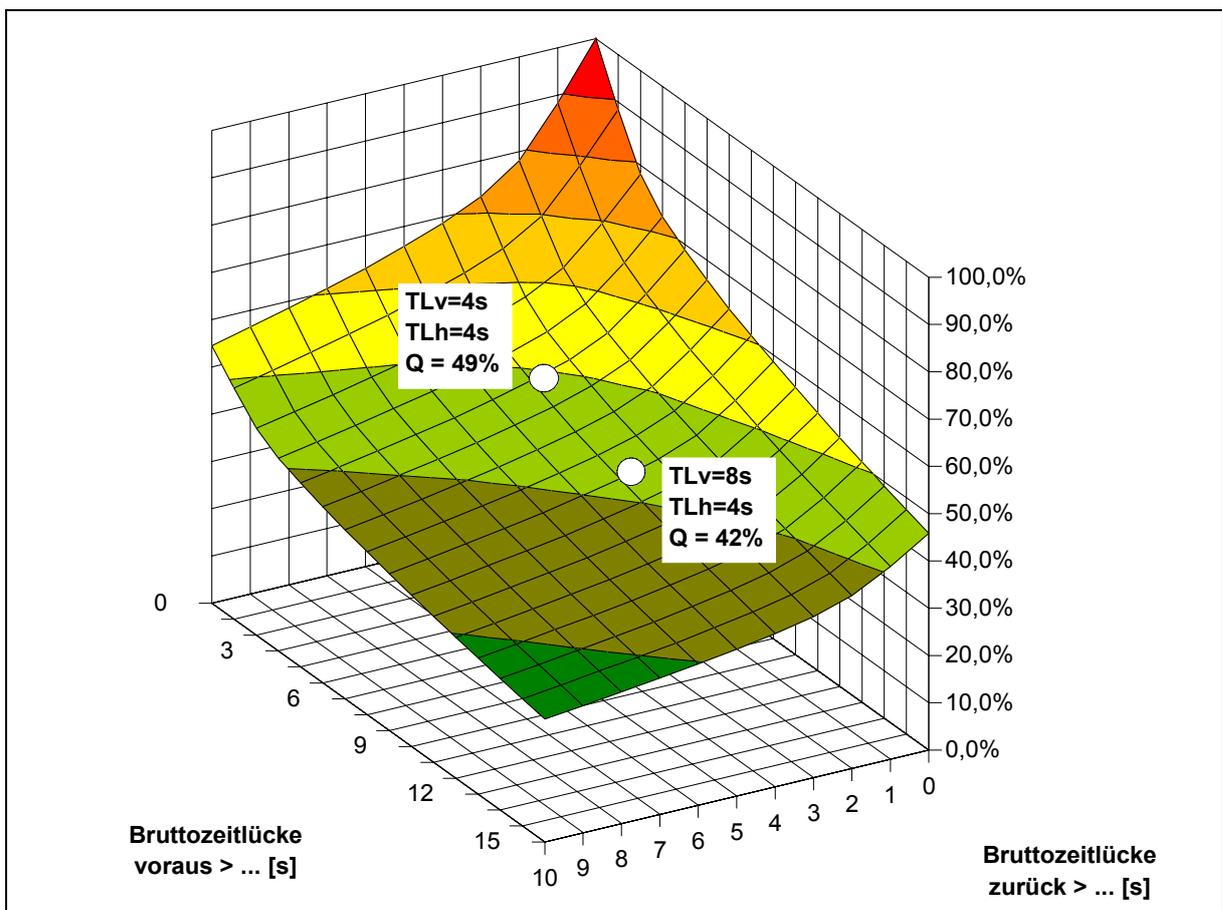


Bild 73: Anteil der unbeeinflussten Fahrer am Gesamtkollektiv in Abhängigkeit der Zeitlücken voraus und zurück

Diese Gefahr besteht auf Grund der geringen Verkehrsbelastung und damit a priori verbundenem hohen Anteil von unbeeinflussten Fahrern und durch die großzügig gewählten Messzeiträume nicht. Wie Bild 73 zu entnehmen ist, wären – bezogen auf alle Strecken und Messquerschnitte – nach der Definition von VOLKENHOFF (2008) ca. 49 % aller Fahrer unbeeinflusst. Durch die Erhöhung der Zeitlücke voraus auf 8 Sekunden sinkt der Anteil unbeeinflusster Fahrer lediglich auf 42 %.

Da VOLKENHOFF (2008) seine Analysen für die hier betrachteten Strecken für kleinere Zeitlücken (jeweils 4 voraus und zurück) durchführte und statistisch nachweisen konnte, wird auf weitere statistische Analysen zur Verifikation dieser Grenzzeitlücken (4 Sekunden zurück und 8 Sekunden voraus) verzichtet.

8.4.2 Größe des Untersuchungskollektivs

Zur Analyse der unbeeinflussten Fahrer muss aus der Menge der erhobenen Einzelfahrzeugdaten (vgl. Kapitel 8.3.1) ein Teilkollektiv ausgewählt werden. Als Abgrenzungskriterium dient eine vordere und hintere Zeitlücke von vier bzw. acht Sekunden. Da es sich bei den erhobenen Radardaten um lokale Messungen an unterschiedlichen Querschnitten handelt, ist diese Abgrenzung nicht ohne Unschärfen durchzuführen. Fahrzeuge, die an einem Querschnitt als unbeeinflusst gelten, können durch hohe Differenzgeschwindigkeiten zum vorausfahrenden oder rückwärtig folgenden Fahrzeug an einem anderen Messquerschnitt als beeinflusst gelten. Im Rahmen dieser Analyse wird diese Unschärfe in Kauf genommen und die Abgrenzung von beeinflussten und unbeeinflussten Fahrern erfolgt querschnittsbezogen. Der streckenbezogene Datenumfang für die folgenden Analysen ist Tab. 12 zu entnehmen.

Strecke	Vorher [Kfz]		Nachher [Kfz]	
L 257 FR Buir	1.210	(810)	820	(800)
L 257 FR Morschenich	590	(470)	1.070	(820)
B 399 FR Gey	1.660	(1.400)	1.350	(1.280)
B 477 FR LUXHEIM	1.490	(1.250)	1.070	(1.060)
Summe:	4.950	(3.930)	4.310	(3.960)

Tab. 12: Größe des Untersuchungskollektivs (unbeeinflusste Fahrer) differenziert nach Strecken (Kfz) (Anzahl Fahrzeuge für direkten Vorher-Nachher-Vergleich in Klammern)

8.4.3 Ergebnisse der Analyse

Analog zu den Auswertungen des gesamten Fahrerkollektivs wurden die Verteilungsfunktionen der unbeeinflussten Fahrer in einem ersten Schritt miteinander verglichen

und die Unterschiede mit Hilfe des KS-Tests hinsichtlich ihrer statistischen Signifikanz analysiert. Im Gegensatz zur statistischen Analyse des gesamten Kollektivs wurden hierbei alle Kreuzvergleiche als signifikant unterschiedlich nachgewiesen ($\alpha=0,05$). Die Änderungen der Geschwindigkeit der unbeeinflussten Fahrer sind damit statistisch abgesichert auf die Wirkung der TRS zurückzuführen und nicht zufälliger Natur.

Zusätzlich wurden die wichtigsten Quantilswerte der Geschwindigkeitsverteilung gegenübergestellt, um zu ermitteln, ob die Abweichungen des Geschwindigkeitsverhaltens auch relevante Größen annehmen. Die 85 %-Quantile aller Messungen sind als Ganglinien in Bild 74 dargestellt.

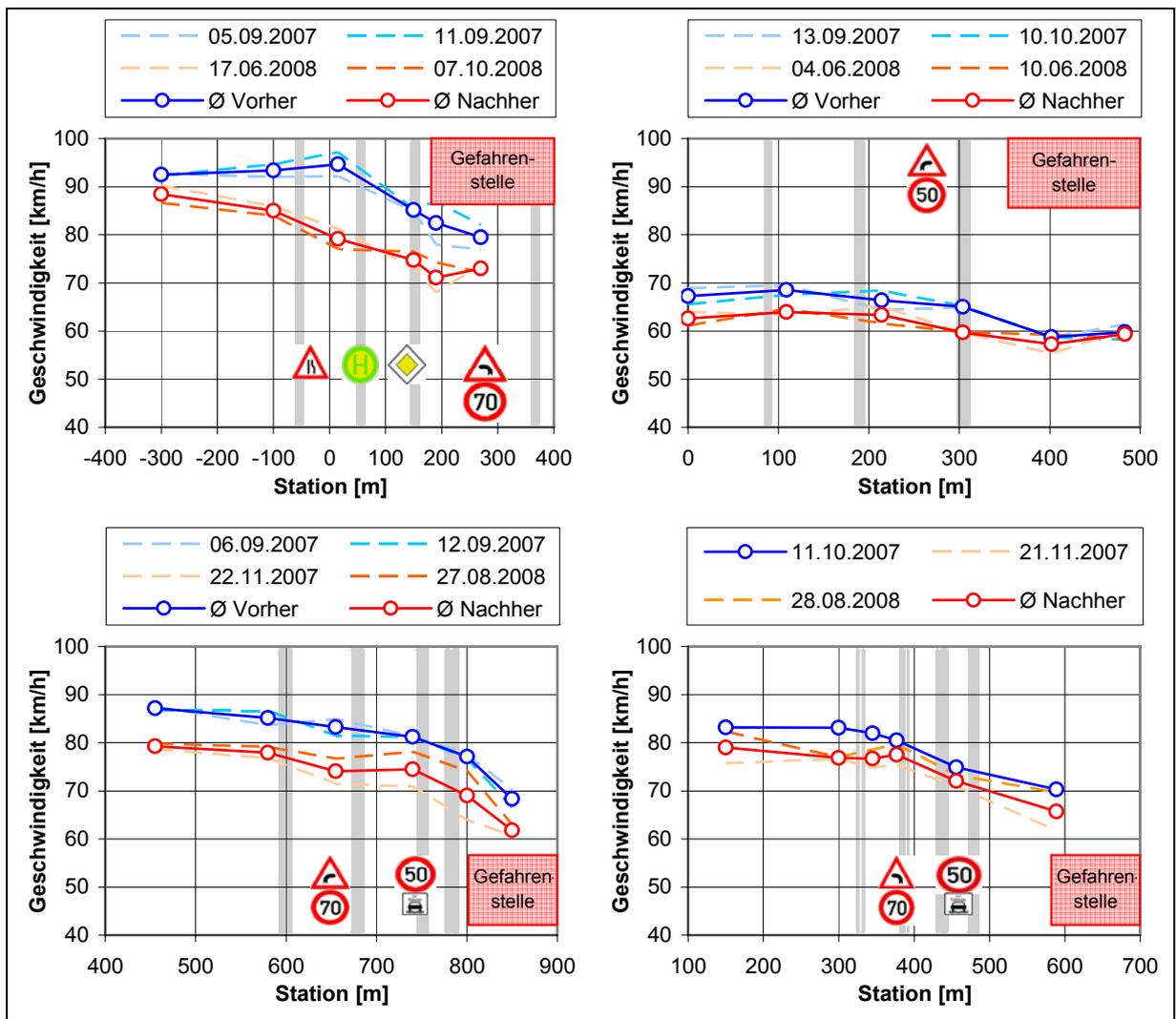


Bild 74: Vergleich der v_{85} vor und nach Applikation der Rüttelstreifen (unbeeinflusste Fahrer): B 477 Fahrtrichtung Lúxheim (oben links); B 399 Fahrtrichtung Gey (oben rechts); L 257 Fahrtrichtung Buir (unten links); L 257 Fahrtrichtung Morchenisch (unten rechts) (blau: Messungen vorher; rot: Messungen nachher)

Zusätzlich wurde die Gruppe der schnellsten Fahrer gesondert betrachtet. In Tab. 13 und Tab. 14 ist die Änderung des Geschwindigkeitsverhaltens des 95 %-Quantils und der Überschreiter der zulässigen Höchstgeschwindigkeit um mehr als 10 km/h aufgeführt.

Strecke	Im Bereich der TRS		Im Bereich der Kurve	
	$\Delta \max$	$\Delta \emptyset$	$\Delta \max$	$\Delta \emptyset$
L 257 FR Buir	-12,4	-6,1	-11,4	-8,0
L 257 FR Morschenich	-8,1	-5,1	-10,4	-5,5
B 399 FR Gey	-5,0	-4,8	-1,9	+0,3
B 477 FR LUXheim	-15,1	-11,4	-11,3	-8,4

Tab. 13: Maximale und mittlere Änderung der v_{95} durch die TRS [km/h]

Strecke	Im Bereich der TRS		Im Bereich der Kurve	
	$\Delta \max$	$\Delta \emptyset$	$\Delta \max$	$\Delta \emptyset$
L 257 FR Buir	-16,4	-11,3	-2,5	-2,1
L 257 FR Morschenich	-12,6	-9,7	-2,6	-1,8
B 399 FR Gey	-25,3	-23,9	-8,8	-0,3
B 477 FR LUXheim	-0,4	-0,4	-0,3	+0,1

Tab. 14: Maximale und mittlere prozentuale Änderung des Anteils der Überschreiter der v_{zul} um mehr als 10 km/h [%]

Für die unbeeinflussten Fahrer ergeben sich sowohl vor als auch nach der Applikation der TRS auf allen Strecken höhere Geschwindigkeiten als für die Gesamtheit aller Fahrer. Die Verläufe der Geschwindigkeit über die Annäherungsstrecke und in der Kurve ähneln den bereits vorgestellten Ganglinien des Gesamtkollektivs. Das Verzögerungsverhalten und der Ort der Verzögerung unterscheiden sich demnach nicht. Die Reduktion der Geschwindigkeit liegt ebenfalls in ähnlichen Größenordnungen wie bei der ersten Analyse aller Fahrer. Eine Gegenüberstellung der 85 %-Quantile der Geschwindigkeit des Gesamtkollektivs und der unbeeinflussten Fahrer für den Vorher- sowie für den Nachher-Fall ergab geringfügig geringere Geschwindigkeitsrückgänge durch die TRS. Ähnlich verhält es sich bei den Standardabweichungen der Geschwindigkeiten. Diese war bei der Betrachtung aller Fahrer niedriger ausgeprägt als bei den unbeeinflussten Fahrern. Durch die Installation der TRS sinkt die Standardabweichung analog zur Geschwindigkeit in geringerem Maße als bei der Analyse des Gesamtkollektivs.

Zusammenfassend lässt sich die Änderung der Geschwindigkeit durch die Betrachtung der unbeeinflussten Fahrer eindeutig auf die Rüttelstreifen zurückführen und bestätigt sich in ihrer Ausprägung.

8.5 Analyse von Einzelfahrzeugdaten

Über die Betrachtung der unbeeinflussten Fahrer hinaus verspricht eine Analyse des Fahrerverhaltens und insbesondere des Geschwindigkeitsverhaltens von einzelnen Fahrzeugen vertiefende Erkenntnisse, da mit deren Hilfe weitere Hypothesen untersucht werden können. Unter anderem kann ermittelt werden, ob

- das Geschwindigkeitsverhalten auf der freien Strecke und im Annäherungsbereich ein Indiz für das Geschwindigkeits- und Spurhalteverhalten innerhalb der Kurve darstellt,
- die Geschwindigkeitswahl von der Ortskenntnis abhängt oder
- die Fahrzeugklasse einen Einfluss auf die Geschwindigkeit hat.

Während die erste Fragestellung vorrangig zum Gesamtverständnis des Geschwindigkeitsverhaltens auf Landstraßen beiträgt, lassen sich aus den Erkenntnissen der zweiten Vermutung Einsatzempfehlungen für Rüttelstreifen ableiten. Ein möglicher Zusammenhang zwischen Fahrzeugklasse und Wirkung auf das Geschwindigkeitsverhalten lässt Rückschlüsse auf die Übertragungswege der Akustik und Schwingung unterschiedlicher Fahrzeuge und auf die psychologische Motivation der Fahrer erwarten.³⁹ Sowohl die Ortskundigkeit als auch die Fahrzeugklasse und damit verbunden Unterschiede im Risiko- und allgemeinen Fahrerverständnis sollen darüber hinaus im Rahmen einer allgemeinen Akzeptanzuntersuchung vertiefend analysiert und mit dem Geschwindigkeitsverhalten verknüpft werden (vgl. Kapitel 9).

Zur Klärung der angeführten Fragestellungen müssen Einzelfahrzeugdaten für den entsprechenden Streckenabschnitt vorliegen und mit Informationen über Fahrzeugklasse, Geschwindigkeit sowie Kennzeichen⁴⁰ verknüpft werden. Für die Erhebung solcher Daten stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung, die sich in Aufwand, Beeinflussung und Genauigkeit unterscheiden.

³⁹ Hochklassige Fahrzeuge mit guter Schalldämmung und Federung liefern dem Fahrer weniger Rückmeldung über sein Geschwindigkeitsverhalten und können ihn somit zu einer höheren Geschwindigkeitswahl verleiten (vgl. Kapitel 3.5). Darüber hinaus ist die Fahrzeugwahl eng mit dem „Lebensgefühl“ und der Fahreinstellung der Fahrer verknüpft.

⁴⁰ Die Kennzeichen der Fahrzeuge werden für die Bestimmung der Ortskundigkeit (Kapitel 8.5.3) benötigt.

Das gängigste Verfahren zur Erhebung von Einzelfahrzeugdaten sind Nachfolgefahrten. Der Vorteil von Nachfolgefahrten liegt in der lückenlosen Datenerhebung über eine längere Strecke mit einem hohen Genauigkeitsgrad hinsichtlich der Bewegungen des Messfahrzeugs. Wesentliche Nachteile liegen in dem hohen Aufwand bzgl. Personal, Equipment und Zeit, welcher die Zahl der durchführbaren Messfahrten meist stark begrenzt. Ein weiterer Nachteil liegt in der psychologischen Beeinflussung des vorausfahrenden Fahrers. Durch zu dichtes Auffahren kann ein Druck erzeugt werden, der den Fahrer zu einer höheren Geschwindigkeitswahl bewegt. Diese Beeinflussung wäre für die hier vorliegenden Fragestellungen kontraproduktiv, so dass die Durchführung von Nachfolgefahrten zur Beantwortung der vorliegenden Fragestellungen als ungeeignet eingestuft wurde.

Eine weitere Methode stellt die Videodetektion dar. Von einem erhöhten Standpunkt aus wird ein genügend großer Abschnitt der Straße mit Videosystemen aufgenommen. Die Videodaten werden – in Echtzeit oder retrospektiv – hinsichtlich Fahrzeugklasse, Kennzeichen und Geschwindigkeitsverhalten sowie ggf. auch Spurhalteverhalten ausgewertet. Auf kurvigen Strecken mit hohem Anteil an Seitenraumbewuchs ist diese Messmethode nicht einsetzbar und wird demnach für diese Arbeit verworfen.

Eine dritte Möglichkeit der Messwerterhebung liegt in der Verknüpfung von lokalen Daten zur Erzeugung wegbezogener Ganglinien. Dieses Verfahren wird in Kapitel 8.5.1 beschrieben. Auf Basis der individualisierten Ganglinien aus Radardaten können differenzierte Analysen des Geschwindigkeitsverhaltens von einzelnen Gruppen von Fahrern und Fahrzeugen erstellt werden. Ein weiterer Vorteil dieser Methode liegt in der Möglichkeit, neben den Reaktionen des Gesamtkollektivs und einzelner Gruppen die Geschwindigkeitsänderung einzelner Fahrzeuge im Vorher-Nachher-Vergleich zu analysieren.

8.5.1 Ganglinienerzeugung aus lokalen Einzelfahrzeugdaten

Im Rahmen der allgemeinen verkehrstechnischen Erhebung wurden Einzelfahrzeugdaten an 6 Querschnitten mittels Seitenradargeräten erhoben. Diese Geräte messen die Geschwindigkeit von Einzelfahrzeugen mit einer Auflösung von 1 km/h. Zusätzlich werden Fahrzeuglängen (Auflösung von 0,1 m) und Zeitstempel (Auflösung von 1 Sekunde) aufgezeichnet. Zusätzlich zu den Radargeräten wurde eine Videoeinheit mit digitalem Festplattenspeicher in den Messaufbau integriert (vgl. Bild 75 oben).

Auf Basis der hohen Messdichte von sechs Radargeräten in einem Bereich von maximal 500 Metern ist es zulässig, die Mittelwerte der Geschwindigkeiten an den ein-

zelen Querschnitten zu einer mittleren Geschwindigkeitsganglinie zu verknüpfen (vgl. Bild 75 unten). Die Standardabweichungen an den einzelnen Stationen gibt Aufschluss über die Homogenität des Geschwindigkeitsverlaufs.

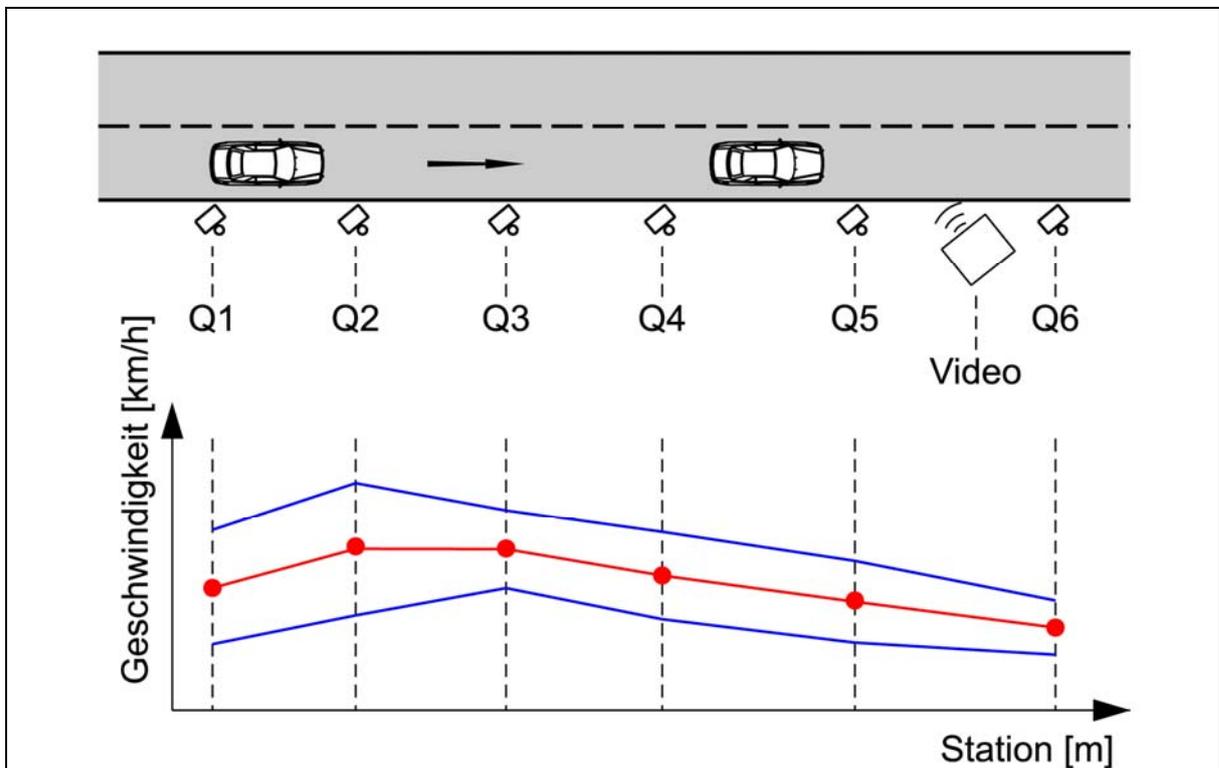


Bild 75: Übersicht Messaufbau und Geschwindigkeitsganglinie aus Mittelwert und Standardabweichung des Gesamtkollektivs (Position in Abhängigkeit der Streckencharakteristik und der Lage der TRS)

Die so erzeugte Ganglinie bzw. das Geschwindigkeitsband über die Strecke lässt allgemeine Aussagen zum Fahrerverhalten des gesamten Kollektivs zu. Wünschenswert wäre jedoch eine differenziertere Aussage zu einzelnen Fahrergruppen wie bspw. zu ortskundigen oder ortunkundigen Fahrern. Dies setzt jedoch individuelle Ganglinien aller Fahrzeuge mit entsprechenden Metadaten zur Abgrenzung unterschiedlicher Gruppen voraus. Derartige Ganglinien lassen sich erzeugen, indem Einzelfahrzeugdaten an jedem Querschnitt miteinander verknüpft und durch Metadaten aus der Videobeobachtung ergänzt werden. Diese Zuordnung kann jedoch nicht eindeutig erfolgen, sondern muss vielmehr aus einem wahrscheinkeitsbasierten Algorithmus resultieren.⁴¹ Die Umsetzung erfolgt dabei auf Grund der großen Datenmengen auf Basis von MYSQL-Datenbankanwendungen⁴² und php-Skripten.⁴³

⁴¹ Die Radargeräte messen zwar mit einem hohen Genauigkeitsgrad, es kann jedoch vorkommen, dass einzelne Fahrzeuge nicht oder fehlerhaft erfasst werden. Eine eindeutige Reihung ist demnach nicht zu garantieren.

⁴² MYSQL: Eingetragenes Warenzeichen der Sun Microsystems AG; Open-Source Datenbankserver.

Der Grundgedanke der Ganglinienerzeugung basiert auf der Zuordnung von Wahrscheinlichkeitswerten für alle relevanten Messgrößen. Der Wertebereich bzw. die zugehörige Wahrscheinlichkeitsspanne wird aus den bekannten Größen des Gesamtkollektivs – im Speziellen der Geschwindigkeit und deren Standardabweichung – abgeleitet und auf die Einzelwerte übertragen.

In Bild 76 sind unterschiedliche Dichtefunktionen normalverteilter Zufallsgrößen mit unterschiedlichen Parametern dargestellt. Die Dichtefunktionen errechnen sich auf Basis der Gl. 12.

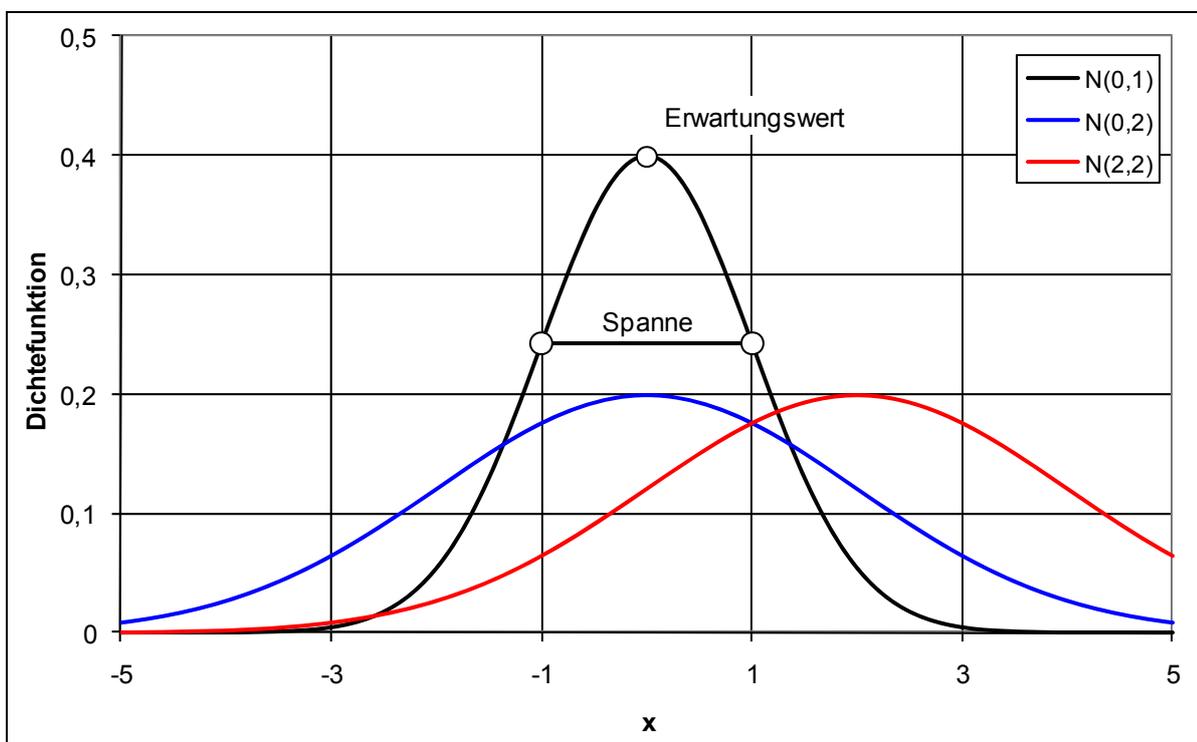


Bild 76: Dichtefunktionen $N(\mu, \sigma)$ normalverteilter Zufallsgrößen mit unterschiedlichen Parametern μ und σ

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left(-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)}$$

Gl. 12

Mit f Dichtefunktion
 σ Standardabweichung
 μ Erwartungswert

⁴³ PHP: Eingetragenes Warenzeichen der „The PHP Group“; serverseitig interpretierte Skriptsprache.

Der erste Term der Gl. 12 legt dabei die Skalierung der Funktion f in vertikale Richtung fest und die Standardabweichung σ bestimmt die laterale Ausdehnung und damit die Form der Dichtefunktion, während der Erwartungswert μ die laterale Position des Maximums der Funktion $f(\mu)$ bestimmt. Die Parameter sind so aufeinander abgestimmt, dass das Integral der Funktion, also die Fläche unter dem Funktionsgraphen, immer den Wert „1“ annimmt (vgl. SACHS, 1992).

Auf Basis des kollektiven Geschwindigkeitsverhalten werden zwischen jedem Messquerschnitt die Parameter der Wahrscheinlichkeitsfunktionen zur

- Geschwindigkeit,
- Fahrtzeit,
- Zeitlücke zum vorausfahrenden bzw. folgenden Fahrzeug sowie zur
- Fahrzeuglänge

formuliert. Zu jedem Datensatz des ersten Messquerschnitts werden auf diese Weise ein Erwartungswert sowie eine Dichtefunktion für jede dieser vier Kennwerte berechnet. Am folgenden Messquerschnitt werden alle Datensätze mit diesen Funktionen verglichen und die jeweilige „Zuordnungswahrscheinlichkeit“ berechnet. Jede einzelne „Zuordnungswahrscheinlichkeit“ wird über vorher festgesetzte Grenzen hinsichtlich der Qualität der Zuordnung überprüft. Liegt die Wahrscheinlichkeit nur eines der Parameter unterhalb des gesetzten Grenzwerts, kann eine Zuordnung nicht mit ausreichender Sicherheit erfolgen. Werden alle Untergrenzen überschritten, wird der Gesamtwert der „Zuordnungswahrscheinlichkeit“ gebildet.

Hierzu wurden mehrere Wichtungsverfahren getestet. Obwohl sich keines der Verfahren hinsichtlich Stabilität deutlich von den anderen Verfahren abgesetzt hat, wird aus Anschaulichkeitsgründen eine einfache Wichtung mit Faktoren nach Gl. 13 unter der Randbedingung nach Gl. 14 empfohlen.

$$f_{ges} = \sum g_i \cdot f_i \quad \text{Gl. 13}$$

Mit f_{ges} Gesamtwert der „Zuordnungswahrscheinlichkeit“
 g_i Wichtungsfaktor für den Parameter i
 f_i Einzelwert der „Zuordnungswahrscheinlichkeit“ für den Parameter i

$$\sum g_i = 1,0 \quad \text{Gl. 14}$$

Mit g_i Wichtungsfaktor für den Parameter i

Anhand dieses Gesamtparameters f_{ges} wird die Zuordnungsgüte der einzelnen Fahrzeugdaten zueinander abgeschätzt. Der maximale Zuordnungsfaktor bestimmt zwei

korrespondierende Wertepaare. Auf diese Weise werden alle sechs Messquerschnitte sowie das Videobild durchlaufen und eine geschlossene Geschwindigkeitsganglinie inklusive Videobild generiert. Die Herleitung der einzelnen Wahrscheinlichkeitsfunktionen und Zuordnungsregeln sind in Anhang I dargestellt.

8.5.2 Datenumfang

Im Rahmen der verkehrstechnischen Datenerhebung wurden bei alle Messungen neben den Radardaten auch Videodaten erhoben. Aus den Videoaufnahmen wurden im Anschluss einzelne Standbilder der Fahrzeuge extrahiert. Insgesamt wurden auf diese Weise Bilder von ca. 40.000 Fahrzeugen gespeichert. Die Einzelbilder der Fahrzeuge wurden in einem weiteren Schritt mit Metadaten versehen. Diese umfassen

- Kennzeichen,
- Fahrzeugklasse⁴⁴,
- Fahrtrichtung und
- Zeitstempel.

Bei ca. 31.800 Fahrzeugen konnte das Kennzeichen identifiziert werden (entspricht ca. 79 %). Von den 40.200 Fahrzeugen fuhren ca. 19.600 Fahrzeuge in die relevante Fahrtrichtung, bei denen ca. 13.300 Kennzeichen identifiziert wurden (entspricht 68 %). Von besonderem Interesse für die Analyse sind die unbeeinflussten Fahrer. Auf Grund der Zeitlücken (vgl. Kapitel 8.4) wurden ca. 8.100 Fahrzeuge als unbeeinflusst eingeordnet, von denen wiederum ca. 5.500 Kennzeichen eindeutig zuzuordnen waren (entspricht ca. 68 %).

Auf Basis des in Kapitel 8.5.1 vorgestellten Algorithmus wurden aus den Radar- und den Bilddaten Einzelfahrzeug-Ganglinien über die Messstrecken erzeugt. Insgesamt konnten über 12.000 vollständige⁴⁵ Ganglinien mit ausreichender Sicherheit erzeugt werden. Ca. 42 % dieser Ganglinien sind unbeeinflussten Fahrern zuzuordnen. Eine genaue Übersicht über die Anteile der Ganglinien differenziert nach Strecken ist Tab. 15 zu entnehmen. Auf Grund des Datenumfangs stützen sich die weiteren Analysen vorrangig auf die Strecken B 399 und L 257. Auf der B 477 liegen für belastbare Aussagen zu wenige Ganglinien aus dem Nachher-Zeitraum vor.

⁴⁴ Die Fahrzeugklassifizierung erfolgte nach einem eigenen, speziell auf die vorliegende Fragestellung abgestimmten Schema, das in Kapitel 8.5.4 näher erläutert wird.

⁴⁵ Als vollständige Ganglinien werden die Datensätze bezeichnet, die eine Geschwindigkeitsinformation an allen sechs Radarstationen und ein Standbild beinhalten. Insgesamt wurden ca. 18.500 einzelne Ganglinien erzeugt.

		alle Fahrer	unbeeinflusste Fahrer
L 257 FR Buir	Vorher	1.942	852
	Nachher	1.353	546
L 257 FR Morschenich	Vorher	638	313
	Nachher	903	386
B 399	Vorher	2.254	895
	Nachher	3.091	1.215
B 477	Vorher	1.761	841
	Nachher	227	39
Summe	Vorher	6.595	2.901
	Nachher	5.574	2.204
	Insgesamt	12.169	5.105

Tab. 15: Übersicht über die erfolgreich erstellten Ganglinien differenziert nach Strecken und nach unbeeinflussten bzw. beeinflussten Fahrern

8.5.3 Analyse der Geschwindigkeitsänderung differenziert nach Ortskundigkeit

Die Kenntnis der Verkehrsteilnehmer über die Streckencharakteristik ist entscheidend für das Risikoverhalten und damit für die Geschwindigkeitswahl der Verkehrsteilnehmer. SEIMETZ zeigte 2009 am Beispiel der Stadt Aachen, dass das Unfallgeschehen und insbesondere die räumliche Verteilung der Unfälle eng mit dem Wohnort der Unfallbeteiligten verknüpft sind. Die meisten Unfälle ereignen sich nach SEIMETZ (2009) in einem engen Radius um den Wohnort (hier Meldeort) der Beteiligten. Basierend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 3.4 wird vermutet, dass die Geschwindigkeitsüberschreitungen und das Unfallgeschehen in den untersuchten Landstraßenkurven eher auf eine falsche Risikowahrnehmung der Verkehrsteilnehmer als auf eine fehlende Kenntnis der Streckencharakteristik zurückzuführen ist. Sollen das Geschwindigkeitsverhalten und die Aufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer durch TRS beeinflusst werden, so gelingt dies bei Ortskundigen nicht vorrangig durch den Alarmcharakter der Signale vor einer Situation, die den Fahrern schon bekannt ist, sondern durch den Diskomfort, der von den Rüttelstreifen ausgeht. Inwieweit die TRS in der vorgestellten Ausführung einen ausreichenden Diskomfort erzeu-

gen, um die ortskundigen Fahrer zu beeinflussen, und ob sich die Geschwindigkeit dieser Gruppe in geringerem Maße ändert, als bei den ortsunkundigen Fahrern wurde auf Basis der vorliegenden Geschwindigkeits- und Videodaten untersucht.

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen gilt es, eine möglichst exakte und fehlerfreie Abgrenzung der ortskundigen von den ortsunkundigen Fahrern zu definieren. Da die Streckenkenntnis der Verkehrsteilnehmer nur über direkte Befragungen exakt abgegrenzt werden kann, ist eine Zuordnung der Ortskundigkeit auf Basis der vorliegenden Videodaten nur über Hilfsgrößen möglich. Nach VOLKENHOFF (2008) bieten sich hierzu zwei mögliche Definitionen als Abgrenzungskriterien an:

Definition 1: *Fahrer, die in einem Landkreis wohnen, der innerhalb eines Radius von 10 km um die Messstrecke liegt, sind ortskundig.*

Definition 2: *Fahrzeuge, die innerhalb aller Messungen auf einer Strecke mehrfach gesichtet wurden, gelten als ortskundig. Die Häufigkeit der Sichtungen gilt als Indikator für das Maß der Ortskundigkeit.*

Beide Definitionen bieten zwar ein logisches Abgrenzungskriterium für die Ortskundigkeit, sind jedoch mit unterschiedlichen Fehlerquellen verbunden. Definition 1 geht davon aus, dass ein Verkehrsteilnehmer alle Strecken innerhalb eines Umkreises um seinen Meldeort in gleichem Maße kennt. Insbesondere die Lage der Strecken in der Nähe der Kreisgrenzen und die Tatsache, dass es sich nicht um Hauptverkehrswege handelt, zeigen die Schwächen dieser Definition. Die Abgrenzung nach Definition 2 basiert auf der Annahme, dass ortskundige Fahrer die Strecken regelmäßig und vor allem auch innerhalb des Messzeitraums mehrfach befahren. Je länger der Untersuchungszeitraum gewählt wurde, desto schärfer lässt sich die Ortskundigkeit nach Definition 2 abgrenzen.

Eine Übersicht über die erhobenen Daten ist nach Strecken differenziert in Tab. 16 dargestellt. Die Ortskundigkeit nach Definition 1 basiert je nach Strecke auf unterschiedlichen Landkreisen. Für die Strecke L 257 gelten demnach alle Fahrer als ortskundig, deren Fahrzeuge die Ortskennzeichen Düren (DN) oder Bergheim (BM) führen. Auf der Strecke B 477 gelten zusätzlich die Fahrer aus dem Kreis Euskirchen (EU) als ortskundig. Die Strecke B 399 liegt auf der südwestlichen Seite von Düren und damit näher am Kreis Aachen (AC). Hier gelten die Fahrer mit den Ortskennzeichen DN und AC als streckenkundig.

L 257 (Fahrtrichtung Buir) (39,5 h an 4 Tagen)						
N	Kennzeichen		Anzahl Sichtungen			
	sonstige	DN EU	1	2	3	> 3
8.808	4.603	4.205	4.120	2.242	1.020	1.426
100 %	52 %	48 %	47 %	25 %	12 %	16 %

L 257 (Fahrtrichtung Morschenich) (24,25 h an 3 Tagen)						
N	Kennzeichen		Anzahl Sichtungen			
	sonstige	DN EU	1	2	3	> 3
5.138	2.741	2.397	3.131	1.306	375	326
100 %	53 %	47%	61 %	25 %	8 %	6 %

L 257 (Fahrtrichtung Buir und Fahrtrichtung Morschenich) (63,75 h an 7 Tagen)						
N	Kennzeichen		Anzahl Sichtungen			
	sonstige	DN EU	1	2	3	> 3
13.946	7.344	6.602	5.653	3.096	1.512	3.685
100 %	53 %	47 %	41 %	22 %	11 %	26 %

B 477 (Fahrtrichtung LUXHEIM) (42,75 h an 4 Tagen)						
N	Kennzeichen		Anzahl Sichtungen			
	sonstige	DN EU BM	1	2	3	> 3
8.025	1.777	6.248	3.825	2.276	831	1.093
100 %	22 %	78 %	48 %	28 %	10 %	14 %

B 399 (Fahrtrichtung Gey) (40,25 h an 4 Tagen)						
N	Kennzeichen		Anzahl Sichtungen			
	nein	DN AC	1	2	3	> 3
9.729	1.011	8.718	4.955	2.368	1.140	1.266
100 %	10 %	90 %	51 %	24 %	12 %	13 %

Tab. 16: Übersicht über die Ortskennzeichen und Anzahl der Sichtungen differenziert nach Strecken und Fahrtrichtung

Eine Besonderheit bei der Betrachtung der Ortskundigkeit stellt die L 257 dar. Während alle bisherigen Analysen für die Strecken getrennt nach Fahrtrichtung erfolgten, kann die Ortskundigkeit hier nicht für eine Fahrtrichtung isoliert betrachtet werden. Die beiden Fahrtrichtung „Buir“ und „Morschenich“ werden für die Analyse des Einflusses der Ortskundigkeit auf das Geschwindigkeitsverhalten zusammengefasst. Aus Tab. 16 geht deutlich hervor, wie der Anteil der Mehrfachichtung mit größerem Datenumfang steigt, wie das Beispiel L 257 zeigt. Bei getrennter Betrachtung der Strecken wurden lediglich 53 % der Fahrzeuge in Fahrtrichtung Buir und nur 39 % in Fahrtrichtung Morschenich mehrfach gesichtet. Bei Zusammenfassung dieser beiden Fahrtrichtungen zu einer Strecke steigt dieser Anteil auf 59 %. Der Anteil der Fahrer, die im Beobachtungszeitraum mehr als dreimal auf der Strecke beobachtet wurden, stieg von 16 % bzw. 6 % noch deutlicher auf über 26 %.

		Ortskundig	Ortsunkundig
L 257	Definition 1	47 %	53 %
	Definition 2	59 %	41 %
B 399	Definition 1	90 %	10 %
	Definition 2	49 %	51 %
B 477	Definition 1	78 %	22 %
	Definition 2	52 %	48 %

Tab. 17: Anteil der ortskundigen und ortsunkundigen Fahrer nach Definition 1 (Ortskennzeichen) und Definition 2 (Anzahl der Sichtungen) differenziert nach Strecken

Nach Definition 2 gelten alle Fahrer, die mehr als einmal im Beobachtungszeitraum auf den Strecken angetroffen wurden, als ortskundig. Die akkumulierten Daten sind für beide Definitionen in Tab. 17 aufgeführt. Während der Anteil der ortskundigen Fahrer auf der L 257 nach beiden Definitionen in ähnlichen Größenordnungen liegt, sind auf den beiden Strecken B 399 und B 477 deutliche Unterschiede zu erkennen. Auf der B 399 können auf Basis des Ortskennzeichen 90 % als ortskundig identifiziert werden, während im Beobachtungszeitraum von mehreren Tagen lediglich knapp 50 % der Fahrer mehrfach gesichtet wurden. Auf der B 477 liegt ebenfalls ein Unterschied von über 25 % zwischen beiden Definitionen vor. Zur genaueren Analyse dieser Diskrepanz wurde die Zuordnung der Ortskundigkeit aller Fahrer auf allen Strecken einander gemäß den beiden Definitionen gegenübergestellt (vgl. Tab. 18). Demnach werden lediglich 55 % aller Verkehrsteilnehmer nach beiden Definitionen gleichermaßen klassifiziert. 29 % der beobachteten Fahrzeuge werden zwar auf

Grund des Ortskennzeichens als streckenkundig eingestuft, konnten jedoch nur einmal auf den Untersuchungsstrecken beobachtet werden. Analog wurden 16 % der Fahrer mit fremdem Ortskennzeichen mehrfach auf den Strecken gesichtet.

Die Abgrenzung der Ortskundigkeit muss demnach sowohl für Definition 1 als auch nach Definition 2 als fehlerbehaftet und damit relativ unscharf bezeichnet werden. Während ein Verkehrsteilnehmer auf Basis der Definition 2 mit hoher Sicherheit als Ortskundiger identifiziert werden kann, wenn er mehrfach auf einer Untersuchungsstrecke beobachtet wurde, lässt sich die Ortsunkundigkeit mit keiner der beiden Definitionen eindeutig feststellen. Sowohl Fahrer, die ein fremdes Ortskennzeichen aufweisen, als auch Fahrer, die die Strecken während der Untersuchung nur einmal befahren, können entgegen der Abgrenzungskriterien hohe Streckenkenntnisse aufweisen.

		Definition 1	
		ja	nein
Definition 2	ja	39 %	16 %
	nein	29 %	16 %

Tab. 18: Gegenüberstellung der Zuordnung der Ortskundigkeit nach Definition 1 und Definition 2 in Prozent

	N	P [%]
ortsunkundig (< 1/Monat)	84	22,9%
ortskundig (1/Monat bis 1/Woche)	65	17,7%
sehr ortskundig (1/Woche bis 1/Tag)	102	27,8%
extrem ortskundig (mehrmals täglich)	116	31,6%
Summe	367	100,0%

Tab. 19: Ortskundigkeit der Verkehrsteilnehmer abgeleitet aus den Befragungen (N=367)

Ergänzend zu den Daten aus der Videoanalyse liegen Aussagen von 367 Verkehrsteilnehmern vor, die im Rahmen einer Befragung erhoben wurden (vgl. auch Kapitel 9.1). Die Verkehrsteilnehmer wurden dabei hinsichtlich der Häufigkeit der Streckennutzung befragt. In Tab. 22 sind die Ergebnisse dieser Befragung zusammengefasst. Alle Fahrer, die die Strecke seltener als einmal pro Monat befahren, wurden als Ortsunkundige eingestuft. Auf Basis dieser sehr detaillierten und zuverlässigen Einteilung können ca. 20 % der befragten Fahrer als ortsunkundig bezeichnet werden. Der Anteil der sehr bis extrem ortskundigen Fahrer, die die Strecke mehrmals pro

Woche bzw. mehrmals pro Tag befahren, liegt bei ca. 60 %. Im Vergleich mit den Abgrenzungen aus den Videobeobachtungen stellt sich das Kollektiv der Befragten also als wesentlich ortskundiger dar, als das Gesamtkollektiv der verkehrstechnischen Untersuchung. Auf Grund der zufälligen und zeitlich ausgedehnten Befragung ist dies weniger darauf zurückzuführen, dass das Kollektiv der Befragten nicht repräsentativ ist, sondern vielmehr darauf, dass die Abgrenzung auf Basis der Videodaten mit gewissen Unschärfen behaftet ist.

Im weiteren Untersuchungsverlauf werden die ortskundigen Fahrer gemäß Definition 2 mit den übrigen Fahrern verglichen. Auch wenn sich innerhalb dieser Gruppe auf Grund der Unschärfe der Abgrenzungskriterien sowohl ortskundige als auch ortsunkundige Fahrer befinden können, werden diese Fahrer im Weiteren als „Ortsunkundige“ zusammengefasst.

Anhand der mittleren Geschwindigkeiten auf der Strecke L 257 (siehe Bild 77 und Bild 78) wird deutlich, dass die Verkehrsteilnehmer mit steigender Ortskundigkeit geringere Geschwindigkeiten im gesamten Annäherungsbereich und in der Kurve fahren. Diese Beobachtung gilt sowohl für die Messungen vor als auch für die Messungen nach der Installation der TRS. Die Unterschiede zwischen den ortskundigen und ortsunkundigen Fahrern sind dabei im Annäherungsbereich stärker ausgeprägt, als in der Kurve. Auf der L 257 Fahrtrichtung Morschenich fällt auf, dass die ortsunkundigen Fahrer ihre Geschwindigkeit später reduzieren, als die ortskundigen Fahrer. In beide Fahrtrichtungen ist der Unterschied der mittleren Geschwindigkeit konsistent und liegt in einer Größenordnung von 1 km/h bis zu 3 km/h.

In einem weiteren Schritt wurde untersucht, ob die in Bild 77 und Bild 78 dargestellten Unterschiede im Geschwindigkeitsverhalten statistisch signifikant oder zufälliger Natur sind. Sowohl für die Vorher- als auch für die Nachher-Messungen wurden die Geschwindigkeitsverteilungen der „Ortskundigen“ bzw. der „sehr Ortskundigen“ mit den Geschwindigkeitsverteilungen der ortsunkundigen Fahrer mittels KS-Test ($\alpha=0,05$) hinsichtlich statistischer Signifikanz analysiert.⁴⁶

⁴⁶ Bei dieser Analyse wurden nur Messungen gegenübergestellt, die einen Mindestdatenumfang $N=35$ aufweisen.

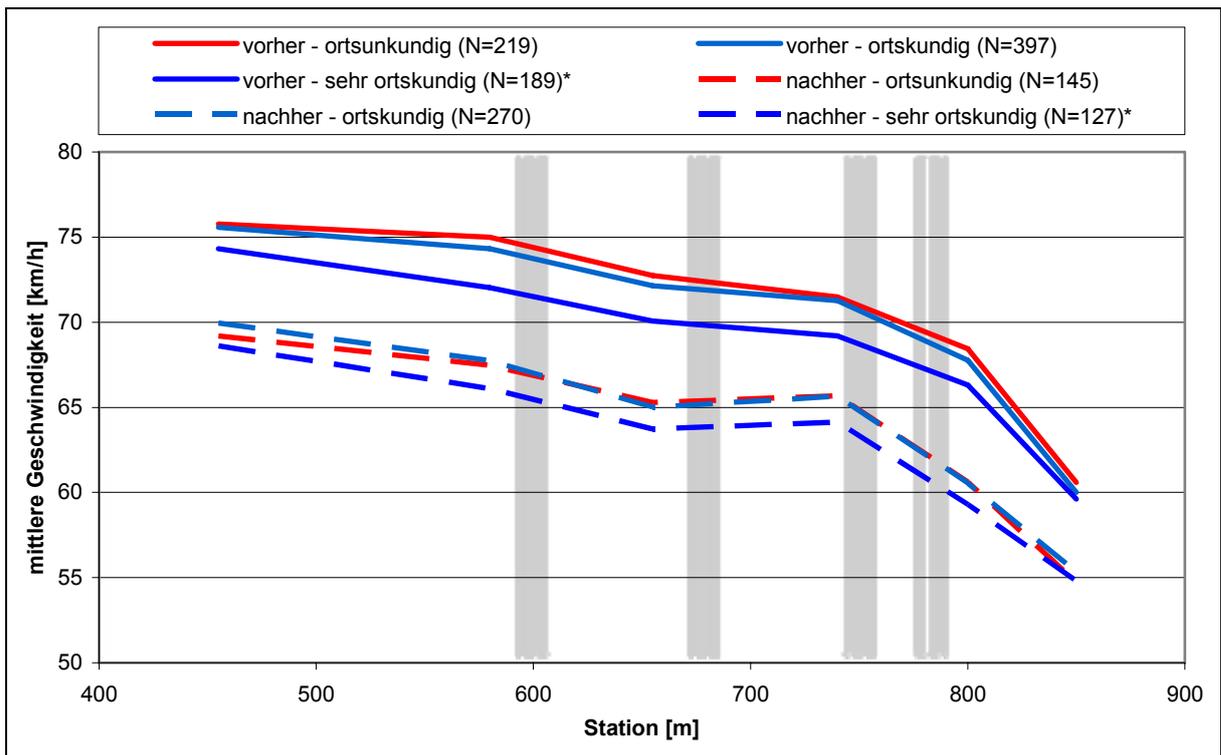


Bild 77: Vergleich der mittleren Geschwindigkeit vor und nach der Installation von TRS auf der L 257 Fahrtrichtung Buir differenziert nach der Ortskundigkeit der Fahrer

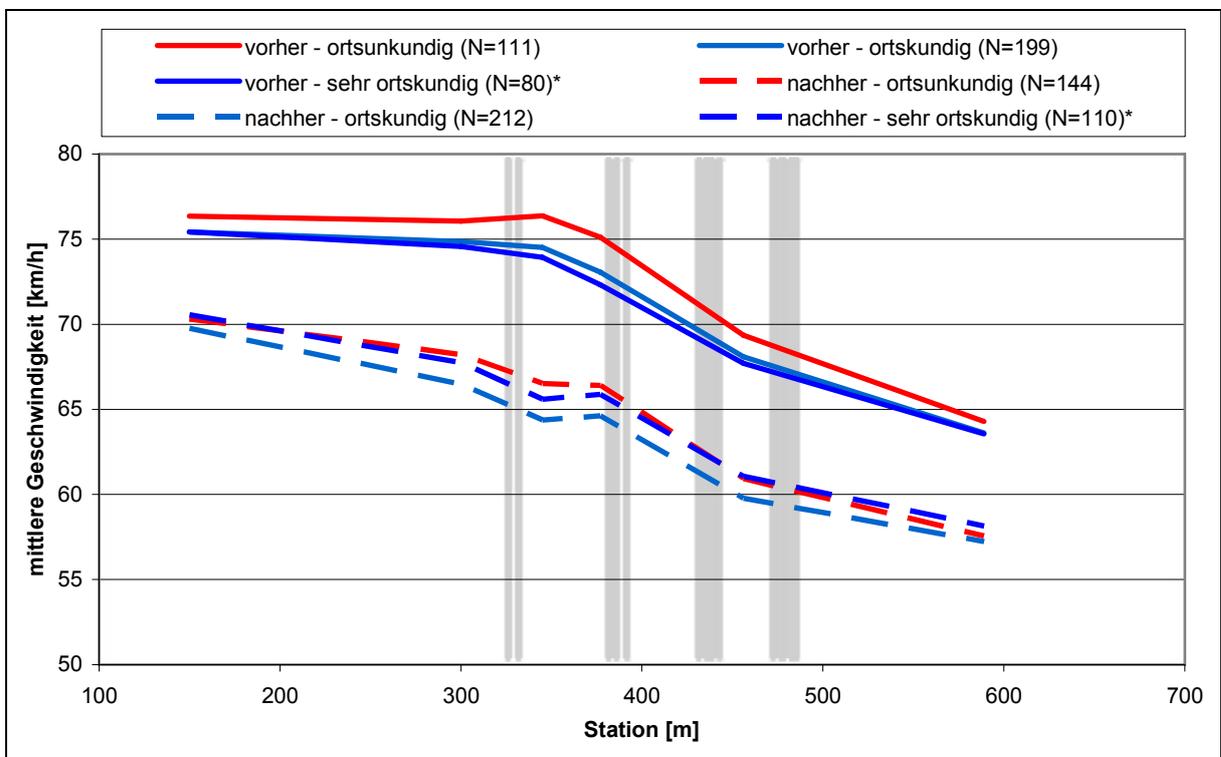


Bild 78: Vergleich der mittleren Geschwindigkeit vor und nach der Installation von TRS auf der 2 257 Fahrtrichtung Morschenich differenziert nach der Ortskundigkeit der Fahrer

Von den 42 Querschnittsmessungen auf der L 257 entstammen gemäß statistischer Analyse 41 Geschwindigkeitsverteilungen der gleichen Grundgesamtheit. Lediglich eine Messung erwies sich in ihrer Verteilung als statistisch signifikant unterschiedlich. Beim Vergleich der „sehr ortskundigen“ Fahrer bestätigt sich dieses Ergebnis. Lediglich 2 Geschwindigkeitsverteilungen erwiesen sich als statistisch signifikant unterschiedlich.⁴⁷ Das Geschwindigkeitsverhalten der Verkehrsteilnehmer ist demnach statistisch nicht abhängig von der Ortskundigkeit. Die Ergebnisse von VOLKENHOFF (2008) werden bestätigt und lassen sich auch auf das Fahrerverhalten nach der Installation der Rüttelstreifen übertragen.

8.5.4 Analyse der Geschwindigkeitsänderung differenziert nach Fahrzeugklassen

Neben der Ortskundigkeit der Kraftfahrer stellt die Fahrzeugklasse einen wesentlichen Einflussparameter auf die Geschwindigkeitswahl und die Wirkung der TRS dar. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass das allgemeine Fahrerverhalten eng mit den Fähigkeiten aber auch mit dem Image des Fahrzeugs verknüpft ist. Hohe Geschwindigkeiten bspw. können nur dann erreicht werden, wenn das Fahrzeug ausreichend motorisiert ist, um sie fahrdynamisch umzusetzen.

Psychologisch gesehen können von der Fahrzeugklasse Rückschlüsse auf die Motivation und den Fahrertyp gezogen werden. Es wird bspw. vermutet, dass sich ein Kleinwagenfahrer mit einer grundsätzlich anderen Motivation bewegt, als bspw. ein Sportwagenfahrer, der den Kauf des Fahrzeugs mit Erwartungen an ein gewisses Fahrgefühl verknüpft hat. Eine Verschiebung des subjektiven Risikos kann ebenfalls auf Grund der Fahrzeugwahl und der damit verbundenen Erwartung an die Technik verbunden sein. Es werden also Sicherheitsreserven, die für die psychologischen (vorrangig kognitive) Prozesse benötigt werden, im Glauben aufgebraucht, dass die bessere technische Ausrüstung des Fahrzeugs (also die erhöhte objektive Sicherheit) dies kompensiert. Die Unfallstatistik berücksichtigt diesen Sachverhalt, indem bspw. die Unfälle in Relation zu der Motorisierung der Fahrzeuge betrachtet werden (vgl. bspw. DESTATIS 2009).

⁴⁷ Die gleichen Analysen wurden auch für die beiden Strecken B 399 und B 477 durchgeführt. Auf Grund der geringen Anzahl von erkennbaren Ortskennzeichen und damit verbundenen geringen Zuordnungen der Ortskundigkeit, konnte hier kein aussagekräftiger Vorher-Nachher-Vergleich vorgenommen werden. Bei den Messungen vor der Installation der TRS ist das Geschwindigkeitsverhalten der ortskundigen Verkehrsteilnehmer jedoch ebenfalls nicht statistisch different zu dem der ortsunkundigen Fahrer.

In Bezug auf die Untersuchung der TRS gewinnt die Fahrzeugklasse an weiterer Bedeutung. Sowohl die akustische als auch die schwingungstechnische Wirkung der TRS auf den Fahrer hängen, wie in Kapitel 4.1 und 4.2 dargestellt, in erheblichem Maße vom Fahrzeugaufbau, vom Entwicklungsstand und von der Fahrzeugqualität ab. Neben den grundlegenden Unterschieden im Schwingungssystem von Lkw und Pkw stellen sich die Schwingungsweiterleitung und die Ausprägung der Innenraumakustik in hochklassigen Pkw durch den erhöhten Aufwand im Bereich der Fahrwerksentwicklung und der Fahrzeugdämmung anders dar, als in einem Kleinwagen. Darüber hinaus wird dieser Effekt durch das Baujahr des Fahrzeugs nochmals verstärkt.⁴⁸ Die akustische und haptische Wirkung der Rüttelstreifen kann sich also in einzelnen Fahrzeugtypen unterschiedlich stark entfalten, und somit können sowohl die Erhöhung der Aufmerksamkeit, der Diskomfort als auch die Geschwindigkeitsreduktion in ihrer Ausprägung variieren. Darüber hinaus stellen Fahrzeuge stets einen Indikator für den Fahrertyp dar.

Auf Basis der Videodaten – verknüpft mit den Geschwindigkeitsdaten – wurden die Fahrzeuge in 11 Fahrzeuggruppen eingeteilt. Die Einteilung folgte dabei weniger der offiziell üblichen Schemata wie bspw. der 8+1 Einteilung nach den Technischen Lieferbedingungen von Streckenstationen (TLS), sondern orientierte sich stark an den vorgestellten Fragestellungen. Eine Übersicht über die unterschiedlichen Gruppen sowie deren prozentualen Anteil an den über 36.600 beobachteten Fahrzeugen ist in Bild 79 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die drei Strecken von einem ähnlichen Fahrzeugmix befahren werden. Mit über 40 % dominieren die Mittelklassewagen, gefolgt von den Kleinwagen mit 17 bis 26 %. Der Anteil der landwirtschaftlichen Fahrzeuge, Zweiräder und Sportwagen ist sehr niedrig, so dass diese Fahrzeuggruppen in den weiteren Untersuchungen vernachlässigt werden.

Für die Strecken L 257 und B 399 wurden die nach dem in Kapitel 8.5.1 erzeugten Ganglinien der unbeeinflussten Fahrer differenziert nach dem Fahrzeugtyp analysiert. Da sich belastbare Aussagen nur auf Basis einer ausreichend großen Datenmenge formulieren lassen, erfolgte die Differenzierung nur für die Fahrzeugtypen „Kleinwagen“, „Mittelklassewagen“, „Oberklassewagen“ und „Geländewagen“. Die mittleren Geschwindigkeiten differenziert nach diesen Fahrzeugklassen sind für alle drei Strecken sowohl für den Vorher- als auch für den Nachher-Fall in Bild 80 bis Bild 82 dargestellt.

⁴⁸ Das Baujahr wird hier zwar der Vollständigkeit halber genannt, konnte jedoch auf Basis der Video-beobachtungen nicht ausreichend genau bestimmt werden, so dass auf weitere Analysen zum Baujahr verzichtet wird.

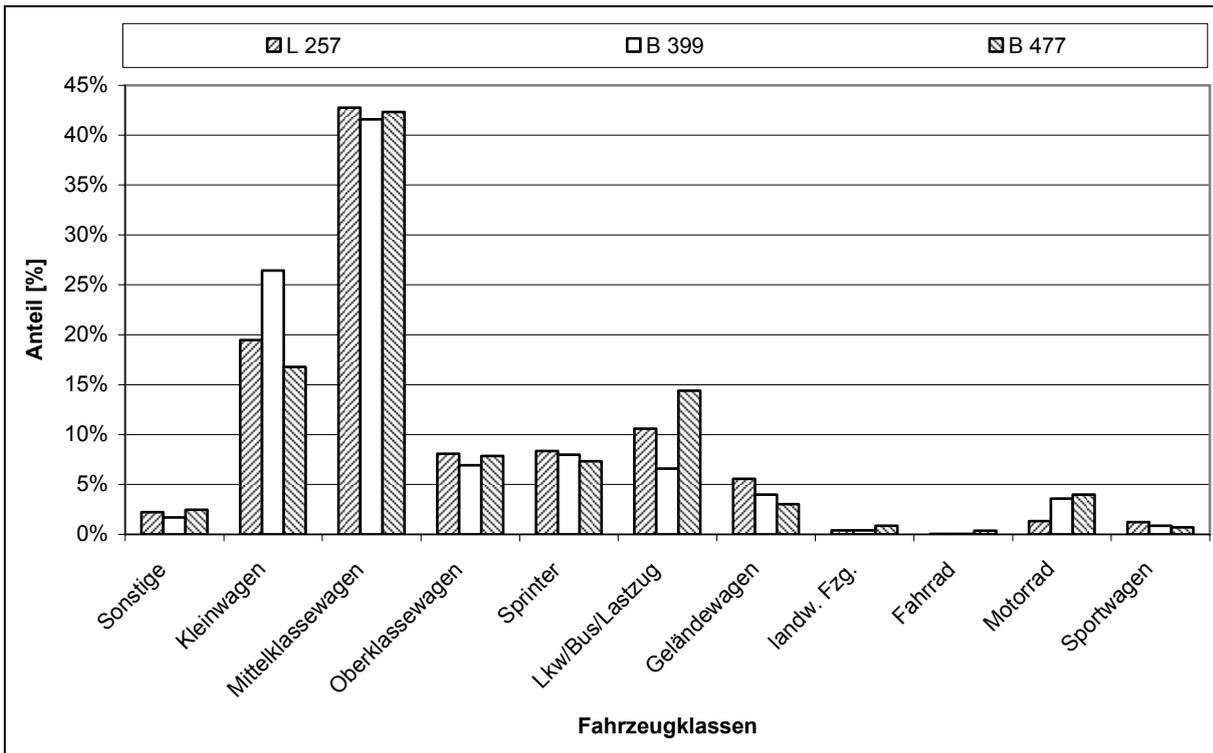


Bild 79 : Anteil der unterschiedlichen Fahrzeugklassen differenziert nach Strecken

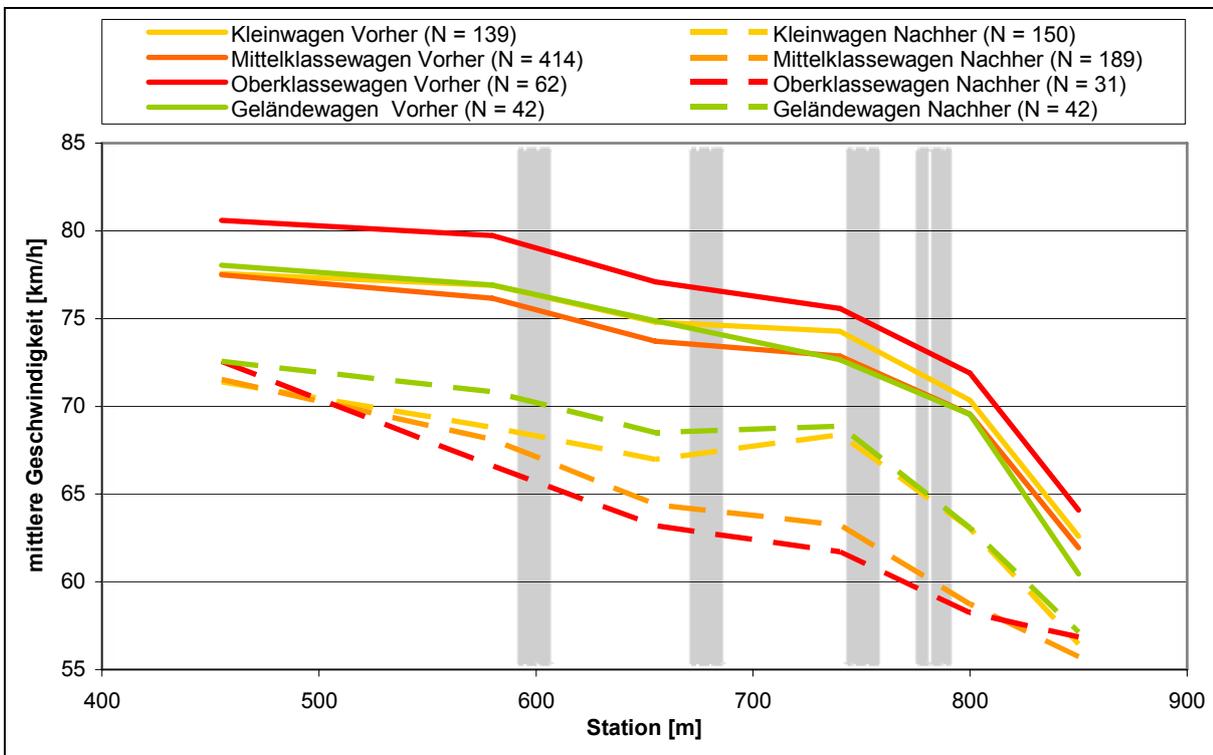


Bild 80: Vergleich der mittleren Geschwindigkeit vor und nach der Installation von TRS auf der L 257 Fahrtrichtung Buir, differenziert nach Fahrzeugklassen

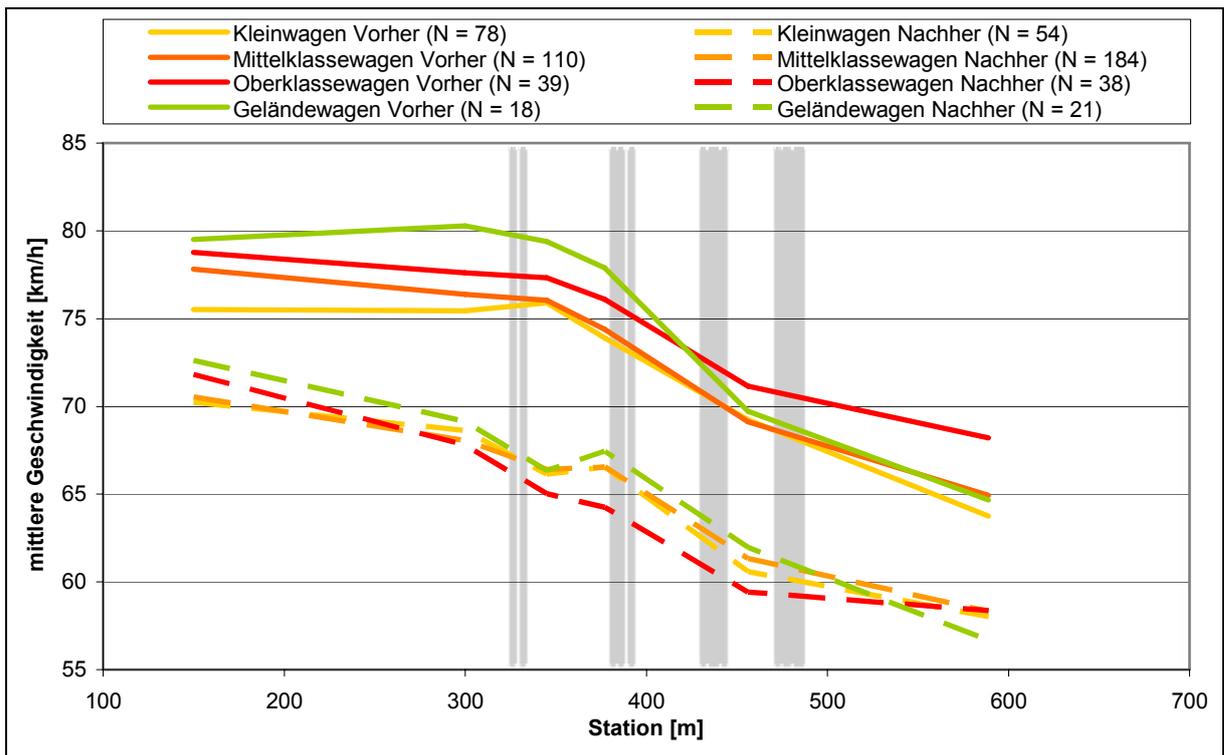


Bild 81: Vergleich der mittleren Geschwindigkeit vor und nach der Installation von TRS auf der L 257 Fahrtrichtung Morschenich, differenziert nach Fahrzeugklassen

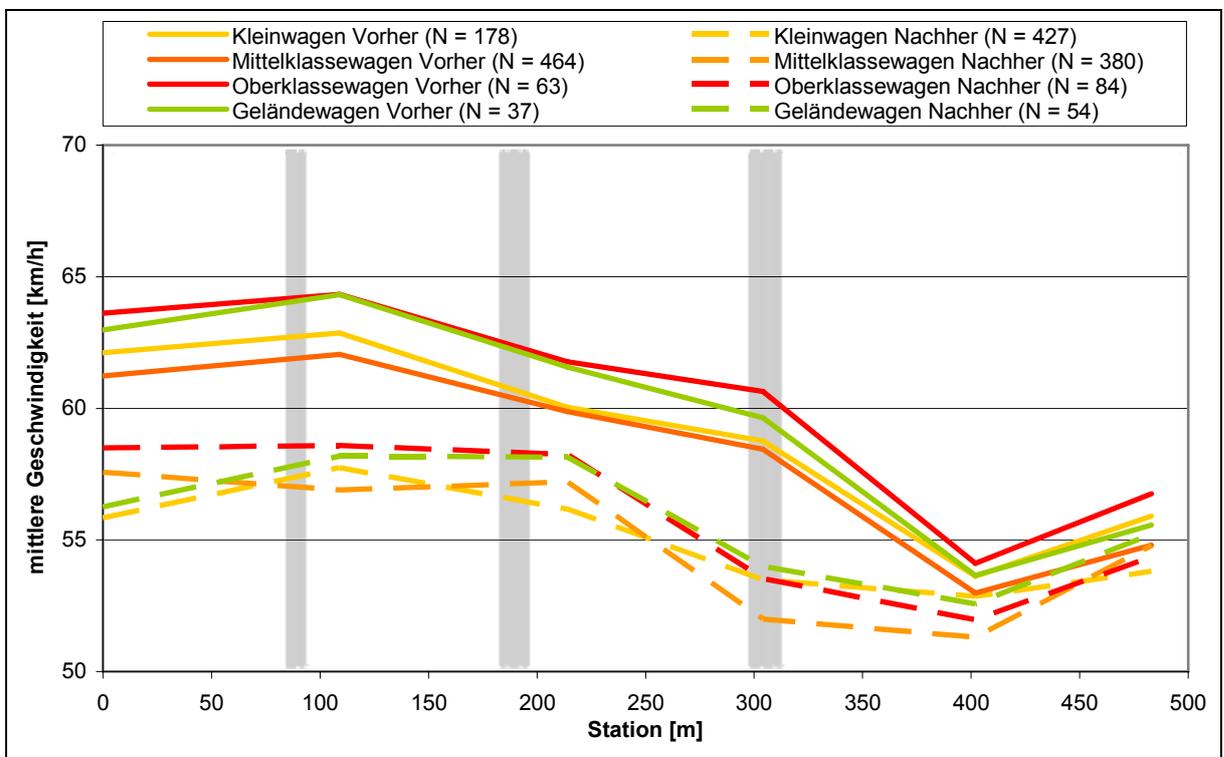


Bild 82: Vergleich der mittleren Geschwindigkeit vor und nach der Installation von TRS auf der B 399, differenziert nach Fahrzeugklassen

Sowohl vor der Installation der TRS als auch bei den Nachher-Messungen sind Unterschiede in den Verläufen der mittleren Geschwindigkeit zu erkennen. Die größten Differenzen betragen je nach Strecke und Messquerschnitt zwischen 2 km/h und 4,8 km/h. Alle drei Strecken wurden vor der Installation der Rüttelstreifen von Oberklassefahrzeugen und Geländewagen im Durchschnitt mit höheren Geschwindigkeiten befahren. Auf Grund der stärkeren Wirkung der TRS auf die Fahrer von Kleinwagen wurde erwartet, dass diese Gruppe nach der TRS-Installation die niedrigsten Geschwindigkeiten fährt. Diese Vermutung konnte durch die Analysen jedoch nicht bestätigt werden. Auf der B 399 fuhren im Nachher-Zeitraum die Oberklassefahrzeuge und die Geländewagen die höchsten Geschwindigkeiten, während die Mittelklassefahrzeuge die niedrigsten Geschwindigkeitsbereiche belegten. Auf der L 257 ergaben die Analysen gegensätzliche Ergebnisse. Während auch hier die Klasse der Geländewagen im Mittel weiterhin die höchsten Geschwindigkeiten fuhr, scheinen die TRS auf die Fahrer der Mittel- und Oberklassewagen die höchste Wirkung zu entfalten.

Am stärksten stellten sich die Unterschiede zwischen den Fahrzeugklassen nach der Installation der TRS auf der Strecke L 257, Fahrtrichtung Buir, dar. Hier wurden vor der Kurve in Station 740 die größten Differenzen der mittleren Geschwindigkeit zwischen Geländewagen und Oberklassewagen mit über 7 km/h gemessen. Auf den anderen Strecken lagen die maximalen Unterschiede der mittleren Geschwindigkeit je nach Messquerschnitt zwischen 2,5 km/h und 3,2 km/h. Des Weiteren wurden die Geschwindigkeitsänderungen durch die Rüttelstreifen für die drei betrachteten Strecken differenziert nach Fahrzeugklassen analysiert. Wie in Bild 83 bis Bild 85 zu erkennen ist, stellen sich die Ergebnisse der L 257 auch hier anders dar, als die der Strecke B 399. Dies ist wahrscheinlich, wie bereits im Kapitel 8.3.3.2 beschrieben, auf die besondere Streckencharakteristik der B 399 zurückzuführen. Durch die hohe Kurvigkeit und die extrem niedrigen Sichtweiten sowie die niedrige zulässige Höchstgeschwindigkeit wird das Fahrerverhalten derart stark beeinflusst, dass die freie Geschwindigkeitswahl extrem eingeschränkt ist. Die TRS entfalten hier ihre niedrigste Wirkung. Der Geschwindigkeitsrückgang war auf der B 399 für alle betrachteten Fahrzeugklassen in etwa gleich groß und differierte im Bereich der TRS und der Kurve lediglich um bis zu 2 km/h. Auf der L 257 wurde dagegen deutlich, dass sich die durchschnittliche Geschwindigkeitsreduktion der einzelnen Fahrzeugklassen unterscheidet.

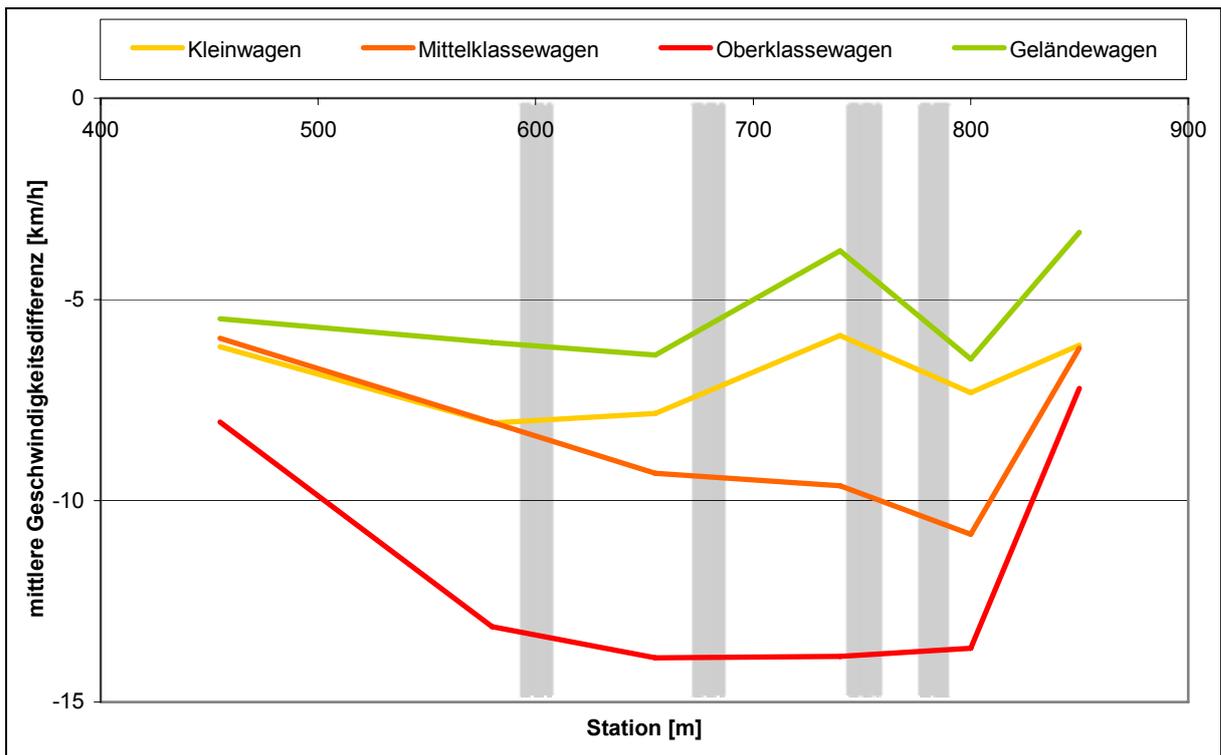


Bild 83: Vergleich der mittleren Geschwindigkeitsdifferenz vor und nach der Installation von TRS auf der L 257 Fahrtrichtung Buir, differenziert nach Fahrzeugklassen

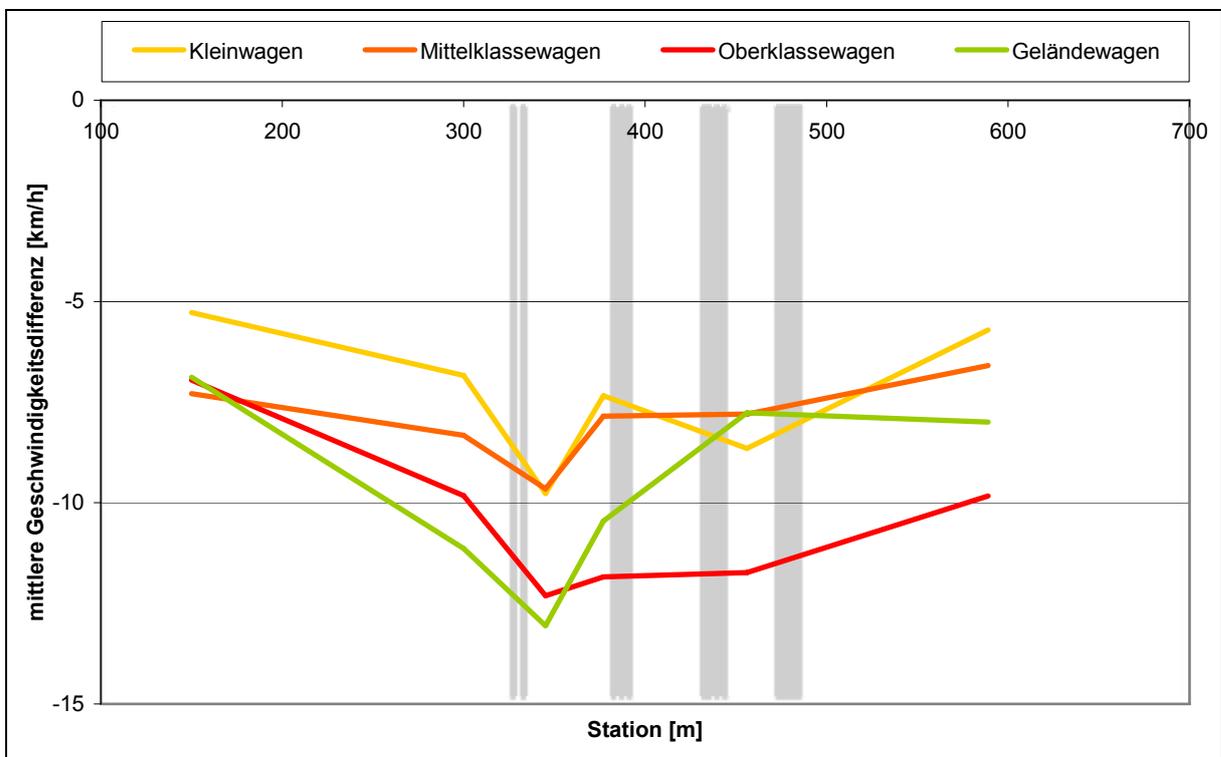


Bild 84: Vergleich der mittleren Geschwindigkeitsdifferenz vor und nach der Installation von TRS auf der L 257 Fahrtrichtung Morschenich, differenziert nach Fahrzeugklassen

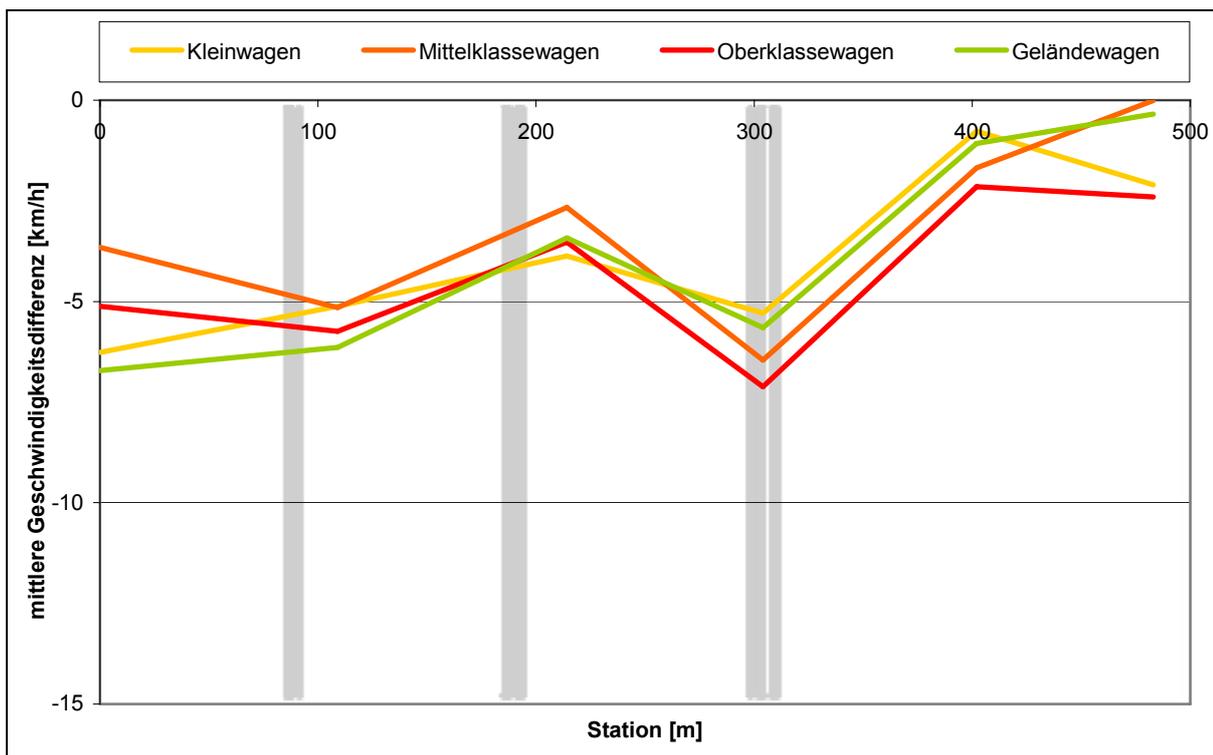


Bild 85: Vergleich der mittleren Geschwindigkeitsdifferenz vor und nach der Installation von TRS auf der B 399, differenziert nach Fahrzeugklassen

Während in Fahrtrichtung Buir in der Klasse der Geländewagen die niedrigsten Geschwindigkeitsrückgänge zu verzeichnen sind, nimmt die mittlere Geschwindigkeit in der Gegenrichtung im Annäherungsbereich am stärksten ab. Die Oberklassewagen reduzierten ihre Geschwindigkeit auf alle drei Strecken am stärksten – auf der L 257 Fahrtrichtung Buir im Mittel sogar um bis zu 14 km/h. Die Geschwindigkeitsreduktionen der Mittel- und Kleinwagen lagen auf der L 257 in Fahrtrichtung Morschenich in ähnlichen Größenordnungen, und unterschieden sich in Fahrtrichtung Buir ab dem ersten Rüttelstreifenpaket. Visuell entsprechen die Resultate der Arbeit von VOLKENHOFF (2008), der das Spurhalteverhalten in Kurven differenziert nach Fahrzeugklassen analysiert. VOLKENHOFF (2008) konnte statistisch signifikante Unterschiede im Spurhalteverhalten von Klein-, Mittelklasse-, Oberklasse- und Geländewagen nachweisen. Das Geschwindigkeitsverhalten der einzelnen Klassen im Annäherungsbereich von gefährlichen Landstraßenkurven ergab dahingegen nach VOLKENHOFF (2008) keine eindeutig signifikanten Unterschiede.

Der Vergleich der Geschwindigkeiten und der Geschwindigkeitsänderung durch die TRS widerspricht in mancher Hinsicht den Erwartungen. Auf Grund der theoretischen Grundlagen aus Kapitel 4 wurde davon ausgegangen, dass Oberklassefahrzeuge und Geländewagen die geringste akustische und haptische Wirkung zum Fahrzeugführer weiterleiten. Die psychologischen Grundlagen aus Kapitel 3 haben gezeigt, dass diese Reize jedoch einen entscheidenden Einfluss auf die Geschwindigkeits-

wahrnehmung der Fahrer haben. Diese Erkenntnisse führten zu der Annahme, dass mit den TRS ein geringerer Einfluss auf das Geschwindigkeitsverhalten der Fahrer der stark entkoppelten und gut gedämmten Fahrzeuge der Oberklasse und der Klasse der Geländewagen genommen werden kann. Eine mögliche Erklärung liegt in der höheren Motorisierung der Oberklassewagen. Während Kleinwagenbesitzer versuchen, das geringe Beschleunigungsvermögen ihres Fahrzeugs zu kompensieren, indem sie die Geschwindigkeit länger auf einem hohen Niveau halten, können die Fahrer der Oberklassefahrzeuge auf Grund der höheren Motorisierung flexibler auf Einflüsse aus der Streckengeometrie oder bspw. Rüttelstreifen reagieren. In Bild 80 und Bild 83 ist deutlich zu erkennen, dass die Oberklassefahrzeuge nach dem Durchfahren der Rüttelstrecke noch in der Kurve ihre Geschwindigkeit deutlich erhöhen, also aus der Kurve heraus beschleunigen und so versuchen, ihre angestrebte Streckengeschwindigkeit wieder herzustellen.

Analog zu den Analysen des Geschwindigkeitsverhaltens differenziert nach Ortskundigkeit (vgl. Kapitel 8.5.3) wurden die Geschwindigkeitsverteilungen differenziert nach Fahrzeugklasse mit Hilfe des KS-Tests statistisch analysiert. Dabei wurde untersucht, ob sich die Geschwindigkeitsverteilung der Mittelklassewagen (als am stärksten vertretene Gruppe) von den Verteilungen der übrigen Fahrzeugklassen unterscheidet. Auch wenn die Verläufe nach Bild 80 bis Bild 85 deutliche Unterschiede zwischen dem Geschwindigkeitsverhalten der einzelnen Fahrzeugklassen aufzeigen, ergaben die statistischen Analysen kein einheitliches Bild (vgl. Anhang J). Von den 198 Kreuzvergleichen erwiesen sich auf einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$ lediglich 27 Geschwindigkeitsverteilungen als signifikant unterschiedlich. Es bleibt jedoch offen, ob die dargestellten Unterschiede im Geschwindigkeitsverhalten der unterschiedlichen Fahrzeugklassen zufälliger Natur sind, oder ob der Stichprobenumfang zu niedrig war, um systematische von zufälligen Effekten statistisch abzugrenzen.

8.5.5 Analyse der Geschwindigkeitsänderung einzelner Fahrer

In den vorangegangenen Kapiteln konnte gezeigt werden, dass die TRS eine geschwindigkeitsreduzierende Wirkung haben und dass – zumindest tendenziell – ein Zusammenhang zwischen dieser Wirkung und der Fahrzeugklasse besteht. Sowohl in dieser, als auch in anderen Arbeiten erfolgte bis dato eine Wirkungsanalyse auf Basis der Gegenüberstellung von Geschwindigkeitsverteilungen, also einer globalen Betrachtung. Inwiefern sich einzelne Verkehrsteilnehmer durch die jeweilige Maßnahme beeinflussen lassen wurde bisher nicht aufgezeigt. Die vorliegende Datenbasis von Geschwindigkeitslinien, die mit Kennzeichen verknüpft wurden ermöglicht eine direkte Gegenüberstellung der Geschwindigkeitsänderung einzelner Fahrer. Auf diese Weise lässt sich zeigen, ob der allgemeine Geschwindigkeitsrückgang durch

eine kleine Reduktion der Geschwindigkeit aller Fahrer erfolgte, oder ob es bestimmte Fahrergruppen gibt, die durch die TRS in besonderem Maße angesprochen werden. Beispielhaft wurden auf der Strecke L 257 die Geschwindigkeiten von Fahrern gegenübergestellt, die sowohl vor als auch nach der Installation der TRS messtechnisch erfasst wurden und zu denen eine vollständige Ganglinie über den Untersuchungsraum vorliegt. Das Ergebnis dieser Gegenüberstellung ist für beide Fahrtrichtungen jeweils für einen Messquerschnitt zwischen dem letzten Rüttelstreifenpaket und der Kurve in Bild 86 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Geschwindigkeit der betrachteten Fahrzeuge im Allgemeinen durch die Installation der TRS sinkt. Fahrzeuge, die vor der Installation mit niedrigen und mittleren Geschwindigkeiten auf der Untersuchungsstrecke fahren, befahren diese nach der Installation ebenfalls mit niedrigen bis gleich hohen Geschwindigkeiten. Lediglich vereinzelt wurden bei den Nachher-Messungen höhere Geschwindigkeiten verzeichnet als vorher. Bei den Fahrern, die im Vorher-Fall hohe Geschwindigkeiten fahren, das heißt die zulässige Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h um mehr als 10 km/h überschritten, trat bis auf zwei Ausnahmen eine Geschwindigkeitsreduktion um mehrere km/h ein.

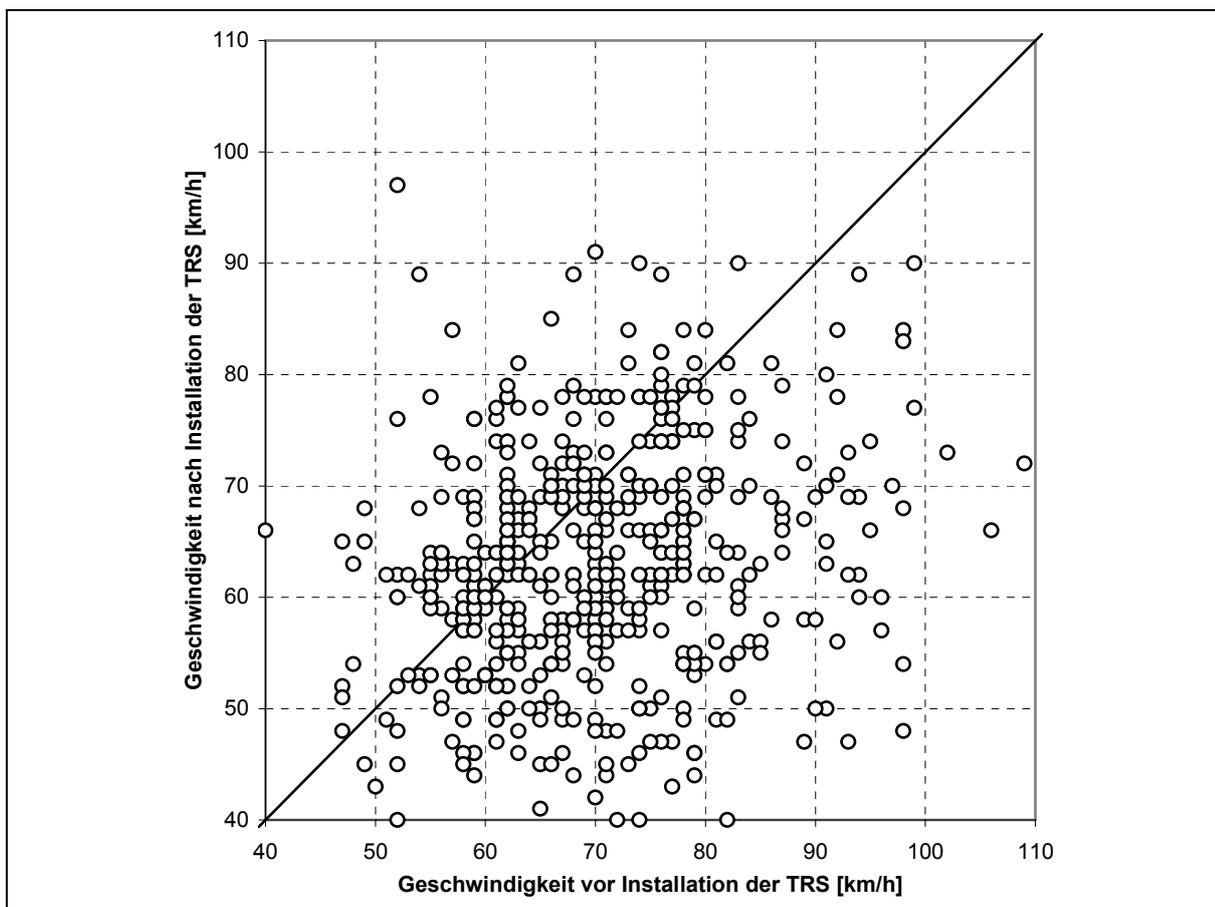


Bild 86: Gegenüberstellung der Geschwindigkeit von Einzelfahrzeugdaten vor und nach Installation der TRS auf der Strecke L 257 zwischen letztem Rüttelstreifenpaket und Kurve

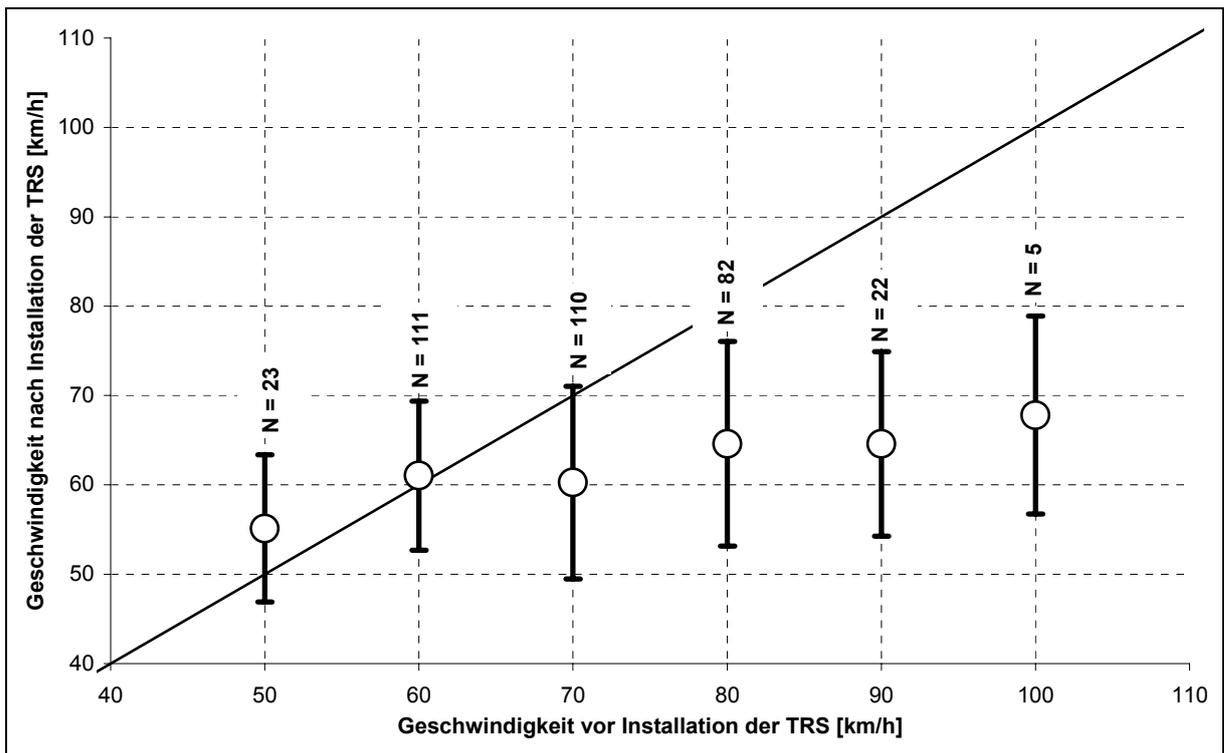


Bild 87: Gegenüberstellung der Geschwindigkeiten einzelner Fahrzeuge Vor und nach Installation der TRS auf der L 257 Fahrtrichtung Buir am 5. Messquerschnitt (Station 740)

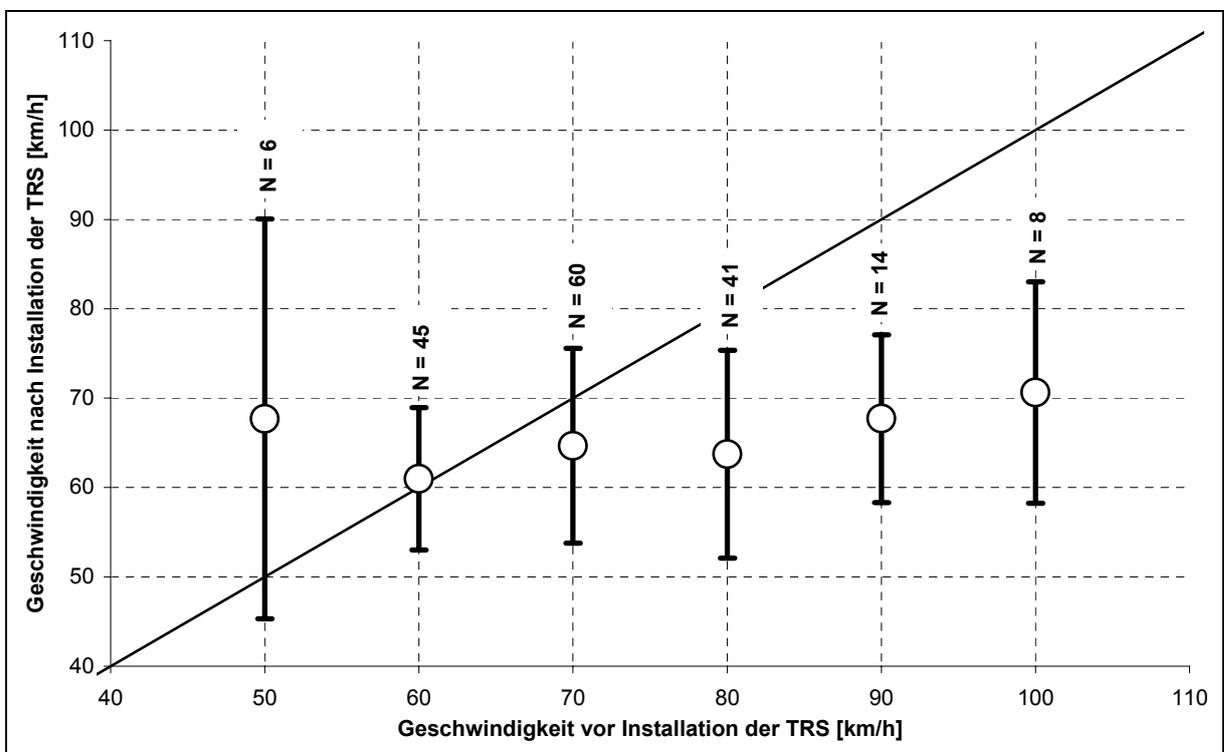


Bild 88: Gegenüberstellung der Geschwindigkeiten einzelner Fahrzeuge vor und nach Installation der TRS auf der L 257 Fahrtrichtung Morschenich am 5. Messquerschnitt (Station 377)

Noch deutlicher wird dieser Sachverhalt durch eine Aggregation der Einzeldaten. Hierzu wurden die Einzelfahrzeugdaten der Vorher-Messungen in Klassen mit einer

breite von 10 km/h eingeteilt. Die Geschwindigkeitsdaten der Nachher-Messung wurden über Mittelwertbildung zusammengefasst. Die Standardabweichung gibt zusätzlich Aufschluss über die Streuung der Einzeldaten. Wie in Bild 87 und Bild 88 dargestellt, wird durch diese Datenzusammenfassung noch deutlicher, dass Fahrer, die die Strecken vor der Installation der TRS mit hohen Geschwindigkeiten befuhren, ihre Geschwindigkeit nachher deutlich senkten. Dieses Ergebnis ist zwar auf Grund der geringen Fallzahlen nicht statistisch zu belegen, bestätigt jedoch die Ergebnisse der allgemeinen verkehrstechnischen Analysen aus Kapitel 8.3 und Kapitel 8.4.

8.6 Unfallgeschehen

Auch wenn der Schwerpunkt dieser Arbeit in der Untersuchung der Wirkung von Schwingung und Akustik auf die Geschwindigkeitswahl liegt, so stellt das eigentliche Ziel der Beeinflussung der Verkehrsteilnehmer durch die TRS eine Erhöhung der Verkehrssicherheit dar, die sich durch zwei Größen beschreiben lässt: Zum einen die tatsächliche Reduktion von Unfällen und zum anderen die Reduktion von kritischen Situationen, also von Beinaheunfällen. Letzteres ist verkehrstechnisch äußerst schwer nachzuweisen, so dass oft der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeitsreduktion und Erhöhung der Verkehrssicherheit als Bewertungskriterium herangezogen wird. Die Status-quo-Analyse (vgl. Kapitel 2) hat ergeben, dass die Wirksamkeitsbewertung von Rüttelstreifen in den meisten Fällen auf Geschwindigkeitsanalysen und nur selten auf Unfallanalysen basiert.

In Deutschland ist lediglich eine statistisch abgesicherte Unfallanalyse als Basis der Ausführungsvariante von Rüttelstrecken nach MVMOT (2007) bekannt. Auf der untersuchten B 514 konnte ein deutlicher Unfallrückgang verzeichnet werden – die Anzahl der Unfälle in den Kategorien 1 bis 3 wurde um ca. 75 % und in den Kategorien 4 bis 6 um ca. 65 % reduziert.

In England wurden durch WEBSTER/LAVFIELD (1993) Unfallanalysen an 11 Strecken vorgenommen. Durch die Installation von Rüttelstreifen wurde ein durchschnittlicher Rückgang der Personenschäden um 27 % erreicht. Bei einer älteren Studie von SUMNER/SHIPPEY (1977) lag der Effekt von Rüttelstreifen auf die Reduktion von Unfällen mit 39 % noch höher. Der Schwerpunkt der in den USA durchgeführten Unfallanalysen lag auf der Wirkung von TRS vor signalisierten und unsignalisierten Kreuzungen und Einmündungen. Bspw. konnte MOORE (1987) einen leichten Rückgang der Unfallzahlen beobachten. Insbesondere Unfälle bei schlechten Sichtverhältnissen konnten stark reduziert werden (Nachtunfälle um 50 % und Schlechtwetterunfälle um 35 %). Nach FREEMAN et al. (2008) ist eine Reduktion bestimmter Unfalltypen an unsignalisierten Kreuzungen von bis zu 50 % und nach BAZZARI (2006)

um 60 % möglich. In einzelnen Bundesstaaten werden Erwartungswerte hinsichtlich der Unfallreduktion (so genannter *Crash Reduction Factor* - *CRF*) formuliert. Diese liegen in der Größenordnung von 25 % bis 30 %.

Die Untersuchungsstrecken der vorliegenden Arbeit wurden auf Grund des Unfallgeschehens ausgewählt. Bei allen drei Landstraßenkurven handelte es sich um unfallauffällige Bereiche. Ziel war es, neben den Analysen zum Geschwindigkeitsverhalten und zum allgemeinen Fahrerverhalten, Aussagen zur unfalldämpfenden Wirkung der TRS zu formulieren. Für alle drei Strecken lagen die Unfalldaten von drei Jahren vor Installation der TRS vor (vgl. Tab. 20), die mit den Nachher-Zeiträumen verglichen werden sollten.

Strecken	Anzahl Unfälle	Getötete	Schwer-verletzte	Leicht-verletzte
L 257	6	1	5	1
B 399	13	-	2	5
B 477	7	-	4	7

Tab. 20: Unfallzahlen der Kategorie 1 bis 4 vor Installation der TRS (Zeitraum: 36 Monate)

Auf Grund von Anwohnerbeschwerden mussten die TRS auf zwei der drei Untersuchungsstrecken nach Abschluss der verkehrstechnischen Untersuchung zurückgebaut werden (vgl. Kapitel 9.2). Aus diesem Grund lagen für diese Strecken keine ausreichend langen Nachher-Zeiträume vor, so dass statistisch abgesicherte Aussagen zum Unfallgeschehen nicht möglich sind. Die Entwicklung des Unfallgeschehens soll im Folgenden jedoch qualitativ vorgestellt werden.

Auf der L 257 lag mit 25 Monaten der längste Nachher-Zeitraum vor. In dieser Zeit ereigneten sich in der betrachteten Kurve lediglich ein Unfall mit Personenschaden (1 Leichtverletzter) und ein schwerwiegender Unfall mit Sachschaden. Die Unfallanzahl reduzierte sich demnach um 50 % und die Anzahl der Personenschäden um 80 %.

Auf der B 399 lag im Vorher-Zeitraum das größte Unfallgeschehen vor. Neben den 13 Unfällen der Kategorie 1 bis 4 ereigneten sich 21 Unfälle der Kategorie 5 (Sonstiger Sachschadensunfall) in der betrachteten Kurve. Da die Rüttelstreifen auf dieser Strecke jedoch lediglich 2 Monate zum Einsatz kamen, können zur Änderung des Unfallgeschehens keinerlei Aussagen gemacht werden.

Auf der B 477 wurden die TRS nach einem Zeitraum von 6 Monaten wieder entfernt. In dieser Zeit ereigneten sich keine Unfälle auf dem Untersuchungsabschnitt. Auch dieser Zeitraum stellt sich als zu kurz für belastbare Aussagen dar.

Auch wenn die vorliegenden Zahlen lediglich als Tendenz zu werten sind, korrespondieren sie mit anderer Studien. Zur statistischen Absicherung müssten sowohl mehrere Strecken, als auch längere Unfallzeiträume betrachtet werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

8.7 Zusammenfassung der verkehrstechnischen Wirkungsanalysen

Aufbauend auf den Ergebnissen der messtechnischen Voruntersuchung (vgl. Kapitel 7) wurde die Wirkung der TRS auf die Verkehrsteilnehmer in situ untersucht. Hierzu wurden drei unfallträchtige Landstraßenkurven im Kreis Düren ausgewählt und in deren Annäherungsbereichen Rüttelstreifen aufgebracht.

Die verkehrstechnische Untersuchung der Wirkung von TRS auf die Verkehrsteilnehmer erfolgte in mehreren Stufen mit steigendem Detaillierungsgrad. Zunächst wurde das Geschwindigkeitsverhalten aller Fahrer vor und nach der Installation von Rüttelstreifen direkt miteinander verglichen (vgl. Kapitel 8.3). Auf allen drei Strecken ergaben sich Reduktionen der Geschwindigkeit sowohl im Bereich der TRS als auch der Kurve. Die v_{85} sank durch die Maßnahme je nach Strecke und Messquerschnitt um 6 km/h bis zu 21 km/h. Im Bereich der Fahrer mit hohen Geschwindigkeiten wird durch die TRS ebenfalls eine deutliche Wirkung beobachtet. Die v_{95} sinkt im Bereich der TRS im Mittel um 4 km/h bis 14 km/h. Bezogen auf die Fahrer, die die zulässige Höchstgeschwindigkeit überschreiten konnte durch die TRS sowohl der Anteil, als auch die durchschnittliche Geschwindigkeit gesenkt werden.

Zur besseren Abgrenzung dieser Wirkung wurde analog das Geschwindigkeitsverhalten der unbeeinflussten Fahrer vor und nach der Maßnahme verglichen (vgl. Kapitel 8.4). Es ist davon auszugehen, dass Fahrer, die über ausreichende Abstände (hier in Form von Zeitlücken ermittelt) zum vorausfahrenden (8 Sekunden) und nachfolgenden (4 Sekunden) Fahrzeug verfügen, nicht durch deren Fahrweise beeinflusst werden, ihre Geschwindigkeit demnach ausschließlich anhand der eigenen Streckenwahrnehmung und des eigenen Risikoverhaltens wählen. Durch die Analysen konnte bei diesem Teilkollektiv ebenfalls eine deutliche Geschwindigkeitsreduktion beobachtet werden, die sich jedoch analog zur Analyse des Gesamtkollektivs je nach Streckencharakteristik unterschiedlich ausgeprägt darstellt. Die Reduktion der v_{95} liegt im Bereich von 5 km/h bis 11 km/h. Die Geschwindigkeitsverteilungen vor und

nach der Installation der TRS sind auf allen Strecken in allen Querschnitten statistisch signifikant unterschiedlich. Zusammenfassend lässt sich die Änderung der Geschwindigkeit durch die Reduktion auf die unbeeinflussten Fahrer eindeutig auf die Rüttelstreifen zurückführen und bestätigt sich in ihrer Ausprägung.

Zusätzlich zur Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens wurde das allgemeine Fahrerverhalten videoteknisch erhoben und analysiert (vgl. Kapitel 8.3.3.3). Bei der Betrachtung des Spurhalteverhaltens innerhalb der Linkskurve auf der L 257 konnte analog zum Geschwindigkeitsverhalten eine Wirkung durch die TRS nachgewiesen werden. Das Spurhalteverhalten wurde zur Analyse in Klassen (extremes Schneiden, starkes Schneiden, moderates Schneiden, und Normalverhalten) eingeteilt. Während vor der Maßnahme ca. 50 % der Fahrer die Kurve unter Mitnutzung der Gegenspur durchfahren, also zum Kurvenschneiden neigten, reduzierte sich dieser Anteil nach der Installation der TRS auf unter 40 %. Insbesondere der Anteil der Fahrer, die zu extremem Kurvenschneiden neigen, wurde durch die Maßnahme halbiert.

Durch die Applikation der Rüttelstreifen auf nur einer Fahrspur ist es den Fahrern möglich, sie unter Nutzung der Gegenspur zu umfahren. Auf Basis der Videodaten wurde analysiert, wie hoch sich der Anteil der Fahrer, die auf diese Weise dem Diskomfort ausweichen, darstellt. Je nach Strecke wurden zwischen 3 % und 12 % der Fahrer dabei beobachtet, wie sie die TRS umfahren. Der Umfahreranteil ist dabei stark korrelativ mit der Verkehrsstärke und der Sichtweite der jeweiligen Strecke. Je größer die Sichtweite und je niedriger die Verkehrsstärke – insbesondere des Gegenverkehrs – desto höher der Anteil der Fahrer, die zum Umfahren der TRS neigen. Derartiges kontrolliertes Ausweichen der TRS wird analog zu Überholvorgängen bewertet und bei ausreichenden Zeitlücken zum Gegenverkehr als unkritisch angesehen. Auf keiner der Strecken konnten nach abgeschlossenem Ausweichmanöver Zeitlücken zwischen einem entgegenkommenden Verkehrsteilnehmer und dem Ausweicher unter drei Sekunden beobachtet werden. Das Umfahren der TRS stellte bei der verkehrstechnischen Analyse das einzige beobachtete unerwünschte Fahrerverhalten dar. Plötzliche Bremsmanöver oder Irritationen durch die TRS wurden auf keiner der Strecken beobachtet.

Im Hinblick auf Erkenntnisse zum Fahrerverhalten spezieller Fahrergruppen wurden die Messdaten der einzelnen Querschnitte durch einen wahrscheinlichkeitsbasierten Zuordnungsalgorithmus zu Ganglinien verknüpft und durch die Zuordnung von Videobildern durch Metadaten ergänzt (vgl. Kapitel 8.5.1). Die erweiterten Daten wurden detaillierten Analysen unterzogen. Im Fokus dieser Einzelfahrzeuganalyse standen Erkenntnisse zum Geschwindigkeitsverhalten von ortskundigen bzw. ortsunkundigen Fahrern (vgl. Kapitel 8.5.3) sowie die unterschiedliche Wirkungsweise von TRS

in Abhängigkeit der Fahrzeugklasse (8.5.4). Sowohl in Abhängigkeit der Ortskundigkeit als auch der Fahrzeugklasse konnten vor und nach der Installation der TRS deutliche Schichtungen des Geschwindigkeitsverhalten beobachtet werden. Bspw. fuhren ortskundige Fahrer im Mittel 3 km/h langsamer als ortsunkundige Fahrer. Das Geschwindigkeitsverhalten von Kleinwagenfahrern und Oberklasse- bzw. Geländewagenfahrern unterscheidet sich vor der Installation der TRS ebenfalls um mehrere km/h. Die einzelnen Fahrzeugklassen werden in unterschiedlichem Maße durch die TRS beeinflusst. Auf der L 257 konnte bspw. beobachtet werden, dass die Oberklassefahrzeuge die größten Geschwindigkeitsreduktionen vollziehen, während die Kleinwagen durch die TRS am wenigsten in ihrem Geschwindigkeitsverhalten beeinflusst werden. Auch wenn sich sowohl im Hinblick auf die Ortskundigkeit als auch auf die Fahrzeugklasse deutliche Unterschiede im Geschwindigkeitsverhalten gezeigt haben, ergaben die statistischen Analysen, dass sich diese Unterschiede nicht als signifikant darstellen ($\alpha=0,05$). Ob das Fahrerverhalten tatsächlich nur zufällig differiert oder der Stichprobenumfang zu niedrig gewählt wurde, um die Effekte statistisch klar abzugrenzen, bleibt offen, bestätigt jedoch die Vermutung von VOLKENHOFF (2008): *„Da sowohl bei der Betrachtung der Ortskundigkeit als auch der Fahrzeugklasse Tendenzen zu erkennen sind, die statistisch nicht signifikant sind, wird daraus geschlossen, dass diese Parameter durchaus einen Einfluss auf das Fahrerverhalten haben könnten. Diese scheinen jedoch durch die Vielzahl weiterer verhaltensbestimmender Parameter überlagert zu sein, was einen statistischen Nachweis erheblich erschwert.“*

In einem letzten Schritt wurden die – durch Kennzeichenidentifikation – eindeutig als identisch festgestellten Fahrzeuge vor und nach der Installation der TRS im Hinblick auf ihr Geschwindigkeitsverhalten einander direkt gegenübergestellt (vgl. Kapitel 8.5.5). Ziel dieser kleinteiligen Analyse war die Klärung der Frage, ob die TRS vorrangig auf schnelle Fahrer wirken oder auf Fahrer aller Geschwindigkeitsgruppen. Es konnte gezeigt werden, dass insbesondere Fahrer mit hohen Ausgangsgeschwindigkeiten diese durch die TRS deutlich senkten, während Fahrer mit niedrigen Ausgangsgeschwindigkeiten diese nahezu beibehielten.

Zusammenfassend ergeben die verkehrstechnischen Analysen deutlich positive Effekte auf das Geschwindigkeits- und das allgemeine Fahrerverhalten insbesondere der „Schnellfahrer“. Verkehrstechnisch scheinen Rüttelstreifen ein geeignetes Mittel darzustellen, die Geschwindigkeit positiv zu beeinflussen und so einen aktiven Beitrag zur Erhöhung der Verkehrssicherheit zu leisten. Eine direkte Wirkung auf das Unfallgeschehen konnte lediglich qualitativ aufgezeigt werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.

9 Untersuchung der Akzeptanz

Im Kapitel 8 wurde das Geschwindigkeitsverhalten und die Wirkung der Rüttelstreifen auf die Geschwindigkeit ausführlich und detailliert analysiert. Die Grundidee der verkehrstechnischen Wirkungsanalyse basiert auf der Annahme, dass sich die Wirkung der TRS vorrangig im Hinblick auf die Geschwindigkeitswahl der Fahrer zeigt. Neben dieser rein objektiven, messtechnischen Untersuchung wurden ergänzende Daten erhoben. Auf allen Strecken wurden nach der Applikation der TRS Befragungen sowohl der Verkehrsteilnehmer als auch der Anwohner durchgeführt. Die Fahrerbefragung lässt erweiterte Erkenntnisse zum Risikoverhalten und zur subjektiv wahrgenommenen Wirkung der TRS erwarten. Die Befragung der Anwohner erfolgt unter Rückgriff auf die Ergebnisse anderer Studien (vgl. Kapitel 2) zur teilweise ablehnenden Haltung gegenüber den TRS und insbesondere der Lärmemission durch die Rüttelstreifen. Sowohl die Daten der Fahrerbefragung als auch der Anwohnerbefragung werden zur Verifikation mit messtechnischen Daten verknüpft.

9.1 Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer

Die Akzeptanz und subjektive Selbsteinschätzung der Verkehrsteilnehmer wurde an allen Strecken mittels Befragungen erhoben. Im Nachlauf der Untersuchungsstrecken wurden zu diesem Zweck nach der Applikation der TRS über mehrere Stunden Verkehrsteilnehmer mit Unterstützung der Verkehrspolizei angehalten. Auf freiwilliger Basis wurden allgemeine statistische Daten und subjektive Einschätzungen erhoben. Die Datenbasis beläuft sich in der Summe auf 367 Befragte.

In Bild 91 links wird die Altersstruktur innerhalb der Gruppe aller Befragter mit der demographischen Struktur eines äquivalenten Kollektivs der deutschen Bevölkerung im Jahre 2006 verglichen. In weiten Teilen ist die Verteilung ähnlich, lediglich die Gruppe der 40 bis 55-jährigen ist leicht überproportional stark vertreten. Die Anteile der unter 40-jährigen sind hingegen unterrepräsentiert. In der Summe ist das Kollektiv der Probanden hinsichtlich der Altersstruktur als hinreichend repräsentativ anzusehen. Im Gegensatz dazu ist die geschlechtsspezifische Verteilung innerhalb der Probandengruppe weniger repräsentativ (siehe Bild 91 rechts). Es ist eine eindeutige Schiefe hin zur männlichen Personengruppe zu erkennen. Im Mittel waren über zwei Drittel der Befragten männlich und lediglich unter einem Drittel weiblich.

Neben den demographischen Daten wurden weitere allgemeine Daten zur Beschreibung der Befragten erhoben. Eine wesentliche Kenngröße stellt die jährliche Fahrleistung dar, mit der zwischen erfahrenen und unerfahrenen Verkehrsteilnehmern differenziert wird. Zur Abgrenzung möglicher Fehleinflüsse durch ungewohnte Fahr-

zeuge wurde unterschieden zwischen Fahrleistung pro Jahr gesamt (inkl. Motorrad, Pkw, Lkw, unabhängig davon, ob es sich um ein Privat- oder um ein Firmenfahrzeug handelt) und Fahrleistung pro Jahr mit dem Fahrzeug, mit dem der Fahrer zum Zeitpunkt der Befragung unterwegs ist. Diese Unterscheidung wird insbesondere bei der Zuordnung der subjektiven Daten der Befragung mit dem tatsächlichen Geschwindigkeitsverhalten berücksichtigt.

Hinsichtlich der jährlichen Fahrleistung sowohl in der Summe als auch mit dem Fahrzeug, das zum Zeitpunkt der Befragung gefahren wurde (vgl. Bild 90), ist eine relativ homogene Verteilung zwischen 0 und 100.000 km/Jahr festzustellen. Die Jahreskilometerleistungen zwischen 30.000 und 50.000 km/Jahr sind dabei mit 20 % am Gesamtkollektiv am stärksten vertreten.

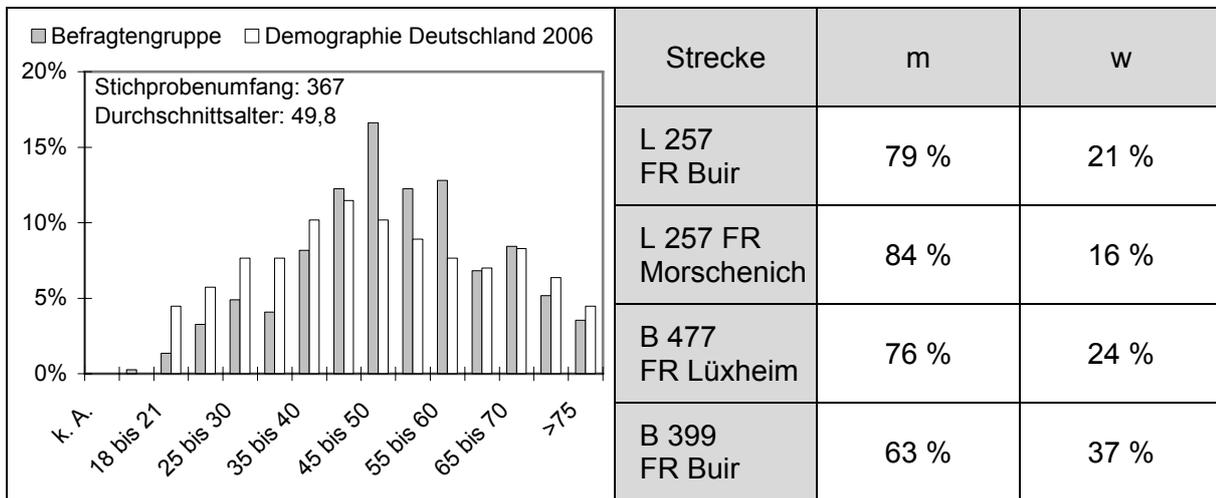


Bild 89: Altersverteilung der Befragten in Relation zur demographischen Struktur Deutschlands im Jahre 2006 nach DESTATIS (2007) (links) und Verteilung des Geschlechts innerhalb der Befragtengruppe differenziert nach Strecke

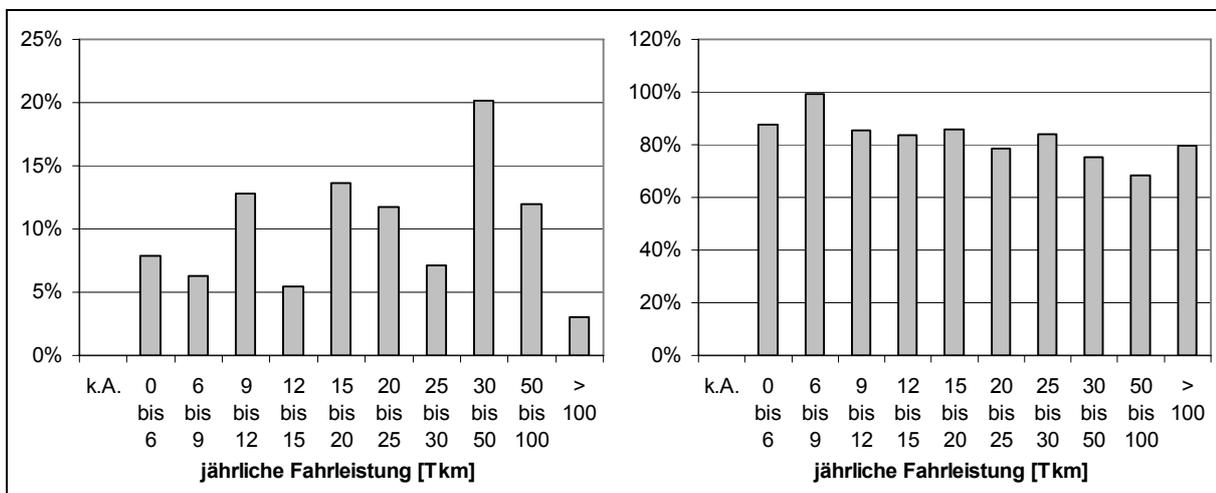


Bild 90: Übersicht über die jährliche Fahrleistung insgesamt (links) und prozentualer Anteil mit dem Fahrzeug zum Zeitpunkt der Befragung (rechts) (Klasseneinteilung gemäß Kfz-Versicherungen)

Das Kollektiv der Befragten wird hinsichtlich der Jahreskilometerleistung als repräsentativ betrachtet. Insbesondere im Bereich der Vielfahrer werden tendenziell mehr Anteile mit demselben Fahrzeug gefahren. Im Bereich unter 10.000 km sind höhere Anteile mit fremden Fahrzeugen zu verzeichnen. Insgesamt kann der Anteil jedoch über den gesamten Fahrleistungsbereich als homogen angesehen werden. Eine Fehlbeeinflussung der Aussageergebnisse durch den Einfluss eines ungewohnten Fahrzeugs kann weitestgehend ausgeschlossen werden.

Eine weitere Kenngröße zur Bewertung der folgenden subjektiven Einschätzungen stellt die Ortskundigkeit dar. Wie bereits in Kapitel 3 ausgeführt, stellt die Kenntnis der Strecke einen wesentlichen Einfluss auf das Risikoempfinden der Fahrer und die Wirkungsweise der TRS dar. Ortskundige Fahrer bewerten die Gefahr einer Strecke vorrangig auf Basis ihrer subjektiven Risikoeinschätzung und beziehen sie primär auf die tatsächliche Situation. Ortsfremde Fahrer bewerten die Strecke durch Vergleiche mit ähnlichen, ihnen bekannten Situationen und vor ihrem Erwartungshorizont bezüglich der voraus liegenden Streckencharakteristik. Diese Unterschiede werden auch auf den hier untersuchten Strecken deutlich. VOLKENHOFF (2008) wies im Rahmen von detaillierten Verkehrsuntersuchungen nach, dass sich das Fahrerverhalten ortskundiger Verkehrsteilnehmer im Hinblick auf Geschwindigkeit und Spurhalteverhalten signifikant vom Verhalten ortsunkundiger Fahrer unterscheidet. In Kapitel 8.5.2 wurde ebenfalls gezeigt, dass sich die Wirkung der TRS in Abhängigkeit von der Ortskundigkeit unterschiedlich entfaltet.

Alle drei Strecken wurden während der Befragung vorrangig von ortskundigen Fahrern befahren. Über 30 % der Fahrer gaben an, die Strecke mehrmals am Tag zu befahren. Weitere 20 % befahren die Strecken nach eigenen Angaben zwischen einmal pro Woche und einmal am Tag. Diese insgesamt 50 % der Fahrer können als überdurchschnittlich ortskundig eingestuft werden. Lediglich knapp 10 % der Fahrer gaben an, die Strecke erstmalig zu befahren. Diese Fahrer sind per definitionem ortsunkundig und hatten beim Durchfahren der Rüttelstrecke und der Kurve keinerlei Erwartungen an die Streckenführung oder Vergleichsmöglichkeiten mit dem Vorherfall. Die restlichen 40 % der Befragten befahren die Strecke zwischen einmal jährlich und einmal pro Woche. Diese Fahrer werden als bedingt ortskundig eingestuft. Sie kennen zwar die Strecke, die Häufigkeit der Streckennutzung ist jedoch nicht hoch genug, um einen Automatismus in der Fahraufgabe hervorzurufen.

Der zweite Teil der Befragung sollte zum einen das Risikoempfinden und zum anderen die Akzeptanz bzw. die Selbsteinschätzung der Wirkung der TRS verdeutlichen.

Wie bereits in den psychologischen Grundlagen dargestellt, hat das persönliche Risikoempfinden der Verkehrsteilnehmer einen entscheidenden Einfluss auf das Fahrerverhalten und insbesondere die Geschwindigkeitswahl. Die Fahrer wurden zu Erhebung des Risikoempfindens wie folgt befragt:

- *Welcher Fahrertyp sind Sie auf einer Skala von eins bis zehn? (1 = zurückhaltender, defensiver und 10 = aggressiver Fahrer)*
- *Wie gefährlich schätzen Sie den zurückliegenden Streckenabschnitt für sich selber auf einer Skala von eins bis zehn ein? (1 = ungefährlich und 10 = sehr gefährlich)*
- *Wie gefährlich schätzen Sie den zurückliegenden Streckenabschnitt für Ortsfremde auf einer Skala von eins bis zehn ein? (1 = ungefährlich und 10 = sehr gefährlich)*

Erwartungsgemäß wurde die erste Frage dahingehend beantwortet, dass sich die meisten Fahrer als eher defensiv ansehen. Während sich ca. 35 % der Fahrer exakt in der Mitte zwischen defensiv und aggressiv einstuften, also angaben ein ganz „durchschnittlicher“ Fahrertyp zu sein, gaben lediglich 14 % eine Selbsteinschätzung ab, die im aggressiveren Bereich, also im Skalenbereich größer 5 lag. Als deutlich aggressiver, also im Bereich zwischen acht und zehn sah sich nur etwa 1 % der Fahrer, während über 10 % der Befragten die defensivste Fahrweise, also die Skala 1 angaben. Diese Einschätzungen sind objektiv wenig belastbar, da Aggressivität gesellschaftlich geächtet ist. Die Ergebnisse dienen eher dazu, die Kluft zwischen tatsächlichem Fahrerverhalten und Selbsteinschätzung zu verdeutlichen, wie in Kapitel 9.1.1 gezeigt werden soll.

Noch deutlicher wird der Unterschied zwischen Selbstwahrnehmung und Fremdwahrnehmung durch die Bewertung der Gefährlichkeit des zurückliegenden Streckenabschnitts. Diese verdeutlicht das subjektiv wahrgenommene Risiko der objektiv äußerst unfallträchtigen Kurve. Auf allen untersuchten Strecken wurde die Kurve von den Verkehrsteilnehmern für die eigene Person („ego“) als eher mittelmäßig gefährlich eingestuft. Der Median der Bewertungen lag auf den Strecken jeweils bei 5 und das arithmetische Mittel (als „avg“ bezeichnet) schwankte zwischen 4,55 und 4,86. Die Gefahr für andere Verkehrsteilnehmer, welche ortsfremd sind, wurde durchweg wesentlich höher bewertet. Der Median lag hierbei je nach Strecke zwischen 6 und acht, das arithmetische Mittel zwischen 5,90 und 7,15. Die Kurven wurden damit für ortsfremde Personen im Mittel um einen bis vier Skalen gefährlicher bewertet, als für den Befragten selbst (vgl. Tab. 23). Die unterschiedlichen Bewertungen sind in Bild 91 rechts für alle Strecken zusammengefasst.

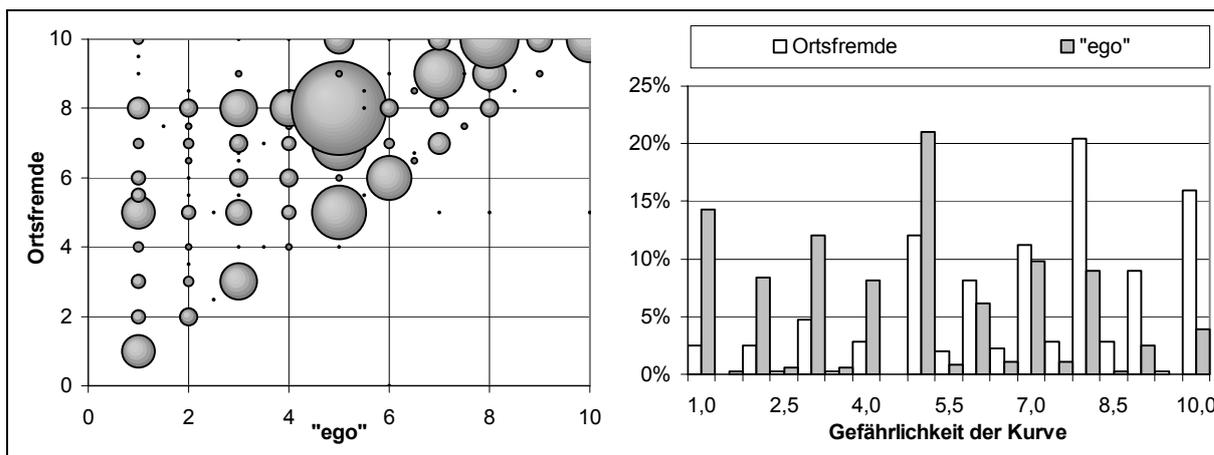


Bild 91: Gegenüberstellung der Risikoeinschätzung der zurückliegenden Kurve für ortsfremde Fahrer und den Befragten („ego“) (1=ungefährlich; 10=sehr gefährlich)

In Bild 91 links wird die direkte Gegenüberstellung der Einzelbewertungen aufgezeigt. Der Durchmesser der Blasen gibt Aufschluss über die Häufigkeit des jeweiligen Bewertungspaars. Während die meisten Befragten die Strecke für sich selbst mit einer mittleren Gefährlichkeit von 5 bewerteten und gleichzeitig eine erhöhte Gefahr der Stufe 8 oder sogar die maximale Gefahr der Stufe 10 für Ortsfremde sahen, wurde die Gefährlichkeit bis auf zwei Ausnahmen für Ortsfremde niemals niedriger als für die eigene Person angesehen.

Diese Gegenüberstellung zeigt klar die unterschiedliche Risikowahrnehmung von Situationen im Allgemeinen und im Straßenverkehr im Besonderen. Zum einen stellt die Negation der persönlichen Gefährdung einen durchaus menschlichen Wesenszug dar. Zum anderen wird durch die unterschiedliche Bewertung des Risikos deutlich, dass die Befragten ihr eigenes fahrerisches Können im Vergleich zu anderen Fahrern als überdurchschnittlich bewerten und die eigene, vermeintlich bessere Situationskenntnis eine Risikominimierung ermöglicht. Einer der Befragten äußerte „dass man die Kurve kennen muss, dann stellt sie keine Gefahr dar und man kann sie mit wesentlich höheren Geschwindigkeiten durchfahren, als die zulässige Höchstgeschwindigkeit erlauben würde. Ortsfremde Fahrer könnten jedoch durchaus von dem un stetigen plötzlichen engen Radius überrascht werden und sind somit einer erhöhten Gefahr ausgesetzt.“ Das objektive Risiko wird also erkannt während das subjektive Risiko jedoch als niedriger bewertet wird (vgl. Kapitel 3.4).

Die Differenzierung der Risikoeinschätzung nach der Ortskundigkeit der Befragten verdeutlicht die unterschiedliche Bewertung der Gefahr nochmals. Fahrer, die die Strecken mehrmals pro Woche befahren, also per definitionem als äußerst ortskundig gelten, bewerten die Strecke im Mittel als ungefährlicher, als Fahrer, die die Strecken zum ersten Mal befahren (siehe Tab. 21). Das Risiko für ortsunkundige Fahrer

wird in Abhängigkeit von der eigenen Ortskenntnis ebenfalls deutlich unterschiedlich bewertet (im arithmetischen Mittel ca. 1,5, im Median 2 Bewertungsstufen). Der Unterschied zwischen der Risikobewertung für den Befragten selbst und der Bewertung für ortskundige Fahrer sinkt mit der Ortskenntnis der Befragten. Das heißt, sehr ortskundige Fahrer bewerten das eigene Risiko wesentlich niedriger, als das Risiko für Ortsfremde, während Fahrer, die selbst ortskundig sind, das Risiko für die eigene Person ähnlich einschätzen, wie für andere, ebenfalls ortskundige Fahrer.

Strecke	ortskundig	N	„ego“		für ortsfremde		Unterschied	
			avg	median	avg	median	Δ avg	Δ median
Gesamt	sehr	187	4,75	5,00	7,46	8,00	2,71	3,00
	mittel	145	4,57	5,00	6,55	7,00	1,98	2,00
	nein	35	5,14	5,00	5,88	6,00	0,74	1,00

Tab. 21: Einschätzung des Risikos der zurückliegenden Kurve für den Befragten ("ego") und ortsfremde Fahrer differenziert nach Ortskundigkeit (1=ungefährlich; 10=sehr gefährlich)

Die Risikowahrnehmung der Befragten wurde noch weiter differenziert. Die Grundlagenanalysen in Kapitel 3 führen zu der Annahme, dass neben der Ortskundigkeit vor allem das Geschlecht, das Alter und die Fahrpraxis einen wesentlichen Einfluss auf die Risikobewertung haben.

In Tab. 22 ist die unterschiedliche Risikobewertung der einzelnen Strecken differenziert nach Geschlecht dargestellt. Auch wenn die weiblichen Fahrer in der Gruppe der Befragten deutlich unterrepräsentiert sind, wird anhand der Bewertungen auf allen Strecken deutlich, dass die männlichen Fahrer ein anderes Risikoempfinden aufweisen als die weiblichen Fahrer. Die Gefahr für die Befragten selbst wurde auf der B 399 und der B 477 von Frauen als niedriger und auf der L 257 als höher bewertet. Die Gründe für diese unterschiedlichen Einschätzungen sind nicht klar. Bei der Bewertung des Risikos für ortsfremde Fahrer stellt sich der Sachverhalt ähnlich undurchsichtig dar (vgl. Tab. 22). Im Mittel über alle Strecken wurde das Risiko für die Befragten selbst und für Ortsfremde von Frauen höher eingestuft als von Männern.

Die Differenzierung nach dem Alter fördert deutlichere Tendenzen zu Tage. Während sehr junge Fahrer die Strecken im Mittel als deutlich gefährlicher für die eigene Person einstufen als ältere Fahrer, bewerten sie das Risiko für andere ortsfremde Fahrer ähnlich wie die Gruppe der ältesten Fahrer (älter als 60 Jahre) relativ niedrig. Der Unterschied der subjektiven Risikobewertung ist bei diesen beiden Gruppen am niedrigsten (vgl. Tab. 23).

Strecke	Geschlecht	N	„ego“		ortsfremde		Unterschied	
			avg	median	avg	median	Δ avg	Δ median
B 399	m	74	4,56	5,00	7,05	7,50	2,49	2,50
	w	44	4,53	4,00	7,28	8,00	2,75	4,00
	m + w	118	4,55	5,00	7,14	8,00	2,59	3,00
B 477	m	70	4,71	5,00	5,89	6,00	1,18	1,00
	w	22	4,64	4,50	5,93	5,75	1,29	1,25
	m + w	92	4,70	5,00	5,90	6,00	1,20	1,00
L 257	m	127	4,63	5,00	6,95	7,50	2,32	2,50
	w	30	5,85	6,00	8,02	8,00	2,17	2,00
	m + w	157	4,86	5,00	7,15	8,00	2,29	3,00
Gesamt	m	271	4,63	5,00	6,70	7,00	2,07	2,00
	w	96	4,97	5,00	7,20	8,00	2,23	3,00
	m + w	367	4,72	5,00	6,83	7,00	2,11	2,00

Tab. 22: Einschätzung des Risikos der zurückliegenden Kurve für den Befragten („ego“) und ortsfremde Fahrer differenziert nach Strecke und Geschlecht (1=ungefährlich; 10=sehr gefährlich)

Die Fahrer im mittleren Alter fühlen sich auf den Strecken am sichersten und sehen für ortsfremde Fahrer das größte Risiko. In Abhängigkeit der jährlichen Fahrleistung stellen sich die Tendenzen ebenfalls deutlich dar (siehe Tab. 24). Befragte mit geringer jährlicher Fahrleistung bewerten zwar das Risiko für die eigene Person und für Ortsfremde höher als die Vielfahrer, der Unterschied zwischen Selbst- und Fremdwahrnehmung steigt jedoch mit zunehmender Fahrleistung.

Die Differenzierung nach Alter und nach jährlicher Fahrleistung verdeutlicht klare Tendenzen. Die Unterschiede in der Bewertung des Risikos für die Befragten und für ortsfremde Fahrer sind aus Sicht des Verfassers auf die Bewertung der eigenen Fahrpraxis zurückzuführen. Die Befragten mittleren Alters mit hohen jährlichen Fahrleistungen sehen sich selbst als erfahrene Fahrer mit überdurchschnittlichen Fähigkeiten an. Das Risiko für die eigene Person wird demnach als niedriger eingestuft als für „weniger erfahrene Fahrer“.

Strecke	Alter	N	„ego“		ortsfremde		Unterschied	
			avg	median	avg	median	Δ avg	Δ median
Gesamt	< 30	36	5,40	5,25	6,60	7,00	1,20	1,75
	30 - 39	45	4,92	5,00	6,84	7,50	1,92	2,50
	40 - 49	106	4,54	5,00	6,98	8,00	2,44	3,00
	50 - 59	92	4,87	5,00	7,13	7,75	2,26	2,75
	≥ 60	88	4,93	5,00	6,45	7,00	2,06	2,00

Tab. 23: Einschätzung des Risikos der zurückliegenden Kurve für den Befragten ("ego") und ortsfremde Fahrer differenziert nach Alter (1=ungefährlich; 10=sehr gefährlich)

Strecke	jährl. Fahrleistung	N	„ego“		ortsfremde		Unterschied	
			avg	median	avg	median	Δ avg	Δ median
Gesamt	< 12.000	99	4,88	5,00	6,89	7,50	2,01	2,50
	12 – 60	244	4,68	5,00	6,84	7,00	2,16	2,00
	> 60.000	37	4,31	4,00	6,61	8,00	2,30	4,00

Tab. 24: Einschätzung des Risikos der zurückliegenden Kurve für den Befragten ("ego") und ortsfremde Fahrer differenziert nach jährlicher Fahrleistung (1=ungefährlich; 10=sehr gefährlich)

Während die ersten Fragen vorrangig der Verdeutlichung des Risikoverhaltens der Fahrer dienen, deckt der dritte Bereich die Reaktion der Fahrer auf die Maßnahme „Rüttelstreifen“ ab. Dieser Block besteht aus den folgenden vier Fragen:

- *Haben Sie Verständnis für die Maßnahme zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, die in der zurückliegenden Kurve durchgeführt wurde? (1 = kein Verständnis und 10 = sehr großes Verständnis)*
- *Wie störend empfinden Sie die Rüttelstreifen auf der Fahrbahn als Fahrer? (1 = nicht bemerkbar und 10 = sehr störend)*
- *Fahren Sie in diesem Bereich langsamer als vorher?*
- *Umfahren Sie die Rüttelstreifen, wenn sich Ihnen die Möglichkeit bietet?*

Die ersten beiden Fragen sollen eruieren, ob der Diskomfort, der von den TRS ausgeht, nur bemerkbar ist oder die Fahrer so stark beeinträchtigt, dass die Akzeptanz gegenüber der verkehrssicherheitsfördernden Maßnahme sinkt. Die Ergebnisse sind in Bild 92 dargestellt. Während die Bewertung des Störungsgrads der TRS über die gesamte Werteskala variiert und ein relativ ausgewogenes Bild repräsentiert, sind die meisten Befragten der Maßnahme gegenüber aufgeschlossen. Der Diskomfort ist

zwar vorhanden, scheint jedoch die Akzeptanz gegenüber den TRS nicht maßgeblich zu beeinflussen. Inwieweit die unterschiedliche Empfindung des Diskomforts auf die persönlichen psychologischen Unterschiede oder auf die Signalstärke auf Grund unterschiedlicher Fahrzeuge zurückzuführen ist, lässt sich auf Basis der Befragungen nicht nachweisen.

Die hohe Akzeptanz gegenüber der Maßnahme trotz vorhandenem Diskomfort ist auch auf die Ortskundigkeit der Befragten zurückzuführen. Die Äußerungen der Befragten spiegeln sich zwar in den Auswertungen der hier dargestellten Ergebnisse der Befragungen nicht direkt wider, einige frei wiedergegebene Zitate verdeutlichen jedoch den Zusammenhang mit der Ortskundigkeit. Den meisten Befragten war bekannt, dass es in den untersuchten Kurven regelmäßig zu Unfällen kommt und sie begrüßten die Bemühungen, die Verkehrssicherheit zu erhöhen: „*In dieser Kurve ist schon so viel passiert.*“ „*Es ist gut, dass endlich etwas unternommen wird.*“

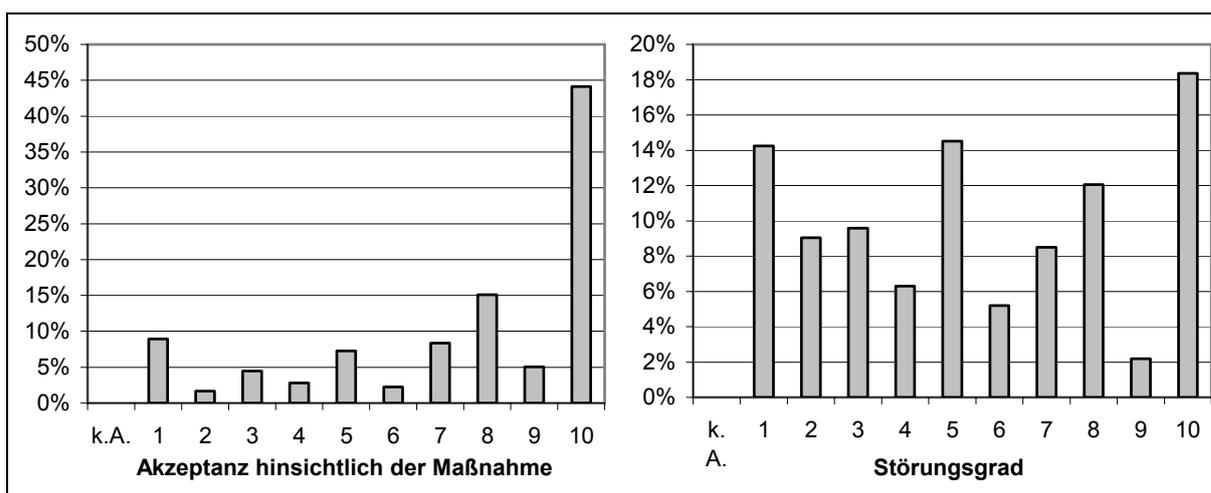


Bild 92: Akzeptanz der Befragten hinsichtlich der Maßnahme "Rüttelstreifen" zur Erhöhung der Verkehrssicherheit (1=keine Akzeptanz bis 10=volle Akzeptanz) (links) und Beeinträchtigung durch die Rüttelstreifen (1=nicht bemerkbar bis 10=sehr störend) (rechts)

Die beiden letzten Fragen basieren entgegen der bisher dargestellten subjektiven Bewertungen nicht auf einer Skala, sondern können lediglich mit ja oder nein beantwortet werden. Sie dienen der direkten Abfrage der Wirkung der TRS bzw. der in anderen Untersuchungen beobachteten Bereitschaft, dem Diskomfort der Rüttelstreifen durch Umfahren zu umgehen (vgl. zur Thematik der Umfahrung der TRS auch Kapitel 8.3.3.3). Gemäß ihrer eigenen Einschätzung fahren knapp über 50 % der Befragten nach der Applikation der TRS langsamer als vorher. Fast 40 % der Fahrer sehen keine Veränderung der eigenen Geschwindigkeitwahl durch die Rüttelstreifen. Die übrigen Befragten machten keine Angaben zu dieser Frage. Im Kontext der zuvor beschriebenen Bewertungen der Streckengefährlichkeit in Kombination mit einer Ortskundigkeit ist dieser Sachverhalt logisch und kann anhand der häufigen Erklä-

rung der Befragten erläutert werden: „*Ich kenne doch die Strecke und bin schon immer mit einer angepassten, richtigen Geschwindigkeit gefahren – warum sollte ich langsamer werden?*“ Inwieweit die Selbsteinschätzung bzgl. der geschwindigkeitsdämpfenden Wirkung der TRS dem tatsächlichen Fahrerverhalten entspricht, wird im Rahmen des Kapitels 9.1.1 analysiert.

Eine Bereitschaft, die Rüttelstreifen zu umfahren, um dem von den TRS ausgehenden Diskomfort zu entgehen signalisierten ca. 20 % Prozent der Befragten. Dies wurde jedoch oft eingeschränkt: „*Grundsätzlich ja, aber nur wenn kein Gegenverkehr zu sehen is.*“ oder „*Ich würde schon gerne, aber die Strecke ist hier so schlecht einsehbar, dass das Risiko zu groß wäre.*“ Vergleicht man den tatsächlichen Anteil der Umfahrer mit der Selbsteinschätzung hinsichtlich der Frage „*Würden Sie die Streifen umfahren, wenn sich Ihnen die Möglichkeit bietet?*“, so ist eine klare Diskrepanz festzustellen. Die Ergebnisse sind – differenziert nach Untersuchungsstrecken – in Tab. 25 dargestellt.⁴⁹ Deutlich werden hier auch die Unterschiede in den Streckencharakteristiken. Im Gegensatz zu den Strecken mit weit gefasstem Verkehrsraum und Blickfeld ist die Bereitschaft zum Umfahren bei der Strecke B 399 zwischen Hürtgenwald und Gey wahrscheinlich auf Grund der sehr niedrigen Sichtweiten und der kurvigen Charakteristik der Strecke in Kombination mit einer höheren Verkehrsbelastung als auf den anderen Untersuchungsstrecken mit 17 % am niedrigsten.

Strecke	Anteil tats. Umfahrer ⁵⁰	Bereitschaft Umfahren
L 257 FR Buir	13,0 %	29 %
L 257 FR Morchenisch	10,4 %	19 %
B 477 FR LUXHEIM	10,8 %	26 %
B 399 FR Gey	5,0 %	17 %

Tab. 25: Gegenüberstellung des tatsächlichen Anteils der Umfahrer (aus Verkehrsmessungen) und der subjektiven Bereitschaft zum Umfahren (aus Befragungen)

9.1.1 Verknüpfung von Akzeptanz und Fahrerverhalten

Die in Kapitel 8.5.1 beschriebene Methode der Ganglinienerzeugung in Kombination mit den verfügbaren Metadaten ermöglicht die Verknüpfung von Geschwindigkeitsdaten der verkehrstechnischen Erhebung mit den Daten der Akzeptanzerhebung. Im Rahmen dieser Untersuchung konnten auf diese Weise über 100 Datensätze erzeugt

⁴⁹ Es ist zu beachten, dass die Beobachtung des tatsächlichen Umfahrerverhaltens nicht zeitgleich mit der Befragung erfolgte und diese Gegenüberstellung lediglich als tendenzielle Aussage zu werten ist.

⁵⁰ Als Umfahrer wurden die Fahrzeuge definiert, die die TRS nicht mit allen vier Reifen befuhren.

werden, die den direkten Vergleich von Selbsteinschätzung der Befragten und deren tatsächlichem Fahrverhalten ermöglicht. Auf Grund des geringen Datenumfangs sind die folgenden Ausführungen qualitativ zu verstehen. Eine statistische Absicherung der Ergebnisse erfolgte nicht. Vorrangig sollen hier mögliche Analysewege aufgezeigt und exemplarisch durchgeführt werden.

In einem ersten Schritt wurde untersucht, ob sich das Geschwindigkeitsverhalten in Abhängigkeit des Geschlechts anders darstellt und ob die Reaktion auf die Rüttelstreifen geschlechtsspezifische Unterschiede aufweist. Während die Geschwindigkeiten vor der Installation der TRS keine bedeutenden Unterschiede aufweisen, reduzierte die männliche Untersuchungsgruppe die Geschwindigkeit im Nachher-Fall deutlicher als die weibliche Gruppe. Auf Grund der geringen Anzahl weiblicher Probanden ist dieses Ergebnis jedoch nicht belastbar.

Eine weitere mögliche Differenzierung stellt das Risikoempfinden der Befragten dar. Vergleicht man das Geschwindigkeitsniveau der Fahrer, die die Strecke als relativ ungefährlich (Bewertung < 5) einstufen, mit den Fahrern, die eine deutliche Gefahr in der zurückgelegten Strecke sehen, dann sind deutliche Unterschiede festzustellen. Im Vorher-Fall liegt die Geschwindigkeit der Fahrer, die die Strecke als gefährlich einstufen, ca. 3 km/h höher als die der anderen Fahrer. Durch die TRS reduziert sich deren Geschwindigkeit jedoch deutlich, so dass sich das Bild für den Nachher-Fall nahezu umkehrt. Analog wurde die Geschwindigkeit in Abhängigkeit des empfundenen Störungsgrades analysiert. Hier konnte jedoch kein unterschiedliches Geschwindigkeitsverhalten aufgezeigt werden.

Die interessantesten Ergebnisse wurden von einer differenzierten Betrachtung der Geschwindigkeit in direktem Vergleich zum empfundenen Geschwindigkeitsverhalten erwartet. Im Rahmen der Befragung mussten die Verkehrsteilnehmer abschätzen, ob sie nach der Installation der TRS langsamer fahren als vorher. Die Aussagen der Fahrer wurden mit dem Geschwindigkeitsverhalten vor und nach der Installation der TRS verglichen. In Bild 93 und Bild 94 ist die Geschwindigkeit der Befragten in Relation zur v_{50} der jeweiligen Strecke aufgeführt. Fahrer, die angeben, durch die Maßnahme in Ihrem Geschwindigkeitsverhalten beeinflusst zu werden, fahren vor der Installation der TRS deutlich schneller als v_{50} . Nach der Maßnahme reduziert sich die Geschwindigkeit dieser Fahrer deutlich und sinkt im Bereich zwischen Rüttelstreifen und Gefahrenstelle im Mittel sogar unter die v_{50} . Durch die Zusammenfassung aller Strecken und Querschnitte wird deutlich, dass die Fahrer ihr eigenes Geschwindigkeitsverhalten erstaunlich gut einschätzen. Während die Fahrer, die angeben, durch die TRS nicht beeinflusst zu werden im Mittel nur 1 km/h langsamer fahren als vor

der Maßnahme, reduzieren die Fahrer, die sich in ihrem Geschwindigkeitsverhalten beeinflusst fühlen, ihre Geschwindigkeit nach der Maßnahme um bis zu 9 km/h.

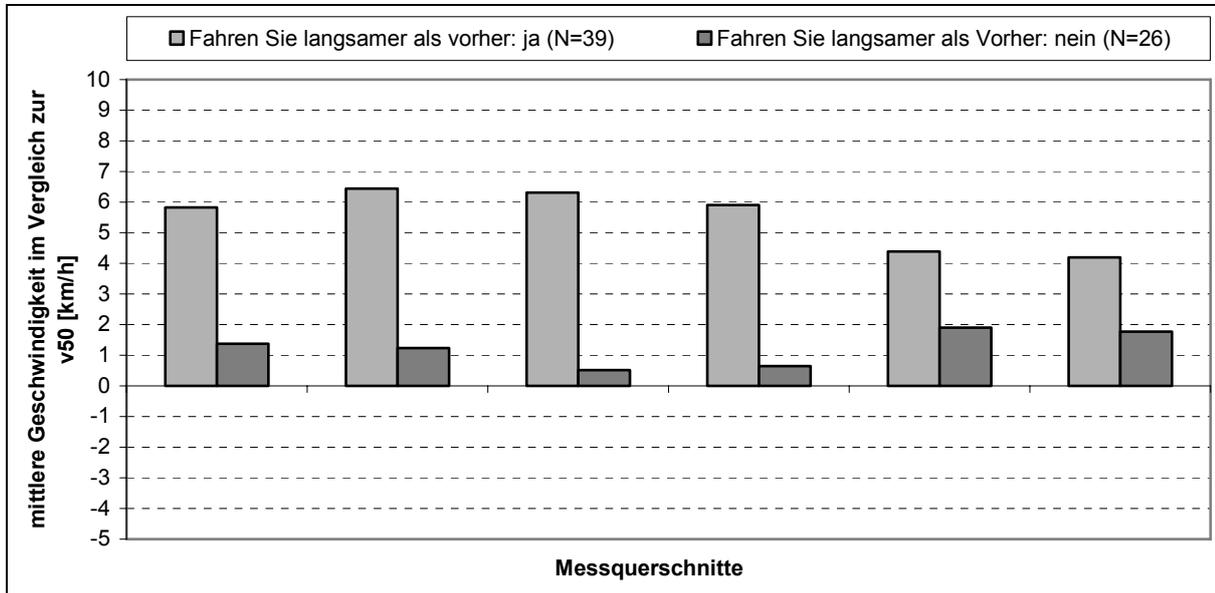


Bild 93: Vergleich der mittleren Geschwindigkeit der Befragten im Vergleich zur v_{50} für alle Strecken differenziert nach der Selbsteinschätzung des Geschwindigkeitsverhaltens vor der Installation der TRS.

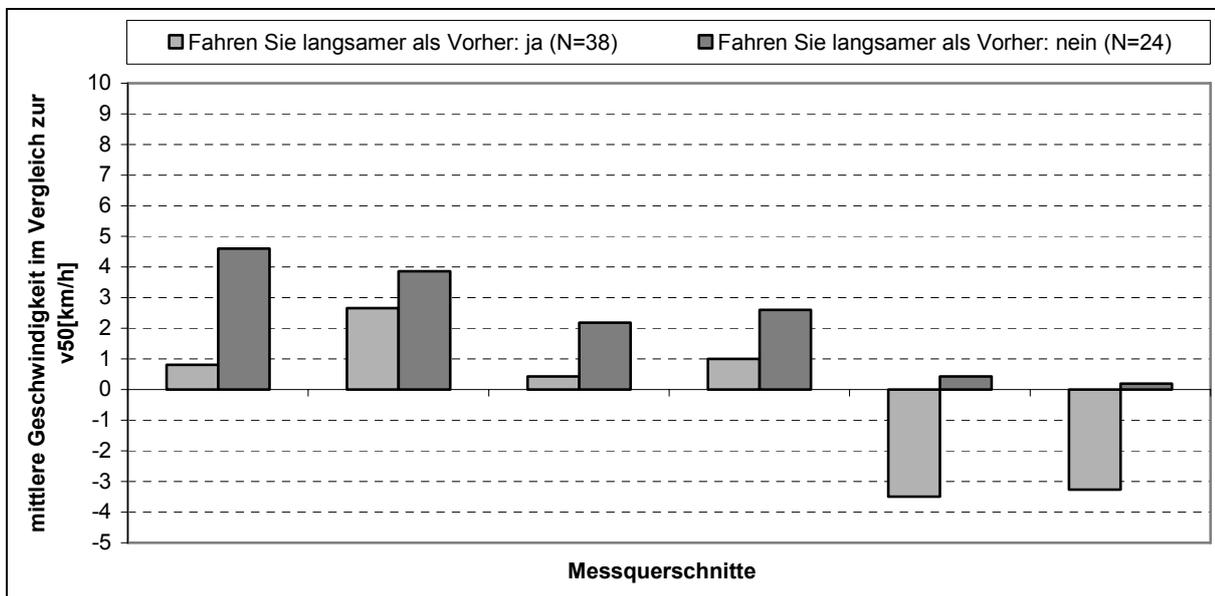


Bild 94: Vergleich der mittleren Geschwindigkeit der Befragten im Vergleich zur v_{50} für alle Strecken differenziert nach der Selbsteinschätzung des Geschwindigkeitsverhaltens nach der Installation der TRS.

9.2 Reaktion der Bevölkerung

Neben der in Kapitel 9.1 beschriebenen Befragung der Verkehrsteilnehmer wurde die Reaktion der Anwohner auf die installierten Rüttelstreifen hinsichtlich ihrer Relevanz analysiert. Auf allen Strecken kam es zu vereinzelt schriftlichen Rückmeldungen von Anwohnern und Verkehrsteilnehmern, die die Strecken häufig befahren. In den Schreiben wurde meist der Sinn der Maßnahme in Frage gestellt. Kritikpunkte der Kraftfahrer waren neben dem generellen Zweifel an der Wirkung der Rüttelstreifen auch das Ausweichen einzelner Fahrer in den Gegenverkehr. Die häufigste Sorge der Autofahrer galt jedoch der Wirkung der Rüttelstreifen auf ihre Fahrzeuge. Neben den Rückmeldungen von einzelnen Autofahrern kam es auch zu Reaktionen der Anwohner, die sich primär über eine erhöhte Lärmemission durch die Rüttelstreifen beschwerten. Die Bürgerbeschwerden über die zusätzliche Lärmbelastung konzentrierten sich insbesondere auf die Strecke B 399 zwischen Großhau und Gey. An dieser Strecke liegt die Bebauung im Vergleich zu den anderen Untersuchungsstrecken mit lediglich 200 Metern am nächsten an der Maßnahme. Bei der Planung der TRS in dieser Ortslage wurde davon ausgegangen, dass eine hohe Böschung und dichter Baum- und Buschbestand zwischen der Straße und den anliegenden Bebauungen eine ausreichend dämpfende Wirkung auf die Lärmausbreitung hat. Auf der B 477 zwischen Eggersheim und LUXheim wurde trotz eines großen Abstands von über 600 Metern zwischen Bebauung und Untersuchungsstrecke ebenfalls über erhöhte Lärmbelastung geklagt. Auch wenn die Beschwerden hier im Gegensatz zur Strecke in Gey lediglich von einer geringen Anzahl von Anwohnern ausgingen, wurden an beiden Strecken Ortstermine mit der Straßenbauverwaltung und den Anwohnern durchgeführt, auf denen sowohl subjektive Hörproben als auch messtechnische Immissionsmessungen durchgeführt wurden. Die messtechnischen Untersuchungen erfolgten stichprobenartig an mehreren der Straße zugewandten Stellen in den Anliegerstraßen und Gärten der Beschwerdeführer. Über mehrere Minuten wurden mit der in Kapitel 7.2 beschriebenen Messtechnik frequenzrechte Daten erhoben.

Die Messreihen wurden retrospektiv analysiert. Der Schwerpunkt der Auswertung lag dabei auf anerkannten Größen wie der A-bewerteten Lautstärke und psychoakustischen Parametern wie der empfundenen Lautheit und der Schärfe. Zusätzlich wurden FFT-Analysen zur Frequenzbewertung durchgeführt. Beispielhafte Ergebnisse sind für beide Strecken in Bild 95 und Bild 96 dargestellt.

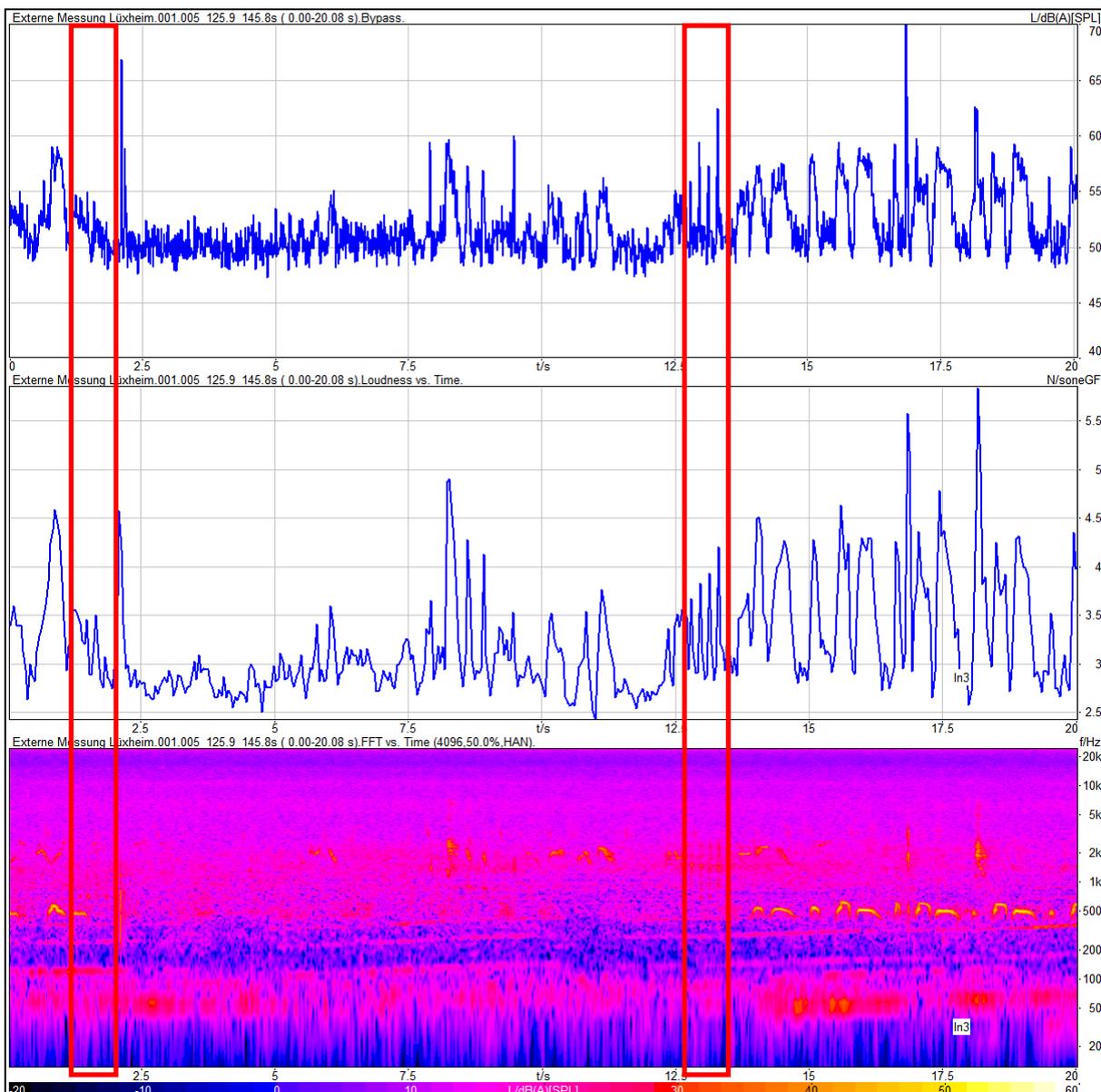


Bild 95: Beispielhafter Ausschnitt der Akustik-Messung in LUXHEIM (Standort: nächstgelegene Anliegerstraße) oben Lautstärke in dB(A), Mitte Lautheit in sone, unten FFT-Analyse. Emissionen durch Rüttelstreifen rot gekennzeichnet.

Die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchung fielen für beide Strecken unterschiedlich aus. Während die Messungen in LUXHEIM (vgl. Bild 95) keine Erhöhung der Lärmimmission durch die TRS ergaben, konnten in Gey (vgl. Bild 96) deutliche Zusatzbelastungen durch die TRS nachgewiesen werden. Die reine Analyse der Abwerteten Lautstärke erwies sich in beiden Ortslagen als wenig zielführend. Der Anstieg der Lautstärke durch die TRS im Gegensatz zum Grundschallpegel ohne Verkehr lag auf beiden Strecken in Spitzen zwischen 3 und 7 dB(A). Die Lärmimmission stieg jedoch durch einzelne Fahrzeuge, die die TRS nicht überfuhren, oder auch durch Vogelgezwitscher und spielende Kinder um ein Vielfaches. Für eine seriöse Bewertung der Lärmbelastung müssen die Messungen im Kontext der Anwohnerbefragung und der subjektiven Hörproben gesehen werden.

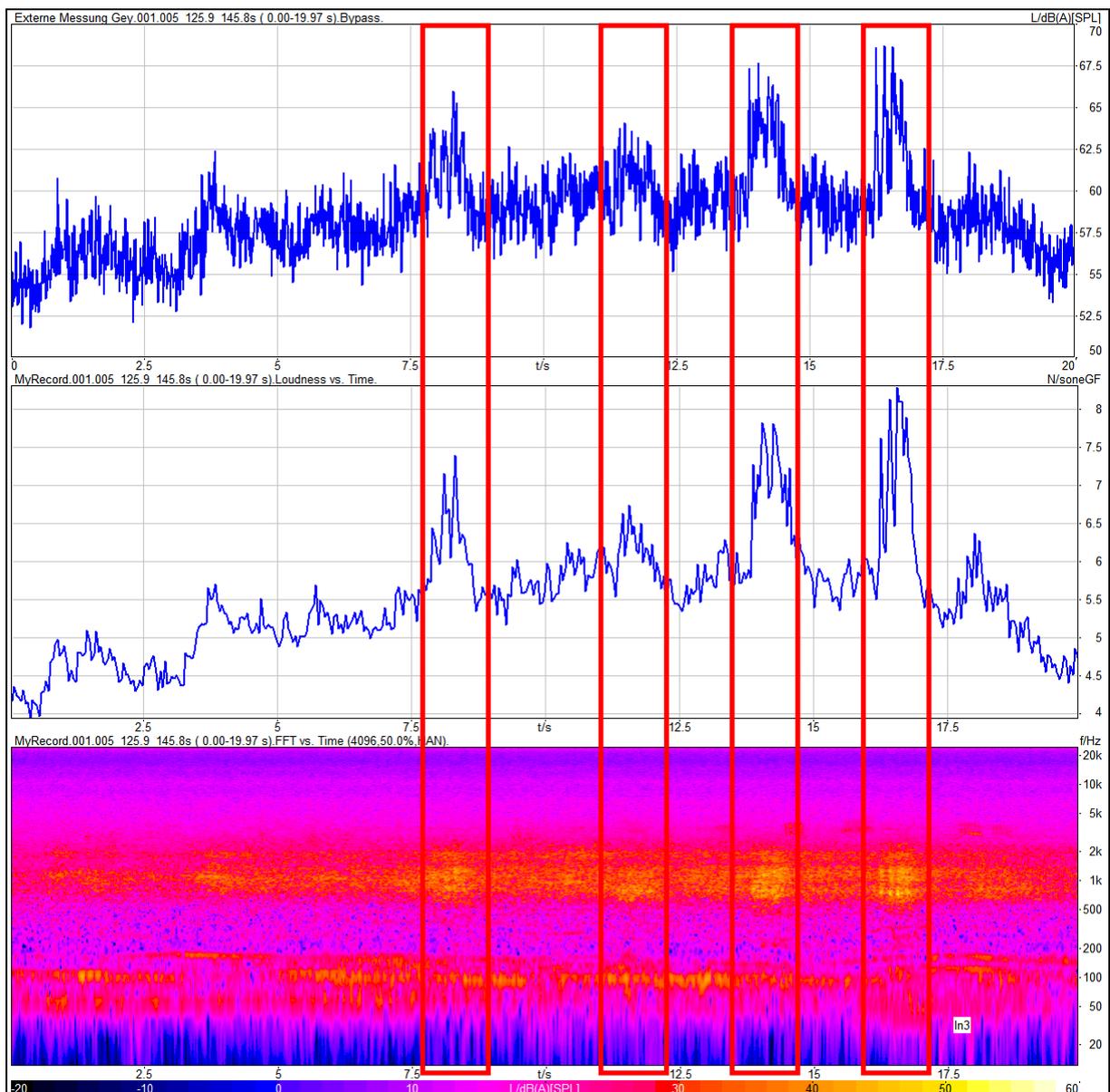


Bild 96: Beispielhafter Ausschnitt der Akustik-Messung in Gey (Standort: Garten des nächstgelegenen Hauses) oben Lautstärke in dB(A), Mitte Lautheit in sone, unten FFT-Analyse. Emissionen durch Rüttelstreifen rot gekennzeichnet.

Die Anwohnerbefragung ergab, dass nicht die Lautstärke, sondern die Art der Geräusche entscheidend für das Maß der Beeinträchtigung ist. Insbesondere nachts und bei Überfahrungen der Streifen von Fahrzeugen mit leichten Anhängern sei die Belästigung durch den Lärm nicht zu ertragen. Die Unregelmäßigkeit der Geräusche und die Geräuschausprägung, die beispielsweise als Gewehrsalve bezeichnet wurde, stellten dabei die größten Probleme dar. Das kurze „knallende“ Geräusch, das beim Überfahren der TRS entsteht, stellt sich demnach als ursächlich für den Grad der Belästigung heraus. Dieser Effekt ist nur auf Basis der „klassischen“ Auswertung der A-bewerteten Lautstärke kaum zu erfassen. Die Auswertung psychoakustischer Parameter verdeutlicht diesen Sachverhalt wesentlich besser. In Bild 96 Mitte ist der deutliche Anstieg der Lautheit durch die Überfahrt der TRS zu erkennen. In der da-

runter dargestellten FFT-Analyse ist die Ursache in Form von deutlichen energetischen Schwerpunkten im – für den Menschen besonders gut hörbaren – Bereich von 1 bis 2 kHz zu erkennen. Diese Ergebnisse in Kombination mit den subjektiven Höreindrücken der Ortstermine führten zu der Entscheidung, die TRS in der Ortslage Gey nach Abschluss der Wirkungsanalyse zurückzubauen. An der zweiten Strecke (B 477) ergaben sowohl die subjektiven Hörproben bei diversen Ortsterminen als auch die stichprobenartigen Immissionsmessungen keinen Beleg für die geschilderte Lärmbeeinträchtigung (vgl. Bild 95). Zusätzlich wurden dort im Haus der Beschwerdeführerin Langzeitmessungen über eine Nacht durchgeführt. Das Zimmer war der Straße zugewandt und das Fenster blieb über die gesamte Nacht geöffnet. Die Auswertung dieser Langzeitmessung bei geringen Hintergrundgeräuschen durch das Wegfallen der Nebengeräusche wie Vogelgezwitscher oder Kinderlachen bestätigten die Ergebnisse der Stichprobenmessungen der Ortstermine. Trotz detaillierter Auswertungen konnte keine Lärmbelastung durch die TRS festgestellt werden. In Rücksichtnahme auf die Interessen der Anwohner wurden die Rüttelstreifen jedoch auch auf dieser Strecke nach Abschluss der verkehrstechnischen Untersuchung entfernt.

Bei beiden Ortslagen war das Empfinden der Anwohner je nach Persönlichkeit, Ausrichtung des Hauses – hier vor allem Schlafzimmer und Terrasse – sehr unterschiedlich und reichten von „starker Beeinträchtigung“ bis hin zu „nicht störend“. Analog zu den Erkenntnissen früherer Studien muss als Fazit der Untersuchung festgestellt werden, dass selbst ein als ausreichend angenommener Abstand von über 600 Metern oder bei geringeren Abständen von ca. 150 bis 200 Metern die Lage der Strecke in Geländeeinschnitten nicht ausreicht, um eine zumindest subjektive Beeinträchtigung a priori auszuschließen. Messtechnisch unbedeutende Änderungen der Umgebungsgeräusche können auf Grund der ungewohnten Geräuschart und der regelhaften Anregung als störend empfunden werden. Externe Einflüsse wie beispielsweise Windrichtung und -stärke können die Immissionen ebenfalls wesentlich beeinflussen. Des Weiteren muss die geringe Reizschwelle der Anwohner in den untersuchten Bereichen in Betracht gezogen werden. Auf Grund der Wohnlage – ländliche Region mit geringen allgemeinen Emissionen aus Infrastruktur oder Industrie – kann bereits eine geringe akustische Zusatzbelastung als stark störend empfunden werden. Maskierende Umgebungsgeräusche treten in diesen ländlichen Bereichen in wesentlich geringerem Maße auf als in Stadtnähe. Zusammenfassend wird festgestellt, dass beim Einsatz von Rüttelstreifen die Akzeptanz der Anwohner eine entscheidende Rolle spielt.

9.3 Zusammenfassung der Akzeptanzuntersuchung

Die Akzeptanzuntersuchung gliedert sich in zwei Bereiche. Zum einen wurde die Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer erhoben und zum anderen wurde der Reaktion der Anwohner nachgegangen.

Zur Analyse der Akzeptanz der Verkehrsteilnehmer wurden über 350 Fahrer nach der Installation der TRS auf den Strecken angehalten und befragt. Neben allgemeinen Informationen wie Geschlecht, Alter und jährliche Fahrleistung wurden Fragen zum Risikoempfinden und zur Akzeptanz hinsichtlich der Rüttelstreifen gestellt. Im Rahmen der Befragung wurden deutliche Unterschiede zwischen Selbstwahrnehmung und Fremdwahrnehmung deutlich. Über 80% der Fahrer schätzten sich selbst als defensiven Fahrertyp ein. Bezogen auf die Einschätzung der Streckengefahr zeigt sich ein deutlich verschobenes Risikoempfinden. Die Fahrer schätzten die Strecke durchweg gefährlicher für Ortsfremde ein, als für die eigene Person. Die eigene Kenntnis der Strecke in Kombination mit der eigenen (vermeintlich überdurchschnittlichen) Fahrfertigkeit lassen die Strecke als ungefährlich erscheinen. Differenzierte Analysen zeigten zusätzlich klare Abhängigkeiten der Risikoeinschätzung vom Geschlecht, dem Alter und der Fahrerfahrung auf. Weitere Fragen zielten auf eine direkte Bewertung der Maßnahme durch die Befragten ab. Auch wenn sich die Fahrer durch die TRS einem deutlichen Diskomfort ausgesetzt sahen, begrüßten die meisten die Maßnahme und zeigten eine deutlich positive Akzeptanz. Analog zum tatsächlichen Fahrerverhalten zeigten die Fahrer mit über 20 % eine tendenzielle Bereitschaft, dem Diskomfort, der von den TRS ausgeht, durch Umfahren zu entgehen, wenn es die Streckencharakteristik und die Verkehrssituation zulassen.

Die Reaktion der Bevölkerung stellte sich weniger positiv dar, als die der Verkehrsteilnehmer. Dies ist vorrangig auf die Lärmemission zurückzuführen, die von den TRS ausgeht. An zwei Strecken mussten die Rüttelstreifen auf Grund von Anwohnerbeschwerden zurückgebaut werden, auch wenn sich nur bei einer Strecke eine zusätzliche Lärmbelastung messtechnisch belegen ließ. Insbesondere die ländliche Lage mit einem geringen akustischen Grundpegel machen die Anwohner empfindlich für kleinere Änderungen der Hintergrundgeräusche. Zur Erhöhung der Akzeptanz der Anwohner hinsichtlich TRS wird eine frühe Information und ggf. Einbindung der Bevölkerung im Planungsstadium empfohlen.

10 Diskussion, Fazit und Empfehlungen

Verkehrsunfälle stellen in der heutigen Gesellschaft insbesondere für junge Menschen ein hohes Risiko dar, das neben persönlichem Leid für die Betroffenen ein beachtliches sozioökonomisches Problem für unsere Gesellschaft bedeutet. Im Vergleich der Betriebsformen stellen Landstraßen den unsichersten Straßentyp dar. In den vergangenen Jahren verstarben ca. 60 % der im Straßenverkehr Getöteten in der Folge von Landstraßenunfällen. Hier liegt demnach der größte Handlungsbedarf aber auch das größte Potential für eine Verringerung der Anzahl der Getöteten und Schwerverletzten. Untersuchungen haben ergeben, dass über 90 % der Unfälle auf personenbezogene Ursachen zurückgeführt werden können (DESTATIS, 2009). Der Mensch stellt demnach den zentralen Punkt in der Unfallforschung und in der Unfallprävention dar. Mit einer gezielten Beeinflussung des Fahrerhaltens kann demnach das Unfallgeschehen und insbesondere das Auftreten schwerer Unfälle mit Personenschäden reduziert und somit eine Erhöhung der Verkehrssicherheit bewirkt werden.

In der Forschungsliteratur finden sich zahlreiche Ansätze zur Beschreibung des Fahrerhaltens bzw. des Fehlverhaltens von Kraftfahrern. Eine Hauptursache für das Entstehen von kritischen Situationen und Unfällen ist eine nicht angepasste Geschwindigkeit.

Warum wählen Kraftfahrer eine der Situation unangepasste Geschwindigkeit?

Psychologisch sind unterschiedliche Erklärungsansätze zur Beantwortung dieser Frage möglich. In dieser Arbeit wurden drei Ansätze im Rahmen von Literaturrecherchen dargestellt. Begreift man den Vorgang „Autofahren“ als Regelkreis, dann stellen die Wahrnehmung, die Verarbeitung und die Entscheidung die wesentlichen Komponenten auf Seiten des Fahrers dar. Bezogen auf diese Einteilung sind Fehlfunktionen bei jeder dieser einzelnen Komponenten als mögliche Ursache für eine überhöhte Geschwindigkeit zu sehen. Die Ursachenforschung für das Geschwindigkeitsverhalten lässt sich also in drei wesentliche Fragestellungen aufschlüsseln:

- *Wählt der Fahrer eine der Situation nicht angepasste Geschwindigkeit, weil er die Situation nicht richtig wahrnimmt? (Hier liegt die Hauptursache also eher im Bereich der physiologischen als der psychologischen Disziplin.)*
- *Wählt der Fahrer eine der Situation nicht angepasste Geschwindigkeit, weil er die wahrgenommenen Informationen nicht richtig, unvollständig*

oder zu spät verarbeitet? (Hier ist eine mögliche Hauptursache ein zu niedriges Aufmerksamkeitslevel.)

- *Wählt der Fahrer eine der Situation nicht angemessene Geschwindigkeit, weil er trotz vollständiger Wahrnehmung und Verarbeitung eine falsche Entscheidung trifft? (Hier liegt die Hauptursache im Bereich des Risikoempfindens und der Vorprägung des Fahrers.)*

Als Ergebnis der Literaturrecherche lässt sich festhalten, dass die einzelnen Komponenten nicht getrennt voneinander betrachtet werden können. Vielmehr stellt sich das Fahrerverhalten als Kombination aller Bereiche des Entscheidungsfindungsprozesses dar. Soll der Fahrer also – zur Reduktion des Unfallgeschehens – aktiv beeinflusst werden, so verspricht nur ein ganzheitlicher Ansatz eine nachhaltig wirksame Lösung. Diese Erkenntnis wurde in den letzten Jahren verstärkt berücksichtigt und fand bspw. Eingang in die stark psychologisch motivierte Richtlinienanpassung und –entwicklung wie bspw. bei der Umsetzung des Konzepts der „selbsterklärenden Straße“ in den Richtlinien für die Anlage von Autobahnen (RAA) und den Richtlinien für die Anlage von Landstraßen (RAL). Deren Konzept kann jedoch nur greifen, wenn das deutsche Straßennetz zu einem hohen Prozentsatz an die neuen Entwurfparameter angepasst wird. Dieser Vorgang wird zum einen viele Jahre in Anspruch nehmen und ist zum anderen nicht überall mit vertretbarem Mittelaufwand durchzuführen. Unstetigkeitsstellen, insbesondere auf Landstraßen werden nach wie vor auftreten und mögliches Konflikt- bzw. Unfallpotential hervorrufen. Ziel dieser Arbeit war es – neben allgemeinen Erkenntnissen zum Geschwindigkeitsverhalten von Kraftfahrern – ein Konzept zu entwickeln und hinsichtlich seiner Wirksamkeit zu überprüfen, mit dem Fahrzeugführer im Vorfeld solcher Unstetigkeitsstellen aktiv beeinflusst werden können und somit die Verkehrssicherheit in diesen Bereichen erhöht werden kann.

Die Maßnahmen zur Beeinflussung der Kraftfahrer vor gefährlichen Unstetigkeitsstellen beschränkte sich in der Vergangenheit auf eine Begrenzung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit und Warnhinweise in Form von Beschilderung – bemühte also ausschließlich die visuellen Informationskanäle des Menschen. Die übrigen Sinne, wie „Hören“ und „Fühlen“, wurden nicht berücksichtigt. Die Literaturrecherchen haben jedoch ergeben, dass diesen Sinnesmodalitäten ein höherer Stellenwert sowohl bei der Geschwindigkeitswahrnehmung als auch bei der unterbewussten Informationsaufnahme einzuräumen ist, als bislang geschehen. Eine Beeinflussung der Geschwindigkeitswahl des Fahrers über haptische oder akustische Signale eröffnet demnach neue Möglichkeiten, die in Ihrer Wirkung bisher kaum untersucht wurden.

Insbesondere in den USA stellen Rüttelstreifen ein verbreitetes Mittel dar, um Fahrer nach monotonen Streckenabschnitten auf eine geänderte Verkehrsführung – bspw.

eine Einmündung oder Kreuzung – vorzubereiten. Dieser Gedanke wurde auch in Europa – vornehmlich in Großbritannien – aufgegriffen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden messtechnische Vorversuche durchgeführt, in denen unterschiedliche Ausführungsvarianten und Anordnungen von TRS hinsichtlich ihrer physikalischen Wirkung auf den Fahrer analysiert wurden. Ein Pkw und ein Lkw wurden mit Beschleunigungssensoren, Messmikrofonen und einem Geschwindigkeitssensor ausgerüstet. Auf einer Teststrecke ohne Verkehr wurden unterschiedliche Varianten von Rüttelstreifen aufgebracht und mit den Fahrzeugen in allen relevanten Geschwindigkeitsbereichen mehrfach überfahren. Die Messdaten wurden im Nachgang hinsichtlich unterschiedlicher physikalischer und psychophysikalischer Kenngrößen analysiert. Als Resultat dieser messtechnischen Versuchsreihen konnte eine Bauform identifiziert werden, die sowohl in ihrer haptischen und akustischen Wirkung als auch im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit und den Straßenbetrieb als optimale Lösung bezeichnet werden kann. Die entwickelte Keilform mit modifizierter Oberfläche erzeugt einen kurzfristigen Anstieg der Innenraumakustik um bis zu 10 dB(A) und eine maximale Erhöhung der Vertikalschwingung um bis zu 4,0 m/s² (entspricht einer kurzfristigen Verzehnfachung des Schwingungssignals im Vergleich zum Grundpegel).

Die entwickelte Ausführungsvariante (vgl. Bild 97) wurde im Rahmen einer dezidierten verkehrstechnischen Untersuchung auf ihre Wirkung auf die Geschwindigkeitswahl analysiert. Im Kreis Düren wurden drei unfallträchtige Landstraßenkurven ausgewählt, in deren Annäherungsbereich transversale Rüttelstreifen auf die Straßenoberfläche aufgebracht wurden. Im Rahmen von verkehrstechnischen Erhebungen wurden Geschwindigkeitsmessungen und Videoaufzeichnungen in den Kurven und deren Annäherungsbereich sowohl vor als auch nach der Installation der TRS durchgeführt. Im Folgenden wurden die Geschwindigkeitsverteilungen vor und nach der Maßnahme bezüglich ihrer statistischen Signifikanz analysiert und die Geschwindigkeitsänderung durch die TRS quantifiziert. Die Datenanalyse erfolgte mehrstufig, so dass neben allgemeinen Aussagen zum Gesamtkollektiv auch kleinteiligere Analysen zur Geschwindigkeitsänderung einzelner Untergruppen möglich waren. Durch die Verknüpfung der Einzelfahrzeugdaten der Messquerschnitte zu streckenbezogenen Geschwindigkeitganglinien und einer Zuordnung von Metadaten aus den Videobeobachtungen konnten Aussagen zum Geschwindigkeitsverhalten von unbeeinflussten Fahrern, ortskundigen Fahrern und Fahrern bestimmter Fahrzeugtypen getroffen werden. Zusätzlich zur Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens wurde das allgemeine Fahrerverhalten auf Basis der Videodaten untersucht. Im Fokus standen hierbei das Spurhalteverhalten in den Kurven und die Reaktion der Fahrer auf die TRS.

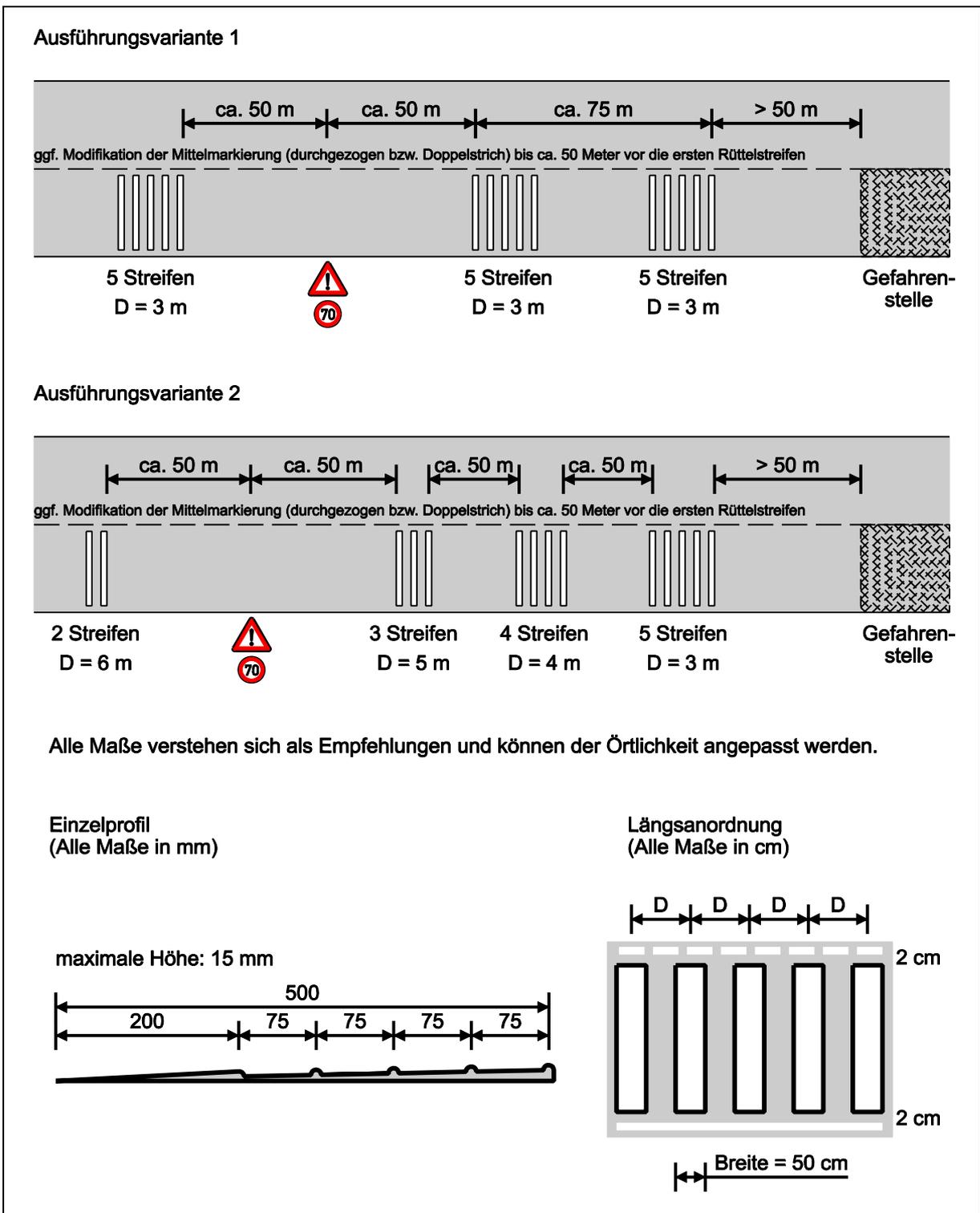


Bild 97: Ausführungsempfehlungen für transversale Rüttelstreifen im Annäherungsbereich von unfallträchtigen Landstraßenkurven

Zusammenfassend bestätigt sich die erwartete Wirkung der TRS auf das Geschwindigkeitsverhalten der Verkehrsteilnehmer. In Abhängigkeit von der Streckencharakteristik (Sichtweite, Kurvigkeit etc.), der Verkehrsbelastung und des Messquerschnitts wurden statistisch signifikante Geschwindigkeitsrückgänge (v_{85}) von 6 km/h bis zu 21 km/h beobachtet. Insbesondere die Ausgangsgeschwindigkeit scheint einen we-

sentlichen Einfluss auf die Höhe der Geschwindigkeitsreduktion zu haben. Je höher die Ausgangsgeschwindigkeit an den betrachteten Messquerschnitten, desto stärker entfaltet sich die geschwindigkeitsdämpfende Wirkung der TRS. Die Fahrer mit hohen Geschwindigkeiten (v_{95}) – deren Geschwindigkeitsreduktion im Fokus dieser Untersuchung stand – senkten ihre Geschwindigkeit in ähnlichen Größenordnungen (4 km/h bis maximal 14 km/h). Der prozentuale Anteil der Fahrer, die die zulässige Geschwindigkeit überschreiten, konnte auf allen Strecken durch die Applikation der TRS gesenkt werden.

Die geschwindigkeitsdämpfende Wirkung konnte exemplarisch in einer Linkskurve auf der L 257 auch anhand des Spurhalteverhaltens nachgewiesen werden. Die Güte der Spurhaltung ist nach SPACEK (1999), STEYER (2004) und VOLKENHOFF (2008) eng mit der Geschwindigkeit verknüpft. Nach der Applikation der TRS wurde eine deutliche Reduktion des Anteils der spurschneidenden Fahrzeuge verzeichnet. Sowohl der Rückgang der Geschwindigkeiten – insbesondere der schnellen Fahrer – als auch die daraus resultierende bessere Spurlage innerhalb der Kurven wird als positiv in Bezug auf die Verkehrssicherheit gewertet. Vereinzelt auftretende Manöver zur teilweisen oder vollständigen Umfahrung der TRS werden auf Grund der dabei zu verzeichnenden hohen Zeitlücken zum Gegenverkehr und der hohen Sichtweiten auf den Strecken analog zu Überholmanövern als unkritisch angesehen. Manöver wie bspw. starkes Abbremsen vor den Streifen oder unnatürliche Lenkbewegungen konnten während der verkehrstechnischen Erhebungen nicht beobachtet werden.

Die Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens erfolgte differenziert nach der Ortskundigkeit der Fahrer – ermittelt über die Häufigkeit der Sichtung auf der Strecke und das Ortskennzeichen – um Wahrnehmungsdefizite bzw. eine schlechte Beschilderung der Gefahrenstelle von einer erhöhten Risikobereitschaft besonders streckenkundiger Fahrer als Ursache für überhöhte Geschwindigkeit abzugrenzen. Die Analysen ergaben zwar eine deutliche Schichtung der Geschwindigkeitsganglinien und eine tendenziell niedrigere Geschwindigkeit der ortskundigen Fahrer, diese wurde jedoch durch statistische Tests als eher zufällig denn statistisch signifikant eingestuft. Analog verhielt es sich bei der Untersuchung differenziert nach Fahrzeugklassen. Diese sollte einen Hinweis auf die möglichen unterschiedlichen Wirkungen der TRS auf unterschiedlich gefederte bzw. schallgedämmte Fahrzeuge liefern. Auf allen Strecken konnte ein unterschiedliches Geschwindigkeitsverhalten und ein unterschiedlicher Geschwindigkeitsrückgang innerhalb der einzelnen Fahrzeugklassen beobachtet werden. Oberklassewagen vollzogen dabei entgegen den Erwartungen einen deutlich stärkeren Geschwindigkeitsrückgang durch die TRS als Kleinwagen. Es wurde vermutet, dass die TRS für Fahrer von Kleinwagen, die naturgemäß eine

geringere Dämpfung von Schwingungen und Akustik aufweisen, eine größere Wirkung entfalten und diese somit zu einer stärkeren Geschwindigkeitsreduktion bewegen, als die Fahrer von Oberklassefahrzeugen. Dieser erwartete Effekt scheint jedoch durch das Beschleunigungsvermögen der hochklassigen Fahrzeuge deutlich überlagert zu werden. Nach einer Geschwindigkeitsreduktion können deren Fahrer wieder schneller das Niveau ihrer Wunschgeschwindigkeit erreichen – das Abbremsen im Kurvenbereich wird eher in Kauf genommen als von Fahrern kleiner, meist schwächer motorisierter Fahrzeuge. Auch wenn die Unterschiede zwischen den einzelnen Fahrzeugklassen stark ausgeprägt scheinen, konnte eine statistische Signifikanz nicht nachgewiesen werden. Ob das Fahrerverhalten zwischen ortskundigen und ortsunkundigen Fahrern bzw. zwischen den einzelnen Fahrzeugklassen tatsächlich nur zufällig differiert oder der Stichprobenumfang zu niedrig gewählt wurde, um die Effekte statistisch klar abzugrenzen bzw. die untersuchten Einflussgrößen durch eine Vielzahl verhaltensbestimmender Parameter überlagert und so der statische Nachweis deutlich erschwert wird, bleibt offen.

Zusätzlich zu der verkehrstechnischen Wirkungsanalyse wurden Akzeptanzerhebungen in der Gruppe der Verkehrsteilnehmer durchgeführt und der Reaktion der Anwohner wissenschaftlich nachgegangen. Insbesondere im Hinblick auf die Nachhaltigkeit stellt die Akzeptanz aller Beteiligten eine wesentliche Größe dar. Die Verkehrsteilnehmer wurden auf allen Strecken nach einer Eingewöhnungsphase von mindestens drei Monaten befragt. Die Erhebung gliederte sich in mehrere Blöcke, in denen neben allgemeinen Kenngrößen (Alter, Fahrleistung etc.) die direkte Akzeptanz hinsichtlich der Maßnahme TRS und allgemeine Einschätzungen zum Risikoempfinden abgefragt wurden. Der überwiegende Anteil der Befragten steht der Maßnahme aufgeschlossen gegenüber. Insbesondere der Anteil der ortskundigen Fahrer begrüßte, dass in den – als Unfallschwerpunkt bekannten – Kurven etwas unternommen wurde. Der von den TRS ausgehende Diskomfort wird von den Befragten heterogen bewertet. Von „nicht bemerkbar“ bis „extrem störend“ waren alle Einschätzungen mit ähnlicher Häufigkeit vertreten. Der positiven Akzeptanz innerhalb der Gruppe der Verkehrsteilnehmer steht die weniger positive Reaktion der Bevölkerung gegenüber. An zwei Strecken gab es Anwohnerbeschwerden über unzumutbare Lärmbelastungen durch die TRS. Diese wurden durch stichprobenartige Kurzzeit- und Langzeitmessungen (24h) überprüft. Während sich der subjektiv empfundene Lärmanstieg an einer Strecke messtechnisch bestätigte, konnte an der zweiten Strecke keine Zusatzbelastung festgestellt werden. An beiden Strecken wurden die TRS auf Wunsch der Baulastträger nach Abschluss der Untersuchungen zurückgebaut. Es bleibt zu diskutieren, ob die ländliche Wohnlage mit geringen Hintergrundgeräuschpegeln die Anwohner empfindlich auch gegen kleinste Änderungen der Ge-

räuschzusammensetzung und der Höhe der Immissionspegel macht, oder ob das Argument Lärmbelastung herangezogen wurde, um die Maßnahme aus anderen Gründen zu verhindern. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob sich eine Ausführungsvariante entwickeln lässt, die zum einen ähnlich kostengünstig herzustellen ist, zum anderen jedoch deutlich niedrigere externe Lärmemissionen erzeugt, so dass sich die TRS einem deutlich breiten Anwendungsbereich zuführen lassen. Als Fazit der Anwohnerreaktionen werden ein ausreichender Abstand zur Wohnbebauung und eine besondere Beachtung der Bevölkerung beim Einsatz von TRS empfohlen.

Die von den TRS ausgehende Geschwindigkeitsreduktion hat das vorrangige Ziel, die Verkehrssicherheit zu erhöhen, also die Unfallzahlen zu reduzieren. Auf Grund der kurzen Betrachtungszeit nach Installation der TRS auf zwei Strecken (< 6 Monate) kann lediglich für die Strecke L 257 eine Aussage zur unfalldämpfenden Wirkung der TRS getroffen werden. Im Vergleich Vorher (3 Jahre) Nachher (2 Jahre) ereigneten sich deutlich weniger Unfälle (50 %) in der untersuchten Kurve. Auf Grund des geringen Umfangs an Daten kann diese Aussage jedoch nur als Tendenz und nicht als statistisch abgesichertes repräsentatives Ergebnis gewertet werden. Ähnliche Untersuchungen von BAZZARI (2006) und FREEMAN et al. (2008) wiesen jedoch eine Unfallreduktion zwischen 35 % und 60 % durch den Einsatz von TRS nach.

Die Untersuchung zum Einfluss von Fahrzeuginnenraumakustik und -vibrationen auf die Geschwindigkeitswahl von Kraftfahrern lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Fahrzeugschwingungen und die Fahrzeuginnenraumakustik haben einen bedeutenden – jedoch meist unterschätzten – Einfluss auf die Geschwindigkeitswahrnehmung von Kraftfahrern.
- Das Fahrerverhalten kann gezielt durch haptische und akustische Signale beeinflusst werden.
- Transversal aufgebrachte Rüttelstreifen (TRS) erzeugen Signale, die zum einen die Aufmerksamkeit erhöhen und die Gefahr einer Kurve verdeutlichen und zum anderen einen Diskomfort auslösen, der die Geschwindigkeitswahl der Kraftfahrer positiv beeinflusst.
- Durch den Einsatz von transversalen Rüttelstreifen vor gefährlichen Landstraßenkurven konnte die Geschwindigkeit (v_{85} , v_{95}) der Kraftfahrer um 6 km/h bis 14 km/h, im Einzelfall sogar bis zu 21 km/h gesenkt werden.
- TRS stellen ein kostengünstiges Mittel zur Beeinflussung der Geschwindigkeit und damit zur Erhöhung der Verkehrssicherheit dar.

Es bleibt zu diskutieren, inwieweit der Ansatz der „Selbsterklärenden Straße“ schlüssig und ganzheitlich umgesetzt werden kann. Derzeit werden vorrangig visuelle Kenngrößen berücksichtigt und in den Entwurfsgrundlagen nach RAL und RAA verankert. Eine Berücksichtigung der Akustik und Haptik – bspw. hervorgerufen durch unterschiedliche Beläge – erfolgt bislang nicht: *„Der Informationsgehalt der akustischen Informationen ist jedoch ein nicht zu missachtender Einflussfaktor auf das Fahrgefühl.“* (WOLF/BUBB, 2005) Vor diesem Hintergrund scheint eine Anpassung der Fahrbahnoberflächeneigenschaften – im Hinblick auf die Erzeugung unterschiedlicher Rollgeräusche und Fahrzeugschwingungen – die logische Konsequenz für ein schlüssiges Entwurfskonzept. Darüber hinaus stellt sich die Frage, inwieweit die zunehmende Isolierung des Fahrers von den haptischen und akustischen Sinneseindrücken des Fahrens – hervorgerufen durch die Bemühungen der Automobilindustrie, den Fahrkomfort durch immer stärkere Dämmung und Dämpfung der Fahrgastkabine zu erhöhen – einen negativen Einfluss auf die Geschwindigkeitswahrnehmung und damit auf das Fahrerverhalten nach sich zieht: *„In diesem Zusammenhang erscheint das Bemühen der Fahrzeugkonstrukteure, für gute Schallisolation zu sorgen, um die Umweltbelastung zu verringern, als Entzug von relevanten Informationen, was die Leistungsfähigkeit der auditiven Sinnesmodalitäten herabsetzen dürfte. [...] Der Geräuschpegel dient auf jeden Fall als akustische Information für die Wahrnehmung der Geschwindigkeit. Aus diesem Grund ist es erwünscht, dass der Fahrzeugkonstrukteur den Lenker nicht allzu stark von dieser Informationsquelle isoliert. Hingegen sollte die Lärmemission in der Umwelt auf ein Minimum herabgesetzt werden.“* (COHEN, 1986) Inwieweit eine Optimierung aller Ansprüche an die Verkehrssicherheit, das Komfortempfinden der Fahrer und die Minimierung der Emissionen des Verkehrs erfolgen kann, bleibt jedoch offen.

11 Literaturverzeichnis

ALASKA DOT: Rumble Strip Policy. Alaska Department of Transportation and Public Facilities, 2001.

Al-Kassar, B., Hoffmann, G., Zmeck, D.: Der Einfluss der Streckenmerkmale auf die Momentangeschwindigkeit frei fahrender Pkw. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 323, Bonn-Bad Godesberg, 1981.

Bernard, B.: In the Theater of Consciousness: The Workspace of the Mind. NY: Oxford University Press, 1997.

Bach-y-Rita, P.: Tactile Sensory Substitution Studies. Annals of the New York Academy of Science, 1013, Seiten 83-91, 2004.

Bahar, G., Erwin, T., MacKay, M., Smiley, A., Tighe, S.: Best Practice Guidelines for the Design and Application of Transverse Rumble Strips. Transportation Association of Canada (TAC), Ottawa, 2005.

Baier, M.M., Hotop, R., Kemper, D., Steinauer, B.: Empfehlungen zum Einsatz von Warnschwellen zur Sicherung von stationären Arbeitsstellen kürzerer Dauer auf Autobahnen, Straße und Autobahn 56, 2005.

Bakaba, J.E.: Ableitung vereinfachter Modellansätze zur Geschwindigkeitsprognose auf Außerortsstraßen auf der Grundlage der verfügbaren Variablen aus der Straßendatenbank. Fakultät für Verkehrswissenschaften „Friedrich List“ der Technischen Universität Dresden, Lehrstuhl für Gestaltung von Straßenverkehrsanlagen, Schriftenreihe SVA, Heft 5, Dresden, 2003.

Baselau, C.: Entwicklung eines Verfahrens zur Beurteilung der Verkehrsqualität auf Straßen mit 2+1-Verkehrsführung. Schriftenreihe der Professur Verkehrsplanung und Verkehrstechnik, Heft 3, Weimar, 2005.

Bazzari, M.: Spot Safety Project Evaluation of the Transvere Rumble Strips Installation on SR 1605 Paul Payne Store Rd at the Intersection with SR 1610 Millersville Rd in Alexander County. Department of North Carolina: Final Report, Safety Spot Project No.: 12-99-201, 2006.

Beall, A.C., Loomis, J.M.: Visual Control of Steering Without Course Information. In: Perception 25, Nr. 4, Seiten 481-494, 1996.

Beers, J., Hubert, S.: Judgement of Vehicle Speeds and Traffic Patterns. UCLA-Eng-7281, Final Report, 1972.

Becher, Th., Baier, M.M.: Einfluss der Straßenraumgestaltung auf Fahrverhalten und Unfallgeschehen in Baumalleen. In: Perspektiven für das Straßenwesen, Aachener Mitteilungen Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Nr. 43, Seiten 71-92, Aachen, 2003.

Becher, T., Baier, M.M., Steinhauer, B., Scheuchenpflug, R., Krüger, H.-P.: Berücksichtigung psychologischer Aspekte beim Entwurf von Landstraßen - Grundlagenstu-

die. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft V 148. Bergisch Gladbach, 2006.

Beckenbauer, T.: Reifen-Fahrbahn-Geräusche – Minderungspotenziale der Straßenoberfläche, Plenarvortrag zur DAGA in Aachen, 2003.

Bellmann, M.A.: Perception of Whole-Body Vibrations: From Basic Experiments to Effects of Seat and Steering Wheel Vibrations on the Passenger's Comfort Inside Vehicles. Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, 2001.

Berger W.J.: Evaluation of Accident Black-Spot Redevelopment – Investigated at a Sample of Sites, In: ICTCT 97 Conference, Proceedings, ICTCT and the Department of Traffic Planning and Engineering Lund University, Lund, 1997.

Bhargava, A., Scott, M., Taylor, R., Chung, R., Mrozek, K., Wolter, J.: Effect of Cognitive Load on Tactor Location Identification in Zero-G. In: Proceedings of the 2005 World Haptics Conference, Seiten 56-62, 2005.

Bloemhof, H.: Sound Engineering. Vortrag anlässlich der Ringvorlesung des Instituts für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT) der Universität Stuttgart, Stuttgart, 29.10.2002.

Brannolte, U., Holz, S.: Simulation des Verkehrsablaufs auf Landstraßen – Modellerweiterung, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 402, Bonn, 1983.

Brannolte U., Dilling, J., Durth, W., Hartkopf, G., Meewes, V., Rohloff, M., Schliesing, H., Stievermann, P.: Einsatz von Zwischenquerschnitten. Bericht der Projektgruppe „Zwischenquerschnitte“ der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1992.

Brannolte, U., Barth, H.-B., Schwarzmann, R., Junkers, W., Liu, Y., Sigthorsson, H., Stein, J.: Sicherheitsbewertung von Querschnitten außerörtlicher Straßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Verkehrstechnik, Heft V 5, Bergisch Gladbach, 1993.

Briggs, G.E.: Driving as a Skilled Performance. In: Driver Behaviour Cause and Effect. Proceedings of the Second Annual Traffic Safety Research, Symposium of the Automobile Insurance Industry, Northbrook, Washington: Institute for Highway Safety, 1986.

Brilon, W., Bäumer, H., Weiser, F.: Mechanisch-akustische Bremsen in Verbindungsrampen von Autobahnknoten. Schlussbericht für das Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Energie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen, 2001.

Bubb, H.: Analyse der Geschwindigkeitswahrnehmung im Kraftfahrzeug, Zeitung für Arbeitswissenschaft, Vol. 31, München, 1977.

Buck, M.: Geschwindigkeitsverhalten auf einbahnigen Außerortsstraßen in Abhängigkeit von baulichen, betrieblichen und verkehrlichen Randbedingungen. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 621, Bonn-Bad Godesberg, 1992.

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Wohnungswesen: Verkehrsbericht 2000: Integrierte Verkehrspolitik – Unser Konzept für eine mobile Zukunft. Berlin, 2000.

Burns, N.R., Zanker, J.M.: Estimating Internal Noise for the Human Visual-Motion-Detection Mechanisms. *Perception* 29, Seite 92, 2000.

Carlson, P.J., Miles, J.D.: Effectiveness of Rumble Strips on Texas Highways: First Year Report. Texas Transportation Institute with Texas Department of Transportation and Federal Highway Administration, The Texas A&M University Systems, College Station, Texas, 2003.

Chubb, G.P., Ernst, R.L.: Studies of Velocity Attainment. *Highway Research Abstracts*, Seite 78-79, 1963.

Cirillo, J.A.: Interstate System Accident Research – Study II – Interim Report II. *Public Roads*, Vol. 35, Nr. 3, 1986.

Cohen, A.S.: Möglichkeiten und Grenzen visueller Wahrnehmung im Straßenverkehr. Bergisch Gladbach, 1986.

Cohen, A.S.: Fahrt auf Sichtabstand bei Nacht: Eine bisher unerfüllbare Forderung des Gesetzgebers. *Fortschritte der Verkehrspsychologie*. Fortbildungsveranstaltung der Sektion Verkehrspsychologie im Berufsverband Deutscher Psychologen e. V., 1988.

Cohen, A.S.: Psychisch bedingte Straßenbreiten. Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1996.

Comunitat valenciana: Recomendaciones de la dirección general de obras públicas para la ejecución de Bandas Transversales de Alerta en carreteras del sistema viario de la comunidad valenciana, Conselleria de Infraestructuras y Transporte, Valencia, 2006.

Corbett, C.: Going Against Our Better Judgment: Akrasia and Those Unexplained Decisions to Drive Faster. *Behavioural research in road safety V11*. Transportation Research Laboratory, Growthorne, 1997.

Corbett, C., Simon, F., O'Connell, M.: The Deterrence of High Speed Driving: a Criminological Perspective. TRL Report TRL 296, Transportation Research Laboratory, Crowthorne, 1998.

Corkle, J., Montebello, D., Marti, M.: Synthesis on the Effectiveness of Rumble Strips. Minnesota Department of Transportation, Final Report MN/RC 2002-07, St. Paul, 2001.

Crocker, M.J.: *Handbook of Noise and Vibration Control*, New Jersey, USA, 2007.

Crowley, F.: Speed Control Devices for Roads Other than Residential. Environmental Research Unit, RS.387b, Dublin, 1993.

Davidse, R., Driel, C.V., Goldenbeld, C.: The Effect of Altered Road Markings on Speed and Lateral Position. A Meta-Analysis – Report (R-2003-31), SWOV Institute for Road Safety Research, Leidschendam, 2003.

- Davis, G.A., Davuluri, S., Pei, J.: Speed as a Risk Factor in Serious Run-off-Road Crashes: Bayesian Case-Control Analysis with Case Speed Uncertainty. *Journal of Transportation and Statistics*. 9 (1), S. 17-28, 2006.
- Denton, G.G.: The Use of Speedometer as an Aid of Driving. *Ergonomics* Vol. 12, Harmondsworth, 1966.
- Denton, G.G.: A Subjective Scale of Speed when Driving a Motor Vehicle. *Ergonomics*, Vol. 9, No. 3, Seite 203-210, Harmondsworth, 1966.
- Denton, G.G.: The Influence of Adaption on Subjective Velocity for an Observer in Simulated Rectilinear Motion. *Ergonomics*, 19, Seiten 409-430, 1976.
- De Silva, H.R.: *Why We Have Automobile Accidents*. New York, 1946.
- Dilling, J.: Fahrerverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 151, Bonn, 1973.
- Donovan, P., Rymer, B.: Assessment of Highway Pavements for Tire/Road Noise Generation. Society of Automotive Engineers Noise & Vibration Conference and Exhibition (pp. Paper 03NVC-232). Grand Traverse, MI: Society of Automotive Engineers, 2003.
- Dornhöfer, S.M., Pannasch, S.: Erhöhung der Verkehrssicherheit durch die Online-Registrierung von Blickbewegungsparametern. Marburg, 2000.
- Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V. (DVR): Schwerpunktaktion 2007: Kein Platz für Kreuze, http://www2.dvr.de/site.aspx?url=html/presse/infodienst/803_10.htm (gelesen am 20.12.2007).
- Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V. (DVR) und Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Schwerpunktaktion 2008/2009: Runter vom Gas. <http://www.runter-vom-gas.de> (gelesen am 13.02.2009).
- Durth, W., Biedermann, B., Vieth, B.: Einflüsse der Erhöhung der Geschwindigkeiten und Beschleunigungen von Fahrzeugen auf die Entwurfsgeschwindigkeit. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 385, Bonn-Bad Godesberg, 1983.
- Durth, W., Weise, G., Bark, A., Lippold, C., Sossoumihen, A.: Überprüfung der Relationstrassierung für Straßen der Kategoriegruppe A. FA 02.153 R93E im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Zwischenbericht (unveröffentlicht), Darmstadt, 1995.
- Erp, J.B.F.V., Veen, H.A.H.C.V.: Vibrotactile in-Vehicle Navigation System. *Transportation Research. Part F, Traffic Psychology and Behaviour*. 7F (4-5), Seiten 247-256, 2004.
- Ellinghaus, D., Schlag, B., Steinbrecher, J.: Leistungsfähigkeit und Fahrerverhalten älterer Kraftfahrer, Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Unfall- und Sicherheitsforschung, Heft 80, Bergisch Gladbach, 1990.

Ellinghaus D., Steinbrecher J.: Fahren auf Landstraßen: Traum oder Albtraum? Untersuchungen zum Fahrverhalten und Fahrvergnügen von Pkw-Fahrern auf Landstraßen. Uniroyal-Verkehrsuntersuchung 28, 2003.

Elvik, R., Vaa, T.: The Handbook of Road Safety Measures. Amsterdam, 2004.

European Road Safety Observatory (ERSO): Speeding. www.erso.eu, 2007.

Evans, L.: Speed Estimation from a Moving Automobile, Ergonomics Vol. 13, Warren, 1970.

Evans, L.: Risk Homeostasis Theory and Traffic Accident Data. Risk Analysis, 6 (1), Seiten 81-94, 1986.

Eves, D.A., Novak, M.M.: Extraction of Vector Information Using a Novel Tactile Display. Displays, 18, Seiten 169-181, 1998.

Felisberti, F.M., Zanker, J.M.: Does Attention Affect Transparent Motion Perception? Perception 33, Seite 124, 2004.

Fildes, B.N., Rumbold, G., Leening, A.: Speed Behaviour and Drivers' Attitude to Speeding. Report 16, Monash University Accident Research Center, Monash, 1991.

Finch, D.J., Kompfner, P., Lockwood, C.R., Maycock, G.: Speed, Speed Limits and Crashes. Transport Research Laboratory TRL, Crowthorne, Berkshire, 1994.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Verkehrsplanung: Empfehlungen für Verkehrserhebungen – EVE 91. Ausgabe 1991.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Begriffsbestimmungen im Straßenbau, Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb. Köln, 2000.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe Verkehrsmanagement: Merkblatt zur Verbesserung der Verkehrssicherheit auf Motorradstrecken (MVMot). Ausgabe 2007.

Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV): Hinweise zur Visualisierung von Entwürfen für außerörtliche Straßen (HViSt), Ausgabe 2008.

Freeman, J.R., Bansen, J.A., Wemple, B., Spinks, R.: Innovative Operational Safety Improvements at Unsignalized Intersections. Florida Department of Transportation: Final Report 7957, Tallahassee, 2008.

Fuller, R.: Towards a General Theory of Driver Behaviour. Accident; Analysis and Prevention. 37 (3), Seiten 461-72, 2005.

Gegenfurtner, K.R.: Sinnespsychologie und Wahrnehmung. Vorlesungsskript, gelesen 2006.

Gibson, J.J.: The Perception of the Visual World. Westport, Greenwood Press. 1974.

Gilliland, K., Schlegel, R.E.: Tactile Stimulation of the Human Head for Information Display. *Human Factors*, 36, Seiten 700-717, 1994.

Glanville, W.H.: Report of the Director of Road Research for the Year 1994. *Road Research 1954*, Seiten 12-13 und 27-30, 1955.

Godley, S.T., Triggs, T.J., Fildes, B.N.: Perceptual Lane Width, Wide Perceptual Road Centre Markings and Driving Speeds. In: *Ergonomics* 47, Nr. 3, Seiten 237-256, 2004.

Griffin, M.J.: *Handbook of Human Vibration*. Human Factors Research Unit, Institute of Sound and Vibration Research, The University of Southampton, Academic Press Limited, London, 1990.

Hacker, W.: *Arbeitspsychologie - Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten*. Schriften zur Arbeitspsychologie, Band 41, Bern, Stuttgart, Toronto, 1986.

Hacker, W.: *Allgemeine Arbeitspsychologie*. Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten (2. Ausgabe), Göttingen, 2005.

Harder, K.A., Bloomfield, J.R., Chihak, B.J.: The Effects of In-Lane Rumble Strips on the Stopping Behaviour of Attentive Drivers. Minnesota Department of Transportation: Final Report MN/RC 2002-11, St. Paul, 2001.

Harder, K.A., Bloomfield, J.R.: The Effects of In-Lane Rumble Strips on the Stopping Behaviour of Sleep-Deprived Drivers. Minnesota Department of Transportation: Final Report 2005-16, St. Paul, 2005.

Harder, K.A., Bloomfield, J.R., Chihak, B.J.: Stopping Behaviour at Real-World Stop-Controlled Intersections with and without In-Lane Rumble Strips. Minnesota Department of Transportation, Final Report MN/RC 2006-42, St. Paul, 2006.

Harms, L.: The Influence of Sight Distance on Subjects' Lateral Control: A Study of Simulated Driving in Fog. Paper presented at the Vision in Vehicles IV, Leiden, 1993.

Harwood, D.W.: Use of Rumble Strips to Enhance Safety. *Synthesis of Highway Practice*, 191. Washington, D.C.: National Academy Press, 1993.

Hegger, R., Weise, G.: Fahrerverhalten und Aktivierung von Kraftfahrern als Kriterien zur Bewertung der Linienführung von Außerortsstraßen. *Fortschritte der Verkehrspsychologie*, Bonn, 1997.

Helander, M.G., Soderberg, S.: Driver Activation Level and Road Demand. Division of Highway Engineering (Technical Report No. 11), Chalmers University of Technology, Göteborg, 1973.

Hella KG Hueck & Co.: ADAS – Advanced Driver Assistance Systems: Lane Departure Warning (LDW). Produktkatalog, 2009.

Herberg, K.-W.: Geschwindigkeit – eine verkehrspsychologische Betrachtung. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 29, Heft 4, Seiten 154-161, 1983.

Ho, C., Tan, H.Z., Spence, C.: Using Spatial Vibrotactile Cues to Direct Visual Attention in Driving Scenes. *Transportation Research Part F* 8, Seiten 397-412, 2005.

Hirsch, M.: Disaggregate Analysis of Speeding Behaviour of Drivers. *Transportation Research Record* 1059, 1986.

Höhnscheid, K.-J., Lippard, D., Bartz, R.: Entwicklung der Anzahl Schwerstverletzter in Folge von Straßenverkehrsunfällen in Deutschland. *Wissenschaftliche Informationen der Bundesanstalt für Straßenwesen Nr. 05*, Bergisch Gladbach, 2005.

Illinois Department of Transportation: Safety Engineering Policy Memorandum. SAFETY 1-06 Highway Safety Improvement Program (HSIP) Effective November 1, 2006. Appendix E: Guidelines to Counter Measure Effectiveness & Crash Reduction Factor. Springfield, 2006.

Iteris Inc.: Innovation for Better Mobility: Vehicle Sensors – Automotive Safety Solutions. Produktkatalog, 2009.

Klebensberg, D.: Verkehrspsychologie, Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York; 1982.

Kleinschmidt, P.: Entwurfs- und Verkehrssicherheitsanforderungen für den Um- und Ausbau vorhandener einbahniger Außerortsstraßen. In: Festschrift zum 65. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Weise. Fakultät für Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Institut für Verkehrsanlagen, Lehrstuhl Planung und Entwurf von Straßenverkehrsanlagen und Anlagen des Luftverkehrs, Seiten 149-162, Dresden, 2000.

Kloeden, C.N., Ponte, G., Moore, V.M., McLean, A.J.: Travelling Speed and the Risk of Crash Involvement. Volume 1: Findings, 1997.

Kloeden, C.N., Ponte, G., McLean, A.J.: Travelling Speed and the Risk of Crash Involvement on Rural Roads. A.C.T.: Australian Transport Safety Board, Canberra, 2001.

Kloeden, C.N., McLean, A.J., Glonek, G.: Reanalysis of Travelling Speed and the Risk of Crash Involvement in Adelaide South Australia. A.C.T.: Australian Transport Safety Board, Canberra, (2002).

Köppel, G., Bock, H.: Fahrgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Kurvigkeit. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 269, Bonn, 1979.

Krebs, H.G., Damianoff, N.: Geschwindigkeitsverhalten bei Gefahrenzeichen, in Kurven und an Stellen mit Geschwindigkeitsbeschränkung. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, Heft 380, Bonn, 1983.

Kupke, P.: Simulatorexperimente zum trassenabhängigen Fahrverhalten und Überprüfung der Linienführung. *Veröffentlichungen des Instituts für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe*, Heft 16, Karlsruhe, 1977.

Land, M., Horwood, J.: Which Parts of the Road Guide Steering? In: *Nature* 377, Nr. 6547, Seiten 339-340, 1995.

Landwehr, K.: Optical Guidance Revisited. Paper presented at the Vision in Vehicles III. Aachen, 1991.

Lank, C., Becher, T., Steinauer, B., Erli, H.-J., Sellei, R.M.: Differenzierte Betrachtung der Verletzungsschwere - Teil 1: Grundlage effizienter Verkehrssicherheitsarbeit. Zeitschrift für Verkehrssicherheit. 55, 2009.

Lank, C., Steinauer, B., Busen, C.: Fahrbahnbeläge zur Beeinflussung der Geschwindigkeitwahl. Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 03.401, BAST-Reihe "Verkehrstechnik" Band V 190, Bergisch Gladbach, 2009.

LFU 2004: Lärmarme Reifen und geräuschkindernde Fahrbahnbeläge, Erkenntnisse – Maßnahmen – Konzepte, Landesanstalt für Umweltschutz, Karlsruhe, 2004.

Leatherwood, J.D., Clevenson, S.A., Hollenbaugh, D.D.: Evaluation of Ride Quality Prediction Methods for Helicopter Interior Noise and Vibration Environments. NASA Technical Paper 2261, AVSCOM Technical Report 84-D-2, Hampton, 1984.

Lefevre, B.A.: Speed Habits Observed on a Rural Highway. HRB Vol. 33, Seiten 409-428, 1954.

Lerner, M., Hegewald, A., Löhe, U., Velling, H.: Sicherheitswirkung eingefräster Rüttelstreifen entlang der BAB A 24. Heft V177, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2009.

Leutzbach, W., Brannolte, U., Schmidt, M., Baumann, N.: Untersuchung des Verkehrsablaufs auf einbahnigen Straßen unter besonderer Berücksichtigung langsamer Fahrzeuge. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 551, Bonn-Bad Godesberg, 1989.

Levelt, P.: Speed and Motivation: Established and Newly Developed Ideas About the Content of Questionnaires and the Designing of Campaigns. Brüssel, 1998.

Lippard, D., Meewes, V.: Geschwindigkeiten in den neuen Bundesländern - Verhaltensänderungen 1991 – 1993 Neue Fahrbahnen, Ausstattung, Umfeld. In: Mitteilungen Nr. 35, HUK-Verband – Beratungsstelle für Schadensverhütung, Köln, 1994.

Lippold, C.: Weiterentwicklung ausgewählter Entwurfsgrundlagen von Landstraßen. Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen, Darmstadt, 1997.

Lipscombe, A., Wilkinson, D.: The Speeding Driver. Traffic Management and Road Safety, 1996.

Maier, R.: Ortsdurchfahrten, Verbesserung der Verkehrssicherheit. Mitteilungen der Beratungsstelle für Schadenverhütung Nr. 31, Köln 1991.

Maier, R., Meewes, V.: Fahrbahnbreite und Geschwindigkeitsverhalten. In: Straßenverkehrstechnik 34 (1990), Nr. 2, Seiten 49-54, 1990.

Maier, R., Meewes, V., Neumann, V.: Baumspiegel und überwachtes Tempo 80 in Alleen. In: Geschwindigkeiten – Überholen – Unfälle, Institut für Straßenverkehr (ISK)

des Gesamtverbands der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V. (GDV), Köln, 1999.

Matena, S., Louwse, W., Schermers, G., Vaneerdewegh, P., Pokomy, P., Gaintanidou, L., Elvik, R., Cardoso, J.: Road Design and Environment – Best Practice on Self Explaining and Forgiving Roads. RIPCORDEREST, 2005.

Matthews, M.L., Cousins, L.R.: The Influence of Vehicle Type on the Estimation of Velocity While Driving. Ergonomics, Vol. 23, No. 12, Seiten 1151-1160, 1980.

McKenna, F.P.: What Role Should the Concept of Risk Play in Theories of Accident Involvement? Ergonomics 31 (4), Seiten 469-484, 1988.

Meyer, E.: Evaluation of Portable Rumble Strips (Advanced Traffic Markings). Midwest Smart Work Zone Deployment Initiative, 2004 Program Year Research Proposal, Lawrence, 2006.

Miles, J.D., Carlson, P.J., und Pratt, M.P.: Traffic Operational Impacts of Transverse, Centreline and Edgeline Rumble Strips. Texas Transportation Institute with Texas Department of Transportation and Federal Highway Administration, The Texas A&M University Systems, College Station, Texas 2005.

Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge. Band B: Schwingungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo; 1984.

Moore, A.F.: Evaluation of Experimental Rumble Strips. Louisiana Department of Transportation and Development: Final Report 186, 1987.

NASA-AVSCOM: Evaluation of Ride Quality Prediction Methods for Helicopter Interior Noise and Vibration Environments, Virginia, 1984.

Näätänen, R., Summala, H.: Road-User-Behaviour and Traffic Accidents. Amsterdam, Oxford: North-Holland Publishing Company, 1976.

Nilsson, G.: Traffic Safety Dimensions and the Power Model to Describe the Effect of Speed on Safety. Bulletin / Lunds tekniska högskola, Institutionen för teknik och samhälle, Lunds universitet, Dissertation, Lund, 2004.

North Carolina Department of Transportation: North Carolina Project Development Crash Reduction Factor Information. 2007.

Northern Territory Government (NTG): Saver Road Use – a Territory Imperative. NT Road Safety Taskforce Report, Darwin, 2006.

Otten, N., Schroiff, H.-W.: Untersuchungen zu Determinanten der Geschwindigkeitswahl – Bericht 2 – Streckencharakteristik und Geschwindigkeitswahl. Bericht zum Forschungsprojekt 8525/2, Heft U169, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 1988.

Palm, I., Schmidt, G.: Querschnittsbreiten einbahniger Außerortsstraßen und Verkehrssicherheit. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik, Heft V 84, Bergisch Gladbach, 1999.

Parasuraman, R., Davies, D.R.: Varieties of Attention. Academic Press Series in Cognition and Perception. Academic Press, Orlando, 1984.

Parker, D., Manstead, A., Stradling, S., Senior, V.: The Development of Remedial-Strategies for Driving Violations. TRL Report TRL 330. Transportation Research Laboratory, Growthorne, 1998.

Quimby, A., Maycock, G., Palmer, C., Butress, S: The Factors that Influence a Driver's Choice of Speed – a Questionnaire Study. TRL Report TRL 325, Transportation Research Laboratory, Growthorne, 1999.

Ray, B., Kittelson, W., Knudsen, J., Nevers, B., Ryus, P., Sylvester, K., Potts, I., Harwood, D., Gilmore, D., Torbic, D., Hanscom, F., McGill, J., Stewart, D.: Guidelines for Selection of Speed Reduction Treatments at High Speed Intersections. NCHRP Report 613, Transportation Research Board, Washington D.C., 2008.

Reason, J.T., Manstead, A.S.R., Stradling, S.G., Parker, D., Baxter, J.S.: The Social and Cognitive Determinants of Aberrant Driving Behaviour. Contractor Report CR 253, Transportation Research Laboratory, Crowthorne, 1991.

Richter P., Wagner, T., Heger, R., Weise, G.: Psychophysical Analysis of Mental Load During Driving on Rural Roads. A Quasi-Experimental Field Study. In: Ergonomics 41 (1998), Nr. 5, Seiten 593-609, 1998.

Roszell, B.J., Braaksma, J.P.: Causes of Variation in Automobile Speed a Long a Parkway. Transportation Research Record 782, 1980.

Rudinger, G., Holte, H.: Die subjektive Sicherheitsbewertung von Baumalleen mit Varianten der Straßenausstattung. In: Straßenverkehrstechnik 38 (1994), Nr. 5, Seiten 291-294, 1994.

Ruwenstroth, G., Kuller, E.C., Radder, F.: Untersuchungen zu Determinanten der Geschwindigkeitswahl Bericht 3 – Situationsangemessene Geschwindigkeitswahl auf Außerortsstraßen (ohne BAB). Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft U193, Bereich Unfallforschung, Bergisch Gladbach, Februar 1989.

Sachs, L.: Angewandte Statistik - Anwendung statistischer Methoden, 7. Auflage, Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York; 1992.

Sandberg, U., Ejsmont, J.A.: Tyre/Road Noise Reference Book, Kisa, Schweden, 2002.

Sanders, A.F.: A Summary of Resource Theories from a Behavioural Perspective. Biological Psychology, 45 (1-3), Seiten 5-18, 1997.

Sartre 2 Report Part 1: The Attitude and Behaviour of European Car Drivers to Road Safety. Brüssel, 1998.

Schagen, I.V., Janssen, T.: Managing Road Transport Risks: Sustainable Safety in the Netherlands. IATSS Research. 24 (2), 2000.

Schmidt, L.: Einhaltung und Überschreitung lokaler Geschwindigkeitsbeschränkungen. Arbeiten aus dem Verkehrspsychologischen Institut VI, Kuratorium für Verkehrssicherheit, Kleine Fachbuchreihe, Band 19, Wien, 1982.

Schönborn, H.D.: Markierungen und Verkehrssicherheit. In: Straßenverkehrstechnik 37 (1993), Nr. 6, Seiten 300-307, 1993.

Schumann, J., Naab, K.: On the Effectiveness of an Active Steering Wheel in Critical Driving Situation – A Proving Ground Experiment. In: Proceedings of the Conference of Road Safety in Europe, Seiten 194-208, 1992.

Schweigert, M.: Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben. Dissertation, München, 2003.

Seimetz, U.: Untersuchung zur räumlichen Verteilung von Unfällen am Beispiel der Stadt Aachen. Studienarbeit am Lehrstuhl für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, (unveröffentlicht), Aachen, 2009.

Shinar, D.: Speed and Crashes – a Controversial Topic and an Elusive Relationship. In: Managing speed – Review of Current Practice for Setting and Enforcing Speed Limits. Transportation Research Board, National Academy Press, Washington D.C., 1998.

Silock, D., Smith, K., Knox, D., Beuret, K.: What Limits Speed? Factors that Affect How Fast we Drive. Basingstoke, 1999.

Sivak, M.: The Information that Drivers Use: Is it Indeed 90% Visual? Transportation Research Board, Perception, Vol. 25, Seite 1081-1089, 1996.

Snider, J.N.: Capability of Automobile Drivers to Sense Vehicles Velocity. Highway Research Record, 159, Seiten 23-35, 1967.

Sklar, A.E., Sarter, N.B.: Good Vibrations: Tactile Feedback in Support of Attention Allocation and Human-Automation Coordination in Event Driven Domains. Human Factors, 41, Seiten 543-552, 1999.

Solomon, D.: Accidents on Main Rural Highways Related to Speed, Driver, and Vehicle. Bureau of Public Roads, Washington, D.C., 1964.

Sossoumihen, A.J.: Entwicklung eines Rahmenkonzepts zur Bewertung der Linienführung von Außerortsstraßen nach der Zielfunktion Fahrsicherheit. Fakultät für Verkehrswissenschaften „Friedrich List“, Technische Universität Dresden, Dresden, 2001.

Spacek, P.: Spurverhalten und Unfallgeschehen in Kurven. In: Straßenverkehrstechnik 43 (1999), Nr. 2, Seiten 68-75, 1999.

Spada, H.: Lehrbuch allgemeine Psychologie. Bern: Huber, 1992.

Statistisches Bundesamt (DESTATIS): Verkehrsunfälle 2006. Fachserie 8 Reihe 7, Wiesbaden 2007.

Statistisches Bundesamt (DESTATIS): Verkehrsunfälle 2008. Fachserie 8 Reihe 7, Wiesbaden 2009.

Steele, M., Gillespie, B.: Shared Control Between Human and Machine: Using a Haptic Steering Wheel to Aid Inland Vehicle Guidance. In: Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 45th Annual Meeting, Seiten 1671-1675, 2001.

Steinauer, B.: Stochastische und periodische Unebenheiten auf Fahrbahnen. Information Verkehrsplanung und Straßenwesen, Heft 32, Universität der Bundeswehr, München-Neubiberg, 1991.

Steinauer, B.: Harmonisierung zwischen Befahrbarkeitszustand und Ausbaustandard von Straßen. Information Verkehrsplanung und Straßenwesen, Heft 38, Universität der Bundeswehr, München-Neubiberg, 1994.

Steinauer, B., Baier, M.M., Kemper, D., Baur, O., Meyer, A.: Einsatz neuer Methoden zur Sicherung von Arbeitsstellen kürzerer Dauer. FE 03.360/2002/FRB, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bericht V 118, Bergisch Gladbach, Dezember 2004.

Steyer, R.: Beitrag zur Erhöhung der Fahrsicherheit in Kurvenbereichen zweistreifiger Außerortsstraßen. Schriftenreihe des Lehrstuhls Gestaltung von Verkehrsanlagen, Heft 6, Dresden, 2004.

Steyvers, F.J.J.M., de Waard, D.: Road-Edge Delineation in Rural Areas: Effects on Driving Behaviour. In: Ergonomics 43 (2000), Seiten 223-238, 2000.

Stradling, S.: Why Drivers Speed. Proceedings of PACTS Conference – Speed:Whose Business is it? London, Februar 1999.

Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen (strassen.NRW): Neue Warnschwellen machen Autobahnbaustellen sicherer. Presseinformation vom 01.06.2005.

Sumner, R., Shippey, J.: The Use of Rumble Areas to Alert Drivers. TRL Report LR800, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, 1977.

Suhr, V.W.: Comparison of Laboratory and Field Studies in the Estimation of Driving Speed. Iowa Academic of Science, 64, Seiten 546-552, Iowa, 1957.

Suhr, V.W., Lauer, A.R., Allgaier, E.: Judgment of Speed on the Highway and on the Auto Trainer. Traffic Safety Research Review, 12, Seite 27-31, 1958.

Surface Characteristics, XXth PIARC World Congress Montreal, 3-9 September 1995.

Tan, H.Z., Gray, R., Young, J.J., Traylor, R.: A Haptic Back Display for Attentional and Directional Cuing. Haptics-E: The Electronic Journal of Haptic Research, 1(3), 2003.

Taylor, M.C., Lynam, D.A., Baruya, A.: The Effects of Drivers' Speed on the Frequency of Road Accidents. TRL, Crowthorne, 2000.

- Terney, B.: Rumble Strips in Work Zones, <http://www.t2.unh.edu/spring02/pg3.html>, (gelesen 2007).
- Theeuwes, J.: Self-Explaining Roads: Subjective Categorisation of Road Environments. *Vision in Vehicles VI*, 1998.
- Titchner, E.B.: *Lectures on the Elementary Psychology of Feeling and Attention*. MacMillan Publishing Inc., New York, 1908.
- Thompson, T.D., Burris, M.W., Carlson, P.J.: Speed Changes Due to Transverse Rumble Strips on Approaches to High-Speed Stop-Controlled Intersections. *TRB Annual Meeting*, 2005.
- Tiefenthaler, H. Hamerle, C., Kammeringer, E.: Geräuschemission strukturierter und profilierter Fahrbahnmarkierungen. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Schriftenreihe Straßenforschung, Heft 522, Wien 2002.
- Titchener, E.B.: *Lectures in the Elementary Psychology of Feeling and Attention*. New York: Macmillan, 1908.
- Treat, J.R., Tumbas, N.S., McDonald, S.T., Shinar, D., Hume, R.D., Mayer, R.E.: *Tri-Level Study of the Causes of Traffic Accidents. Volume I: Casual Factor Tabulations and Assessment*. National Highway Traffic Safety Administration, Washington, 1977.
- Transportation Research Board: *Managing Speed; Review of Current Practice for Setting and Enforcing Speed Limits*. Special Report 254, Washington, 1998.
- Trapp, K.-H., Oellers, F.-W.: *Streckencharakteristik und Fahrerverhalten auf zweispurigen Landstraßen*. Straßenbau und Verkehrstechnik, Heft 176, Bonn, 1974.
- TRL 2005: *Rumblewave Surfacing*. In: *Traffic Advisory Leaflet 1/05*, London 2005.
- Truax, B.: *Handbook for Acoustic Ecology*. Version 1.1; Cambridge Street Publ., 1999.
- Van Erp, J.B.F., Van Veen, H.A.H.C.: *Vibrotactile In-Vehicle Navigation System*. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 7, Seiten 247-256, 2004.
- Van den Horst, R.: *Speed Reducing Measures for 80 km/h Roads*. In: *ICTCT-Workshop*, Zagreb, 1996.
- VDI- Handbuch Schwingungstechnik. VDI 2057 Teil 1, September 2002.
- VDI- Handbuch Schwingungstechnik. VDI 2057 Teil 2, September 2002.
- Veit, I.: *Technische Akustik, Grundlagen der physikalischen, physiologischen Elektroakustik*. Vogel Buchverlag, 6. Auflage, Würzburg 2005.
- Volkenhoff, T.: *Fahrerverhalten im Annäherungsbereich an Gefahrenstellen auf Landstraßen*. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau der RWTH Aachen, Aachen, 2008 (unveröffentlicht).

Volkenhoff, T., Lank, C., Becher, Th.: Fahrerverhalten auf Landstraßen - Wird die Gefahr im Annäherungsbereich von Kurven unterschätzt? Straße und Autobahn, 2009.

Vorländer, M.: Technische Akustik. Vorlesungsskript des Instituts für technische Akustik der RWTH Aachen, 2007.

Wagner, T., Richter, P., Heger, J., Weise, G.: Die psychologische Aufwandsregulation des Kraftfahrers auf Außerortsstraßen in Abhängigkeit von der Kurvigkeit des Streckensegments. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 51 (1997), Nr. 2, Seiten 104-112, 1997.

Watts, G.R., Stait, R.E., Godfrey, N.S., Chinn, L., Layfield, R.: Development of a Novel Traffic Calming Surface 'Rippleprint'. TRL Report TRL545, Department for Transport, 2002.

Watzlawick, P., Kreuzer, F.: Die Unsicherheit unserer Wirklichkeit: Ein Gespräch über den Konstruktivismus. Piper-Verlag, München, 1989.

Webster, D.C., Layfield, R.E.: An Assessment of Rumble Strips and Rumble Areas, Traffic and Transport Resource Center, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, 1993.

Webster, D.C., Wells, P.A.: The Characteristics of Speeders. TRL Report 440, Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, 2000.

Weise, G., Steyer, R.: Gestaltungskriterien von Landstraßenkurven. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Verkehrstechnik, Heft V63, Bergisch Gladbach, 1999.

Weller, G., Schlag, B., Jorna, R., van de Leur, M., Gatti, G.: Road User Behaviour Model. RIPCORDER-ISEREST, 2005.

Weller, G., Schlag, B., Gatti, G., Jorna, R., van de Leur, M.: Human Factors in Road Design. State of the Art and Empirical Evidence. RIPCORDER-ISEREST, 2006.

Weller, G.: Road User Behaviour Model – Model Description and Validation. RIPCORDER-ISEREST, 2007.

Weltgesundheitsorganisation (WHO): Der Europäische Gesundheitsbericht 2005: Maßnahmen für eine bessere Gesundheit der Kinder und der Bevölkerung insgesamt. Kopenhagen, 2005.

Wiedemann, R.: Simulation des Straßenverkehrsflusses. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Band 8, Karlsruhe 1974.

Wickens, C.D.: Processing Resources in Attention. In: R. Parasuraman & R. Davies (Eds.), Varieties of Attention, Seiten 63-101, New York: Academic Press, 1984.

Wickens, C.D.: Engineering Psychology and Human Performance (2. Ausgabe), New York, 1992.

Wickens, C.D.: How Many Resources and How to Identify them? Commentary on Boles et al. and Vidulich and Tsang. *Human Factors*, 49 (1), Seiten 53-56, 2007.

Wickens, C.D., McCarley J.S: *Applied attention theory*. CRC Press, Boca Raton, 2008.

Wilde, G.J.S.: Risk Homeostatis Theory and Traffic Accidents: Propositions, Deductions and Discussions of Dissension in Recent Reactions. *Ergonomics*, 31 (4), Seiten 441-468, 1988.

Wolf, H., Bubb, H.: *Ergonomie in der Fahrwerksentwicklung – Wo und wie kann sie dort hilfreich sein?* Tagung fahrwerk.tech, 04.04.-05.04.2005 München, 2005:

Yerkes, R.M., Dodson, J.D.: The Relation of Strength of Stimulus to Rapidity of Habit-formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 18, Seiten 459-482, 1908.

Zanker, J.M., Braddick, O.: How Does Noise Influence the Estimation of Speed? *Vision Research* 39, Seiten 2411-2420, 1999.

Zwieliich, F., Reker, K., Flach, J.: *Fahrerverhaltensbeobachtungen auf Landstraßen am Beispiel von Baumalleen*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Mensch und Sicherheit, Heft M 124, Bergisch Gladbach, 2001.

Zwicker, E.: *Psychoakustik*; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York; 1982.

12 Glossar

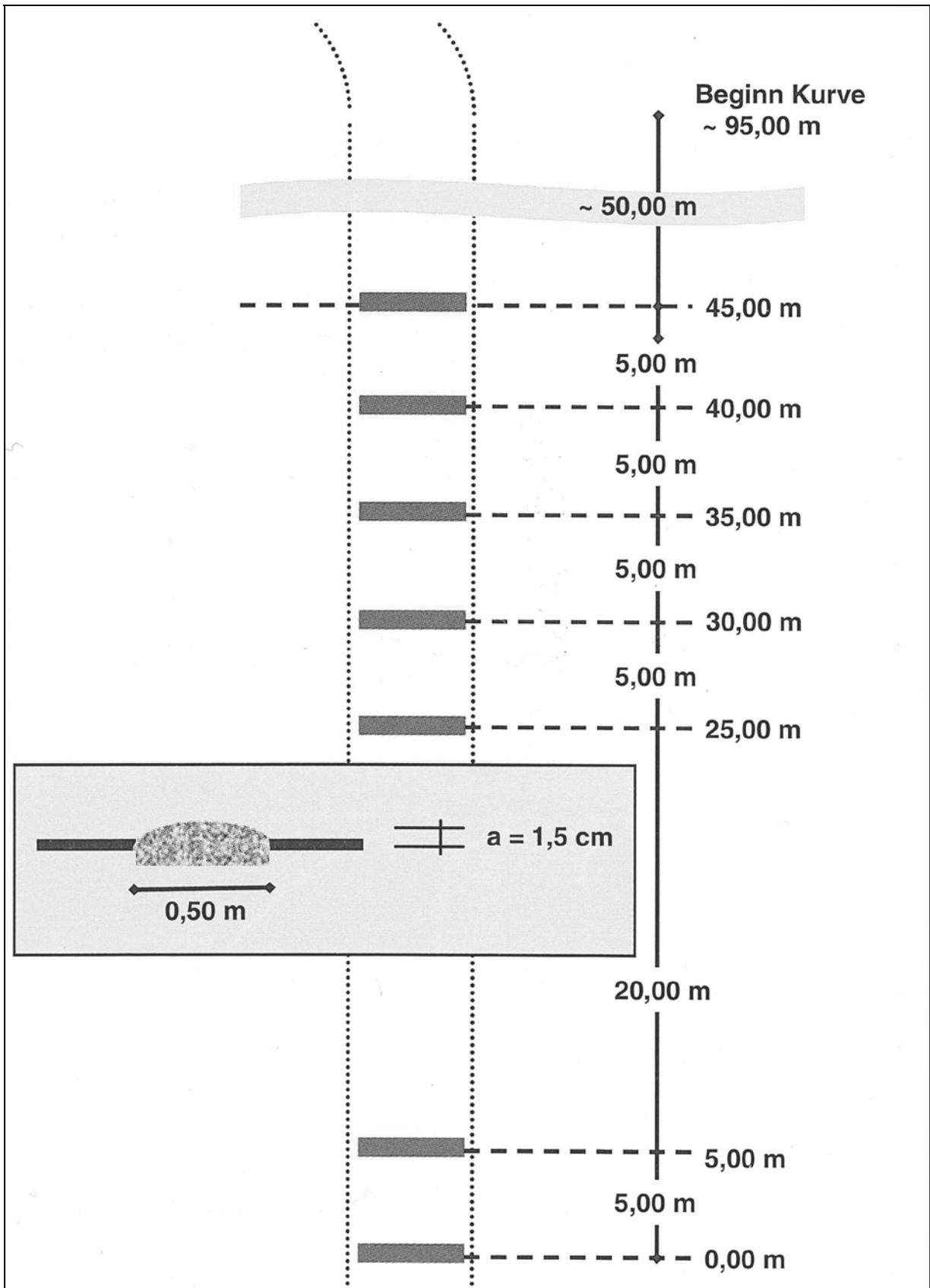
a	Beschleunigung	[m/s ²]
AS	Anschlussstelle	
avg	Arithmetischer Mittelwert	[/]
B	Bundesstraße	
BAB	Bundesautobahn	
CRF	Crash Reduction Factor	[%]
Δ max	maximale Differenz	[/]
$\Delta \emptyset$	durchschnittliche Differenz	[/]
DISC	NASA Discomfort Index	[-]
DOT	Department of Transportation	
ERSO	European Road Safety Observatory	
EU	Europäische Union	
EVE	Empfehlungen für Verkehrserhebungen	
FE	Forschung und Entwicklung	
FFT	Fast Fourier Transformation	
HVist	Hinweise zur Visualisierung von Entwürfen für außerörtliche Straßen	
Kfz	Kraftfahrzeug	
KS-Test	Kolmogorow-Smirnow-Tests	
L	Schalldruckpegel	[dB]
Lkw	Lastkraftwagen	
μ	Erwartungswert	[/]
N	Anzahl	[-]
p	Schalldruck	[N/m ²]
p ₀	Bezugsschalldruck	[N/m ²]
Pkw	Personenkraftwagen	

Q	Kraftfahrzeugverkehrsstärke	[Kfz/h]
RAA	Richtlinie für die Anlage von Autobahnen	
RAL	Richtlinie für die Anlage von Landstraßen	
RAS	Richtlinien für die Anlage von Straßen	
s_{eff}	Effektivwert	[/]
σ_x	Standardabweichung	[/]
t	Zeit	[s]
TLS	Technische Lieferbedingungen von Streckenstationen	
TRB	Transportation Research Board	
TRL	Transportation Research Laboratory	
TRS	Transversale Rüttelstreifen	
v	Geschwindigkeit	[km/h]
v_m	Mittlere Geschwindigkeit	[km/h]
v_{15}	Geschwindigkeit, die von 15 % der Fahrer unterschritten oder erreicht wird	[km/h]
v_{50}	Geschwindigkeit, die von 50 % der Fahrer unterschritten oder erreicht wird	[km/h]
v_{85}	Geschwindigkeit, die von 85 % der Fahrer unterschritten oder erreicht wird	[km/h]
v_{95}	Geschwindigkeit, die von 95 % der Fahrer unterschritten oder erreicht wird	[km/h]
UK	Unfallkategorie	
VDI	Verein Deutscher Ingenieure	
VDV	Vibration Dose Value (nach Griffin)	[m/s ^{1,75}]
\bar{x}	Mittelwert	[/]

12 Anhang

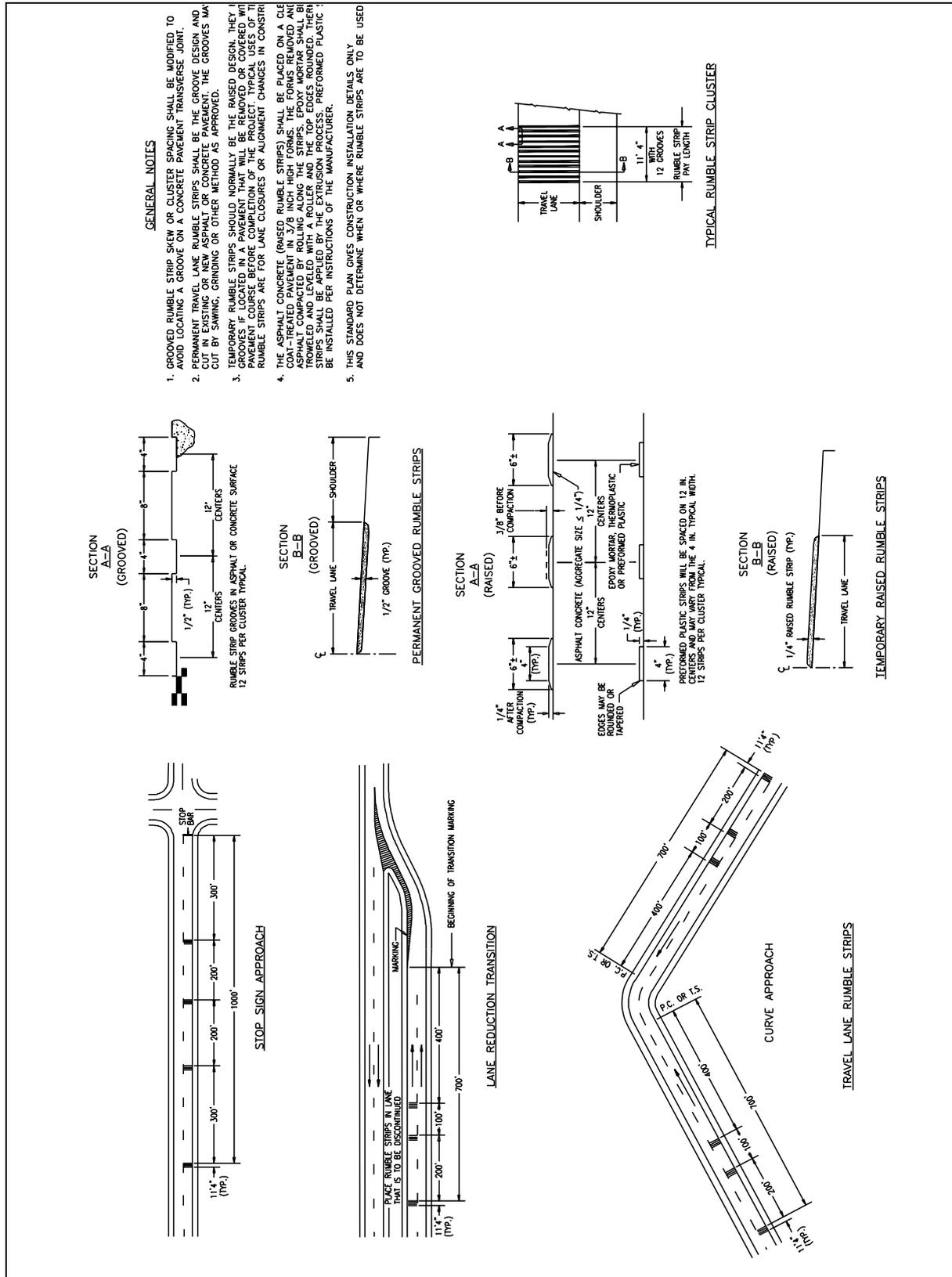
Anhang A:	Regelzeichnung nach MVMOT (2007).....	215
Anhang B:	Regelzeichnungen USA	216
Anhang B-1:	Regelzeichnungen zu TRS in Colorado	216
Anhang B-2:	Regelzeichnungen zu TRS in Florida.....	217
Anhang C:	Entstehungsmechanismen von Rollgeräuschen.....	218
Anhang C-1:	Mechanische Entstehungsmechanismen (SANDBERG/EJSMONT, 2002)	219
Anhang C-2:	Aerodynamische Entstehungsmechanismen (SANDBERG/EJSMONT, 2002)	220
Anhang D:	Bewertungsfunktionen nach VDI	227
Anhang D-1:	Hand-Arm-Schwingungen	227
Anhang D-2:	Ganzkörperschwingungen:	228
Anhang E:	Ergebnis der messtechnischen Vorversuche.....	229
Anhang E-1:	Ergebnisse Pkw	230
Anhang E-2:	Ergebnisse Lkw.....	231
Anhang F:	Übersichtslagepläne und Ausführungspläne	232
Anhang F-1:	Übersichtslageplan L 257 Fahrtrichtung Buir	233
Anhang F-2:	Übersichtslageplan L 257 Fahrtrichtung Morschenich	234
Anhang F-3:	Übersichtslageplan B 399 Fahrtrichtung Gey.....	235
Anhang F-4:	Übersichtslageplan B 477 Fahrtrichtung LUXHEIM.....	236
Anhang F-5:	Ausführungspläne L 257	237
Anhang F-6:	Ausführungspläne B 399 und B 477:	238
Anhang G:	Statistische Analysen der Geschwindigkeit	239
Anhang G-1:	L 257 Fahrtrichtung Buir (gesamtes Fahrerkollektiv)	239
Anhang G-2:	L 257 Fahrtrichtung Buir (unbeeinflusste Fahrer).....	240
Anhang G-3:	L 257 Fahrtrichtung Morschenich (gesamtes Fahrerkollektiv).....	241
Anhang G-4:	L 257 Fahrtrichtung Morschenich (unbeeinflusste Fahrer).....	242
Anhang G-5:	B 399 Fahrtrichtung Gey (gesamtes Fahrerkollektiv).....	243
Anhang G-6:	B 399 Fahrtrichtung Gey (unbeeinflusste Fahrer)	244
Anhang G-7:	B 477 Fahrtrichtung LUXHEIM (gesamtes Fahrerkollektiv).....	245
Anhang G-8:	B 477 Fahrtrichtung LUXHEIM (unbeeinflusste Fahrer)	246
Anhang H:	Standardabweichung der Geschwindigkeiten	247
Anhang H-1:	Gesamtes Fahrerkollektiv	247
Anhang H-2:	Unbeeinflusste Fahrer.....	248
Anhang I:	Erzeugung von Ganglinien.....	249
Anhang I-1:	Wahrscheinlichkeitsfunktion der Geschwindigkeit.....	251
Anhang I-2:	Wahrscheinlichkeitsfunktion der Zeitdifferenz	252
Anhang I-3:	Wahrscheinlichkeitsfunktion der Zeitlücken	255
Anhang I-4:	Wahrscheinlichkeitsfunktion der Fahrzeuglänge.....	255
Anhang J:	Statistische Analysen der Geschwindigkeit differenziert nach Ortskundigkeit.....	256
Anhang J-1:	B 399 Fahrtrichtung Gey	256
Anhang J-2:	L 257 beide Fahrtrichtungen	257

Anhang A: Regelzeichnung nach MVMOT (2007)

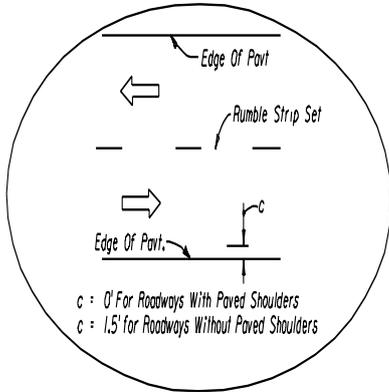


Anhang B: Regelzeichnungen USA

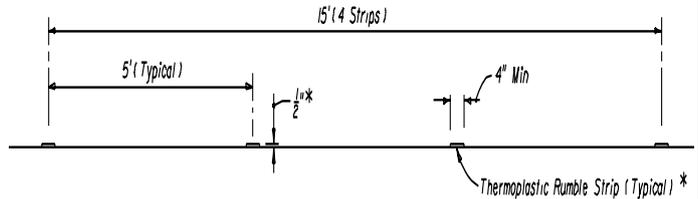
Anhang B-1: Regelzeichnungen zu TRS in Colorado



Anhang B-2: Regelzeichnungen zu TRS in Florida



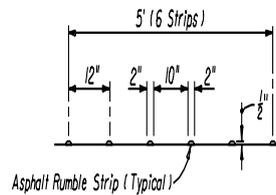
INSET C



* Use multiple applications to achieve desired 1/2" thickness

Note. Shoulder thermoplastic rumble strip sets shall match edgeline color. Intersection thermoplastic rumble strip sets shall be white.

THERMOPLASTIC SET

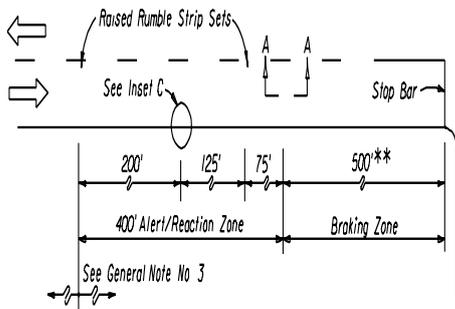


ASPHALT SET

Note: Rumble strips may be required for one or more legs of the intersection (one leg shown for spacing information). Rumble strips shall be constructed only on the legs identified in the plans. See General Note No. 1.

SECTION AA - FOR THERMOPLASTIC AND ASPHALT RUMBLE STRIP SETS

GENERAL NOTES FOR RAISED RUMBLE STRIPS



** May be decreased in urban areas with low operating speeds.

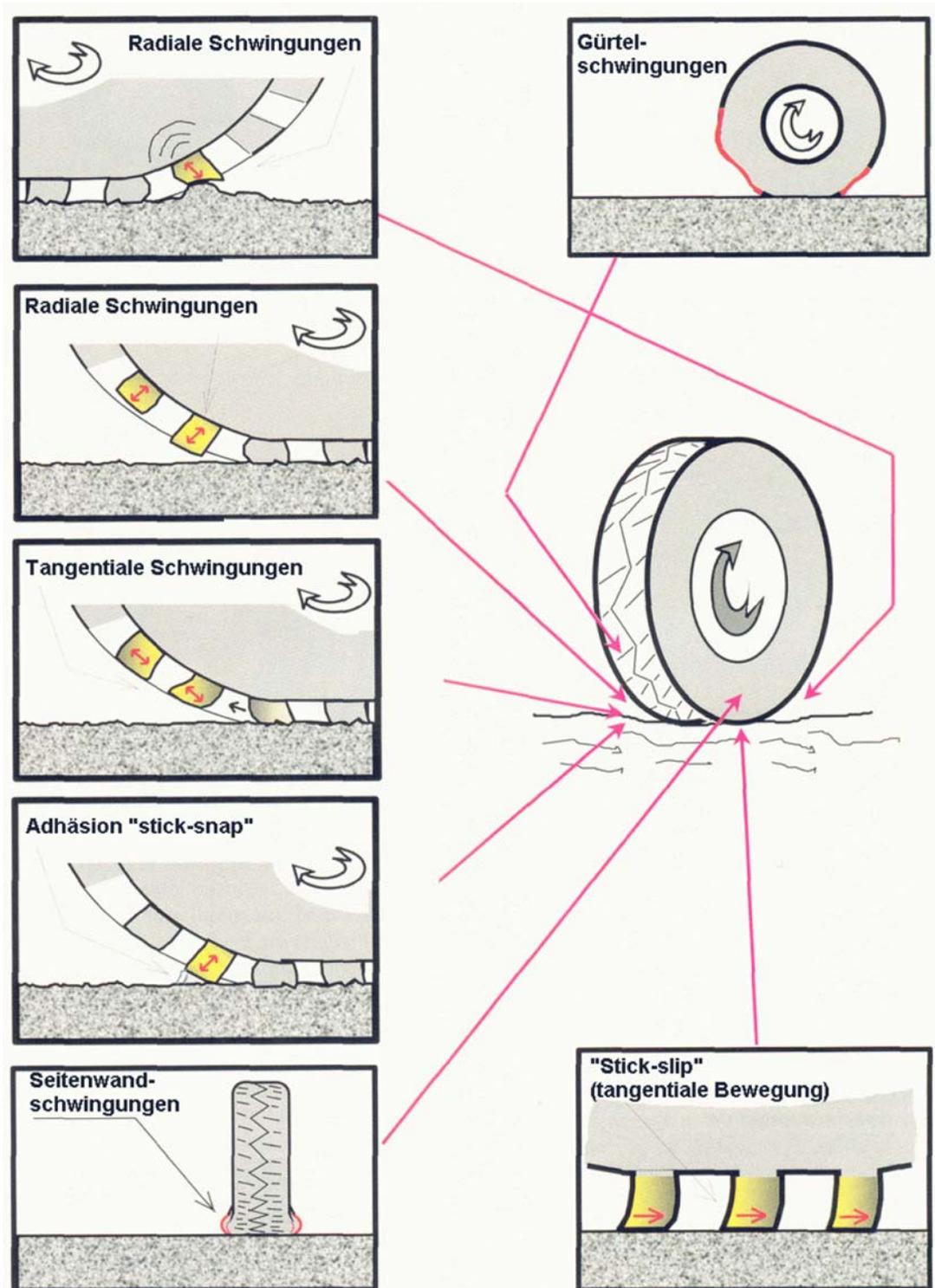
PLAN

INTERSECTIONS

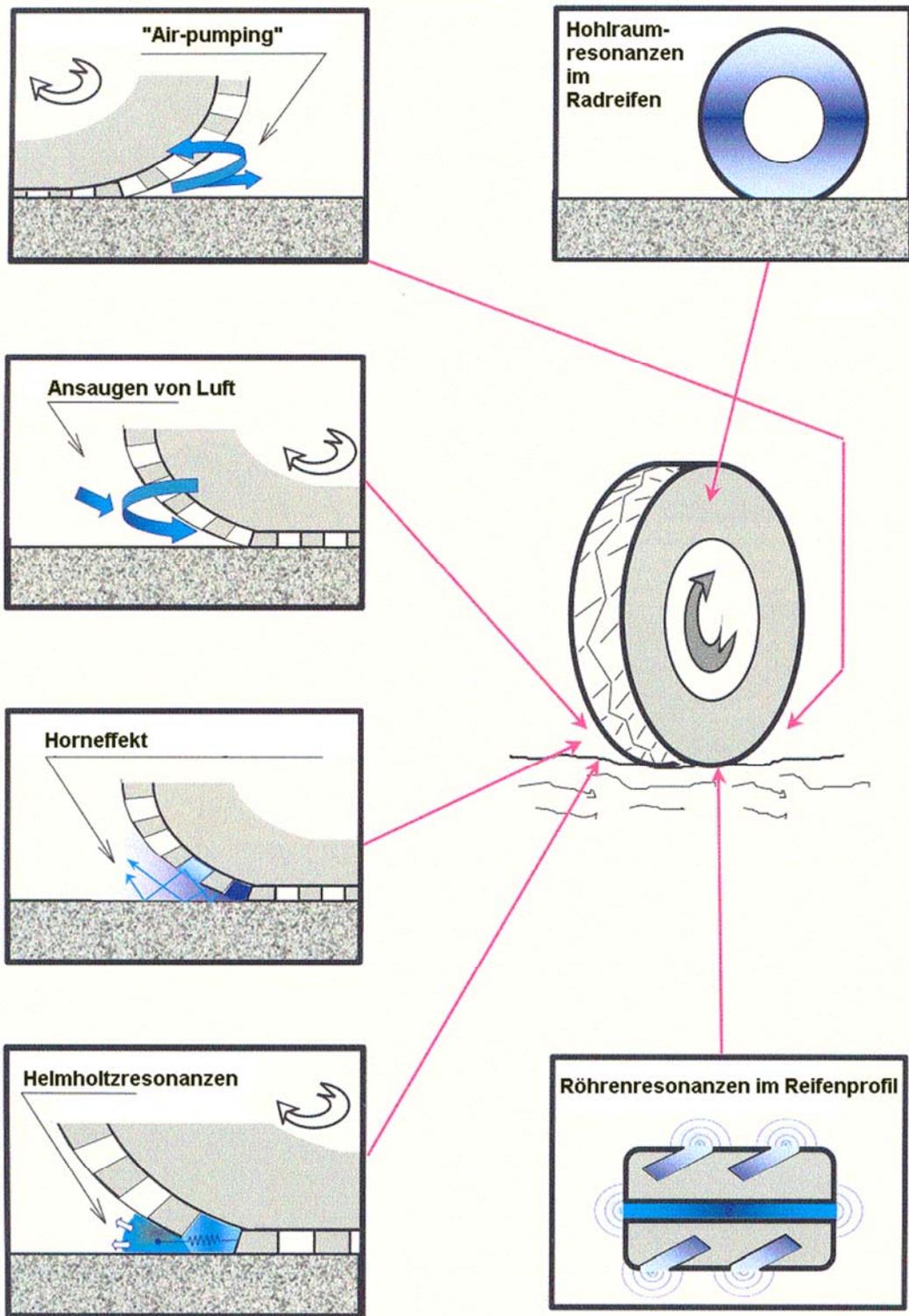
1. Raised rumble strips shall be constructed on all paved shoulders approaching structures, where the structure shoulder width is less than the usable shoulder width of the approach roadway. Raised rumble strips at intersections shall be constructed only when specified in the plans
2. Raised rumble strips are to be constructed in accordance with Section 546 of the Specifications
3. When any portion of a curve falls within the limit of rumble strips shown in these details, additional rumble strip sets spaced at 200' centers shall be constructed throughout the remainder of the approaching curve
4. Raised rumble strips shall be paid for per set under the contract unit price for Rumble Strips Sets, PS Such price and payment shall be full compensation for all work and materials required without adjustment due to width of pavement receiving the strips or length of strips

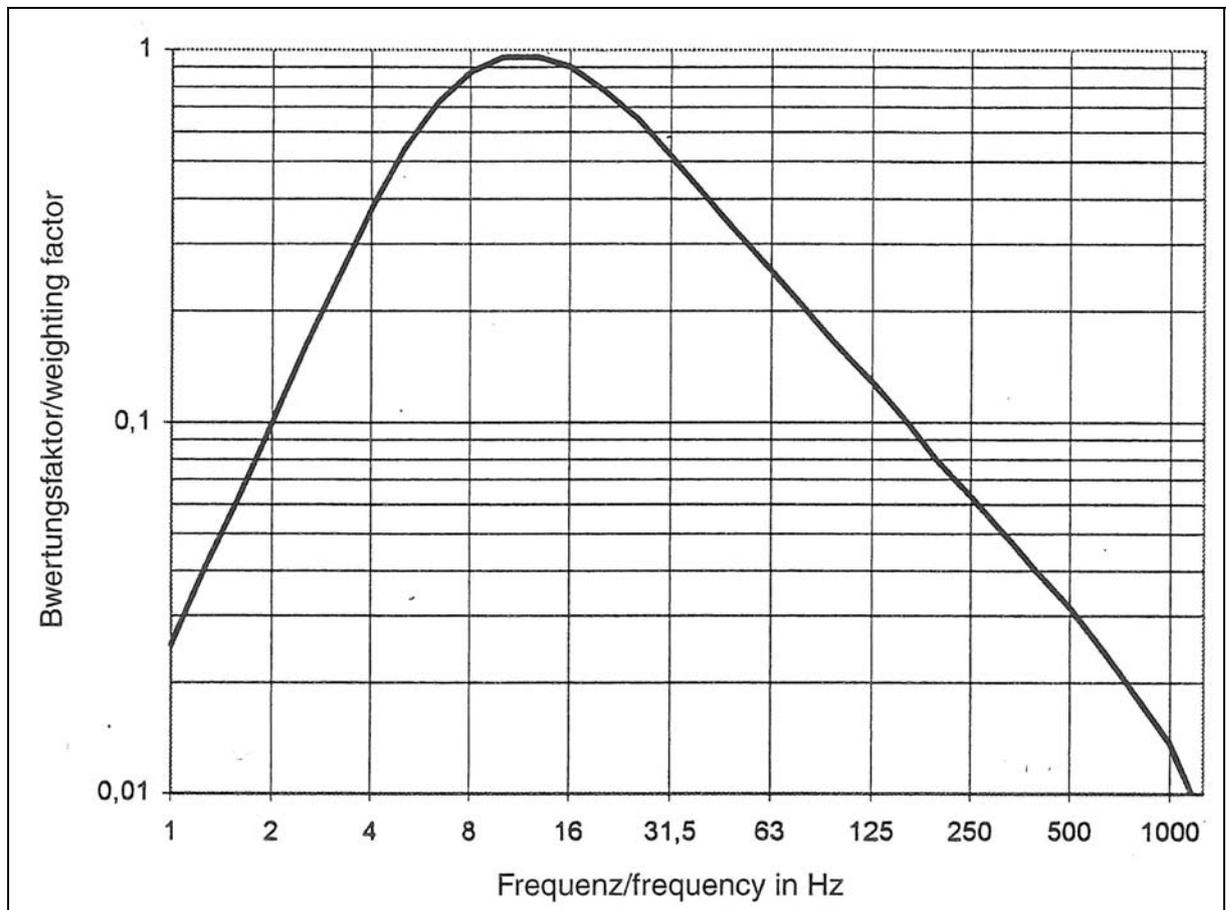
Anhang C: Entstehungsmechanismen von Rollgeräuschen

Anhang C-1: Mechanische Entstehungsmechanismen (SANDBERG/EJSMONT, 2002)

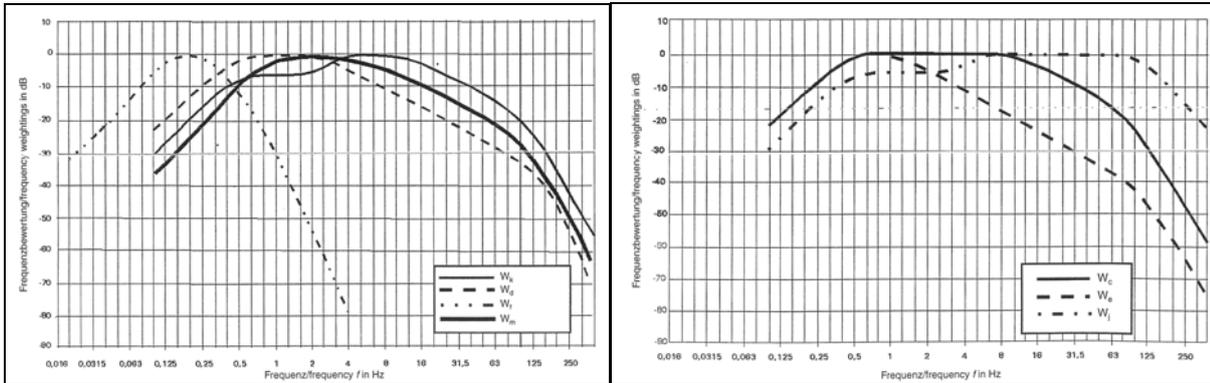


Anhang C-2: Aerodynamische Entstehungsmechanismen (SANDBERG/EJSMONT, 2002)



Anhang D: Bewertungsfunktionen nach VDI**Anhang D-1: Hand-Arm-Schwingungen**

Anhang D-2: Ganzkörperschwingungen:

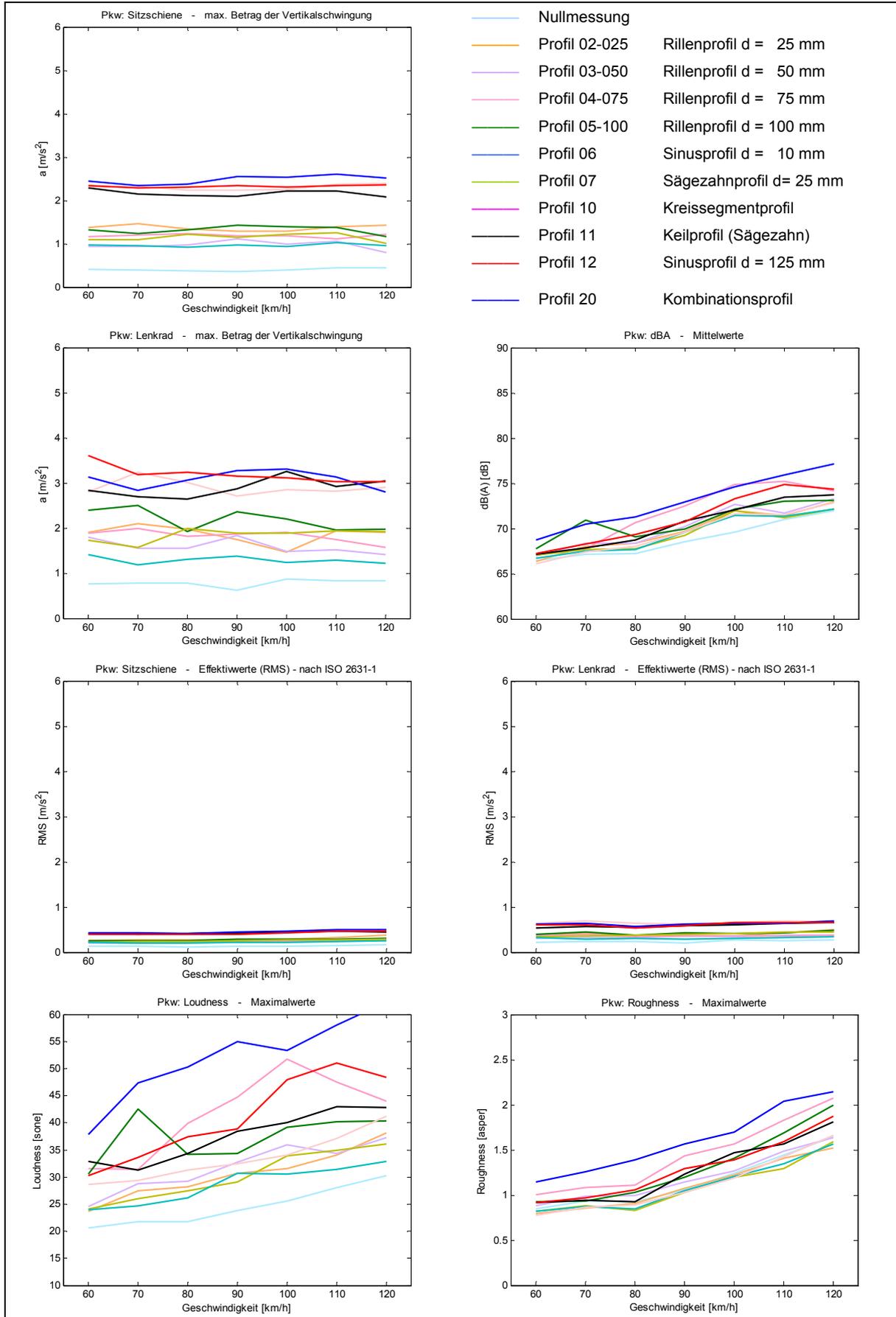


x	Terzmittenfrequenz (Nennwert) Hz	W _k		W _d		W _f		W _m	
		Faktor	dB	Faktor	dB	Faktor	dB	Faktor	dB
-17	0,02					0,0241	-32,37		
-16	0,025					0,0380	-28,40		
-15	0,0315					0,0602	-24,41		
-14	0,04					0,0962	-20,34		
-13	0,05					0,157	-16,06		
-12	0,063					0,267	-11,45		
-11	0,08					0,454	-6,86		
-10	0,1	0,0312	-30,11	0,0624	-24,09	0,695	-3,16	0,0158	-36,00
-9	0,125	0,0493	-26,14	0,0987	-20,12	0,900	-0,92	0,0251	-32,00
-8	0,16	0,0776	-22,21	0,155	-16,18	1,004	0,04	0,040	-28,01
-7	0,2	0,121	-18,37	0,242	-12,32	0,993	-0,06	0,063	-24,02
-6	0,25	0,183	-14,74	0,368	-8,68	0,850	-1,41	0,099	-20,05
-5	0,315	0,264	-11,55	0,533	-5,47	0,615	-4,22	0,156	-16,12
-4	0,4	0,350	-9,11	0,710	-2,98	0,388	-8,22	0,243	-12,29
-3	0,5	0,419	-7,56	0,854	-1,37	0,223	-13,05	0,368	-8,67
-2	0,63	0,459	-6,77	0,944	-0,50	0,116	-18,73	0,530	-5,51
-1	0,8	0,477	-6,44	0,991	-0,08	0,0543	-25,30	0,700	-3,09
0	1	0,482	-6,33	1,011	0,10	0,0235	-32,57	0,833	-1,59
1	1,25	0,485	-6,29	1,007	0,06	0,00970	-40,26	0,907	-0,85
2	1,6	0,493	-6,13	0,971	-0,26	0,00392	-48,14	0,934	-0,59
3	2	0,531	-5,50	0,891	-1,00	0,00157	-56,11	0,932	-0,61
4	2,5	0,633	-3,97	0,773	-2,23	0,000624	-64,10	0,910	-0,82
5	3,15	0,807	-1,86	0,640	-3,88	0,000248	-72,10	0,872	-1,19
6	4	0,965	-0,31	0,514	-5,78	0,000099	-80,10	0,818	-1,74
7	5	1,039	0,33	0,408	-7,78			0,750	-2,50
8	6,3	1,054	0,46	0,323	-9,83			0,669	-3,49
9	8	1,037	0,32	0,255	-11,87			0,582	-4,70
10	10	0,988	-0,10	0,202	-13,91			0,494	-6,12
11	12,5	0,899	-0,93	0,160	-15,93			0,411	-7,71
12	16	0,774	-2,22	0,127	-17,95			0,337	-9,44
13	20	0,637	-3,91	0,100	-19,97			0,274	-11,25
14	25	0,510	-5,84	0,0796	-21,98			0,220	-13,14
15	31,5	0,403	-7,89	0,0630	-24,01			0,176	-15,09
16	40	0,316	-10,01	0,0496	-26,08			0,140	-17,10
17	50	0,245	-12,21	0,0387	-28,24			0,109	-19,23
18	63	0,186	-14,62	0,0295	-30,62			0,0834	-21,58
19	80	0,134	-17,47	0,0213	-33,43			0,0604	-24,38
20	100	0,0887	-21,04	0,0141	-36,99			0,0401	-27,93
21	125	0,0531	-25,50	0,00848	-41,43			0,0241	-32,37
22	160	0,0292	-30,69	0,00467	-46,62			0,0133	-37,55
23	200	0,0153	-36,32	0,00244	-52,24			0,00694	-43,18
24	250	0,00779	-42,16	0,00125	-58,09			0,00354	-49,02
25	315	0,00393	-48,10	0,000629	-64,02			0,00179	-54,95
26	400	0,00198	-54,08	0,000316	-70,00			0,000899	-60,92
27	500							0,000451	-66,91
28	630							0,000226	-72,91
29	800							0,000113	-78,91

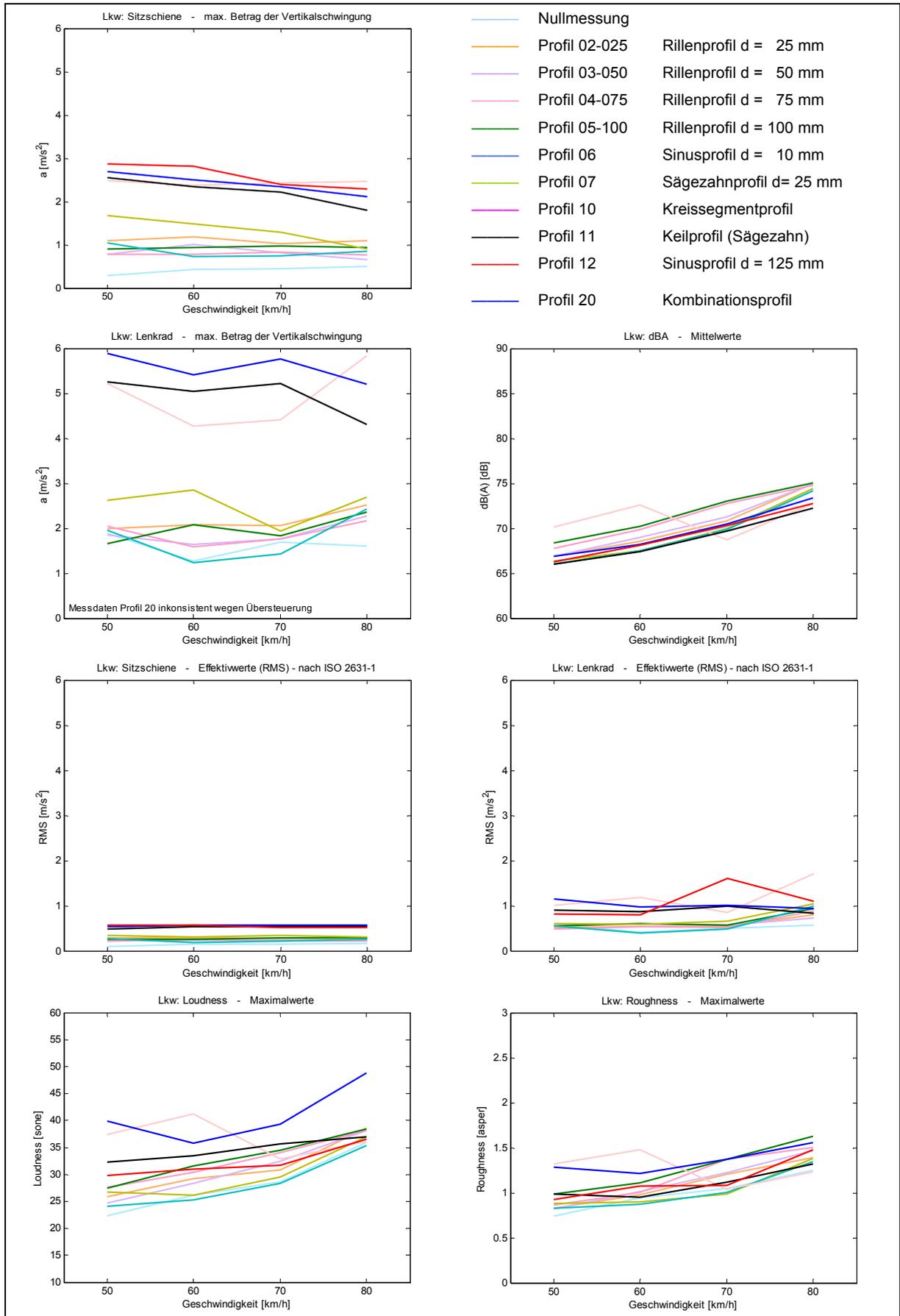
Anhang E: Ergebnis der messtechnischen Vorversuche

Im Weiteren sind Auszüge aus den zusammenfassenden Ergebnissen der messtechnischen Voruntersuchungen für den Pkw und den Lkw dargestellt. Die vollständige Darstellung aller Einzelergebnisse kann LANK/STEINAUER/BUSEN (2009) entnommen werden.

Anhang E-1: Ergebnisse Pkw

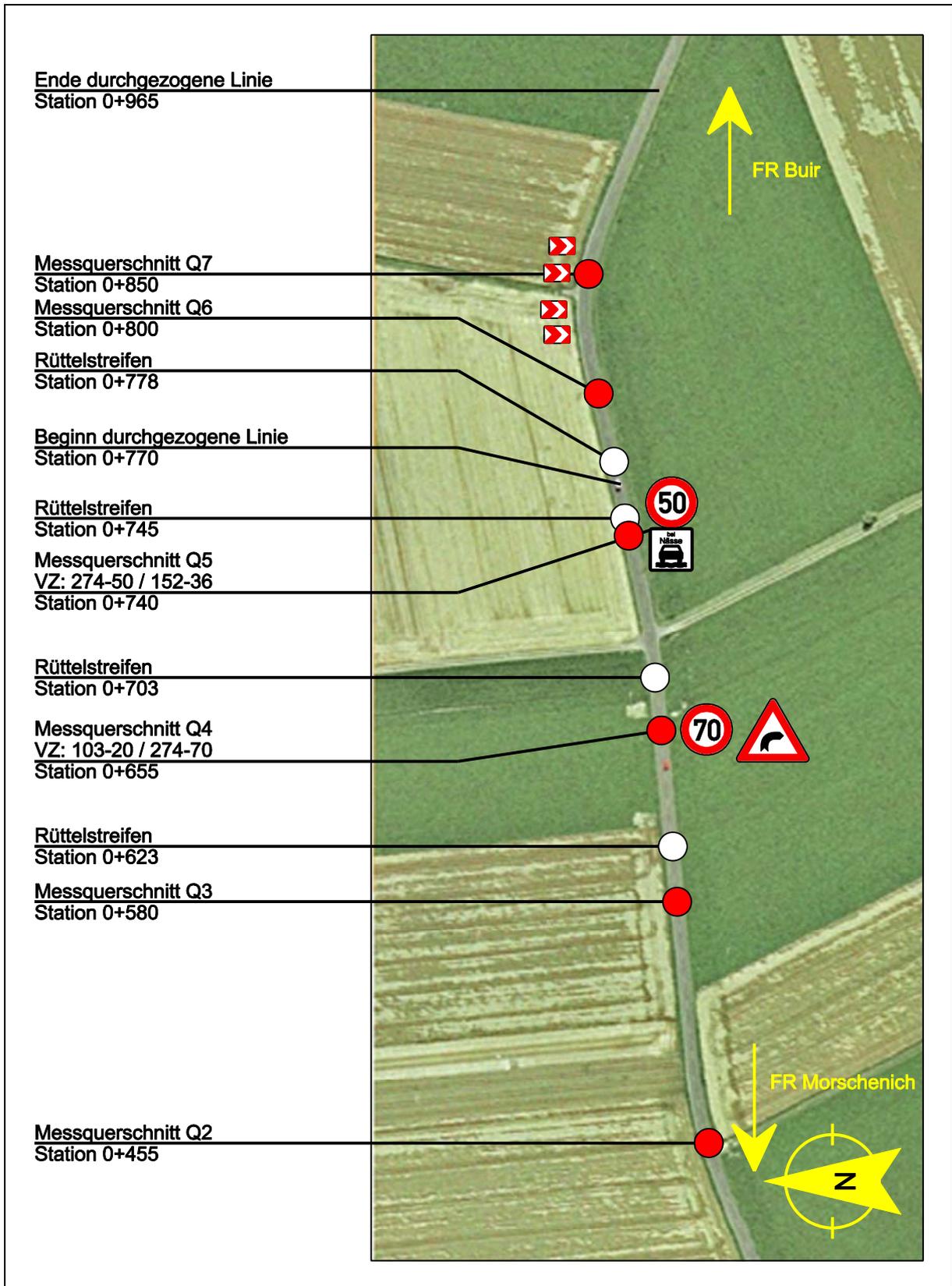


Anhang E-2: Ergebnisse Lkw

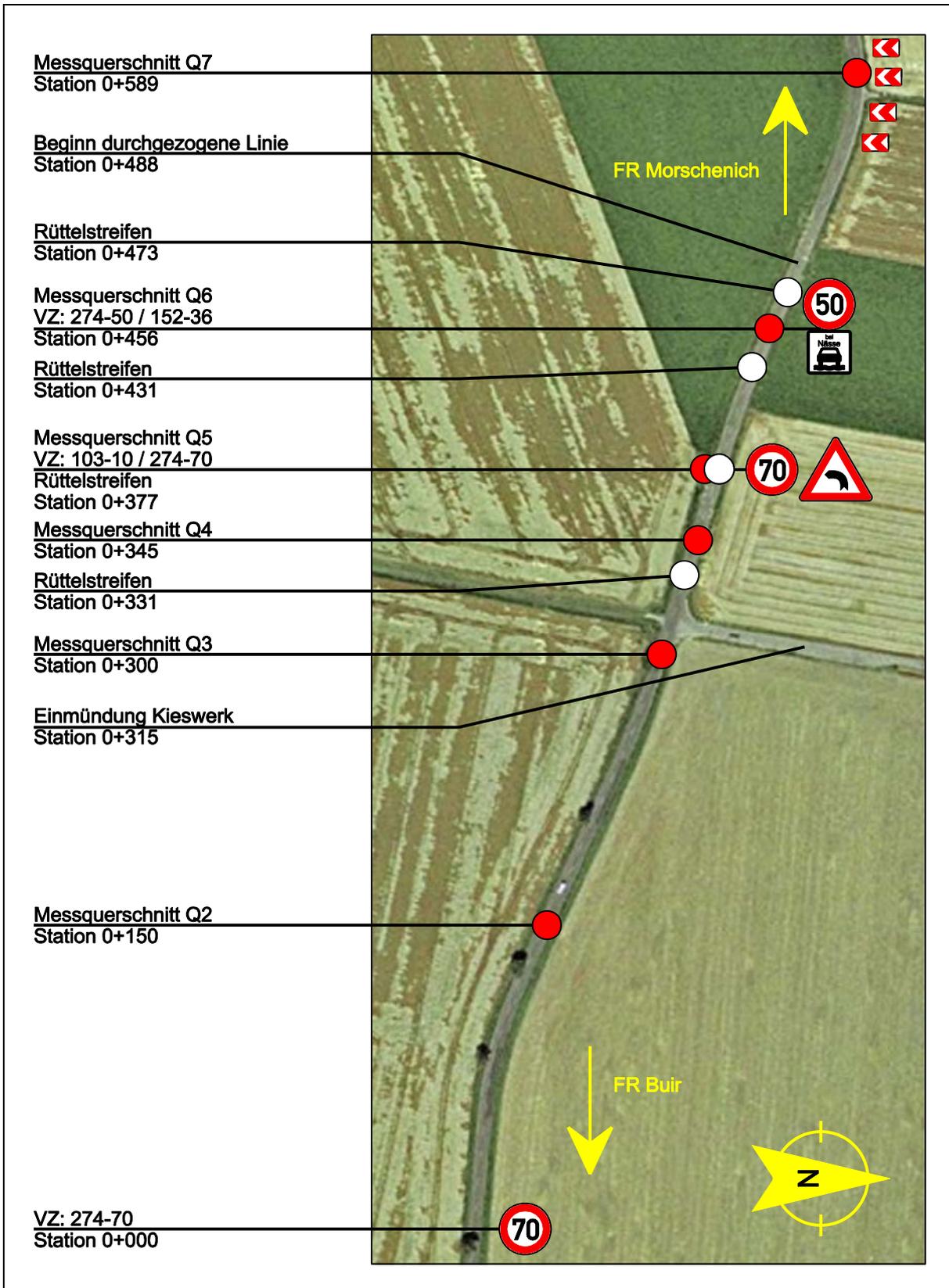


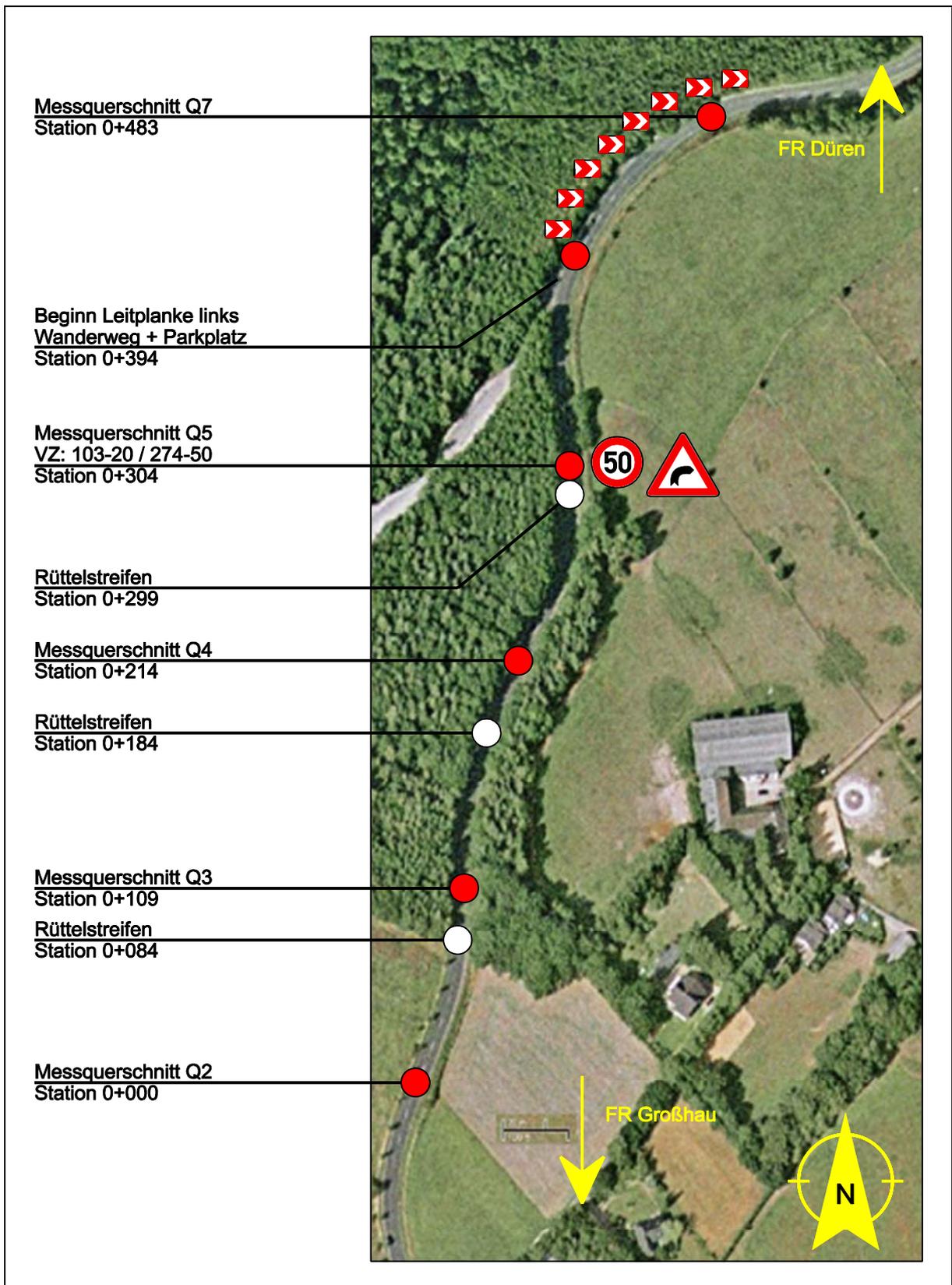
Anhang F: Übersichtslagepläne und Ausführungspläne

Anhang F-1: Übersichtslageplan L 257 Fahrtrichtung Buir

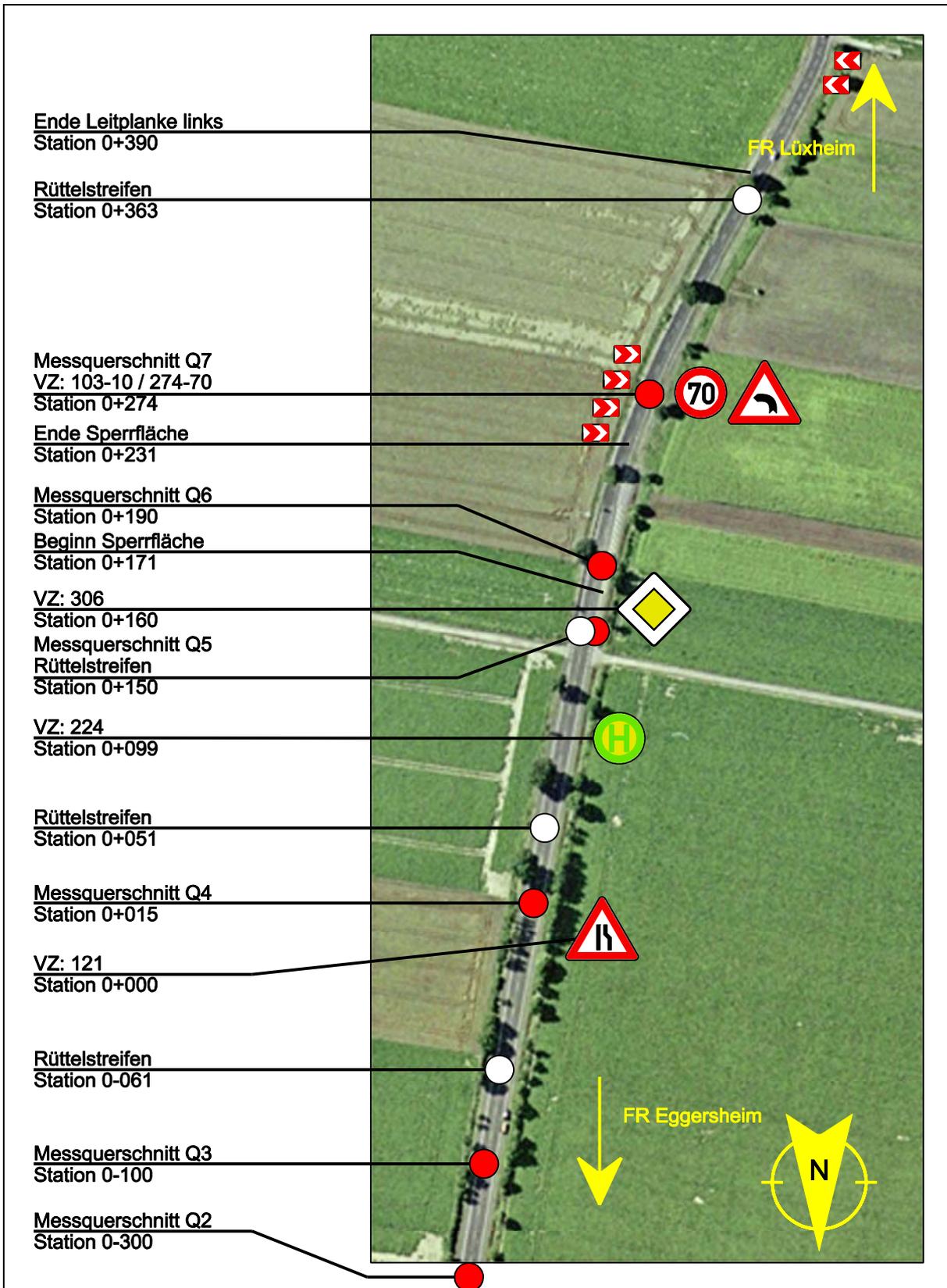


Anhang F-2: Übersichtslageplan L 257 Fahrtrichtung Morschenich

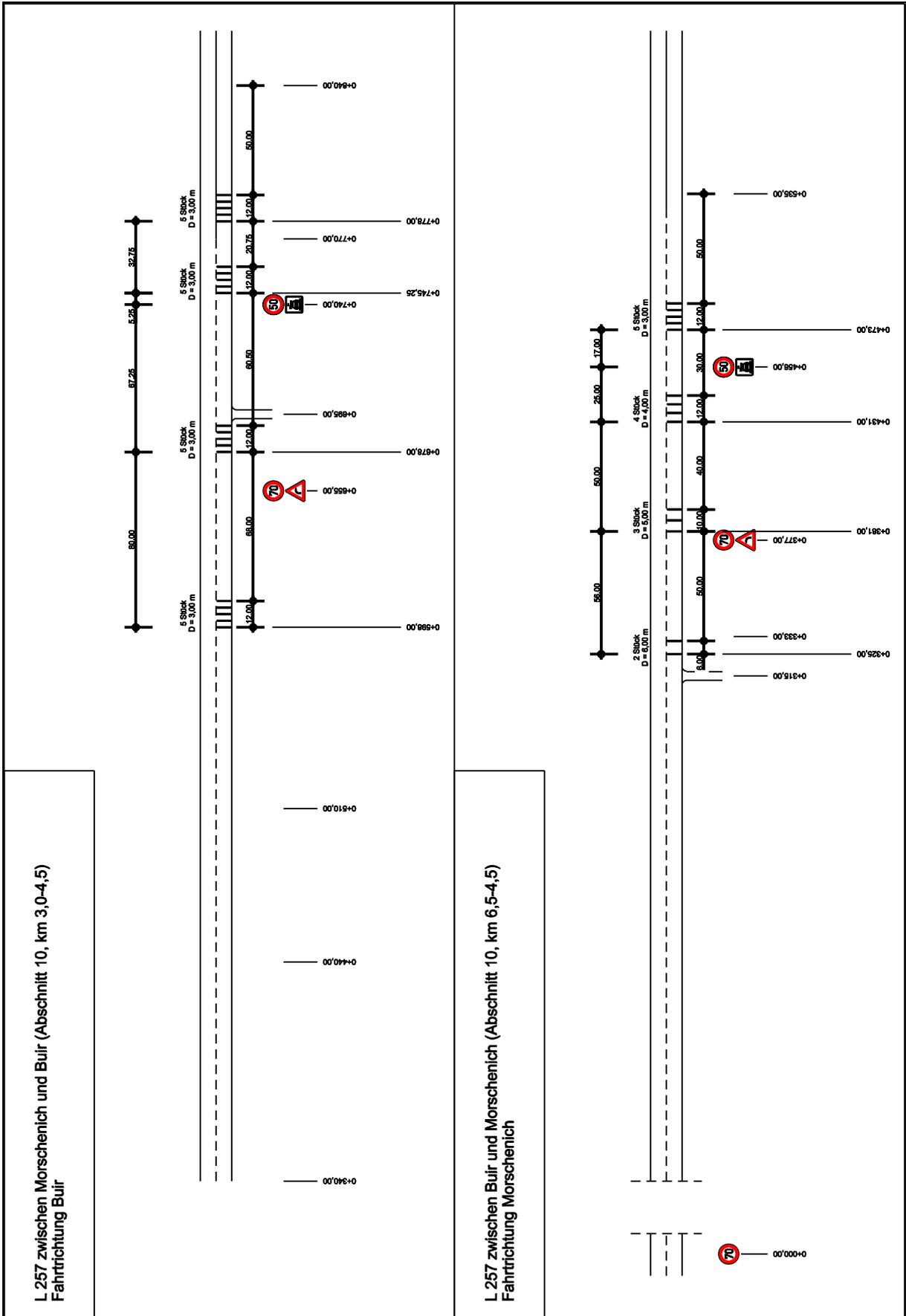


Anhang F-3: Übersichtslageplan B 399 Fahrtrichtung Gey

Anhang F-4: Übersichtslageplan B 477 Fahrtrichtung LUXHEIM



Anhang F-5: Ausführungspläne L 257



Anhang G: Statistische Analysen der Geschwindigkeit

Anhang G-1: L 257 Fahrtrichtung Buir (gesamtes Fahrerkollektiv)

Station	Datum		Kfz		v _m		Statistik		
	v	n	v	n	v	n	D _{max}	D _{krit}	Sign.
455	06.09.07	22.11.07	964	886	72,88	67,46	0,197	0,063	ja
455	06.09.07	27.08.08	964	903	72,88	68,09	0,161	0,063	ja
455	12.09.07	22.11.07	868	886	72,23	67,46	0,167	0,065	ja
455	12.09.07	27.08.08	868	903	72,23	68,09	0,153	0,065	ja
655	06.09.07	22.11.07	969	877	70,66	58,95	0,423	0,063	ja
655	06.09.07	27.08.08	969	901	70,66	64,60	0,230	0,063	ja
655	12.09.07	22.11.07	878	877	66,74	58,95	0,289	0,065	ja
655	12.09.07	27.08.08	878	901	66,74	64,60	0,084	0,065	ja
740	06.09.07	22.11.07	971	894	68,80	57,70	0,420	0,063	ja
740	06.09.07	27.08.08	971	860	68,80	65,21	0,135	0,064	ja
740	12.09.07	22.11.07	881	894	66,73	57,70	0,347	0,065	ja
740	12.09.07	27.08.08	881	860	66,73	65,21	0,057	0,065	nein
850	06.09.07	22.11.07	982	891	59,99	53,03	0,342	0,063	ja
850	06.09.07	27.08.08	982	905	59,99	54,59	0,262	0,063	ja
850	12.09.07	22.11.07	888	891	56,98	53,03	0,213	0,065	ja
850	12.09.07	27.08.08	888	905	56,98	54,59	0,140	0,064	ja
KG	12.09.07	22.11.07	1493	1521	80,48	81,70	0,074	0,050	Ja
KG	12.09.07	27.08.08	1493	1625	80,48	80,37	0,027	0,049	nein
KG	22.11.07	27.08.08	1521	1625	81,70	80,37	0,069	0,049	ja

Anhang G-2: L 257 Fahrtrichtung Buir (unbeeinflusste Fahrer)

Station	Datum		Kfz		v_m		Statistik		
	V	n	v	n	v	n	D_{max}	D_{krit}	Sign.
455	06.09.07	22.11.07	375	379	76,32	70,11	0,238	0,099	ja
455	06.09.07	27.08.08	375	401	76,32	69,19	0,214	0,098	ja
455	12.09.07	22.11.07	396	379	75,17	70,11	0,221	0,098	ja
455	12.09.07	27.08.08	396	401	75,17	69,19	0,218	0,096	ja
655	06.09.07	22.11.07	365	363	73,91	61,96	0,442	0,101	ja
655	06.09.07	27.08.08	365	398	73,91	66,37	0,287	0,099	ja
655	12.09.07	22.11.07	411	363	69,68	61,96	0,289	0,098	ja
655	12.09.07	27.08.08	411	398	69,68	66,37	0,140	0,096	ja
740	06.09.07	22.11.07	376	370	71,49	60,56	0,413	0,100	ja
740	06.09.07	27.08.08	376	377	71,49	67,32	0,174	0,099	ja
740	12.09.07	22.11.07	412	370	69,24	60,56	0,311	0,097	ja
740	12.09.07	27.08.08	412	377	69,24	67,32	0,091	0,097	nein
850	06.09.07	22.11.07	354	382	61,73	54,56	0,341	0,100	ja
850	06.09.07	27.08.08	354	399	61,73	55,32	0,292	0,099	ja
850	12.09.07	22.11.07	391	382	58,67	54,56	0,193	0,098	ja
850	12.09.07	27.08.08	391	399	58,67	55,32	0,167	0,097	ja
KG	12.09.07	22.11.07	590	614	82,40	84,12	0,078	0,078	nein
KG	12.09.07	27.08.08	590	621	82,40	82,75	0,055	0,078	nein
KG	22.11.07	27.08.08	614	621	84,12	82,75	0,088	0,077	ja

Anhang G-3: L 257 Fahrtrichtung Morschenich (gesamtes Fahrerkollektiv)

Station	Datum		Kfz		v _m		Statistik		
	V	n	v	n	v	n	D _{max}	D _{krit}	Sign.
150	11.10.07	21.11.07	649	593	73,46	67,10	0,298	0,077	ja
150	11.10.07	28.08.08	649	605	73,46	71,90	0,118	0,077	ja
377	11.10.07	21.11.07	670	576	69,33	64,11	0,258	0,077	ja
377	11.10.07	28.08.08	670	533	69,33	66,83	0,137	0,079	ja
456	11.10.07	21.11.07	678	597	64,93	60,85	0,215	0,076	ja
456	11.10.07	28.08.08	678	603	64,93	62,42	0,154	0,076	ja
589	11.10.07	21.11.07	666	584	61,26	55,46	0,324	0,077	ja
589	11.10.07	28.08.08	666	601	61,26	61,07	0,061	0,077	nein
KG	11.10.07	21.11.07	1534	1498	76,09	76,17	0,026	0,049	nein
KG	11.10.07	28.08.08	1091	1075	77,21	75,36	0,082	0,058	ja
KG	21.11.07	28.08.08	1094	1075	77,14	75,36	0,080	0,058	ja

Anhang G-4: L 257 Fahrtrichtung Morschenich (unbeeinflusste Fahrer)

Station	Datum		Kfz		v_m		Statistik		
	V	n	v	n	v	n	D_{max}	D_{krit}	Sign.
150	11.10.07	21.11.07	308	276	73,46	68,38	0,274	0,113	ja
150	11.10.07	28.08.08	308	283	73,46	74,01	0,052	0,112	nein
377	11.10.07	21.11.07	320	265	68,97	65,53	0,206	0,113	ja
377	11.10.07	28.08.08	320	262	68,97	68,35	0,084	0,113	nein
456	11.10.07	21.11.07	313	284	65,28	61,45	0,218	0,112	ja
456	11.10.07	28.08.08	313	292	65,28	63,45	0,145	0,111	ja
589	11.10.07	21.11.07	301	278	61,06	56,35	0,287	0,113	ja
589	11.10.07	28.08.08	301	278	61,06	61,94	0,057	0,113	ja
KG	11.10.07	21.11.07	690	650	78,47	78,95	0,031	0,074	nein
KG	11.10.07	28.08.08	436	424	79,50	79,71	0,039	0,093	nein
KG	21.11.07	28.08.08	429	424	80,69	79,71	0,092	0,093	nein

Anhang G-5: B 399 Fahrtrichtung Gey (gesamtes Fahrerkollektiv)

Station	Datum		Kfz		v _m		Statistik		
	V	n	v	n	v	n	D _{max}	D _{krit}	Sign.
0	13.09.07	04.06.08	1817	1623	61,73	57,07	0,259	0,046	ja
0	13.09.07	10.06.08	1817	1716	61,73	53,74	0,430	0,046	ja
0	10.10.07	04.06.08	1784	1623	59,00	57,07	0,110	0,047	ja
0	10.10.07	10.06.08	1784	1716	59,00	53,74	0,281	0,046	ja
304	13.09.07	04.06.08	1848	1619	57,26	50,87	0,330	0,046	ja
304	13.09.07	10.06.08	1848	1739	57,26	50,20	0,369	0,045	ja
304	10.10.07	04.06.08	1804	1619	57,17	50,87	0,302	0,047	ja
304	10.10.07	10.06.08	1804	1739	57,17	50,20	0,342	0,046	ja
402	13.09.07	04.06.08	1854	1635	51,85	48,78	0,178	0,046	ja
402	13.09.07	10.06.08	1854	1713	51,85	50,63	0,088	0,046	ja
402	10.10.07	04.06.08	1827	1635	51,26	48,78	0,148	0,046	ja
402	10.10.07	10.06.08	1827	1713	51,26	50,63	0,056	0,046	ja
KG	13.09.07	10.10.07	1197	2065	81,02	81,56	0,057	0,049	ja
KG	13.09.07	04.06.08	1197	2108	81,02	82,36	0,066	0,049	ja
KG	10.10.07	04.06.08	2065	2108	82,56	82,36	0,019	0,042	nein

Anhang G-6: B 399 Fahrtrichtung Gey (unbeeinflusste Fahrer)

Station	Datum		Kfz		v_m		Statistik		
	V	n	v	n	v	n	D_{max}	D_{krit}	Sign.
0	13.09.07	04.06.08	730	684	63,00	58,41	0,266	0,072	ja
0	13.09.07	10.06.08	730	674	63,00	55,18	0,418	0,073	ja
0	10.10.07	04.06.08	708	684	60,19	58,41	0,120	0,073	ja
0	10.10.07	10.06.08	708	674	60,19	55,18	0,275	0,073	ja
304	13.09.07	04.06.08	692	653	58,84	51,86	0,349	0,074	ja
304	13.09.07	10.06.08	692	596	58,84	51,90	0,340	0,076	ja
304	10.10.07	04.06.08	688	653	58,19	51,86	0,317	0,074	ja
304	10.10.07	10.06.08	688	596	58,19	51,90	0,307	0,076	ja
402	13.09.07	04.06.08	698	620	53,03	49,98	0,202	0,075	ja
402	13.09.07	10.06.08	698	572	53,03	52,38	0,070	0,077	nein
402	10.10.07	04.06.08	670	620	52,37	49,98	0,154	0,076	ja
402	10.10.07	10.06.08	670	572	52,37	52,38	0,036	0,077	nein
KG	13.09.07	10.10.07	477	839	82,91	84,60	0,068	0,078	nein
KG	13.09.07	04.06.08	477	869	82,91	84,31	0,072	0,078	nein
KG	10.10.07	04.06.08	839	869	84,60	84,31	0,031	0,066	nein

Anhang G-7: B 477 Fahrtrichtung L uxheim (gesamtes Fahrerkollektiv)

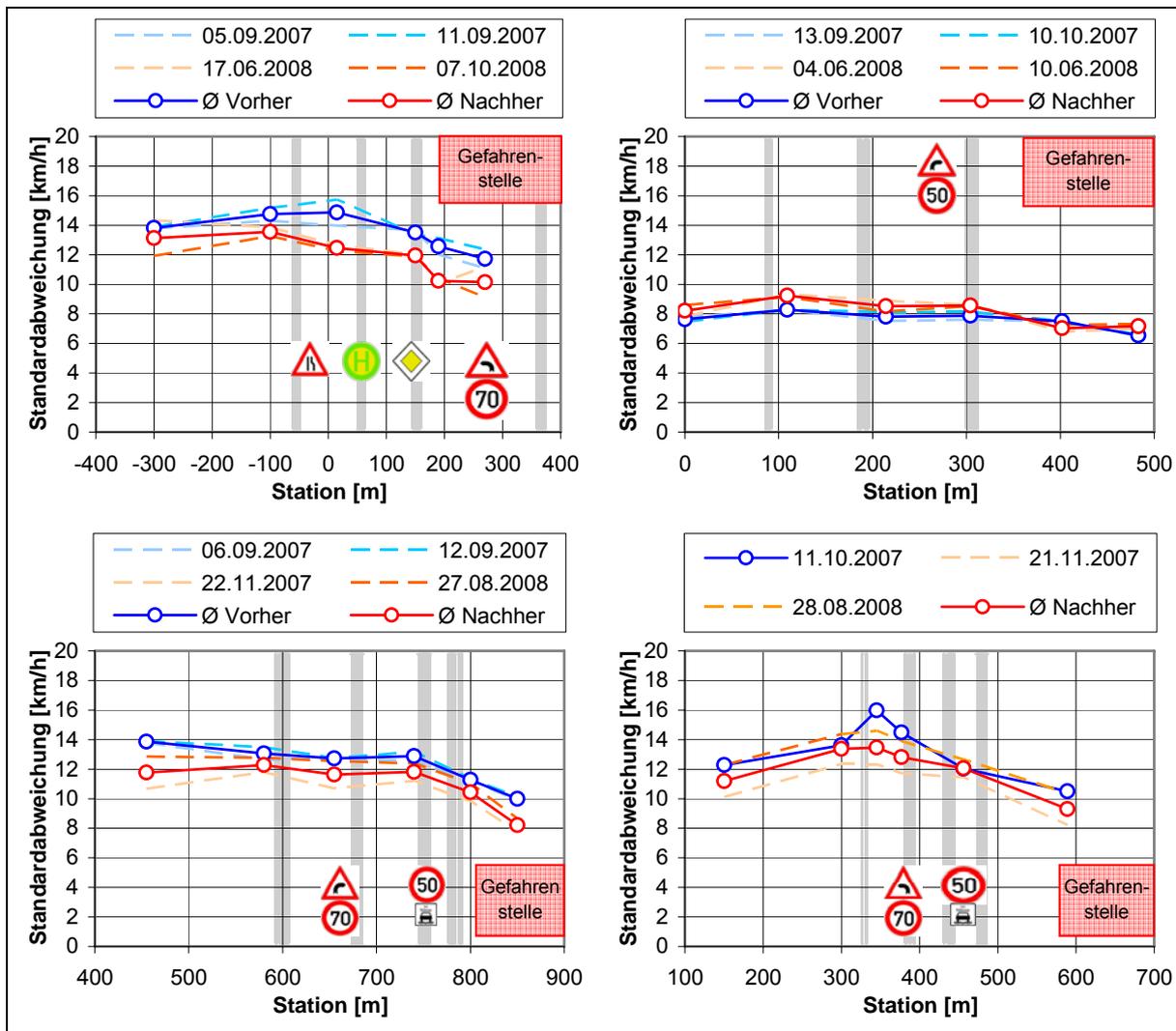
Station	Datum		Kfz		v _m		Statistik		
	V	n	v	n	v	n	D _{max}	D _{krit}	Sign.
-300	05.09.07	17.06.08	1475	1503	79,04	76,71	0,110	0,050	ja
-300	05.09.07	07.10.08	1475	761	79,04	73,94	0,229	0,061	ja
-300	11.09.07	17.06.08	1399	1503	78,55	76,71	0,086	0,051	ja
-300	11.09.07	07.10.08	1399	761	78,55	73,94	0,220	0,061	ja
150	05.09.07	17.06.08	1480	1509	71,70	61,56	0,386	0,050	ja
150	05.09.07	07.10.08	1480	1211	71,70	62,45	0,381	0,053	ja
150	11.09.07	17.06.08	1425	1509	71,50	61,56	0,361	0,050	ja
150	11.09.07	07.10.08	1425	1211	71,50	62,45	0,362	0,053	ja
270	05.09.07	17.06.08	1501	1557	66,89	63,19	0,176	0,049	ja
270	05.09.07	07.10.08	1501	1236	66,89	60,05	0,344	0,052	ja
270	11.09.07	17.06.08	1438	1557	68,98	63,19	0,245	0,050	ja
270	11.09.07	07.10.08	1438	1236	68,98	60,05	0,393	0,053	ja
KG	05.09.07	11.09.07	1581	1603	82,33	81,86	0,046	0,078	nein
KG	05.09.07	07.10.08	1581	1557	82,33	81,21	0,064	0,078	ja
KG	11.09.07	07.10.08	1603	1557	81,86	81,21	0,042	0,077	nein

Anhang G-8: B 477 Fahrtrichtung L uxheim (unbeeinflusste Fahrer)

Station	Datum		Kfz		v _m		Statistik		
	V	n	v	n	v	n	D _{max}	D _{krit}	Sign.
-300	05.09.07	17.06.08	658	619	80,91	77,41	0,138	0,076	ja
-300	05.09.07	07.10.08	658	390	80,91	75,21	0,206	0,087	ja
-300	11.09.07	17.06.08	615	619	79,55	77,41	0,120	0,077	ja
-300	11.09.07	07.10.08	615	390	79,55	75,21	0,178	0,088	ja
150	05.09.07	17.06.08	652	590	72,68	62,54	0,379	0,077	ja
150	05.09.07	07.10.08	652	462	72,68	64,58	0,318	0,083	ja
150	11.09.07	17.06.08	600	590	73,13	62,54	0,360	0,079	ja
150	11.09.07	07.10.08	600	462	73,13	64,58	0,312	0,084	ja
270	05.09.07	17.06.08	643	600	67,75	64,32	0,177	0,077	ja
270	05.09.07	07.10.08	643	473	67,75	62,13	0,281	0,082	ja
270	11.09.07	17.06.08	578	600	70,52	64,32	0,262	0,079	ja
270	11.09.07	07.10.08	578	473	70,52	62,13	0,355	0,084	ja
KG	05.09.07	11.09.07	769	755	83,09	82,69	0,048	0,070	nein
KG	05.09.07	07.10.08	769	724	83,09	83,00	0,032	0,070	nein
KG	11.09.07	07.10.08	755	724	82,69	83,00	0,026	0,070	nein

Anhang H: Standardabweichung der Geschwindigkeiten

Anhang H-1: Gesamtes Fahrerkollektiv



Vergleich der Standardabweichungen der Geschwindigkeiten vor und nach Applikation der R ttelstreifen:

B 477 Fahrtrichtung L uxheim (oben links);

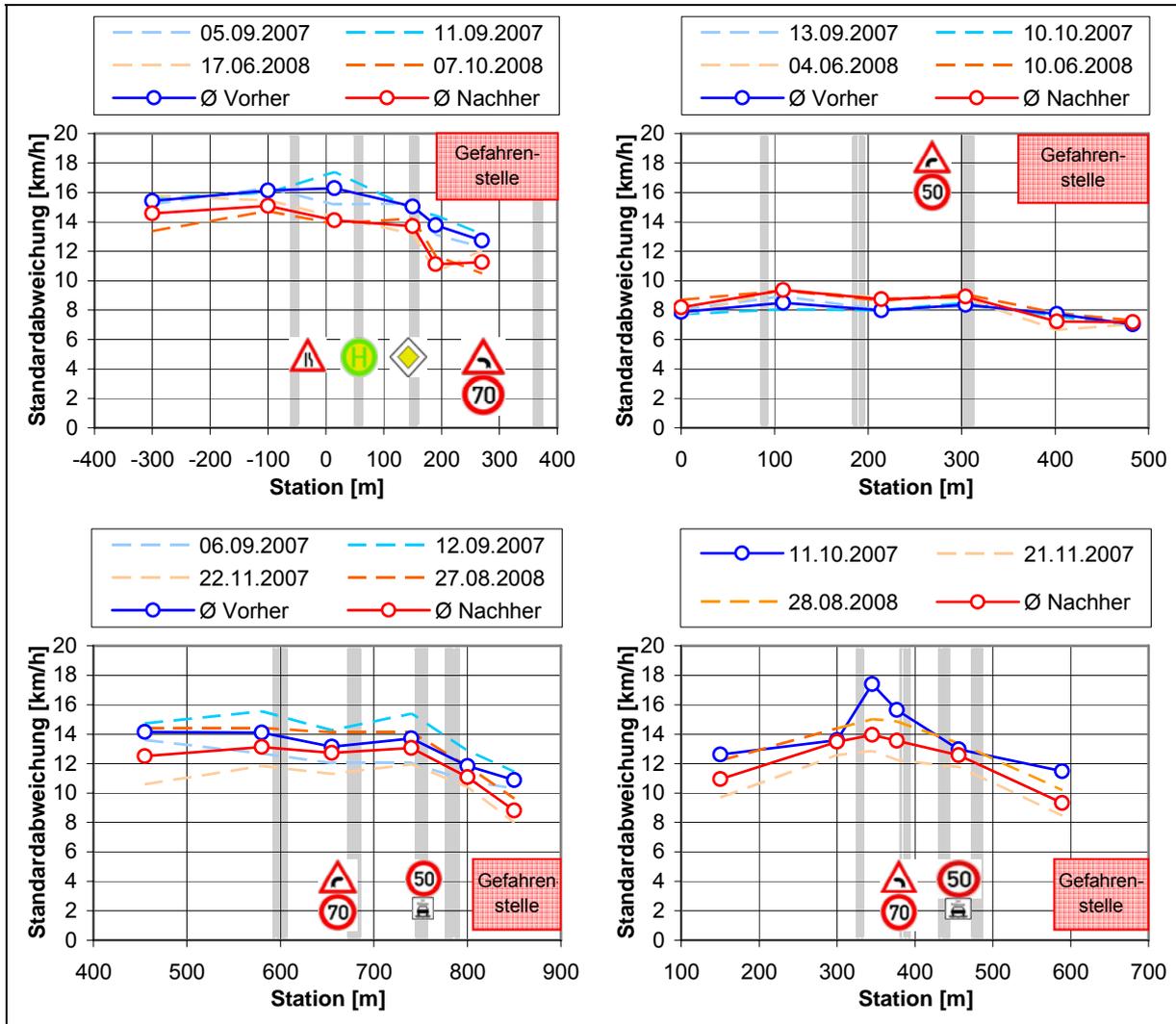
B 399 Fahrtrichtung Gey (oben rechts);

L 257 Fahrtrichtung Buir (unten links);

L 257 Fahrtrichtung Morschenich (unten rechts)

(blau: Messungen vorher, rot: Messungen nachher)

Anhang H-2: Unbeeinflusste Fahrer



Vergleich der Standardabweichungen der Geschwindigkeiten vor und nach Applikation der Rüttelstreifen:

B 477 Fahrtrichtung LUXHEIM (oben links);

B 399 Fahrtrichtung GEY (oben rechts);

L 257 Fahrtrichtung BUIR (unten links);

L 257 Fahrtrichtung MORCHENISCH (unten rechts)

(blau: Messungen vorher, rot: Messungen nachher)

Anhang I: Erzeugung von Ganglinien

In Kapitel 8.5.1 wurde erläutert, dass die Fahrzeugdaten der einzelnen Messquerschnitte nicht trivial miteinander verknüpft werden können, sondern eine Zuordnung zu einzelnen Ganglinien auf Basis von Wahrscheinlichkeitsfunktionen erfolgen muss. Der hierzu benötigte Algorithmus wurde ebenfalls in dem o. g. Kapitel vorgestellt. Im weiteren Verlauf werden die wichtigsten Funktionen hergeleitet und zu einem Algorithmus verknüpft, der es ermöglicht, die Einzelfahrzeugdaten mit hoher Zuverlässigkeit zu individuellen Ganglinien zu verknüpfen. Auf Grund der getrennten Darstellung sind Redundanzen zum Kapitel 8.5.1 möglich.

Der Grundgedanke der Ganglinienerzeugung basiert auf der Zuordnung von Wahrscheinlichkeitswerten für alle relevanten Messgrößen. Der Wertebereich bzw. die zugehörige Wahrscheinlichkeitsspanne werden aus den bekannten Größen des Gesamtkollektivs – im Speziellen der Geschwindigkeit und deren Standardabweichung – abgeleitet und auf die Einzelwerte übertragen.

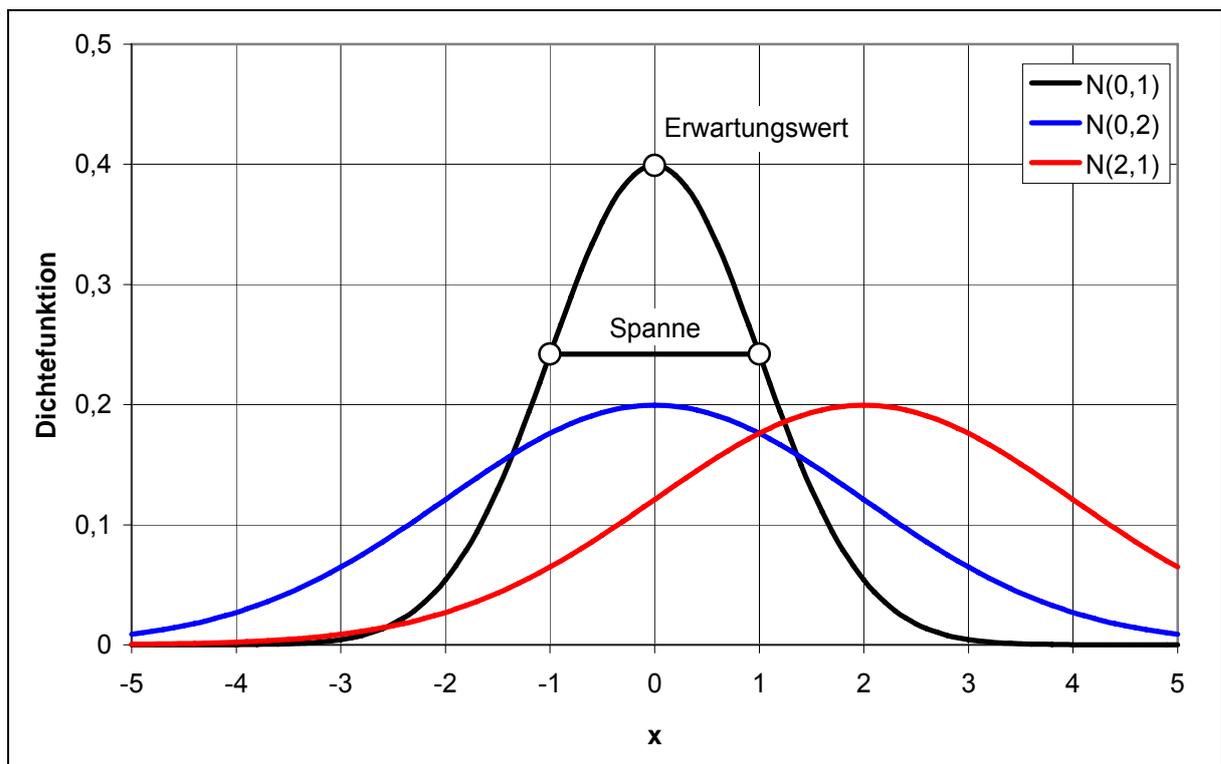


Bild 1: Dichtefunktionen $N(\mu,\sigma)$ normalverteilter Zufallsgrößen mit unterschiedlichen Parametern μ und σ

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$$

Gl. 1

Mit f Dichtefunktion
 σ Standardabweichung
 μ Erwartungswert

In Bild 1 sind unterschiedliche Dichtefunktionen normalverteilter Zufallsgrößen mit unterschiedlichen Parametern dargestellt. Die Dichtefunktionen errechnen sich auf Basis der Gl. 1.

Der erste Term der Gl. 1 legt dabei die Skalierung der Funktion f in vertikaler Richtung fest und die Standardabweichung σ bestimmt die laterale Ausdehnung und damit die Form der Dichtefunktion, während der Erwartungswert μ die laterale Position des Maximums der Funktion $f(\mu)$ bestimmt. Die Parameter sind so aufeinander abgestimmt, dass das Integral der Funktion, also die Fläche unter dem Funktionsgraphen, immer den Wert „1“ annimmt (vgl. SACHS, 1992).

Auf Basis des kollektiven Geschwindigkeitsverhalten werden zwischen jedem Messquerschnitt die Parameter der Wahrscheinlichkeitsfunktionen zur

- Geschwindigkeit,
- Fahrtzeit,
- Zeitlücke zum vorausfahrenden bzw. folgenden Fahrzeug sowie zur
- Fahrzeuglänge

formuliert. Zu jedem Datensatz des ersten Messquerschnitts werden auf diese Weise ein Erwartungswert sowie eine Dichtefunktion für jeden dieser vier Kennwerte berechnet. Am folgenden Messquerschnitt werden alle Datensätze mit diesen Funktionen verglichen und die jeweilige „Zuordnungswahrscheinlichkeit“ berechnet. Jede einzelne „Zuordnungswahrscheinlichkeit“ wird über vorher festgesetzte Grenzen hinsichtlich der Qualität der Zuordnung überprüft. Liegt die Wahrscheinlichkeit nur eines der Parameter unterhalb des gesetzten Grenzwerts, kann eine Zuordnung nicht mit ausreichender Sicherheit erfolgen. Werden alle Untergrenzen überschritten, wird der Gesamtwert der Zuordnungswahrscheinlichkeit gebildet.

Hierzu wurden mehrere Wichtungsverfahren getestet. Obwohl sich keines der Verfahren hinsichtlich Stabilität deutlich von den anderen Verfahren abgesetzt hat, wird aus Anschaulichkeitsgründen eine einfache Wichtung mit Faktoren nach Gl. 2 unter der Randbedingung nach Gl. 3 empfohlen.

$$f_{ges} = \sum g_i \cdot f_i \quad \text{Gl. 2}$$

Mit	f_{ges}	Gesamtwert der Zuordnungswahrscheinlichkeit
	g_i	Wichtungsfaktor für den Parameter i
	f_i	Einzelwert der Zuordnungswahrscheinlichkeit für den Parameter i

$$\sum g_i = 1,0 \quad \text{Gl. 3}$$

Mit	g_i	Wichtungsfaktor für den Parameter i
-----	-------	-------------------------------------

Anhand dieses Gesamtparameters f_{ges} wird die Zuordnungsgüte der einzelnen Fahrzeugdaten zueinander abgeschätzt. Der maximale Zuordnungsfaktor bestimmt zwei korrespondierende Wertepaare. Auf diese Weise werden alle sechs Messquerschnitte sowie das Videobild durchlaufen und eine geschlossene Geschwindigkeitsganglinie inklusive Videobild generiert.

Anhang I-1: Wahrscheinlichkeitsfunktion der Geschwindigkeit

Für jedes einzelne Fahrzeug wird eine Geschwindigkeit an den Messquerschnitten n und $n+1$ gemessen. Fährt ein Fahrzeug am Messquerschnitt n mit der Geschwindigkeit $v_{0,i}$ ein, hat es am folgenden Messquerschnitt die Geschwindigkeit $v_{1,i}$. Die exakte Größe dieser Geschwindigkeit ist jedoch unbekannt. Mit Hilfe der zuvor beschriebenen Gl. 1 muss auf Basis der Eingangsgeschwindigkeit eine Wahrscheinlichkeit für die Geschwindigkeit am Folgequerschnitt definiert werden. Für diese Wahrscheinlichkeitsfunktion muss in einem ersten Schritt ein Erwartungswert definiert werden. Dieser Erwartungswert stellt den wahrscheinlichsten Wert für die Geschwindigkeit am Folgequerschnitt dar und basiert auf der Ausgangsgeschwindigkeit des Einzelfahrzeugs und der mittleren Geschwindigkeitsdifferenz aller Fahrzeuge zwischen den beiden Messquerschnitten (vgl. Gl. 4).

$$\mu = v_{0,i} + (\bar{v}_{n+1} - \bar{v}_n) \quad \text{Gl. 4}$$

Mit	$v_{0,i}$	Geschwindigkeit des Einzelfahrzeugs am Messquerschnitt n
	\bar{v}_n	Mittlere Geschwindigkeit aller Fahrzeuge am Messquerschnitt n
	\bar{v}_{n+1}	Mittlere Geschwindigkeit aller Fahrzeuge am Messquerschnitt $n+1$

Die zugehörige Standardabweichung als Eingangsparameter für die Gl. 1 ergibt sich aus der Summe der Standardabweichungen der beiden betrachteten Messquerschnitte nach Gl. 5.

$$\sigma = \sigma_n + \sigma_{n+1} \quad \text{Gl. 5}$$

Mit	σ	Eingangsparameter der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Geschwindigkeit
	σ_n	Standardabweichung der Geschwindigkeiten am Messquerschnitt n
	σ_{n+1}	Standardabweichung der Geschwindigkeiten am Messquerschnitt n+1

Die Wahrscheinlichkeitsfunktion der Zeitdifferenz sowie aller weiteren beschreibenden Parameter wird analog nach Gl. 1 aufgestellt. Lediglich die Eingangsparameter müssen unterschiedlich bestimmt werden.

Anhang I-2: Wahrscheinlichkeitsfunktion der Zeitdifferenz

Der Erwartungswert und die Pseudo-Standardabweichung für den Zeitstempel des Fahrzeugs am Folgeradar muss über die mittlere Beschleunigung und die allgemeine Gleichung für gleichförmig beschleunigte Bewegungen ermittelt werden.

Die Beschleunigung berechnet sich bei annähernd konstantem, homogenem Verlauf der Geschwindigkeit zwischen zwei Querschnitten gemäß Gl. 6 (siehe hierzu auch Bild 2).

$$a(t) = \frac{v_{n+1} - v_n}{t} \quad \text{Gl. 6}$$

Mit	a	Beschleunigung [m/s ²]
	v_{n+1}	Geschwindigkeit am Messquerschnitt n+1 [m/s]
	v_n	Geschwindigkeit am Messquerschnitt n [m/s]
	t	Zeit [s]

$$s(t) = 0,5 \cdot a \cdot t^2 + v_n \cdot t \quad \text{Gl. 7}$$

Mit	s	Weg zwischen Messquerschnitt 1 und 2 [m]
	a	Beschleunigung [m/s ²]
	v_n	Ausgangsgeschwindigkeit am Messquerschnitt n [m/s]
	t	Zeit [s]

Aus dieser Beschleunigung und der allgemeinen Bewegungsgleichung für konstant beschleunigte Bewegungen (vgl. Gl. 7) kann durch Einsetzen und Umstellung die Zeitdifferenz ermittelt werden, die ein Fahrzeug benötigt, um den Weg zwischen zwei Messquerschnitten zu überwinden (siehe Gl. 8).

$$t = \frac{s(t)}{0,5 \cdot (v_n + v_{n+1})}$$

Gl. 8

Mit	s	Weg zwischen Messquerschnitt 1 und 2 [m]
	v_n	Geschwindigkeit am Messquerschnitt n [m/s]
	v_{n+1}	Geschwindigkeit am Messquerschnitt n+1 [m/s]
	t	Zeit [s]

Setzt man als v_n und v_{n+1} die Mittelwerte der Geschwindigkeiten an den beiden Messquerschnitten n und n+1 ein, erhält man die wahrscheinlichste Zeitdifferenz, den Erwartungswert μ (vgl. Gl. 9).

$$\mu = T_{0,i} + t$$

Gl. 9

Mit	$T_{0,i}$	Zeitstempel des Einzelfahrzeugs am Messquerschnitt n
	t	Zeitdifferenz zur Überwindung des Wegs zwischen Messquerschnitt n und n+1

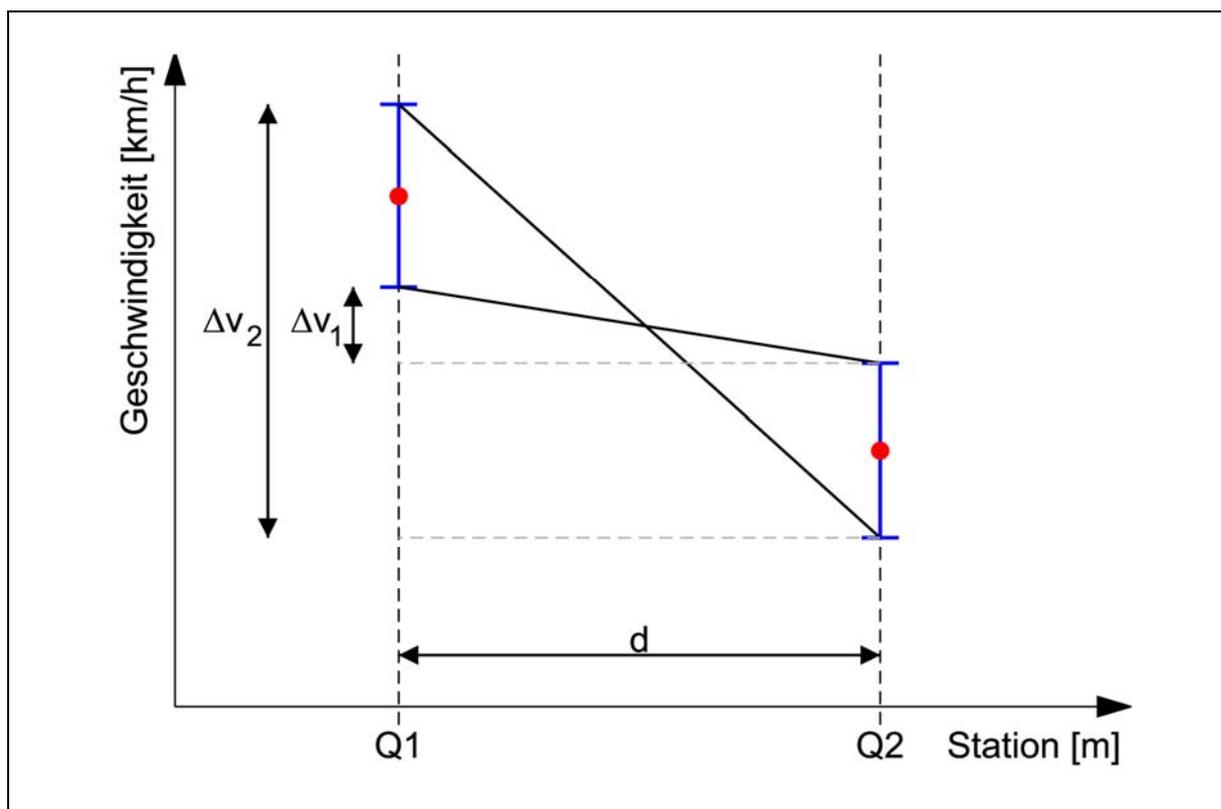


Bild 2: Mittelwert der Geschwindigkeit und deren Standardabweichung an zwei aufeinanderfolgenden Querschnitten

Der zweite Eingangsparameter σ wird aus den möglichen und realistischen Grenzen der Beschleunigung und den abgeleiteten Zeitlücken ermittelt. Dies geschieht wieder auf Basis der Standardabweichungen der Geschwindigkeiten an den beiden betrachteten Messquerschnitten. Die Standardabweichung gilt als Indiz für die Homogenität und Streuung von Einzelwerten. D.h., je stärker die Geschwindigkeiten um den Mit-

telwert streuen, desto größer wird auch die Standardabweichung. Unter der Voraussetzung, dass bei stark homogenisierten Verkehrszuständen geringe Standardabweichungen sowohl der Geschwindigkeit als auch der Beschleunigung auftreten, kann man die Grenzen „sinnvoller“ Beschleunigungen und damit auch die der auftretenden Zeitdifferenzen auf Basis der Mittelwerte und Standardabweichungen der Geschwindigkeit an den beiden betrachteten Querschnitten definieren (siehe Bild 2).

Die kleinste wahrscheinliche Zeitlücke wird analog zum Erwartungswert auf Basis der Gl. 8 berechnet. Als Eingangsparameter dienen jedoch nicht die mittlere, sondern die maximal und minimal realistischen Beschleunigungen und Geschwindigkeitsdifferenzen (Mittlere (Geschwindigkeitsdifferenz \pm Standardabweichung) / Weg) zwischen den beiden Messquerschnitten. Somit ergibt sich die untere Grenze der Zeitlücken nach Gl. 10 und die obere Zeitlücke analog nach Gl. 11.

$$t_{\min} = \frac{s(t)}{0,5 \cdot ((v_n + \sigma_n) + (v_{n+1} - \sigma_{n+1}))} \quad \text{Gl. 10}$$

$$t_{\max} = \frac{s(t)}{0,5 \cdot ((v_n - \sigma_n) + (v_{n+1} + \sigma_{n+1}))} \quad \text{Gl. 11}$$

Mit	s	Weg zwischen Messquerschnitt 1 und 2 [m]
	v_n	Geschwindigkeit am Messquerschnitt n [m/s]
	v_{n+1}	Geschwindigkeit am Messquerschnitt n+1 [m/s]
	σ_n	Standardabweichung der Geschwindigkeiten am Messquerschnitt n
	σ_{n+1}	Standardabweichung der Geschwindigkeiten am Messquerschnitt n+1
	t	Zeit [s]

Da der Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Zeitlücke nicht linear ist, muss der Eingangsparameter σ für die Wahrscheinlichkeitsfunktion als mittlere Zeitdifferenz zwischen diesen beiden Grenzen angenommen werden (vgl. Gl. 12).

$$\sigma = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{2} \quad \text{Gl. 12}$$

Mit	σ	Eingangsparameter der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Zeitdifferenzen
	t_{\max}	Obergrenze der realistischen Zeitdifferenz zwischen zwei Messquerschnitten
	t_{\min}	Untergrenze der realistischen Zeitdifferenz zwischen zwei Messquerschnitten

Die so ermittelte Wahrscheinlichkeitsfunktion ordnet allen Zeitdifferenzen zwischen den Grenzen t_{\min} und t_{\max} Werte im Bereich 0,6827 und 1,0 zu. Das heißt, dass auch hier extremere Fahrmanöver nicht a priori ausgeschlossen werden, vielmehr werden ihnen sehr geringe Wahrscheinlichkeitswerte zugewiesen. Mit diesem Vorgehen wird dem Auftreten auch extremerer Fahrmanöver Rechnung getragen.

Anhang I-3: Wahrscheinlichkeitsfunktion der Zeitlücken

Der Erwartungswert μ für die Zeitlücken nach hinten und vorne ist recht einfach zu definieren. Wenn die Fahrzeuge alle ein homogenes ähnliches Beschleunigungsverhalten aufweisen, sind die Zeitlücken am Querschnitt $n+1$ die gleichen, wie am Querschnitt n . Das Vorgehen bei der Aufstellung des Eingangsparameters σ für Zeitlücken steht im engen Zusammenhang mit dem Vorgehen für die absoluten Zeitdifferenzen zwischen zwei Querschnitten (vgl. Gl. 13). Als extremstes Szenario wird angenommen, dass das vorausfahrende Fahrzeug maximal beschleunigt und das Folgefahrzeug maximal verzögert bzw. vice versa.

Das heißt dass die Standardabweichung der Wahrscheinlichkeitsfunktion für die Zeitlücken den doppelten Wert annimmt, wie die Standardabweichung für Zeitdifferenzen.

$$\sigma = t_{\max} - t_{\min}$$

Gl. 13

Mit	σ	Eingangsparameter der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Zeitlücken
	t_{\max}	Obergrenze der realistischen Zeitdifferenz zwischen zwei Messquerschnitten
	t_{\min}	Untergrenze der realistischen Zeitdifferenz zwischen zwei Messquerschnitten

Anhang I-4: Wahrscheinlichkeitsfunktion der Fahrzeuglänge

Die Fahrzeuglänge bildet den letzten und einfachsten aller Wahrscheinlichkeitswerte bei der Fahrzeugzuordnung. Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Funktionen ist die Fahrzeuglänge nicht zeitabhängig. Gewisse Schwankungen bei der Messung der Fahrzeuglängen sind jedoch auf Grund der geräteabhängigen Messgenauigkeiten und -toleranzen nicht auszuschließen. Der Erwartungswert μ für die Fahrzeuglänge am Messquerschnitt $n+1$ entspricht naturgemäß (wenn keine systematischen Messfehler vorliegen) der Fahrzeuglänge am Messquerschnitt n . Die Standardabweichung σ für die Wahrscheinlichkeitsfunktion der Fahrzeuglänge wird auf Basis der Messgenauigkeit festgelegt. Die Fahrzeuglänge dient bei der Zuordnung auf Grund der schlechteren Messgenauigkeit lediglich der Plausibilitätskontrolle.

