



**Human Factors – Maßnahmen
zur Erhöhung der Sicherheit im Verhalten von
Straßenverkehrsteilnehmern an Bahnübergängen**

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR der PHILOSOPHIE

(Dr. phil.)

der Fakultät für Ingenieurwissenschaften,
Informatik und Psychologie der Universität Ulm

von

Jan Grippenkoven

aus Neuss

2019

Gutachter:

Prof. Dr. Martin Baumann

Prof. Dr. Meike Jipp

Mitglieder der Prüfungskommission:

Prof. Dr. Klaus Melchers

Prof. Dr. Tina Seufert

Amtierender Dekan:

Prof. Dr.-Ing. Maurits Ortmanns

Tag der Promotion:

25. Oktober 2019

Zusammenfassung

Bahnübergänge sind besonders unfallträchtige Bereiche im ansonsten sehr sicheren Eisenbahnverkehr. Der Grund für Unfälle an diesen Kreuzungspunkten sind in der Regel Fehler der Straßenverkehrsteilnehmer. Es existieren allerdings kaum belastbare Befunde zu den psychologischen Hintergründen dieser Fehler. Überdies gibt es kaum Maßnahmen zur Sicherheitserhöhung an Bahnübergängen, die gezielt beim Erleben und Verhalten der Straßenverkehrsteilnehmer ansetzen. Vor diesem Hintergrund wurden zunächst Wissen und Informationsverarbeitungsprozesse von Straßenverkehrsteilnehmern in Bezug auf den Vorgang der Bahnübergangsüberquerung untersucht. In Untersuchung 1 wurde eine Befragung durchgeführt und festgestellt, dass ein Großteil der Befragten nur ein eingeschränktes Verständnis bahnübergangsbezogener Verkehrszeichen, insbesondere dem Andreaskreuz hatte. In Untersuchung 2 wurde eine Blickbewegungsmessung bei Autofahrern im Vorgang der Annäherung an einen nicht technisch gesicherten Bahnübergang durchgeführt. Es zeigte sich unter anderem, dass ein Großteil der Autofahrer keine aufmerksame Sichtprüfung der peripheren Bahnübergangsbereiche durchführte, um festzustellen ob ein Schienenfahrzeug herannaht. Mangelhafte Kenntnisse zur Bedeutung des Andreaskreuzes sowie das Unterlassen einer Sichtprüfung stellen Risiken für die sichere Überquerung nicht technisch gesicherter Bahnübergänge dar. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden zwei Maßnahmen abgeleitet und untersucht, mit denen dem Unwissen und der Unaufmerksamkeit der Straßenverkehrsteilnehmer begegnet werden kann. In Untersuchung 3 wurde überprüft, ob es leichter ist Skripte zu anderen vorfahrtsbezogenen Verkehrszeichen abzurufen, die an Straßenkreuzungen vorkommen, als zum Andreaskreuz. In einem Wahlreaktionszeitexperiment zeigten sich unter anderem deutliche Verständnismehrvorteile in Bezug auf das Stoppschild gegenüber dem Andreaskreuz. Das Stoppschild könnte demnach eine sinnvolle Ergänzung des Andreaskreuzes an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen sein, um dem Unverständnis vieler Straßenverkehrsteilnehmer zu begegnen. In Untersuchung 4 wurde die Erfindung *PeriLight* an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang in einem weiteren Fahrversuch mit Blickbewegungsmessung getestet. Die Erfindung besteht aus zwei Leuchteinheiten, die in den peripheren Bereichen links und rechts des Bahnübergangs platziert sind und stroboskopartige Lichtreize abgeben, wenn sich ein Autofahrer annähert. Mit *PeriLight* konnte im Vergleich zur Kontrollbedingung der Anteil der Versuchsteilnehmer deutlich erhöht werden, die im Vorgang der Bahnübergangsannäherung eine Sichtprüfung durchführten.

Abstract

Railway level crossings are particularly accident-prone areas within the railway transport which generally is rather safe. Road users with their errors are responsible for most of the accidents that occur at level crossing. However, reliable findings on the psychological background of these human errors are scarce. Moreover, there are hardly measures that increase the safety at level crossings, by systematically reflecting the experiences and the behavior of road users. Starting from this state-of-the-art of science and technology, the knowledge and information processing of road users with regard to the passage of a level crossing were examined first. In study 1, a survey was conducted. It was found that the majority of respondents had a limited understanding of traffic signs related to level crossings, especially the St. Andrew's Cross. In study 2, the behaviour of motorists in the process of approaching a passive level crossing without a barrier or a light signal was evaluated using eye tracking during a regular ride. It became apparent that a majority of motorists did not engage in a careful visual inspection of the peripheral areas at the level crossing to determine whether a train is approaching or not. Deficient knowledge of the importance of the St. Andrew's Cross as well as the omission of a visual check of the level crossing peripheries pose risks for the safe passage of passive level crossings. Based on these findings, two safety measures to counteract the lack of knowledge and the inattention of road users were derived and tested. In study 3 it was examined whether it is easier to retrieve mental scripts related to other traffic signs compared to the St. Andrew's Cross. In a choice reaction time experiment it turned out that it was indeed easier for participants to assign the right meaning to the stop sign than to the St. Andrew's Cross as an example. At passive level crossings in Germany the stop sign could be a useful addition to the St. Andrew's Cross to counteract the lack of understanding of many road users. In study 4, the invention *PeriLight* was tested in the context of a passive level crossing with the help of eye tracking in a driving experiment in regular traffic. The invention consists of two lighting units that are placed in the peripheral areas to the left and right of the level crossing and emit stroboscopic light stimuli whenever a motorist is approaching. *PeriLight* significantly increased the proportion of participants who visually inspected the level crossing during the approach, compared to a baseline condition.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	III
Abstract.....	IV
Inhaltsverzeichnis	V
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XV
Eigene Publikationen im Rahmen der Dissertation.....	XVI
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	3
1.3 Einordnung und Abgrenzung der Arbeit	4
1.4 Vorgehensweise.....	5
2 Bahnübergänge in Deutschland	6
2.1 Geschichtliches	6
2.2 Bahnübergangssicherungsarten	6
2.3 Unfälle an Bahnübergängen	10
3 Theoretische Ansatzpunkte: Erleben und Verhalten des Verkehrsteilnehmers am Bahnübergang	13
3.1 Kognitive Schritte vor der sicheren Überquerung eines Bahnübergangs	13
3.2 Erkenntnisse zur Wahrnehmbarkeit eines Bahnübergangs.....	16
3.3 Erkenntnisse zum Wissen in Bezug auf das richtige Verhalten am Bahnübergang.....	17
3.4 Erkenntnisse zum Verhalten in der Zufahrt auf einen Bahnübergang.....	20
Bildung einer Handlungsintention.....	20
Blickverhalten.....	21
Fahrverhalten	25
3.5 Zusammenfassung und Identifikation relevanter Forschungslücken	25
4 Untersuchung 1: Befragung zu bahnübergangsbezogenem Wissen von Straßenverkehrsteilnehmern.....	29
4.1 Einleitung.....	29
4.2 Methoden	30

4.2.1	Befragungsteilnehmer.....	30
4.2.2	Design.....	31
4.2.3	Materialien und Versuchsumgebung.....	31
4.2.4	Durchführung	32
4.3	Ergebnisse.....	33
4.3.1	Andreaskreuz.....	33
4.3.2	Blinklicht, Lichtsignalanlage und Lichtsignalanlage (Straßenverkehr).....	36
4.3.3	Weitere bahnübergangsbezogene Schilder.....	38
4.3.4	Straßenverkehrsschilder	40
4.4	Diskussion	40
4.4.1	Andreaskreuz.....	40
4.4.2	Stoppchild, Vorfahrt gewähren und Kombinationsschild.....	42
4.4.3	Vorwarnschild unbeschränkter Bahnübergang.....	43
4.4.4	Lichtsignalanlagen.....	44
4.4.5	Zusammenfassung	44
5	Untersuchung 2: Blick- und Fahrverhalten von Autofahrern an unbeschränkten Bahnübergängen.....	46
5.1	Einleitung.....	46
5.2	Hypothesen	47
5.3	Methoden	48
5.3.1	Versuchsteilnehmer	48
5.3.2	Design.....	49
5.3.3	Materialien und Versuchsfahrzeug.....	50
5.3.4	Durchführung	50
5.4	Ergebnisse.....	52
5.4.1	Blickverhalten.....	52
5.4.2	Fahrverhalten.....	57
5.5	Diskussion	60
6	Bestehende Ansätze zur nutzerzentrierten Erhöhung der Sicherheit an Bahnübergängen.....	68
6.1	Maßnahmen zur Verbesserung der Wahrnehmbarkeit von Bahnübergängen	68
6.2	Maßnahmen zur Vermittlung des Wissens zu richtigen Verhaltensweisen an Bahnübergängen	75
6.3	Maßnahmen zur Einflussnahme auf die Handlungsintention im Kontext von Bahnübergängen	78

6.4	Fazit zu bestehenden Ansätzen der nutzerzentrierten Erhöhung der Sicherheit an Bahnübergängen	83
7	Untersuchung 3: Assoziationsstärke und Verständnis bahnübergangsbezogener Vorfahrtssymbolik	85
7.1	Einleitung.....	85
7.2	Hypothesen	86
7.3	Methoden	88
7.3.1	Versuchsteilnehmer	88
7.3.2	Design.....	89
7.3.3	Materialien und Versuchsumgebung.....	91
7.3.4	Durchführung	92
7.4	Ergebnisse.....	93
7.4.1	Bedingung 1 – Vorfahrtbedeutung oder nicht?	93
7.4.2	Bedingung 2 – Vorfahrt haben, Vorfahrt gewähren oder neutrales Verkehrszeichen?	97
7.4.3	Bedingung 3 – Anhalten, Bremsbereitschaft oder neutrales Verkehrszeichen?	101
7.4.4	Zusammenfassung	105
7.5	Diskussion	107
8	PeriLight – Eine Erfindung zur Blicklenkung an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen.....	116
8.1	Technischer Aufbau und Positionierung am Bahnübergang	117
8.2	Psychophysiologische Wirkweise und Hintergrund der Systemgestaltung von PeriLight.....	120
9	Untersuchung 4: Wirksamkeit peripherer Lichtreize auf das Blickverhalten von Autofahrern an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang.....	125
9.1	Einleitung.....	125
9.2	Hypothesen	126
9.3	Versuch 1 – Evaluation der Wirkung von PeriLight bei Tageslicht.....	127
9.4	Methoden	127
9.4.1	Versuchsteilnehmer	127
9.4.2	Design.....	128
9.4.3	Materialien und Versuchsumgebung.....	130
9.4.4	Durchführung	132
9.5	Ergebnisse.....	134
9.6	Versuch 2 – Evaluation von PeriLight bei Dunkelheit.....	151
9.7	Methoden	151

9.7.1	Versuchsteilnehmer	151
9.7.2	Design.....	152
9.7.3	Materialien und Versuchsumgebung.....	152
9.7.4	Durchführung	152
9.8	Ergebnisse.....	153
9.9	Diskussion	170
10	Fazit und Ausblick.....	197
10.1	Die sichere Überquerung des Bahnübergangs: Mehr als nur eine Frage der Technik	197
10.2	Abschließende Schlussfolgerungen zu den untersuchten Maßnahmen	199
10.3	Anschließende Forschungsfragen und Empfehlungen	201
11	Literaturverzeichnis	205
Anlage A	– Soziodemographische Daten der Stichprobe der Interviews zu bahnübergangsbezogenem Wissen von Straßenverkehrsteilnehmern	218
Anlage B	– Route der Untersuchung 2: Blick- und Fahrverhalten von Autofahrern an unbeschränkten Bahnübergängen.....	220
Anlage C	– Schilder der Untersuchung zur Assoziationsstärke und dem Verständnis bahnübergangsbezogener Vorfahrtssymbolik.....	221
Anlage D	– Adaptierte De Boer Skala zur Erfassung der subjektiv wahrgenommenen Blendung	224
Anlage E	– Skala zur Erfassung des subjektiven Störempfindens durch die Marker des Eye Tracking - Systems im Fahrzeug	225
Anlage F	– Positionen der Marker des Eye Tracking – Systems in der Untersuchungen zur Wirksamkeit peripherer Lichtreize auf das Blickverhalten von Autofahrern an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang	226
Anlage G	– Route der Untersuchungen zur Wirksamkeit peripherer Lichtreize auf das Blickverhalten von Autofahrern an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang	227
Anlage H	- Information für die Teilnehmer des Versuchs zur Wirksamkeit peripherer Lichtreize auf das Blickverhalten von Autofahrern an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang	229
Anlage I	– Schriftliche Instruktion zum Versuch zur Wirksamkeit peripherer Lichtreize auf das Blickverhalten von Autofahrern an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang	230
Anlage J	– Debriefing des Versuchs zur Wirksamkeit peripherer Lichtreize auf das Blickverhalten von Autofahrern an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang	231

Eidesstattliche Erklärung 232

Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1.</i> Übersicht der gängigen Sicherungselemente von Bahnübergängen in Deutschland (Grippenkoven, Giesemann & Dietsch, 2012a). (a) Andreaskreuz, (b) Andreaskreuz an elektrifizierten Eisenbahnstrecken, (c) Eisenbahnstrecke, (d) Vorankündigungsschild Bahnübergang, (e) Vorankündigung beschränkter Bahnübergang, (f) Entfernungsbaken in der Bahnübergangszufahrt (240 m, 160 m, 80 m), (g) zweifarbige Lichtzeichenanlage, (h) Blinklichtanlage, (i) Schrankenanlage	7
<i>Abbildung 2.</i> Anteil der unterschiedlichen Sicherungsarten am Bestand der Bahnübergänge der DB Netz AG, gerundete Werte. Daten aus DB Netz AG (2016).....	9
<i>Abbildung 3.</i> Entwicklung des Bahnübergangbestandes und der Unfallzahlen im Netz der DB Netz AG. Daten aus Deutsche Bahn AG (2012), DB Netz AG (2016) und DB Netz AG (2017).....	10
<i>Abbildung 4.</i> Erforderliche kognitive Teilschritte der Überquerung eines Bahnübergangs (eigene Darstellung nach Grippenkoven & Dietsch, 2015; Grippenkoven, 2017)	14
<i>Abbildung 5.</i> Darstellungen der Schilder und Bahnübergangsinfrastrukturelemente, die den Teilnehmern der Befragung vorgelegt wurden. (d: Eigene Abbildung, c und e: EBO (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1967), a, b, f, g, h, i: StVO (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013)).....	32
<i>Abbildung 6.</i> Andreaskreuz (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013).....	33
<i>Abbildung 7.</i> Andreaskreuz mit roter Blinklicht-anlage (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1967).....	36
<i>Abbildung 8.</i> Andreaskreuz mit zweifarbiger Lichtsignalanlage und rot zeigendem Dauerlicht (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1967).....	36
<i>Abbildung 9.</i> Rot zeigende Lichtsignalanlage (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013)	37
<i>Abbildung 10.</i> Entfernungsbake 160m vor dem Bahnübergang (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013)	38
<i>Abbildung 11.</i> Warnschild vor unbeschränktem Bahnübergang (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013)	39
<i>Abbildung 12.</i> Exemplarisches Kombinations-schild aus Andreaskreuz und Stoppschild (Eigene Darstellung)	39
<i>Abbildung 13.</i> Stoppschild (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013).....	40
<i>Abbildung 14.</i> Schild Vorfahrt gewähren (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013).....	40

<i>Abbildung 15.</i> Anzahl der Versuchsteilnehmer, die Bahnübergangsinfrastrukturelemente in der Zufahrt mindestens einmal fixierten.	52
<i>Abbildung 16.</i> Boxplots der Geschwindigkeit (in km/h) der Versuchsteilnehmer in der Zufahrt auf die Bahnübergänge bei den Distanzen 240 m, 160 m, 80 m und 1 m.	57
<i>Abbildung 17.</i> Durchschnittliche Geschwindigkeit in der Zufahrt auf die Bahnübergänge bei den Distanzen 240 m, 160 m, 80 m und 1 m, unterteilt nach Teilnehmern, die vor dem Bahnübergang eine Sichtprüfung mindestens einer Seite durchgeführt haben oder nicht.	59
<i>Abbildung 18.</i> Zielschilder des Assoziationsversuchs (Grippenkoven, Rawert & Naumann, 2015).....	89
<i>Abbildung 19.</i> Schematische Darstellung des Versuchsablaufs am Beispiel der dritten Versuchsbedingung.	91
<i>Abbildung 20.</i> Übersicht der Anzahlen der Versuchsteilnehmer, die in Bedingung 1 mindestens einmal richtig reagierten beziehungsweise systematisch falsche Entscheidungen trafen.	94
<i>Abbildung 21.</i> Übersicht der Anzahlen der Versuchsteilnehmer, die in Bedingung 2 mindestens einmal richtig reagierten beziehungsweise systematisch falsche Entscheidungen trafen.	98
<i>Abbildung 22.</i> Übersicht der Anzahlen der Versuchsteilnehmer, die in Bedingung 3 mindestens einmal richtig reagierten beziehungsweise systematisch falsche Entscheidungen trafen.	102
<i>Abbildung 23.</i> Rechte Leuchteinheit des Systems PeriLight.....	117
<i>Abbildung 24.</i> Aufbau von PeriLight am Bahnübergang zwischen Hans-Jürgen-Straße und Bundesallee in Braunschweig (eigene Abbildung basierend auf einem Kartenausschnitt aus © OpenStreetMap).	118
<i>Abbildung 25.</i> Lichtreizabfolge von PeriLight in den Versuchen: Die dargestellte Sequenz wird pro Leuchteinheit fünfmal durchlaufen.....	119
<i>Abbildung 26.</i> Für den Versuch definierte <i>Areas of Interest</i> zur Auswertung von Blickparametern.	128
<i>Abbildung 27.</i> Beispiele zweier Marker des Blickbewegungsmesssystems und eine Miniaturkamera im Fahrzeuginnenraum.....	130
<i>Abbildung 28.</i> Grafische Darstellung der Ergebnisse zur Untersuchung von Hypothese 1 in der Untersuchung zur Wirksamkeit von PeriLight bei Tageslicht.....	140
<i>Abbildung 29.</i> Fahrgeschwindigkeit in der Zufahrt auf den Bahnübergang bei inaktivem und aktivem PeriLight.....	146
<i>Abbildung 30.</i> Histogramm der maximalen Bremsverzögerungswerte in der Zufahrt auf den Bahnübergang bei Tageslicht.....	150
<i>Abbildung 31.</i> Grafische Darstellung der Ergebnisse zur Untersuchung von Hypothese 1 in der Untersuchung zur Wirksamkeit von PeriLight bei Dunkelheit.....	158

<i>Abbildung 32.</i> Fahrgeschwindigkeit in der Zufahrt auf den Bahnübergang bei inaktivem und aktivem PeriLight im Teilversuch bei Dunkelheit.....	165
<i>Abbildung 33.</i> Histogramm der maximalen Bremsverzögerungswerte in der Zufahrt auf den Bahnübergang bei Dunkelheit.....	169
<i>Abbildung 34.</i> Dauer des Führerscheinbesitzes der Teilnehmer der Befragung	218
<i>Abbildung 35.</i> Anzahl der Bahnübergangsüberfahrten der Teilnehmer der Befragung pro Woche	218
<i>Abbildung 36.</i> Anzahl der Nennungen regelmäßig genutzter Verkehrsmitteln der Befragungsteilnehmer (Mehrfachnennungen waren möglich)	219
<i>Abbildung 37.</i> Route der Untersuchung 2 zum Blick- und Fahrverhalten von Autofahrern an unbeschränkten Bahnübergängen (eigene Abbildung basierend auf einem Kartenausschnitt aus © OpenStreetMap).....	220
<i>Abbildung 38.</i> Eye Tracking - Marker im Versuchsfahrzeug.....	226
<i>Abbildung 39.</i> Versuchsstrecke für die Evaluation von PeriLight. Diese Strecke wurde sowohl für den Teilversuch bei Tageslichtbedingungen als auch im Teilversuch bei Dunkelheit genutzt (eigene Abbildung basierend auf einem Kartenausschnitt aus © OpenStreetMap).	227
<i>Abbildung 40.</i> Teilansicht der Versuchsstrecke für die Evaluation von PeriLight im Bereich des Bahnübergangs an der Hans-Jürgen-Straße / Bundesallee in Braunschweig (eigene Abbildung basierend auf einem Kartenausschnitt aus © OpenStreetMap).....	228

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	<i>Ergebnisse der Befragung zur Bedeutung des Andreaskreuzes</i>	35
Tabelle 2	<i>Ergebnisse der Befragung zum roten Blinklicht und den Lichtsignalanlagen am Bahnübergang und im Straßenverkehr</i>	37
Tabelle 3	<i>Übersicht der Anzahl der Versuchsteilnehmer, die an den Bahnübergängen ein sicherheitsrelevantes Blickverhalten gezeigt haben</i>	53
Tabelle 4	<i>Übersicht der Anzahl der Versuchsteilnehmer, die an den Bahnübergängen eine Sichtprüfung der linken und rechten Peripherie durchgeführt haben</i>	54
Tabelle 5	<i>Fixationsdaten der Zufahrt auf den nicht technisch gesicherten Bahnübergang</i>	56
Tabelle 6	<i>Schematische Darstellung der Versuchsbedingungen und Variablen</i>	91
Tabelle 7	<i>Deskriptive Statistik der Wahlreaktionszeiten in Bedingung 1</i>	96
Tabelle 8	<i>Deskriptive Statistik der Wahlreaktionszeiten in Bedingung 2</i>	100
Tabelle 9	<i>Deskriptive Statistik der Wahlreaktionszeiten in Bedingung 3</i>	104
Tabelle 10	<i>Ergebnisübersicht der statistischen Vergleiche der relevanten Verkehrszeichen</i>	106
Tabelle 11	<i>Nutzungshäufigkeit des Bahnübergangs in Watenbüttel unter den Versuchsteilnehmern der Untersuchung der Wirksamkeit von PeriLight bei Tageslicht</i>	135
Tabelle 12	<i>Kreuztabelle zu Fixationen in der AOI links außen</i>	136
Tabelle 13	<i>Kreuztabelle zu Fixationen in der AOI rechts außen</i>	137
Tabelle 14	<i>Kreuztabelle zu Fixationen in der AOI halb links</i>	138
Tabelle 15	<i>Kreuztabelle zu Fixationen in der AOI halb rechts</i>	139
Tabelle 16	<i>Anzahl der Versuchsteilnehmer, die bei inaktivem PeriLight zu beiden Seiten / zu keiner Seite / nur zu einer Seite geschaut haben</i>	140
Tabelle 17	<i>Anzahl der Versuchsteilnehmer, die bei aktivem PeriLight zu beiden Seiten / zu keiner Seite / nur zu einer Seite geschaut haben</i>	141
Tabelle 18	<i>Deskriptive Daten zur Untersuchung von Hypothese 2 bei Tageslicht</i>	143
Tabelle 19	<i>Fahrdatenvergleich bei inaktivem und aktivem PeriLight bei Tageslicht</i>	147
Tabelle 20	<i>Nutzungshäufigkeit des Bahnübergangs in Watenbüttel unter den Versuchsteilnehmern der Untersuchung der Wirksamkeit von PeriLight bei Dunkelheit</i>	153
Tabelle 21	<i>Kreuztabelle zu Fixationen in der AOI links außen bei Dunkelheit</i>	155
Tabelle 22	<i>Kreuztabelle zu Fixationen in der AOI rechts außen bei Dunkelheit</i>	156
Tabelle 23	<i>Kreuztabelle zu Fixationen der AOI halb links bei Dunkelheit</i>	157
Tabelle 24	<i>Kreuztabelle zu Fixationen in der AOI halb rechts</i>	157

Tabelle 25	<i>Anzahl der Versuchsteilnehmer, die im Teilversuch bei Dunkelheit bei inaktivem PeriLight zu beiden Seiten / zu keiner Seite / nur zu einer Seite geschaut haben</i>	159
Tabelle 26	<i>Anzahl der Versuchsteilnehmer, die im Teilversuch bei Dunkelheit bei aktivem PeriLight zu beiden Seiten / zu keiner Seite / nur zu einer Seite geschaut haben</i>	159
Tabelle 27	<i>Deskriptive Daten zur Untersuchung von Hypothese 2 bei Dunkelheit</i>	161
Tabelle 28	<i>Fahrdatenvergleich bei inaktivem und aktivem PeriLight im Teilversuch bei Dunkelheit</i>	166
Tabelle 29	<i>Verkehrszeichen der Teilaufgabe 1: Vorfahrt vs. Neutrale Schilder</i>	221
Tabelle 30	<i>Verkehrszeichen der Teilaufgabe 2: Vorfahrt haben vs. Vorfahrt gewähren vs. Neutrale Schilder</i>	222
Tabelle 31	<i>Verkehrszeichen der Teilaufgabe 3: Halten vs. Erhöhte Bremsbereitschaft vs. Neutrale Schilder</i>	223

Abkürzungsverzeichnis

AOI	Area of Interest
BLFA StVO	Bund-Länder-Fachausschuss Straßenverkehrsordnung
BÜ – LSA	Lichtsignalanlage an Bahnübergängen
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e. V.
EBKrG	Eisenbahnkreuzungsgesetz
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
ERA	European Railway Agency
EUB	Eisenbahn – Unfalluntersuchungsstelle des Bundes
GPS	Englisch: Global Positioning System / Deutsch: Globales Positionsbestimmungssystem
ILCAD	International Level Crossing Awareness Day
Kfz	Kraftfahrzeug
LED	Englisch: Light-emitting diode / Deutsch: Lichtemittierende Diode
LKW	Lastkraftwagen
ms	Millisekunde(n)
PKW	Personenkraftwagen
RSSB	Rail Safety and Standards Board
s	Sekunde(n)
SD	Standardabweichung
Straßenverkehrs-LSA	Lichtsignalanlage an Straßenkreuzungen
StVO	Straßenverkehrsordnung
UIC	Union internationale des chemins de fer, Internationaler Eisenbahnverband
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen

Eigene Publikationen im Rahmen der Dissertation

- Dietsch, S., Gripenkoven, J. & Schade, S. (2014). Unfallschauplatz Bahnübergang - Nicht Sehen oder nicht Verstehen? In P. Schill, Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure e.V. (Hrsg.), *EIK - Eisenbahn Ingenieur Kalender 2014* (S. 289-300). Frankfurt a.M.: DVV Media Group GmbH / Eurailpress.
- Gripenkoven, J. (2016). *Patentnr. DE 10 2015 107 451 A1 2016.11.17*. München, Deutschland: Deutsches Patent- und Markenamt (DPMA).
- Gripenkoven, J. (2016). *Patentnr. EP 3 093 209 A1*. München, Deutschland: Europäisches Patentamt (EPA).
- Gripenkoven, J. (2017). Wahrnehmung und Verhalten am Bahnübergang. *Deine Bahn* (2), 10-15.
- Gripenkoven, J. & Dietsch, S. (2016). Gaze direction and driving behavior of drivers at level crossings. *Journal of Transportation Safety and Security*, 8, 4-18.
- Gripenkoven, J., Rawert, H. & Naumann, A. (2015). The potential of the stop sign to unravel the mystery named St. Andrew. *Fifth International Rail Human Factors Conference, 14-17 September 2015, Book of Proceedings* (S. 492-501). London: Rail Safety and Standards Board.
- Gripenkoven, J., Thomas, B. & Lemmer, K. (2016). PeriLight – effektive Blicklenkung am Bahnübergang. *EI - Eisenbahningenieur* (1), 48-51.

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

„Drei schwere Unfälle an Bahnübergängen in drei Tagen“ (Die Welt, 2015),

„Die Gefahr am Bahnübergang“ (Augsburger Allgemeine, 2015),

„Zwei Schwerverletzte an unbeschränktem Bahnübergang“ (Focus online, 2015).

Derartige Pressezitate in Bezug auf folgenschwere Unfälle an Bahnübergängen sind nahezu wöchentlich in Zeitungen und Nachrichtenportalen zu lesen. Trotz bestehender Sicherungen kommt es regelmäßig zu Konflikten zwischen Straßenverkehrsteilnehmern¹ und Schienenfahrzeugen. In den Jahren 2006–2012 resultierte aus Unfällen an Europas Bahnübergängen im Durchschnitt täglich etwa ein Todesfall und ein Mensch wurde schwer verletzt (European Union Agency for Railways (ERA), 2017). Der Bahnübergang ist eine besondere Gefahrenstelle im ansonsten sehr sicheren Eisenbahnverkehr, da er als Kreuzungspunkt zwischen Straßen- und Schienenverkehr einen speziellen Verkehrsschauplatz darstellt, an dem Bahnbetreiber nicht alleine für die Sicherheit zuständig sind.

Für die Sicherheit des Kreuzungsverkehrs am Bahnübergang sind die Straßenverkehrsteilnehmer mit ihrem Verhalten maßgeblich mitverantwortlich. Der Straßenverkehr muss dem Schienenverkehr an Bahnübergängen stets Vorrang gewähren, nicht zuletzt aufgrund der speziellen physikalischen Eigenschaften von Schienenfahrzeugen. Aus hohem Gewicht und hoher Geschwindigkeit von Schienenfahrzeugen resultiert ein langer Bremsweg, der selbst bei einer Schnellbremsung den Stillstand vor dem Bahnübergang nur in Ausnahmefällen ermöglicht (Schöne, 2013). Um den Vorrang des Schienenverkehrs zu gewährleisten, müssen Bahnübergänge daher einheitlich so gestaltet sein, dass sie für die Straßenverkehrsteilnehmer „rechtzeitig und eindeutig erkennbar, übersichtlich, begreifbar sowie sicher befahrbar und begehbar sind (...) und der Vorrang des Schienenverkehrs vor dem Straßenverkehr jederzeit deutlich zu erkennen ist“ (Bund-Länder-Fachausschuss Straßenverkehrsordnung (BLFA StVO), 2002, S. 5-6).

Trotz dieser Regelung sind Straßenverkehrsteilnehmer am Bahnübergang jedoch häufig unaufmerksam (Wigglesworth, 1978), kennen sich nicht mit bahnübergangsbezogenen Ver-

¹ In dieser Arbeit wird aus Gründen der besseren Lesbarkeit nur die männliche Form von Substantiven verwendet. Wenn im generischen Maskulinum geschrieben wird, beispielsweise über *Straßenverkehrsteilnehmer* oder *Versuchsteilnehmer*, beziehen sich diese Ausführungen ausdrücklich auch auf Frauen und Menschen anderer Geschlechteridentitäten.

kehrszeichen aus (Ellinghaus & Steinbrecher, 2006) oder umfahren geschlossene Schrankenanlagen (Seehafer, 1997). Dementsprechend sind die Verursacher von Bahnübergangsunfällen größtenteils Straßenverkehrsteilnehmer und nicht die Triebfahrzeugführer der Schienenfahrzeuge. Die Unfallstatistik der DB Netz (2015) zeigt, dass die Verantwortung für Bahnübergangsunfälle in über 90 % aller Zusammenpralle bei den involvierten Straßenverkehrsteilnehmern liegt. Unter zehn Prozent der Unfälle sind menschlichem oder technischem Versagen seitens des Bahnbetreibers zuzuschreiben. Diese Verteilung in der Unfallverantwortung ist historisch betrachtet stabil. Bereits in den 70er und 80er Jahren konnten in Deutschland vergleichbare Verteilungen in der Unfallverantwortung festgestellt werden (Heilmann, 1984).

Neben der nach wie vor hohen Anzahl an Personenschäden, die aus Bahnübergangsunfällen resultieren, besteht auch ein hohes wirtschaftliches Schadenspotential. Bei Kollisionen zwischen Schienenfahrzeugen und Straßenverkehrsteilnehmern entstehen teils erhebliche Kosten in Folge von Entgleisungen und durch Schäden an Schienenfahrzeugen sowie der Bahnübergangsinfrastruktur. Hinzu kommen indirekte Kosten, die aus Verkehrsstörungen resultieren. Anders als im Straßenverkehr können bei einem Unfall im Bahnverkehr die nachfolgenden Schienenfahrzeuge die Unfallstelle meist nicht ortsnah umfahren, da die Unfallstelle zunächst geräumt und die Bahninfrastruktur wieder in einen sicher befahrbaren Zustand gebracht werden muss. Die ERA bezifferte die durchschnittlichen Kosten der ihr bekannten *signifikanten Bahnübergangsunfälle*² in der EU im Jahr 2012 auf 1,7 Millionen Euro je Bahnübergangsunfall (European Union Agency for Railways (ERA), 2014). Im Jahr 2012 wurden der ERA durch die zuständigen nationalen Behörden 573 derartige Unfälle gemeldet. Auf Basis der berichteten durchschnittlichen Kosten je Bahnübergangsunfall lässt sich berechnen, dass der wirtschaftliche Gesamtschaden aller signifikanten Bahnübergangsunfälle in der EU im Jahr 2012 fast eine Milliarde Euro betrug. Unfälle mit Leichtverletzten oder leichterem Sachschaden sind in dieser Berechnung nicht berücksichtigt.

Mit Blick auf die Personen- und Sachschäden, die durch Bahnübergangsunfälle entstehen, fordert eine gemeinsame Initiative der Länder und des VDV eine Verstärkung der Bemühungen, kostengünstige technische Sicherungsmöglichkeiten zu entwickeln, zuzulassen

² Als *signifikante Bahnübergangsunfälle* werden diejenigen Bahnübergangsunfälle gewertet, die unter Beteiligung eines Schienenfahrzeugs stattfanden und in denen mindestens eine Person schwerverletzt oder getötet wurde und / oder die zu schweren Schäden an Schienenfahrzeug, Strecke, Bahnübergangsinfrastruktur oder Umgebung führten und / oder die zu erheblichen Verkehrsstörungen geführt haben (European Union Agency for Railways (ERA), 2014).

und anzuwenden (Speck, 2011). Die Entwicklung kostengünstiger Sicherungsmaßnahmen erscheint geboten, da sich das nachträgliche Aufrüsten nicht technisch gesicherter Bahnübergänge mit technischen Bahnübergangssicherungsanlagen häufig verzögert, unter anderem aufgrund von Konflikten, die aus der gesetzlichen Regelung der verteilten Kostenverantwortung resultieren: Soll an einem Bahnübergang eine technische Sicherungseinrichtung nachgerüstet werden, sind gemäß § 13 des Eisenbahnkreuzungsgesetzes (EBKrG) die entstehenden Kosten aufzuteilen (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1963). Ein Drittel der Kosten ist durch den Schienenverkehrsinfrastrukturbetreiber zu tragen (z. B. die DB AG oder ein privates Eisenbahnverkehrsunternehmen), ein Drittel durch den Baulastträger der kreuzenden Straße (z. B. eine Kommune) und ein Drittel durch den Bund (wenn es sich um eine mehrheitlich bundeseigene Eisenbahn wie die DB handelt) oder das Land (wenn es sich um eine nicht bundeseigene Eisenbahn handelt). Aufgrund der hohen Kosten gängiger technischer Bahnübergangssicherungsanlagen ist häufig eine der drei Parteien nicht bereit, die Notwendigkeit einer nachträglichen Sicherungsmaßnahme anzuerkennen. Kostengünstige Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit, mit denen die Aufmerksamkeit der Straßenverkehrsteilnehmer erhöht werden kann oder mit denen sie an das angemessene Verhalten an Bahnübergängen erinnert werden, könnten Kostenübernahmeverhandlungen vereinfachen.

Im Sinne einer zielführenden und anwenderzentrierten Entwicklung solcher Maßnahmen wurde insbesondere das Thema *Human Factors* durch ein Expertengremium der Vereinten Nationen als ein wichtiger Fokus im Rahmen einer Befragung internationaler Bahnbetreiber identifiziert. Es wurde festgestellt, dass sich Vorstellungen hinsichtlich Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit an Bahnübergängen bislang in der Regel auf ein Nachrüsten bekannter technischer Sicherungsanlagen beschränken beziehungsweise auf die Stilllegung von Bahnübergängen. Maßnahmen, die den Menschen in der Rolle des Straßenverkehrsteilnehmers in das Zentrum der Betrachtung rücken sind selten (United Nations, 2014).

1.2 Zielsetzung

Das Ziel der Arbeit besteht darin, auf Grundlage des Verständnisses des Erlebens und Verhaltens des Straßenverkehrsteilnehmers in der Phase der Annäherung an den Bahnübergang eine nutzerzentrierte Gestaltungsmaßnahme zu identifizieren und zu untersuchen, mit der die Kreuzungssicherheit an Bahnübergängen erhöht werden kann. Diese Maßnahme soll

im Vergleich zur gängigen Bahnübergangssicherungstechnik deutlich kostengünstiger sein. Diese Zielsetzung folgt im Kern den Feststellungen und Empfehlungen des Expertengremiums der Vereinten Nationen zur Sicherheit an Bahnübergängen (United Nations, 2014). Diese Forschung ist erforderlich, da im Bereich der Human Factors - Forschung zum Fehlverhalten von Straßenverkehrsteilnehmern an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen wesentliche Lücken bestehen. Es ist bislang nicht ausreichend beziehungsweise teils nicht mit angemessenen Methoden erforscht worden, inwiefern zum einen *Unaufmerksamkeit* und zum anderen *Unwissen* von Straßenverkehrsteilnehmern zu Unfällen beitragen. Aufgrund dieses Mangels wurden bislang auch kaum überzeugende Maßnahmen identifiziert, die als Alternativen zu bestehenden Sicherungssystemen dienen können, um die Sicherheit an Bahnübergängen zu erhöhen. Die Wirksamkeit der meisten bislang vorgeschlagenen alternativen Maßnahmen ist nicht oder nicht ausreichend belegt, die Effektivität ist häufig zweifelhaft oder Maßnahmen sind unwirtschaftlich und aus diesem Grund für den Serieneinsatz nicht tauglich.

Die Forschungslücke im Bereich der Aufmerksamkeitsprozesse und dem Unwissen von Straßenverkehrsteilnehmern im Zusammenhang mit der Annäherung an nicht technisch gesicherte Bahnübergänge wird in dieser Arbeit aufgegriffen. Es wird das Ziel verfolgt, geeignete und kostengünstige Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit nicht technisch gesicherter Bahnübergänge abzuleiten.

1.3 Einordnung und Abgrenzung der Arbeit

Das Ziel der Identifikation geeigneter Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit nicht technisch gesicherter Bahnübergänge wird aus der Perspektive des Straßenverkehrsteilnehmers, insbesondere des Autofahrers behandelt, da diese Verkehrsteilnehmergruppe für den Großteil der Unfälle in diesem Verkehrskontext verantwortlich ist (Schöne, 2013). Der Triebfahrzeugführer ist vor dem Hintergrund seiner im Vergleich zum Autofahrer stark eingeschränkten Handlungsmöglichkeiten im Zusammenhang mit der Bahnübergangssicherheit (Schöne, 2013) nicht Gegenstand der Betrachtung.

In der Betrachtung von Ursachen, die zu Unfällen an Bahnübergängen führen, werden in dieser Arbeit vor allem menschliche Einflussfaktoren betrachtet. Da technische Fehler, die in der Verantwortung des Eisenbahnverkehrsunternehmens liegen oder technische Defekte von Straßenfahrzeugen als Unfallursachen äußerst selten vorkommen (DB Netz AG, 2016; ADAC e. V., 2014), sind sie nicht Gegenstand der Betrachtung in dieser Arbeit.

Neben der Fokussierung auf Autofahrer unter den Verkehrsteilnehmern muss auch die Art der Bahnübergänge eingeschränkt werden, die den Rahmen der Untersuchungen bilden. Es werden ausschließlich Bahnübergänge an Eisenbahnstrecken untersucht. Bahnübergänge im Straßenbahnverkehr sowie höhengleiche Zugänge zu Bahnsteigen an Bahnhöfen oder Haltepunkten werden nicht betrachtet, da die Umgebung und die vorherrschenden Betriebsabläufe sich deutlich von Bahnübergängen an Eisenbahnstrecken unterscheiden. Bei den Bahnübergängen an Eisenbahnstrecken wird von Bahnübergängen in ihrer in Deutschland üblichen Erscheinungsform ausgegangen (vgl. 2.2), in Kenntnis der Tatsache, dass Bahnübergangsbeschilderung und technische Sicherungssysteme trotz der Festlegungen des Wiener Übereinkommens über Straßenverkehrszeichen und Signale (United Nations, 1968) international leicht unterschiedlich interpretiert werden.

1.4 Vorgehensweise

Um Lösungen zu identifizieren, die das Passieren von Bahnübergängen für Straßenverkehrsteilnehmer zukünftig sicherer machen können, ist der Mensch in der Rolle des Straßenverkehrsteilnehmers mit seinem Erleben und Verhalten im Prozess der Überquerung von Bahnübergängen der Ausgangspunkt dieser Arbeit. Zunächst wird in Kapitel 2 der Untersuchungsgegenstand Bahnübergang näher beleuchtet und in seinen in Deutschland vorkommenden Hauptausprägungen vorgestellt. In Kapitel 3 werden theoretische Ansatzpunkte der Psychologie im Bahnübergangskontext aufgearbeitet. In den Kapiteln 4 und 5 werden eigene Untersuchungen vorgestellt, mit denen der Stand der Forschung zum Wissen und der Wahrnehmung im Bahnübergangskontext erweitert werden soll. In Kapitel 6 folgt eine Übersicht verschiedener Ansätze aus der nationalen und internationalen Fachliteratur zu menschenzentrierten Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit an Bahnübergängen.

Die theoretischen Erkenntnisse der Kapitel 3 bis 5 sowie der beschriebene Stand der Technik in Kapitel 6 bilden die Grundlage der eigenen Untersuchungen zu menschenzentrierten sicherheitserhöhenden Maßnahmen, die in den Kapiteln 7 bis 9 ausführlich beschrieben werden. Im abschließenden Kapitel 10 wird ein Fazit der Ergebnisse dieser Arbeit gezogen und die Implikationen der Arbeit in Bezug auf die zukünftige Gestaltungsmöglichkeit von Bahnübergängen reflektiert sowie weiterführender Forschungsbedarf identifiziert.

2 Bahnübergänge in Deutschland

In diesem Kapitel wird der Bahnübergang als Forschungsgegenstand dieser Arbeit beleuchtet. Nach einer kurzen geschichtlichen Einordnung folgt eine Übersicht der gängigen Bahnübergangssicherungsarten in Deutschland. Danach werden öffentlich verfügbare Statistiken und Erkenntnisse zu Unfällen sowie zum Bestand an Bahnübergängen in Deutschland dargestellt. Diese Daten stellen einen Ausgangspunkt zur Erreichung des Ziels der Identifikation menschenzentrierter und effizienter Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit dar.

2.1 Geschichtliches

Die meisten Eisenbahnen in Deutschland entstanden in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. In dieser Zeit kam dem motorisierten Individualverkehr auf den Straßen kaum Bedeutung zu und der Siegeszug des Automobils stand noch bevor. Erfordernisse, die zukünftig aus dem zunehmenden Straßenverkehr mit motorisierten Fahrzeugen entstehen sollten, waren noch nicht absehbar. Mit der Entwicklung von Kraftfahrzeugen und deren zunehmender Verbreitung auf deutschen Straßen wurden die Nachteile und Gefahren höhengleicher Kreuzungen zwischen Straßen und Eisenbahnstrecken offensichtlich und führten zu einer zunehmenden Regulierung von Bahnübergängen und der zugehörigen Sicherheitseinrichtungen. So wird seit 1967 durch die Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO) geregelt, dass und in welcher Form Bahnübergänge in Deutschland gesichert werden müssen (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1967). Zudem wurden in den Wiener Übereinkommen von 1968 Konventionen zur Gestaltung von Straßenverkehrszeichen und Signalen verabredet, die auch einen Rahmen zur Vereinheitlichung der Beschilderung und Signalisierung von Bahnübergängen in Europa umfassen (United Nations, 1968).

2.2 Bahnübergangssicherungsarten

In dieser Arbeit werden Bahnübergänge als höhengleiche Kreuzungen von Eisenbahnen mit Straßen und Wegen betrachtet. Diese Definition folgt weitestgehend der Festlegung gemäß § 11 der EBO (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1967). Bahnübergänge sind gemäß der EBO bis zu einer schienenverkehrsseitigen Maximalgeschwindigkeit von 160 km/h zugelassen. Bei höheren Geschwindigkeiten, die gerade im Personenfernverkehr üblich sind, muss die höhengleiche Kreuzung von Straße und Schiene durch eine Über- beziehungsweise Unterführung vermieden werden. Die gängigsten Erscheinungsformen

und Elemente nicht technisch gesicherter beziehungsweise technisch gesicherter Bahnübergänge sind zusammengefasst in Abbildung 1 dargestellt.

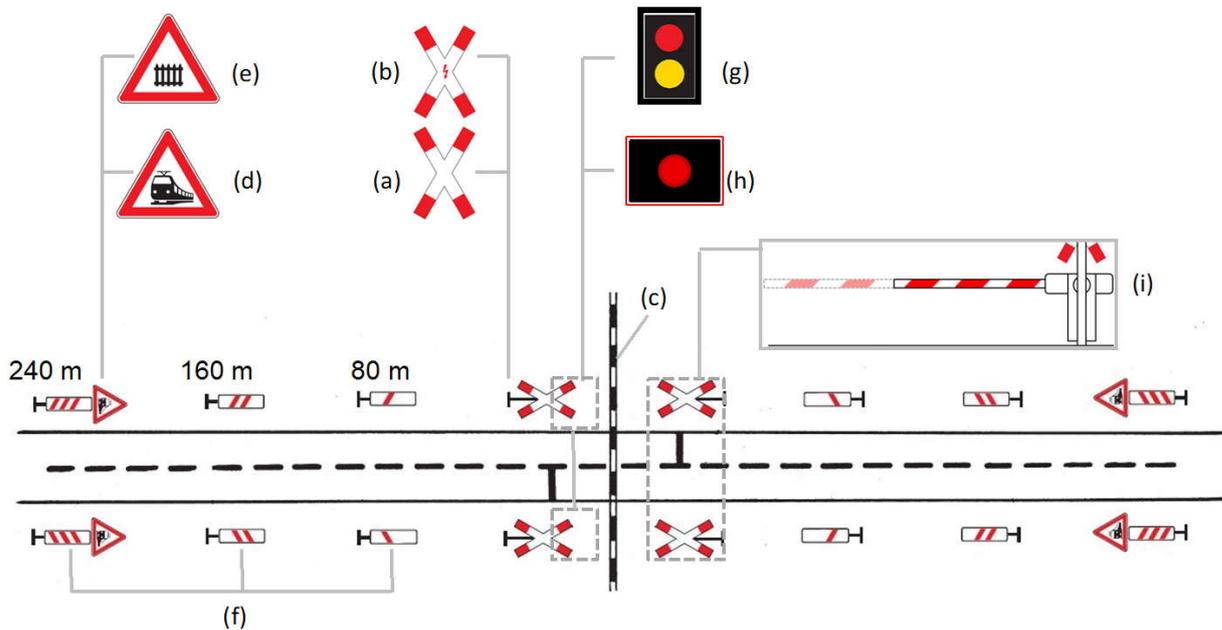


Abbildung 1. Übersicht der gängigen Sicherungselemente von Bahnübergängen in Deutschland (Grippenkoven, Giesemann & Dietsch, 2012a). (a) Andreaskreuz, (b) Andreaskreuz an elektrifizierten Eisenbahnstrecken, (c) Eisenbahnstrecke, (d) Vorankündigungsschild Bahnübergang, (e) Vorankündigungsschild beschränkter Bahnübergang, (f) Entfernungsbaken in der Bahnübergangszufahrt (240 m, 160 m, 80 m), (g) zweifarbige Lichtzeichenanlage, (h) Blinklichtanlage, (i) Schrankenanlage

Per Definition bestehen in deutschen Eisenbahnnetzen keine *ungesicherten* Bahnübergänge. Bahnübergänge ohne technische Sicherung werden in der Fachsprache als *nicht technisch gesichert* oder auch als *passiv gesichert* bezeichnet, da es Verkehrszeichen gibt, die den Straßenverkehrsteilnehmer auf den Bahnübergang aufmerksam machen sollen. Der Straßenverkehrsteilnehmer ist an diesen Bahnübergängen in der Verantwortung, auf Grundlage der Verkehrszeichen sein Wissen über das angemessene Sicherungsverhalten in der Zufahrt abzurufen, aufmerksam und vorsichtig zu sein. Das zentrale Verkehrszeichen, das auf beiden Seiten der Straße in jeder Fahrtrichtung einen Bahnübergang kennzeichnet, ist das Andreaskreuz (Abbildung 1a). Andreaskreuze werden unmittelbar vor dem Bahnübergang dort angebracht, wo Straßenverkehrsteilnehmer anhalten müssen, wenn ein Schienenfahrzeug herannaht, dem Vorrang gewährt werden muss (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1967). Es gibt als zweite Variante ein Andreaskreuz, das in seiner Mitte mit einem Blitzsymbol versehen ist (Abbildung 1b). Diese Form des Andreaskreuzes wird an Eisenbahnstrecken mit stromführender Oberleitung verwendet. Zur frühzeitigen Ankündigung des Bahnüber-

gangs gibt es zusätzlich zum Andreaskreuz weitere Schilder. In einem Abstand von 240 m vor dem Bahnübergang ist ein Vorankündigungsschild positioniert, das entweder ein Piktogramm eines Zuges (Abbildung 1d) oder einer Schrankenanlage (Abbildung 1e) trägt, je nachdem, ob ein nicht technisch gesicherter Bahnübergang oder ein beschränkter Bahnübergang angekündigt wird. Diese Vorankündigungsschilder sind oberhalb einer dreigestreiften Bake platziert, die als Entfernungshinweis dient. Insgesamt weisen drei Baken Straßenverkehrsteilnehmer auf die sich verringernde Distanz zum Bahnübergang hin (Abbildung 1f). Im Regelfall stehen Baken in Entfernungen von 240 m, 160 m und 80 m vor dem Bahnübergang mit drei, zwei beziehungsweise einem diagonalen roten Streifen auf weißem Grund.

Neben den beschriebenen nicht technischen Sicherungselementen, unter denen das Andreaskreuz an jedem Bahnübergang vorzufinden sein sollte, existieren unterschiedliche technische Sicherungsformen. Hier wird zwischen den drei gebräuchlichsten technischen Sicherungsanlagen unterschieden:

- Lichtzeichen beziehungsweise Blinklichtanlage (Abbildung 1g bzw. h)
- Halbschranken (Abbildung 1i) mit Lichtzeichen oder Blinklichtanlage
- Vollschranken (Abbildung 1i blass dargestellt) mit oder ohne Lichtzeichen oder Blinklichtanlage

Weitere besondere Bahnübergangsformen sind Bahnübergänge mit Anrufschraken, Bahnübergänge mit Postensicherung oder Bahnübergänge an Wald-, Forst- oder Privatwegen. Diese Bahnübergangsformen folgen zum Teil abweichenden Regelungen der Sicherung und werden im Folgenden nicht thematisiert. In Bezug auf die Sicherungsarten gilt vereinfachend die Regel, dass die Art der Bahnübergangssicherungsmaßnahme umfangreicher ausfallen muss, je höher die Verkehrsdichte auf Straßen- und Schienenseite ist, je höher die Geschwindigkeit der Schienenfahrzeuge ist und je höher die Anzahl der Gleise ist. Eine Übersicht der Anteile der Sicherungsarten ist exemplarisch für das Netz der Deutschen Bahn in Abbildung 2 dargestellt.

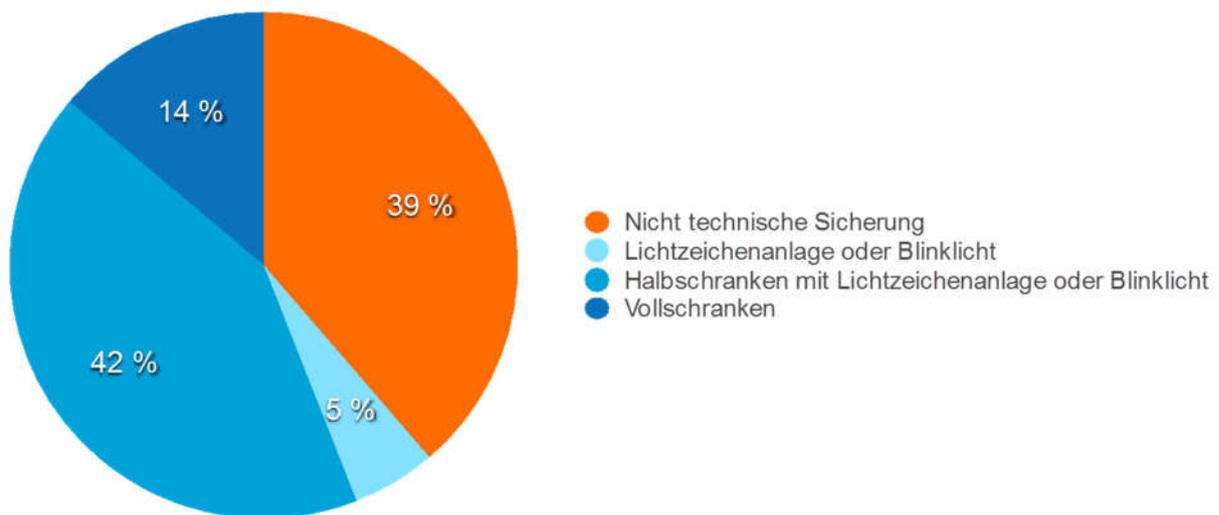


Abbildung 2. Anteil der unterschiedlichen Sicherungsarten am Bestand der Bahnübergänge der DB Netz AG, gerundete Werte. Daten aus DB Netz AG (2016)

Unter den Bahnübergängen im Netz der Deutschen Bahn sind 42 % mit Halbschranken und Lichtzeichen oder mit Halbschranken und Blinklichtern gesichert. Im Vergleich zu Vollschrankensystemen bieten Halbschrankenanlagen den Straßenverkehrsteilnehmern nach ihrem Verschluss den Vorteil einer erleichterten Räumung des Gefahrenraumes zwischen den Andreaskreuzen, da nicht die gesamte Fahrbahnbreite abgesperrt wird. Damit geht allerdings der Nachteil einher, dass Verkehrsteilnehmer leichter einen Verstoß gegen die Verkehrsvorschriften begehen können, indem sie geschlossene Halbschranken umfahren. 5 % der Bahnübergänge sind technisch nur mit Lichtzeichenanlage oder Blinklichtern ohne Halbschranke gesichert, 14 % der Bahnübergänge verfügen über einen Vollschrankenabschluss. Vollschrankenanlagen, automatisch oder wärterbedient sind häufig innerhalb geschlossener Ortschaften vorzufinden.

Besondere Beachtung finden in den folgenden Kapiteln nicht technisch gesicherte Bahnübergänge. Diese Bahnübergänge kommen vor allem an Nebenbahnstrecken vor, an denen schwacher bis mäßiger Straßenverkehr vorherrscht und selten Bahnfahrzeuge verkehren. Unter den bestehenden Bahnübergängen im Netz der Deutschen Bahn AG sind mit 39 % der Bahnübergänge noch immer ein großer Anteil nicht technisch gesichert (DB Netz AG, 2016). Auf Schienenseite darf an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang die Maximalgeschwindigkeit 80 km/h nicht übersteigen (DB Netz AG, 2008). Nicht technisch gesicherte Bahnübergänge sollten in einer Weise angelegt werden, dass jeder Straßenverkehrsteilnehmer die Bahnstrecke ausreichend überblicken kann, da Straßenverkehrsteilnehmer selbst prüfen müssen, ob einem Schienenfahrzeug Vorrang gewährt werden muss. Dafür müssen Sichtflä-

chen links und rechts der Fahrbahn (das sogenannte Sichtdreieck) in der Zufahrt auf den Bahnübergang freigehalten werden. Das Freihalten der erforderlichen Sichtflächen kann aufgrund von Bewuchs oder Bebauung nicht immer gewährleistet werden. In diesen Fällen ist mindestens eine Geschwindigkeitsverringerung auf Seiten des Eisenbahnverkehrs erforderlich, teilweise auch die ergänzende Sicherung durch hörbare Signale in Form von Pfeifen des Eisenbahnfahrzeugs oder die Nachrüstung einer technischen Bahnübergangssicherungsanlage.

2.3 Unfälle an Bahnübergängen

Die effektivste Maßnahme um Bahnübergangsunfälle zu vermeiden besteht darin, Bahnübergänge zurückzubauen oder sie durch Unterführungen oder Überwege zu umgehen, so dass es nicht mehr zu einem höhengleichen Kreuzungsverkehr zwischen Schienenfahrzeugen und Straßenverkehr kommt. Die in den letzten zwei Jahrzehnten kontinuierlich sinkende Anzahl an Bahnübergängen im Netz der Deutschen Bahn spiegelt sich auch in der rückläufigen Anzahl schwerwiegender Unfälle wieder (vgl. Abbildung 3). Der Bahnübergangsbestand im Jahr 2016 lag bei 16871 Bahnübergängen, an denen im Bezugsjahr 140 Unfälle zu verzeichnen waren (DB Netz AG, 2016).

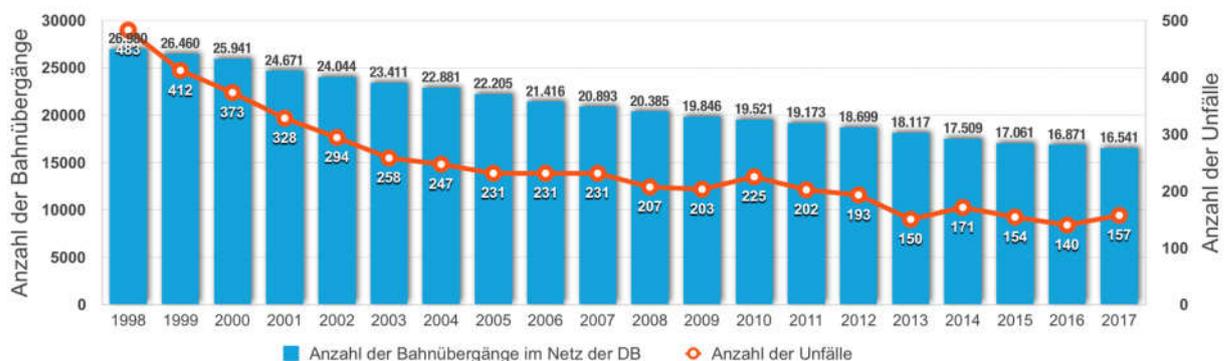


Abbildung 3. Entwicklung des Bahnübergangsbestandes und der Unfallzahlen im Netz der DB Netz AG. Daten aus Deutsche Bahn AG (2012), DB Netz AG (2016) und DB Netz AG (2017).

Zusätzlich zu den Bahnübergängen der DB Netz AG gibt es in Deutschland jedoch auch noch eine große Anzahl von Bahnübergängen in Netzen von Privatbahnen. Auskünften des Eisenbahn-Bundesamtes zufolge entspricht die Anzahl der Bahnübergänge in Netzen von Privatbahnen in etwa der Anzahl der Bahnübergänge im Netz der Deutschen Bahn AG. In Deutschland gab es 2016 dementsprechend schätzungsweise etwas mehr als 30000 Bahnübergänge. Zur exakten Anzahl der Bahnübergänge im Netz von Privatbahnen und den Unfällen an diesen Bahnübergängen gibt es keine öffentlich verfügbaren Angaben. Die Annahme liegt

nahe, dass sich auch an Bahnübergängen von Privatbahnen zahlreiche Unfälle ereignen. Da viele Privatbahnen in ländlichen Regionen oder Werksgeländen von Firmen verkehren, ist zudem anzunehmen, dass insbesondere eine hohe Anzahl nicht technischer Bahnübergänge in deren Netzen existieren, die zu den Bahnübergängen der DB Netz AG hinzukommen.

Betrachtet man die Verteilung der Unfälle auf die unterschiedlichen Sicherungsarten von Bahnübergängen im Netz der DB Netz AG fällt auf, dass mit 60 % aller Unfälle ein größerer Anteil der Unfälle auf technisch gesicherte Bahnübergänge entfällt als auf nicht technisch gesicherte Bahnübergänge, an denen sich 40 % der Unfälle ereignen (DB Netz AG, 2016). Diese Statistik ist jedoch insofern zu relativieren, dass technisch gesicherte Bahnübergänge üblicherweise an Kreuzungspunkten eingerichtet werden, die sowohl von Straßenverkehrsteilnehmern als auch durch Schienenfahrzeuge häufig frequentiert werden, beispielsweise innerorts. Nicht technisch gesicherte Bahnübergänge kommen häufiger außerorts und in ländlichen Gegenden vor und werden seltener befahren. Bezogen auf die seltenere Überquerung nicht technisch gesicherter Bahnübergänge durch Straßenverkehrsteilnehmer ist der Anteil von 40 % an der Gesamtheit aller Bahnübergangsunfälle 2016 (DB Netz AG, 2016) keineswegs als gering anzusehen.

In Bezug auf das Unfallgeschehen an Bahnübergängen ist hervorzuheben, dass in der Regel Straßenverkehrsteilnehmer Verursacher der Unfälle sind. Der Anteil der Straßenverkehrsteilnehmer, die durch ihre Fehler Bahnübergangsunfälle verursachten (im Vergleich zu technischem oder menschlichen Versagen seitens der Deutschen Bahn AG), lag in den vergangenen Jahren stabil bei über 90 %. Exemplarisch seien hier die Anteile der straßenverkehrsteilnehmerseitigen Verantwortung an der Summe der Bahnübergangsunfälle im Netz der Deutschen Bahn für drei Jahre aufgeführt: Für das Jahr 2006 wird ein Anteil von 95 % angegeben (DB Netz AG, 2007), für 2010 ein Anteil von 94 % (DB Netz AG, 2011) und für 2014 ein nicht näher definierter Anteil über 90 % (Deutsche Bahn AG, 2015). Der von Bahnbetreibern unabhängige ADAC bestätigt diesen hohen Anteil der Straßenverkehrsteilnehmer, die Schuld an Bahnübergangsunfällen haben (ADAC e. V., 2014). Als Konsequenz dieser Sachlage ist der Straßenverkehrsteilnehmer mit seinem Erleben und Verhalten ein naheliegender Ansatzpunkt, um die Entstehung von Bahnübergangsunfällen einerseits besser zu verstehen und andererseits Maßnahmen zu identifizieren, mit denen die Häufigkeit von Bahnübergangsunfällen reduziert werden kann. Bei detaillierterer Recherche ist festzustellen, dass unter den Straßenverkehrsteilnehmern ein Großteil aller Unfälle auf ein Fehlverhalten von Autofahrern zurückzuführen ist. Schöne (2013) untersuchte dahingehend Unfallzahlen der Jahre 2001–

2008 in Bezug auf Bahnübergänge der DB Netz AG und stellte fest, dass in diesem Zeitraum Personenkraftwagen (PKW) an rund 70 % aller Unfälle beteiligt waren, gefolgt von Lastkraftwagen (LKW), die in rund 10 % der Zusammenpralle verwickelt waren. Unter den nicht motorisierten Straßenverkehrsteilnehmern waren Fußgänger an 10 % der Gesamtzahl aller Unfälle im betrachteten Zeitraum beteiligt und Fahrradfahrer an 7 % der Unfälle. Aufgrund des auffällig hohen Anteils von Autofahrern unter den Verursachern von Zusammenprallen steht diese Gruppe unter den Straßenverkehrsteilnehmern in den folgenden Kapiteln und Untersuchungen im Zentrum der Betrachtung.

3 Theoretische Ansatzpunkte: Erleben und Verhalten des Verkehrsteilnehmers am Bahnübergang

In den folgenden Unterkapiteln wird der Stand der Human Factors-Forschung zu menschlichen Einflussfaktoren auf die Sicherheit an Bahnübergängen aufgearbeitet. Ergebnisse nationaler sowie internationaler Untersuchungen zum Erleben und Verhalten des Menschen werden in Bezug zu einer Abfolge erforderlicher kognitiver Teilschritte im Zusammenhang mit der Bahnübergangsüberquerung beschrieben. Dabei wird von der bestehenden Bahnübergangssicherungstechnik im In- und Ausland ausgegangen. Ausgehend vom Stand der Forschung werden abschließend bestehende Forschungslücken konkretisiert.

3.1 Kognitive Schritte vor der sicheren Überquerung eines Bahnübergangs

Die kognitiven Vorgänge des Menschen im Zusammenhang mit seiner Informationsverarbeitung und den damit in Zusammenhang stehenden Verhaltensweisen wurden in einer Vielzahl psychologischer Modelle beschrieben. In Abbildung 4 wird die Zufahrt auf einen Bahnübergang als Prozess aufeinanderfolgender kognitiver Teilschritte dargestellt. Diese Darstellung ist inspiriert durch das Modell der Informationsverarbeitung (Wickens & Hollands, 1999) und wurde durch Grippenkoven & Dietsch (2015) und Grippenkoven (2017) an den Vorgang der Bahnübergangsüberquerung angepasst. Bei der Darstellung handelt es sich um eine zweckdienliche Vereinfachung der Teilschritte, die durchlaufen werden müssen, um einen Bahnübergang sicher zu überqueren. Zu berücksichtigen ist, dass sich die einzelnen Teilschritte überlappen können und dass mehrere Schleifen der Abfolge durchlaufen werden können.

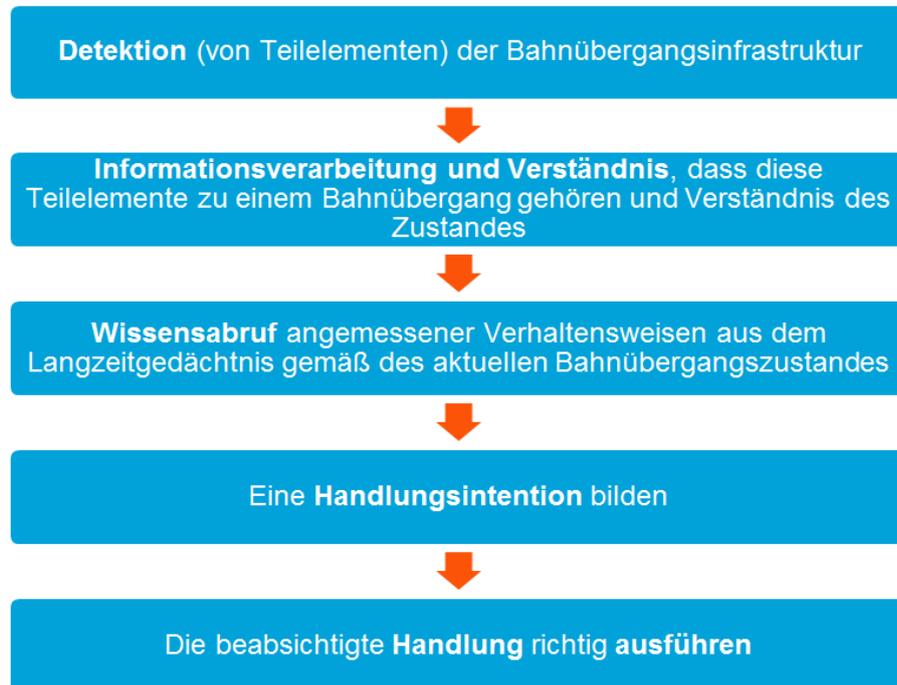


Abbildung 4. Erforderliche kognitive Teilschritte der Überquerung eines Bahnübergangs (eigene Darstellung nach Gripenkoven & Dietsch, 2015; Gripenkoven, 2017)

Der erste Teilschritt der Detektion ist es eine notwendige Voraussetzung für alle weiteren Teilschritte. Der Verkehrsteilnehmer muss zumindest Teile der Bahnübergangsinfrastruktur detektieren. Die Detektion beinhaltet zunächst die Entdeckung zentraler Elemente des Bahnübergangs, wie beispielsweise der Beschilderung in der Zufahrt oder der technischen Sicherungselemente unmittelbar vor dem Kreuzungspunkt zwischen Straße und Schiene. Wurden Elemente der Bahnübergangsinfrastruktur detektiert, muss der Verkehrsteilnehmer im Schritt der Informationsverarbeitung Schemata zum Thema Bahnübergang aktivieren und zunächst zur allgemeinen Erkenntnis gelangen, dass er sich einem Bahnübergang annähert, der bestimmte Attribute besitzt, zum Beispiel in Form unterschiedlicher Sicherungselemente.

Im zweiten Teilschritt, dem Wissensabruf, muss der Verkehrsteilnehmer einen Abgleich zwischen der Art des Bahnübergangs (technisch oder nicht technisch gesichert), dessen gegenwärtigen Zustand (Zugfahrt oder nicht) und den zugehörige *Skripten* aus dem eigenen Langzeitgedächtnis durchführen. Das Skript ist in diesem Zusammenhang ähnlich wie das *Schema* als kognitionspsychologischer Begriff zu verstehen, der eine bestimmte Form der Organisation von Inhalten des menschlichen Gedächtnisses beschreibt (Genschow & Sturzbecher, 2015). Der im Vergleich zum Begriff der Schemata nicht so gebräuchliche Begriff des Skripts beschreibt dabei eine prozedurale Abfolge von in Schemata gespeicherten Wissensstrukturen in Form eines mentalen Ablaufplans, bezogen auf das gebotene Verhalten

in einer bestimmten Situation (Kluwe & Spada, 1981; Tomkins, 1987). Nähert sich der Straßenverkehrsteilnehmer beispielsweise einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang an, muss er unter anderem zur Kenntnis nehmen, dass keine technische Sicherung in Form eines Lichtzeichens oder Schranken Aufschluss darüber gestattet, ob aktuell eine Zugfahrt ansteht oder nicht und er selbst für die Prüfung verantwortlich ist, ob ein Schienenfahrzeug herannaht oder nicht. Nur durch die Sichtprüfung kann in Abwesenheit einer technischen Sicherungsanlage dennoch festgestellt werden, ob eine Zugfahrt den eigenen Fahrweg kreuzt.

Aus dem abgerufenen und idealerweise angemessenen Skript muss im nachfolgenden Teilschritt eine Handlungsintention gebildet werden. Im Teilschritt der Handlungsintentionbildung muss eine motivierte Bereitschaft zur Ausführung bestimmter motorischer Handlungsabfolgen gebildet werden. In der Zufahrt in einem Kraftfahrzeug auf einen Bahnübergang sind relevante Handlungsabfolgen beispielsweise das Drehen des Kopfes, die zeitweise Verlagerung der visuellen Aufmerksamkeit in die peripheren Bahnübergangsbereiche sowie die Bewegung des Fußes vom Gaspedal im Sinne einer Verlangsamung des eigenen Fahrzeugs. Die Motivation des Verkehrsteilnehmers, bestehende Regeln im Kontext der Bahnübergangsüberfahrt zu befolgen, spielt im Prozessschritt der Bildung einer Handlungsintention eine wesentliche Rolle und hat Auswirkungen auf das Verhalten, das in der Folge initiiert wird. Auch die Abwägung von Risiken und dem wahrgenommenen Nutzen, die aus einem Regelverstoß resultieren können, kann in der Phase der Intentionbildung von Bedeutung sein. In der Kette der Informationsverarbeitung folgt zuletzt die eigentliche Handlung, eine Umsetzung des intendierten und zuvor gebildeten motorischen Handlungsplans.

Die beschriebenen kognitiven Teilschritte (Abbildung 4) dienen in den nachfolgenden Abschnitten der Einordnung bisheriger Human Factors-relevanter Forschungsarbeiten, die im Zusammenhang mit der Sicherheit am Bahnübergang relevant sind. Im folgenden Abschnitt 3.2, der sich auf die ersten beiden Schritte (Detektion und Identifikation) bezieht, werden Untersuchungen und Erkenntnisse zur Wahrnehmbarkeit wesentlicher Infrastrukturelemente am Bahnübergang dargestellt. In Abschnitt 3.3 werden Aspekte zum Wissensabruf angemessener Regeln und Verhaltensweisen im Bahnübergangskontext behandelt. In Abschnitt 3.4 werden die relevanten Erkenntnisse aus der Fachliteratur in Zusammenhang mit verschiedenen Aspekten des Verhaltens der Straßenverkehrsteilnehmer in der Bahnübergangszufahrt dargestellt. Darin wird nacheinander auf die Bildung einer Handlungsintention in der Bahnübergangszufahrt, das Blickverhalten und das Fahrverhalten von Straßenverkehrsteilnehmern eingegangen.

3.2 Erkenntnisse zur Wahrnehmbarkeit eines Bahnübergangs

Damit ein Straßenverkehrsteilnehmer in der Lage ist, sich am Bahnübergang sicher zu verhalten, muss er den Bahnübergang zunächst zur Kenntnis nehmen. Voraussetzung dafür ist neben einem ausreichenden Seh- und Hörvermögen des Verkehrsteilnehmers, dass die Verkehrszeichen, die den Bahnübergang ankündigen überhaupt objektiv sichtbar sind. Eine Verdeckung der Bahnübergangssicherung, zum Beispiel durch Bebauung oder starken Bewuchs, begünstigt Detektionsfehler (Salmon et al., 2010). Ein spitzer Kreuzungswinkel kann die frühzeitige Detektion eines Schienenfahrzeugs zusätzlich erschweren (Caroll, Multer & Markos, 1995). Ein zentrales Charakteristikum von Detektionsfehlern besteht darin, dass es sich dabei um unbeabsichtigte Auslassungsfehler der Straßenverkehrsteilnehmer handelt (U.S. Department of Transportation, 2008).

Ist die generelle Detektierbarkeit des Bahnübergangs und seiner Teilelemente gegeben, hängt die Wahrscheinlichkeit der Detektion relevanter Zielreize vor allem davon ab, wie gut sich diese Zielreize von ihrer Umgebung abheben. Diese von Green & Swets (1966) im Kontext der Signalentdeckungstheorie postulierte Gesetzmäßigkeit lässt sich in der Bahnübergangszufahrt gleichermaßen auf die Beschilderung, die technischen Sicherungseinrichtungen und die kreuzenden Schienenfahrzeuge übertragen. Grippenkoven (2017) schreibt in diesem Zusammenhang: „Je besser sich ein herannahendes Schienenfahrzeug von seiner Umgebung abhebt, beispielsweise aufgrund seiner Farbe, seiner Beleuchtung oder akustischer Signale, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass es durch den Straßenverkehrsteilnehmer nicht detektiert wird.“ (S. 12). Gerade im Bereich bestimmter Werksbahnen, in denen Ruß und Staub die umliegenden Gebäude, Gewächse und Schienenfahrzeuge gleichermaßen bedecken, heben sich Schienenfahrzeuge zum Teil nur schlecht von ihrer Umgebung ab und die Detektierbarkeit ist erschwert.

Neben der visuellen Wahrnehmung spielt auch die auditive Wahrnehmung für die Detektion eines Schienenfahrzeuges eine Rolle. Insbesondere an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen können Pfeifsignale von Schienenfahrzeugen abgegeben werden, damit der Straßenverkehrsteilnehmer sie frühzeitig wahrnehmen kann. Die Wahrnehmbarkeit dieser Warnsignale wird jedoch zunehmend erschwert. Materialien und Möglichkeiten der Schallisolation von Kraftfahrzeugen zur Abschirmung der Fahrerkabine von Störgeräuschen des Motors und der Umgebung werden fortlaufend verbessert und erschweren die Wahrnehmung von Pfeifsignalen (Rudin-Brown, French-St. George & Stuart, 2014; National Transportation Safety Board (NTSB), 1986; Schöne & Bagola, 2013; Speck, 2011)). Die Erkenntnisse zur

eingeschränkten auditiven Wahrnehmungsfähigkeit von Umgebungsgeräuschen in Kraftfahrzeugen unterstreichen die Bedeutung der visuellen Wahrnehmung in der Bahnübergangsannäherung.

In der Zufahrt auf nicht technisch gesicherte Bahnübergänge sollte die visuelle Wahrnehmung auf die peripheren Bereiche des Bahnübergangs gerichtet sein, um ein herannahendes Schienenfahrzeug frühzeitig detektieren zu können. Ngandung und daSilva (2013) statteten 16 Privat-PKW im Rahmen einer *Naturalistic Driving Study* mit Kamerasystemen und Systemen zur Erfassung von Positions- und Fahrdaten aus und untersuchten das Verhalten der Fahrer in der Zufahrt auf Bahnübergänge. Sie stellten unter anderem fest, dass sich die untersuchten Fahrer während 4215 aufgezeichneter Bahnübergangsüberfahrten in 46,7 % der Fälle mit Nebentätigkeiten ablenkten. Ist insbesondere die visuelle Aufmerksamkeit auf interne oder externe Ablenkungsquellen gerichtet, kann dies die rechtzeitige Wahrnehmung von Schienenfahrzeugen behindern (Caird, Creaser, Edwards & Dewar, 2002).

3.3 Erkenntnisse zum Wissen in Bezug auf das richtige Verhalten am Bahnübergang

Nach der Detektion von Teilen der Bahnübergangsinfrastruktur in der Zufahrt ist es erforderlich, dass der Straßenverkehrsteilnehmer mentale Modelle und Skripte aus dem Langzeitgedächtnis aktiviert, um die richtigen Regeln und Verhaltensabläufe abzurufen. Der Straßenverkehrsteilnehmer muss eine Einschätzung vornehmen, ob es möglich ist den Bahnübergang sicher zu überqueren. Dafür muss festgestellt werden, welche Sicherungsart der Bahnübergang aufweist, auf den er sich zubewegt. Ein technisch gesicherter Bahnübergang erfordert einen anderen Aufmerksamkeitsfokus als ein nicht technisch gesicherter Bahnübergang. Das in Bezug auf die Sicherungsart angemessene mentale Modell muss abgerufen werden und in der Fahrumgebung eine Verlagerung des visuellen Aufmerksamkeitsfokus zur Folge haben. Durch eine Sichtprüfung der technischen Sicherungseinrichtungen oder der peripheren Schienenbereiche am Bahnübergang muss in der Folge festgestellt werden, ob eine Zufahrt stattfindet (Grippenkoven & Dietsch, 2015; Heilmann, 1980; Russell, Shah & Rys, 2007). An nicht technisch gesicherten Bahnübergängen ist der Abruf angemessener Skripte daher von besonderer Bedeutung, da der Straßenverkehrsteilnehmer an diesen Bahnübergängen nicht aktiv von einer technischen Sicherungseinrichtung über das Herannahen eines Schienenfahrzeugs informiert wird, sondern er sich eigenständig ein Bild der Lage verschaffen muss.

Wie der Teilschritt der Detektion des Bahnübergangs ist auch die Phase des Wissensabrufs empfindlich gegenüber Interferenzen in Form externer und interner Ablenkungen (vgl. Abschnitt 3.2). Unabhängig von möglichen Ablenkungen hängt der erfolgreiche Abruf von bahnübergangsbezogenen Schemata und Skripten jedoch vor allem davon ab, ob der Straßenverkehrsteilnehmer grundsätzlich über das Wissen zu einem sicheren Verhalten im Bahnübergangskontext verfügt. Ohne die richtigen Skripte kann das angemessene Verhalten nicht initiiert werden. Verschiedene nationale und internationale Untersuchungen und Berichte unterstreichen, dass Unwissen oder Fehlannahmen bezüglich der Bedeutung von Elementen der Bahnübergangssicherung wesentliche Einflussfaktoren in der Entstehung fehlerhafter Verhaltensweisen in der Überquerung von Bahnübergängen sind (Lenné et al., 2011; Manz & Slovak, 2008; Health and Safety Executive (HSE), 2005). In den zitierten Untersuchungen wird die Rolle von Unwissen in Bezug auf Verkehrszeichen allerdings weitestgehend auf theoretische Annahmen gestützt und nicht ausreichend empirisch abgesichert. Ellinghaus und Steinbrecher (2006) bemühten sich um eine empirische Absicherung und stellten in einer deutschlandweiten Befragung unter anderem fest, dass einem Drittel der 1241 Befragten die Bedeutung des Andreaskreuzes nicht geläufig ist. Die Autoren selbst stellten allerdings fest, dass dieses Ergebnis aufgrund der Frageformulierung mit einiger Unsicherheit versehen ist. Ellinghaus und Steinbrecher (2006) verwendeten als Befragungsgegenstand teils suggestiv formulierte (Fehl-)Aussagen zur Bahnübergangselementen und deren Bedeutung, die durch die Befragten bejaht oder verneint werden mussten. Aus anderen Fragebogenstudien ist die Tendenz von Befragten bekannt, vorzugsweise bejahend zu antworten (Nickerson, 1998), was Ergebnisse verzeichnen kann. Auch wenn Ellinghaus und Steinbrecher ein Indiz liefern, das nahelegt, dass viele Verkehrsteilnehmer keine ausreichende Kenntnis der Bedeutung des Andreaskreuzes haben, ist dieses Indiz unter dem Vorbehalt der zweifelhaften Frageformulierungen zu betrachten.

Im Gegensatz zum Andreaskreuz scheinen die Vorankündigungsschilder mit Piktogrammen eines Schienenfahrzeugs oder einer Schrankenanlage besser verstanden zu werden. Basacik, Cynk, Flint und McMorro (2014) stellten, basierend auf den Ergebnissen einer Fragebogenstudie fest, dass das Verständnis der in Europa nach den Wiener Konventionen (United Nations, 1968) gebräuchlichen Vorankündigungsschilder (vgl. Kapitel 2.2, Abbildung 1d und e) unter Befragten aus Großbritannien tendenziell gut ist. Sowohl das Vorankündigungsschild, das einen Zug in einem rot umrahmten Dreieck auf weißem Grund zeigt, als auch das Schild zur Ankündigung eines beschränkten Bahnübergangs wurde durch

einen Großteil der 200 befragten Teilnehmer gut verstanden. Über 80 % der Teilnehmer konnten im Fall beider Schilder angeben, dass sie etwas mit einem Bahnübergang zu tun haben. Es ist anzunehmen, dass den Verkehrsteilnehmern die Ableitung der Bedeutung dieses Warnschildes im Vergleich zum abstrakteren Andreaskreuz leichter fällt, da auf dem Schild gut erkennbar ein Zug zu sehen ist. Dies könnte den Wissensabruf erleichtern.

Alternativ zur fehlerbegünstigenden Möglichkeit, dass manche Straßenverkehrsteilnehmer kein Wissen in Form von Schemata und Skripten haben, besteht die Möglichkeit, dass zwar Skripte zum Verhalten an Bahnübergängen abgespeichert sind und ausgeführt werden können, diese Skripte jedoch fehlerhafte Verhaltensweisen beinhalten. Gemäß der Fehlerklassifikation nach Reason (1994) handelt es sich dabei um Fehler auf der regelbasierten Ebene, die entstehen, wenn aus der Einschätzung einer Situation eine fehlerhafte Diagnose folgt und daraufhin eine Verhaltensregel abgerufen und in eine Handlung überführt wird, die in der gegebenen Situation nicht angemessen ist. Bezogen auf den Anwendungsfall des Bahnübergangs konkretisiert Seehafer (1997) in seinen Ausführungen, wie fehlerhafte Skripte in Bezug auf Bahnübergänge entstehen können. Fehlerhafte Skripte entstehen Seehafer (1997) zufolge zum einen, da viele Verkehrsteilnehmer in ihrem Alltag selten Bahnübergänge überqueren oder erworbenes Wissen aus der Fahrschule vergessen. Zum anderen sei anzunehmen, dass sich unangemessene Verhaltensweisen in Form eines fehlerhaften Skripts manifestieren, wenn ein Straßenverkehrsteilnehmer regelmäßig bei Bahnübergangsüberquerungen die Lernerfahrung macht, dass kein Schienenfahrzeug seinen Weg kreuzt. Daraus kann der Straßenverkehrsteilnehmer ableiten, dass sein aufmerksames Suchverhalten als schützende Maßnahme eigentlich gar nicht erforderlich ist und sein Skript in der Folge in ungünstiger Weise anpassen. Die bahnübergangsbezogenen Verkehrszeichen können in der Wahrnehmung des Straßenverkehrsteilnehmers auf diese Weise zu einem inhaltsleeren Hinweisreiz reduziert werden, der auf eine Gefahr hinweist, deren subjektiv wahrgenommene Auftretenswahrscheinlichkeit derart gering ist, dass sie ihre Verhaltensrelevanz verliert. Sanders und Wertheim (1973) formulieren in diesem Zusammenhang, das Ausmaß des Suchverhaltens an Bahnübergängen korreliere negativ mit der Häufigkeit der Bahnübergangsüberquerung eines Straßenverkehrsteilnehmers. Je häufiger der Bahnübergang befahren werde, desto seltener werde geprüft, ob ein Schienenfahrzeug herannaht.

3.4 Erkenntnisse zum Verhalten in der Zufahrt auf einen Bahnübergang

Um einen Bahnübergang sicher überqueren zu können, muss nach dem Abruf angemessener Skripte die Intention vom Straßenverkehrsteilnehmer gebildet werden, die erforderlichen Teilhandlungen des Skripts auch in motorische Abfolgen zu überführen. Danach müssen intendierte Teilhandlungen, wie die Sichtprüfung und die Verringerung der Geschwindigkeit motorisch korrekt und in zeitlich angemessener Abfolge ausgeführt werden.

Bildung einer Handlungsintention

Als Grundlage der Bildung einer angemessenen Handlungsintention in der Zufahrt auf Bahnübergänge kommen vor allem motivationale Aspekte zum Tragen. Beispielsweise ist ein Fahrer, der es besonders eilig hat und keine Zeit verlieren möchte, vermutlich eher motiviert einen Verstoß zu begehen als ein entspannter Straßenverkehrsteilnehmer ohne Zeitdruck. Während Fehlverhaltensweisen in der Bahnübergangsüberquerung, die aus Problemen in den Phasen der Detektion oder des Wissensabrufs resultieren meist als unbeabsichtigte Fehler einzuordnen sind, sind Fehler, die trotz des Wissens um das richtige Verhalten in der Phase der Bildung einer Handlungsintention auftreten in der Regel als bewusste Verstöße zu bewerten. Diese bewussten Verstöße werden in der Fehlernomenklatur von Reason (1994) als *violations* bezeichnet. Die erhöhte Bereitschaft zu bewussten Verstößen kann aus einem erlernten Fehlverhalten in Folge der Erfahrungen aus früheren Bahnübergangsüberfahrten resultieren, wie im vorherigen Abschnitt 3.3 geschildert. Der Unterschied zwischen einem gelernten Fehlverhalten und einem bewussten Verstoß besteht im Kontext einer Bahnübergangsüberquerung darin, dass der Verkehrsteilnehmer sich bei einem Verstoß im Klaren darüber ist, dass sein Verhalten nicht regelkonform ist, ihn also intentional begeht.

Diese Art des Fehlverhaltens ist vor allem in Bezug auf technisch gesicherte Bahnübergänge von Bedeutung. Betrachtet man beispielsweise die äußere Erscheinung eines Bahnübergangs mit Halbschrankensicherung, so besteht in einer gesenkten Schranke eine physische Barriere in Fahrtrichtung. Die vorherige Wahrnehmung der gesenkten Halbschranken stellt eine notwendige Voraussetzung für den Verstoß in Form des Umfahrens dar. Wird die Halbschranke umfahren, muss dieser Handlung also ein bewusster Vorsatz zugrunde liegen. Darin unterscheidet sich das Umfahren einer gesenkten Schrankenanlage vom unaufmerksamen Überfahren eines nicht technisch gesicherten Bahnübergangs, das auch unbewusst erfolgen kann. Denkbare Motive für Planung und Durchführung eines solch riskanten Verhaltens sind Ungeduld in Folge langer Verschlusszeiten des Bahnübergangs oder auch übermäßiger

Wagemut der Fahrer (Seehafer, 1997; Grippenkov, Giesemann & Dietsch, 2012b). Im Zusammenhang mit nicht technisch gesicherten Bahnübergängen sind derartige bewusste Fehler und Verstöße von nachrangiger Bedeutung.

Blickverhalten

Ein angemessenes Blickverhalten ist für die sichere Überquerung eines Bahnübergangs von zentraler Bedeutung. In der Zufahrt auf einen technisch gesicherten Bahnübergang muss durch den Straßenverkehrsteilnehmer der Zustand der Lichtzeichen beziehungsweise Schrankenanlagen durch Hinsehen geprüft werden. Am Zustand dieser Elemente kann er erkennen, ob er den Bahnübergang überqueren darf. Insbesondere in der Zufahrt auf nicht technisch gesicherte Bahnübergänge ist die Bedeutung des Blickverhaltens hervorzuheben. An diesen Bahnübergängen muss der Verkehrsteilnehmer zur Kenntnis nehmen, dass er nicht reaktiv agieren darf, sondern die sichere Bahnübergangsüberquerung proaktiv durch sein Blick- und Fahrverhalten gewährleisten muss. Ihn weist keine technische Sicherungsvorrichtung aktiv darauf hin, wann er dem Schienenverkehr Vorfahrt gewähren muss (Heilmann, 1984). Nur anhand seiner rechtzeitigen Prüfung des zuführenden Schienenbereichs kann er feststellen, ob einem Schienenfahrzeug Vorfahrt zu gewähren ist.

In nationalen und internationalen Untersuchungen wurde in der Vergangenheit mit verschiedenen Methoden versucht, das Blickverhalten von Autofahrern in der Annäherung an Bahnübergänge unterschiedlicher Sicherungsart nachzuvollziehen und zu erklären. Eine klassische Methode besteht in Beobachtung der Kopfbewegungen von Kraftfahrern im Feldversuch durch einen Beobachter, der sich in der Umgebung des Bahnübergangs aufhält. Wigglesworth (1978) führte als einer der Pioniere auf dem Feld der Human Factors-Forschung im Bahnübergangskontext eine solche Untersuchung an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen in Australien durch. Bezüglich der Sichtprüfung am nicht technisch gesicherten Bahnübergang fand Wigglesworth (1978) heraus, dass 40 % der beobachteten Autofahrer (n = 451) keine erkennbaren Kopfbewegungen zeigten, die auf eine Sichtprüfung des Schienenbereichs hindeuten.

In einer späteren Studie untersuchte Wigglesworth (1990) unter anderem erneut das Blickverhalten von Autofahrern an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen in Australien. In dieser Untersuchung wurde das Blickverhalten von 264 Autofahrern an Bahnübergängen beobachtet, diesmal aus Polizeifahrzeugen heraus. Über die Hälfte der beobachteten Fahrer (55 %) führte am Bahnübergang keine Sichtprüfung durch. Ein möglicher Erklärungsansatz

ist, dass sich ein Großteil der Straßenverkehrsteilnehmer nicht im Klaren darüber war, dass die mangelhafte Sichtprüfung in der Bahnübergangszufahrt ein Fehlverhalten darstellt und sie sich angesichts dieser Wissenslücke, auch in Gegenwart der Polizei, nicht darum bemühen. Denkbar wäre auch, dass die Verkehrsteilnehmer durch die Anwesenheit der Polizei abgelenkt waren und deswegen keine Sichtprüfung durchführten. In einer zusammenfassenden Arbeit schlussfolgerte Wigglesworth (2001), dass viele Fahrer als Grundlage ihres Verhaltens nicht zwischen technisch und nicht technisch gesicherten Bahnübergängen unterscheiden. Dies würde bedeuten, dass das mentale Modell vieler Straßenverkehrsteilnehmer über unterschiedliche Bahnübergangssicherungsarten nicht ausreichend differenziert ist und dementsprechend nicht zwangsläufig spezifische Verhaltensweisen in Bezug auf unterschiedliche Arten der Sicherung abgerufen werden können. Dies ist eine denkbare Erklärung für das mangelnde Blickverhalten eines Teils der Versuchsteilnehmer (Wigglesworth, 1978; Wigglesworth, 1990) an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen.

In einer Untersuchung mit vergleichbarem Vorgehen analysierte Heilmann (1984) in Deutschland unter anderem das Blickverhalten verschiedener Verkehrsteilnehmer am Bahnübergang anhand ihrer Kopfbewegungen. Die Untersuchungen des Blickverhaltens fanden an zwei nicht technisch gesicherten Bahnübergängen statt, die beide in der Zufahrt über ein freies Sichtfeld verfügten. Unter den 206 Kraftfahrern führten 36,4 % an den beiden Bahnübergängen keine oder nur eine unvollständige Sichtprüfung durch, indem sie entweder gar nicht auf die Bahnstrecke schauten oder nur zu einer der beiden Seiten. Dieser Anteil ähnelt dem Anteil der Fahrer, die in der Untersuchung von Wigglesworth (1978) keine Sichtprüfung des linken und des rechten peripheren Bereichs am Bahnübergang vornahmen.

Sowohl in Bezug auf die Untersuchungen von Wigglesworth (1978, 1990) als auch die Untersuchung von Heilmann (1984) ist kritisch anzumerken, dass die Qualität der Beobachtungen in beiden Fällen von der Position der Beobachter abhängt und die Sichtmöglichkeiten potentiell eingeschränkt waren. Es ist unklar, ob die beobachteten Autofahrer ihre Sichtprüfungen möglicherweise schon in einiger Distanz vor dem Bahnübergang durchgeführt haben, so dass sie von den Beobachtern nicht wahrgenommen werden konnten. Falls eine Sichtprüfung in größerer Distanz erfolgte, wäre zudem nicht zwingend eine Kopfbewegung erforderlich. Blicksakkaden hätten in diesem Fall genügen können und wären kaum durch einen Beobachter außerhalb des Fahrzeugs festzustellen gewesen. Dies begründet gewisse Vorbehalte in Bezug auf diese Untersuchungen.

Neben Beobachtungen in den zuvor beschriebenen Untersuchungen, in denen das Blickverhalten der Autofahrer von Beobachtern außerhalb des Fahrzeugs eingeschätzt wurde, gibt es die Möglichkeit, das Blick- und Fahrverhalten von Autofahrern im Vorgang der Bahnübergangsüberquerung durch Kameras und Ortungseinheiten zu untersuchen, die in Privatfahrzeugen eingebaut werden. Ngamdung und daSilva (2013) untersuchten das Blick- und Fahrverhalten von Autofahrern in der Zufahrt auf Bahnübergänge in den USA im Rahmen einer *Naturalistic Driving Study*, in der 16 Fahrzeuge gleicher Bauart unter anderem mit Kameras zur Erfassung des Blick- und Fahrverhaltens ausgestattet wurden. Es wurde festgestellt, dass unter 314 aufgezeichneten Überfahrten nicht technisch gesicherter Bahnübergänge (mit Stoppschild oder Andreaskreuz) bei 35,4 % der Überfahrten keine Sichtprüfung stattfand. Dieser Anteil von Überfahrten liegt in einem ähnlichen Bereich wie die Anteile von Fahrern in den Untersuchungen von Wigglesworth (1978) und Heilmann (1984), die keine Sichtprüfung durchführten, die bei 40 % beziehungsweise 36,4 % lagen. Es wurde zudem festgestellt, dass an Bahnübergängen mit Stoppschildern signifikant häufiger eine Sichtprüfung durchgeführt wurde als an Bahnübergängen mit Andreaskreuz. An Bahnübergängen mit Stoppschild wurde vor 97,3 % der Überfahrten eine Sichtprüfung mindestens zu einer Seite durchgeführt, an Bahnübergängen mit Andreaskreuz nur vor 39 % der Überfahrten. Diese Ergebnisse sind schwer zu generalisieren, da sie auf Beobachtungen an einer eingeschränkten Anzahl von Teilnehmern beruhen, die unter nicht standardisierten Bedingungen Bahnübergänge überfahren. Dennoch ist es bemerkenswert, dass bei deutlich weniger Überfahrten eine Sichtprüfung des peripheren Bereichs am Bahnübergang festgestellt werden konnte, wenn der Bahnübergang nur mit einem Andreaskreuz gesichert war, als wenn zusätzlich ein Stoppschild angebracht war. Zudem legt die Untersuchung nahe, das Stoppschild als zusätzliche Sicherungsmöglichkeit auch in Deutschland in Erwägung zu ziehen und in einer kontrollierteren Umgebungen Untersuchungen dazu durchzuführen.

Während *Naturalistic Driving Studies* nicht ohne weiteres experimentell zu kontrollieren sind, weil nur Daten aus Fahrten analysiert werden können, die Privatpersonen während ihrer alltäglichen Wege erzeugen, bieten kontrollierte Realfahrstudien eine Möglichkeit, bestimmte Aspekte des Verhaltens von Autofahrern an realen Bahnübergängen gezielter zu untersuchen. Das Blickverhalten an Bahnübergängen kann über ein Eye-Tracking-System oder Kameras untersucht werden. Lenné, Salmon, Beanland, Stanton und Filtness (2013) untersuchten in einer Realfahrtstudie in Australien die Sichtprüfungen der peripheren Schienenbereiche anhand einer Stichprobe von elf erfahrenen und elf unerfahrenen

Autofahrern in der Zufahrt auf (unter anderem) vier nicht technisch gesicherte Bahnübergänge. Von diesen Bahnübergängen waren drei mit einem Stoppschild gesichert und einer mit einem Vorfahrtsschild³. Als Eye-Tracking-Parameter wurde die Anzahl der visuellen Fixationen in die peripheren Bereiche des Bahnübergangs untersucht. Im Fall der Bahnübergänge mit Stoppschild sowie dem Bahnübergang mit Vorfahrtsschild wurden sowohl durch erfahrene- als auch durch unerfahrene Autofahrer durchschnittlich über fünf Sichtprüfungen der peripheren Bahnübergangsbereiche durchgeführt. Lenné et al. (2013) berichten nicht, wie viele Versuchsteilnehmer in der Bahnübergangszufahrt überhaupt eine Sichtprüfung in mindestens einem peripheren Bereich durchführten und wie viele Teilnehmer gar keine Sichtprüfung durchführten. Die durchschnittliche Anzahl der Fixationen in den peripheren Bereichen über alle Versuchsteilnehmer ist als alleiniger Parameter der Blickbewegung ungeeignet, um die Wirkung einer Sicherungsart auf die Wahrnehmung und das Verhalten von Autofahrern eindeutig zu beurteilen. Eine Aussage, wie viele Versuchsteilnehmer überhaupt nach einem möglicherweise herannahenden Zug schauten oder nicht, ist im Kontext der Bahnübergangssicherheit relevanter als die Aussage darüber, wie oft alle Fahrer im Durchschnitt Fixationen in den peripheren Bereichen des Bahnübergangs gezeigt haben.

Als Alternative zu Untersuchungen des Blickverhaltens im realen Verkehrskontext besteht des Weiteren die Möglichkeit, das Blickverhalten von Straßenverkehrsteilnehmern in einem Fahrsimulator zu untersuchen. Larue, Kim, Rakotonirainy, Haworth und Ferreira (2015) untersuchten im Rahmen einer Simulatorstudie das Blickverhalten als Maß der Wirksamkeit dreier Assistenzsysteme zur Erhöhung der Sicherheit an nicht technisch und technisch gesicherten Bahnübergängen. Als abhängige Variable des Blickverhaltens wurden von Larue et al. (2015) die Kopfbewegungen der Fahrer in der Zufahrt auf die Bahnübergänge untersucht. Auch Schöne, Schulze und Wöllmann (2014) untersuchten das Blickverhalten von Autofahrern in Bezug auf drei unterschiedliche Varianten der Vorwarnsymbolik in der Zufahrt auf nicht technisch gesicherte Bahnübergänge im Rahmen einer Simulatorstudie. Dabei wurde ein Eye-Tracking-System zur Beurteilung des Blickverhaltens in der Bahnübergangszufahrt eingesetzt. Die Ergebnisse beider Untersuchungen sind jedoch aufgrund methodischer Mängel nicht belastbar. In der kurzen Dauer der Untersuchungen von

³ Stoppschilder und Vorfahrtsschilder als Sicherungseinrichtungen an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen sind sowohl in Australien als auch in zahlreichen anderen Ländern üblich. In Deutschland ist diese Art der Beschilderung von Bahnübergängen bislang nicht vorgesehen.

20 beziehungsweise 30 Minuten wurden in beiden Untersuchungen in kurzen Zeitabständen wiederholt Bahnübergänge überfahren. Dabei wurden jeweils unterschiedliche Assistenzfunktionen, mit denen die Versuchsteilnehmer auf Bahnübergänge hingewiesen wurden dargeboten, teils in Gegenwart, teils in Abwesenheit herannahender Züge. In einem solchen Versuchsaufbau ist davon auszugehen, dass nach dem ersten Erscheinen eines Zuges oder der ersten Anzeige einer neuartigen Bahnübergangswarnung die Ergebnisse des Blickverhaltens in allen darauffolgenden Bedingungen in einer Weise verzeichnet werden, die dazu führt, dass keine sinnvolle Beurteilung mehr möglich ist. Aus diesem Grund wird auf die Ergebnisse dieser Untersuchungen nicht näher eingegangen.

Fahrverhalten

Generell sind Fehler in der Handlungsausführung nicht als beabsichtigte Fehler zu klassifizieren, sondern als Fehler, bei denen zwar eine der Situation am Bahnübergang angemessene Handlung ausgewählt wird, deren motorische Ausführung allerdings fehlerhaft ist oder deren Timing unpassend ist (Reason, 1994). Ein Abwürgen des Motors eines Fahrzeuges im Gefahrenraum des Bahnübergangs ist ein Beispiel für einen Fehler auf der Ebene der Handlungsausführung. Ein weiteres Beispiel ist ein schlechtes Timing beim Befahren des Gefahrenraums des Bahnübergangs bei erhöhtem Verkehrsaufkommen, das in der Folge zu einer Rückstausituation und einem Stillstand im Bereich der Schienen führen kann. Gerade in Bezug auf nicht technisch gesicherte Bahnübergänge konnte im Studium der Fachliteratur und relevanter Unfallstatistiken allerdings nicht festgestellt werden, dass Fehler dieser Art regelmäßig zu Unfällen führen.

Ein zu untersuchender Aspekt des Fahrverhaltens bestünde hingegen in der Geschwindigkeitwahl von Verkehrsteilnehmern an Bahnübergängen, da auch bei erfolgreicher Sichtprüfung eine überhöhte Geschwindigkeit dazu führen kann, dass ein Fahrzeug nicht rechtzeitig gebremst werden kann, wenn ein Schienenfahrzeug sich dem Bahnübergang annähert.

3.5 Zusammenfassung und Identifikation relevanter Forschungslücken

Zusammenfassend können im Stand der Human Factors-Forschung zu Bahnübergängen Lücken im Bereich der Erkenntnisse zur visuellen Wahrnehmung an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen identifiziert werden sowie Unklarheiten bezüglich des Wissens von Straßenverkehrsteilnehmern zum angemessenen Verhalten in der Bahnübergangszufahrt.

Wissen

In Bezug auf das Wissen von Verkehrsteilnehmern weisen die Befunde aus der Fachliteratur darauf hin, dass Lernerfahrungen, insbesondere im Kontext nicht technisch gesicherter Bahnübergänge, die auf Schienenseite selten frequentiert werden, dazu führen können, dass das angemessene Verhalten durch Straßenverkehrsteilnehmer nicht mehr ausgeführt wird (Sanders & Wertheim, 1973). Zudem wird nahegelegt, dass das Wissen zur Bedeutung relevanter Elemente der Bahnübergangsinfrastruktur bei vielen Straßenverkehrsteilnehmern nicht in ausreichendem Maß vorhanden ist (Ellinghaus & Steinbrecher, 2006). Diese Ergebnisse stehen jedoch unter dem Vorbehalt teils suggestiv formulierter Fragestellungen. Positive Erkenntnisse bestehen bezüglich der weitgehenden Bekanntheit der Vorankündigungsschilder mit Piktogrammen (Basacik et al., 2014). Es besteht jedoch insbesondere in Bezug auf das Verständnis des Andreaskreuzes eine Forschungslücke. Es sind keine nationalen Forschungsergebnisse bekannt, die mit geeigneten Befragungsmethoden erzielt wurden und eine verlässliche Grundlage hinsichtlich des Wissens der Straßenverkehrsteilnehmer zur Verhaltensrelevanz bahnübergangsbezogener Verkehrszeichen in Deutschland bieten. Internationale Erkenntnisse sind nicht einwandfrei übertragbar, da sich die Konstellation von eingesetzten Verkehrszeichen in der Zufahrt auf Bahnübergänge zwischen unterschiedlichen Ländern teilweise unterscheiden. Ausgehend vom Stand der Forschung scheint es ratsam, eine gut strukturierte Befragung durchzuführen, um Erkenntnisse zur verhaltensbezogenen Bedeutung von Verkehrszeichen in der Bahnübergangszufahrt zu vertiefen.

Es besteht eine Forschungslücke in Bezug auf die Fähigkeit von Straßenverkehrsteilnehmern, aus bahnübergangsbezogenen Verkehrszeichen, die in Deutschland üblich sind, verhaltensrelevante Schemata und Skripte zu aktivieren. Der Stand der Forschung legt Wissenslücken nahe, jedoch bestehen Mängel in der Methode und Dokumentation.

Visuelle Wahrnehmung

Aus den beschriebenen Erkenntnissen zur Detektion ist festzustellen, dass die visuelle Wahrnehmung in der Bahnübergangszufahrt besonders relevant ist, auch weil akustische Warnsignale im Fahrzeuginneren häufig nicht gut genug wahrgenommen werden können. Bezüglich des Blickverhaltens wurde in unterschiedlichen Untersuchungen eine nicht ausreichende Sichtprüfung der peripheren Bahnübergangsbereiche bei einem Anteil der Fahrer festgestellt der zwischen 35,4 % und 40 % der untersuchten Fahrer liegt (Wigglesworth, 1978; Heilmann,

1984; Ngamdung & daSilva, 2013). Insbesondere an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen, an denen die Sichtprüfung länderunabhängig für die sichere Überfahrt das maßgebliche Verhalten darstellt, ist das Ausbleiben der Sichtprüfung grundsätzlich als sicherheitskritisches Fehlverhalten zu betrachten. Nach dem Studium der Fachliteratur muss jedoch festgestellt werden, dass in keiner der berichteten Untersuchungen zum Blickverhalten Methoden eingesetzt wurden, die vorbehaltlos als geeignet bezeichnet werden können. In den Beobachtungsstudien, die durch Personen außerhalb der Fahrzeuge durchgeführt wurden (Wigglesworth, 1978, 1990; Heilmann, 1984), konnten nur in einem eingeschränkten Annäherungsbereich Kopfbewegungen ermittelt werden. Es ist zu bezweifeln, dass durch Beobachter auch Blicksakkaden in die Beurteilung mit einbezogen werden konnten, die möglicherweise bereits in größerer Distanz zum Bahnübergang als Indizien einer Sichtprüfung zu ermitteln sein könnten. Dies wäre anhand der im Fahrversuch von Lenné et al. (2013) erhobenen Eye-Tracking-Daten vermutlich möglich gewesen, wurde jedoch nicht in geeigneter Form ausgewertet. In dieser Fahrstudie wurde mit der durchschnittlichen Anzahl der Fixationen im peripheren Sichtbereich über alle Versuchsteilnehmer ein Eye-Tracking-Parameter eingesetzt, der in seiner Aussagekraft eingeschränkt ist. Einen zufriedenstellenden Überblick über das generelle Blickverhalten in der Zufahrt auf nicht technisch gesicherte Bahnübergänge eröffnet also auch diese Untersuchung nicht. Ebenso verhält es sich mit den zuvor benannten Fahrstudien (Larue et al. 2015; Schöne, Schulze & Wöllmann, 2014) die mit der Beurteilung von Assistenzsystemen ein anderes Ziel verfolgten als die Erfassung des unbeeinflussten Blickverhaltens in der Zufahrt auf nicht technisch gesicherte Bahnübergänge.

Die *Naturalistic Driving Study* von Ngamdung und daSilva (2013) eröffnet aufschlussreiche Eindrücke bezüglich des störenden Einflusses von Ablenkungsquellen in der Bahnübergangsüberfahrt sowie der potentiellen Wirksamkeit des Einsatzes des Stoppschildes an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen. Da diese Untersuchung jedoch in den USA durchgeführt wurde, wo eine von Deutschland stark abweichende Bahnübergangsbeschilderung zum Einsatz kommt, ist die unmittelbare Übertragbarkeit eingeschränkt. Angesichts der Einschränkungen der bestehenden Blickuntersuchungen erscheint es angebracht, die Erkenntnisse zum Blickverhalten mit einem verbesserten methodischen Vorgehen zu überprüfen und zu vertiefen.

Es besteht eine Forschungslücke in Bezug auf die visuelle Wahrnehmung von Autofahrern in der Zufahrt auf nicht technisch gesicherte Bahnübergänge. Der Stand der For-

schung basiert auf Ergebnissen aus Untersuchungen, die methodisch mangelhaft oder nicht zeitgemäß sind.

Über das Blickverhalten hinaus wurde in der Fachliteratur keine Untersuchung gefunden, die einen Bezug zwischen Blickverhalten und Geschwindigkeitswahl herstellt. Die Geschwindigkeitsverringeringung ist für Autofahrer gerade in der Zufahrt auf nicht technisch gesicherte Bahnübergänge wichtig, um ausreichend Zeit zur Sichtprüfung sowie die Möglichkeit zum Anhalten zu haben. Die Geschwindigkeitswahl wird dementsprechend als relevanter Aspekt in den weiteren Untersuchungen berücksichtigt.

Nur auf dem Fundament verlässlicher analytischer Erkenntnisse zum vorhandenen bahnübergangsbezogenen Wissen von Straßenverkehrsteilnehmern und zur visuellen Wahrnehmung in der Bahnübergangszufahrt ist es möglich, gezielt nutzerzentrierte Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit abzuleiten. Um einen Beitrag zum Stand der Forschung zu liefern und eine Grundlage zu schaffen, auf der in der Folge nutzerzentrierte Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit in der Bahnübergangsüberquerung abgeleitet werden können, werden in den folgenden zwei Kapiteln zwei analytische Untersuchungen beschrieben, die durchgeführt wurden, um die beschriebenen Lücken in der Human Factors-Forschung zu Bahnübergängen zu schließen.

4 Untersuchung 1: Befragung zu bahnübergangsbezogenem Wissen von Straßenverkehrsteilnehmern

4.1 Einleitung

Im vorangehenden Kapitel wurde eine Forschungslücke bezüglich der Fähigkeit von Straßenverkehrsteilnehmern identifiziert, auf der Grundlage von Verkehrszeichen in der Bahnübergangszufahrt Schemata und Skripte zu aktivieren, die eine sichere Überquerung des Bahnübergangs ermöglichen. Daher wurde als erste Untersuchung eine Befragung unter einer Stichprobe von Straßenverkehrsteilnehmern durchgeführt. Mit der Befragung soll ein detaillierter Eindruck des Verständnisses der Straßenverkehrsteilnehmer zu Infrastrukturelementen an Bahnübergängen gewonnen werden. Auf Grundlage von Unfallberichten zu Unfällen an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen ist es in der Regel nicht möglich, zu einer detaillierten Feststellung zu gelangen, welcher Art der *menschliche Fehler* ist, der meist als Ursache angegeben wird. Es ist teilweise nicht eindeutig festzustellen, ob ein Unfall, als dessen Ursache *Übersehen* angegeben wird, nicht eher auf ein mangelhaftes Wissen zur Bedeutung von Schildern und Lichtsignalen an Bahnübergängen zurückzuführen ist (vgl. 3.1).

Die Vermutung liegt nahe, dass Straßenverkehrsteilnehmer insbesondere an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen unbeabsichtigte Auslassungsfehler begehen, da sie fehlerhafte Schemata und Skripte im Langzeitgedächtnis gespeichert haben. Es ist ebenfalls denkbar, dass zwar korrekte Schemata und Skripte gespeichert sind, sie aber nicht ohne weiteres abgerufen werden können (vgl. 3.3). Die Ergebnisse der Interviewstudie von Ellinghaus & Steinbrecher (2006) legen nahe, dass ein mangelhaftes Wissen in Bezug auf die Bedeutungen von Bahnübergangsbeschilderung und -signalisierung besteht. 1241 Teilnehmer dieser Befragung wurden mit Stellungnahmen wie „Ein rotes Blinklicht am Bahnübergang ist nur ein Warnhinweis. Erst wenn ein rotes Dauerlicht leuchtet, muss man anhalten!“ (Ellinghaus und Steinbrecher, 2006, S. 91) konfrontiert. Die Befragten mussten beurteilen, ob die Aussagen zutreffend sind. In diesem Beispiel stimmten 39 % der Befragten dieser falschen Aussage zu. Hinsichtlich weiterer Befragungsergebnisse zum Andreaskreuz, dem zentralen Erkennungsmerkmal von Bahnübergängen, deuten Ellinghaus und Steinbrecher (2006) zwar an, dass ein Drittel der Befragten keine genaue Auskunft zu dessen Bedeutung geben konnte, allerdings wird durch die Autoren nicht genau berichtet, als Reaktion auf welche Fragestellung dieses Ergebnis erzielt wurde. Aufgrund der Formulierung der anderen Fragen in der Befragung ist

anzunehmen, dass die Befragten auch in Bezug auf das Andreaskreuz und weitere Elemente der Bahnübergangsbeschilderung mit Stellungnahmen konfrontiert wurden, die sie *bejahen* oder *verneinen* mussten beziehungsweise die sie, falls sie es nicht wussten, mit *weiß nicht* beantworten konnten. Die suggestive Form der Fragestellungen von Ellinghaus und Steinbrecher (2006) ist unvoreilhaft, da bekannt ist, dass es unter Teilnehmern von Fragebogenstudien in diesen Fällen eine Tendenz zum Bejahen gibt (Eirmbter & Jacob, 1996). Es ist anzunehmen, dass ein offenes Frageformat einen besseren Eindruck über das tatsächliche Wissen bezüglich der Bahnübergangsbeschilderung und der Bedeutung von Lichtzeichenanlagen liefern kann. Dementsprechend wurde eine Befragung mit offenen Fragestellungen durchgeführt, um zu überprüfen, in welchem Ausmaß Fehlverhaltensweisen am Bahnübergang potentiell auf Wissenslücken zurückzuführen sind. Es wurden keine Hypothesen formuliert.

Der Fokus der Befragung lag auf dem Andreaskreuz als universelles Symbol von Bahnübergängen, zu dem keine gut dokumentierten Befragungsergebnisse vorliegen und auf der Blinklichtanlage, da diese sich schon in vorherigen Befragungen als missverständlich erwiesen hat. Neben den Schildern und Lichtsignalen der Bahnübergangsinfrastruktur wurden die Teilnehmer auch zu Schildern und Lichtsignalanlagen aus dem übrigen Straßenverkehr befragt, um eine Vergleichsmöglichkeit zu vorfahrtsregulierenden Symbolen zu ermöglichen, denen die Befragten potentiell häufiger begegnen.

4.2 Methoden

In den folgenden Abschnitten wird das methodische Vorgehen der Befragung vorgestellt. Zunächst wird die befragte Stichprobe beschrieben, danach die verwendeten Materialien und die Versuchsumgebung und abschließend der Ablauf der Durchführung der Befragung.

4.2.1 Befragungsteilnehmer

Im Rahmen der Befragung wurden insgesamt 100 Personen befragt, die zum Zeitpunkt der Befragung im Besitz eines gültigen Führerscheins waren. Unter den Teilnehmern befanden sich 55 Frauen und 45 Männer. Die Teilnehmer wurden nach der Dauer ihres Führerscheinbesitzes, jedoch nicht nach ihrem Alter gefragt. Der Median der Dauer des Führerscheinbesitzes in der Stichprobe betrug 11,5 Jahre (Minimum = 1, Maximum = 56). Die durch die Teilnehmer geschätzte durchschnittliche Anzahl ihrer Bahnübergangsüberfahrten pro Wo-

che betrug im Median 2 (Minimum = 0, Maximum = 100). Zudem wurde ermittelt, mit welchen Verkehrsmitteln die Befragungsteilnehmern verkehren, um festzustellen, ob sie Bahnübergänge eher als aktive Verkehrsteilnehmer überqueren (z. B. mit dem Auto oder dem Fahrrad) oder als passive Fahrgäste (z. B. in einem Bus). Unter den Verkehrsmitteln, die durch die Teilnehmer regelmäßig genutzt werden, wurde das Auto mit über 70 % der am häufigsten genannt, gefolgt vom Fahrrad, dem öffentlichen Personennahverkehr, der Eisenbahn und Krafträdern. Die Verteilungen der Dauer des Führerscheinbesitzes sowie der Anzahl der Bahnübergangsüberfahrten sowie die Anteile regelmäßig genutzter Verkehrsmittel sind im Detail in Anlage A dargestellt.

Die Befragten können in vier Gruppen nach der Häufigkeit der Bahnübergangsüberquerungen unterteilt werden. Die Extrema, Personen die *nie* beziehungsweise *zehnmal oder häufiger in der Woche Bahnübergänge überqueren*, wurden gewählt, um die Personengruppen zu identifizieren, die täglich auf ihrem Arbeitsweg einen Bahnübergang überqueren oder nicht in der Nähe eines Bahnübergangs leben und daher auch nie Bahnübergänge überqueren. Die Klasse *ein bis zwei Bahnübergangsüberquerungen pro Woche* wurde gewählt, um zum Beispiel Personen zu identifizieren, die bei regelmäßigen Wegen an Wochenenden Bahnübergänge überqueren. Die Klasse *drei bis neun Überquerungen* wurde für die Befragten gewählt, die zwar nicht täglich Bahnübergänge überqueren, aber dennoch regelmäßig, beispielsweise auf Wegen, die mit Freizeitaktivitäten oder Einkäufen zu tun haben.

4.2.2 Design

Den Versuchsteilnehmern wurden in randomisierter Reihenfolge Fragen zur Bedeutung von Verkehrszeichen gestellt. Jedem Versuchsteilnehmer wurde dabei jede Frage gestellt.

4.2.3 Materialien und Versuchsumgebung

Neben einem Diktiergerät, das zur Aufzeichnung der Interviews verwendet wurde, wurden neun einzelne Farbdrucke in DIN A4 von Schildern beziehungsweise bahnübergangsbezogenen Infrastrukturelementen genutzt. Diese Ausdrücke wurden in Klarsichthüllen in einer Art Katalog hintereinander abgeheftet, um sie den Teilnehmern als Grundlage der Befragung leicht präsentieren zu können. Die neun Schilder und Bahnübergangsinfrastrukturelemente, die den Teilnehmern der Befragung in zufälliger Reihenfolge vorgelegt wurden, sind in Abbildung 5 dargestellt. Folgende Verkehrszeichen wurden berücksichtigt:

- a) Eine zweigestreifte Bake als Indikator eines Abstandes von 160 m zum Bahnübergang
- b) Ein Andreaskreuz
- c) Ein Andreaskreuz mit darüber installiertem roten Blinklicht⁴
- d) Ein (in Deutschland nicht gebräuchliches) Kombinationsschild aus einem Andreaskreuz und einem Stoppschild
- e) Ein Andreaskreuz mit darüber installierter Lichtsignalanlage mit zwei Signalpositionen, die Rot zeigt
- f) Ein Warnzeichen für einen unbeschränkten Bahnübergang mit einem darauf abgebildeten Zug
- g) Ein Stoppschild
- h) Ein Vorschriftszeichen *Vorfahrt gewähren*
- i) Eine im Straßenverkehr gebräuchliche Lichtsignalanlage mit drei Signalpositionen, die Rot zeigt

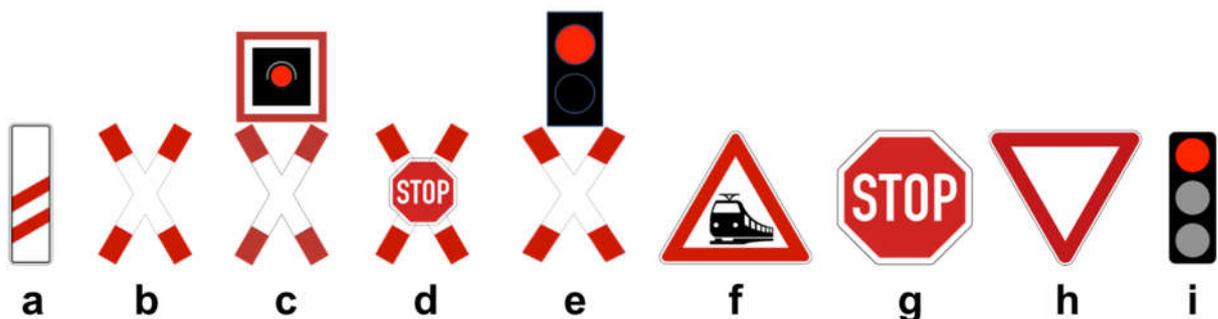


Abbildung 5. Darstellungen der Schilder und Bahnübergangsinfrastrukturelemente, die den Teilnehmern der Befragung vorgelegt wurden. (d: Eigene Abbildung, c und e: EBO (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1967), a, b, f, g, h, i: StVO (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013))

Die Befragung wurde in Braunschweig und umliegenden Ortschaften durchgeführt. Alle Teilnehmer waren Passanten, die in der Öffentlichkeit in unterschiedlichen Situationen getroffen und angesprochen wurden.

4.2.4 Durchführung

Die Teilnehmer wurden zunächst gefragt, ob sie bereit seien, an einer etwa fünfminütigen Befragung zur Bedeutung von Verkehrsschildern teilzunehmen. Nachdem der Interviewer sich und das Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR kurz vorgestellt hatte, wurden die Passanten, die bereit waren teilzunehmen um ihre Erlaubnis gebeten, das Interview mit einem Diktiergerät aufzuzeichnen. Nur die Teilnehmer, die der Tonaufzeichnung zustimmten wur-

⁴ Den Teilnehmern wurde mündlich erläutert, dass es sich um ein blinkendes Licht handelt, da dies in dem Ausdruck nicht darstellbar war. In Bezug auf die zweifarbige Lichtsignalanlage wurde den Teilnehmern mitgeteilt, dass es sich dabei nicht um Blinklichter handelt.

den befragt. Den Teilnehmern wurde anschließend das Vorgehen der Befragung erläutert. Ihnen wurden nacheinander in zufälliger Reihenfolge die neun in Abbildung 5 dargestellten Verkehrszeichen präsentiert. Nachdem die Befragten die Darstellung eines Verkehrszeichens betrachtet hatten, wurden ihnen im exakten Wortlaut drei Fragen gestellt:

- „Wie heißt dieses Schild?“
- „Worauf weist dieses Schild hin?“
- „Wie müssen Sie sich verhalten, wenn Sie im Straßenverkehr diesem Schild begegnen?“

Im Falle der Lichtsignalanlagen wurde nicht nach dem Namen und der Bedeutung eines Schildes gefragt, sondern der Begriff *Verkehrssymbol* gewählt. Abschließend wurden die Versuchsteilnehmer nach der Dauer ihres Führerscheinbesitzes, der Häufigkeit ihrer Bahnübergangsüberquerungen pro Woche sowie nach den von ihnen regelmäßig verwendeten Verkehrsmitteln gefragt. Nur Teilnehmer, die in Besitz eines gültigen Führerscheins waren, wurden in die weitere Datenauswertung aufgenommen, um sicherzustellen, dass nur Teilnehmer in die Stichprobe aufgenommen werden, die in der Vergangenheit Kenntnisse zu Straßenverkehrsregeln in einer Fahrschule erworben haben.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Andreaskreuz



Abbildung 6.
Andreaskreuz
(Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013)

Das Andreaskreuz kennzeichnet den Vorrang des Eisenbahnverkehrs vor dem Straßenverkehr. Es kommt an jedem Bahnübergang vor. Straßenverkehrsteilnehmer sollten sich aufmerksam verhalten und nach links und rechts schauen, ob ein Eisenbahnfahrzeug herannaht. Sie sollten ihre Geschwindigkeit der Situation angemessen anpassen und bremsbereit sein. 46 der 100 Teilnehmer war der Begriff *Andreaskreuz* geläufig und sie konnten das Schild korrekt benennen. Die verbleibenden 54 Teilnehmer konnten das Andreaskreuz nicht benennen. 43 der Teilnehmer verwendeten in ihren Ausführungen zum Andreaskreuz den Begriff *Zug*. 87 Teilnehmer verwendeten den Begriff *Bahnübergang*. 13 der 100 Teilnehmer gaben an, dass ihnen das vorliegende Schild unbekannt sei.

Unter Berücksichtigung der Dauer des Führerscheinbesitzes gab es in der befragten Stichprobe einen geringfügigen Unterschied in der Fähigkeit,

das Andreaskreuz korrekt zu benennen. Die Stichprobe ließ sich in zwei vergleichbar große Gruppen teilen: diejenigen die den Führerschein zwischen einem und zehn Jahren besitzen und diejenigen, die den Führerschein länger als 10 Jahre besitzen. Unter den Teilnehmern, die den Führerschein ein bis zehn Jahre besaßen, benannten 41,7 % den korrekten Begriff *Andreaskreuz* (20 von 48), unter den Teilnehmern, die den Führerschein seit über zehn Jahren besaßen war dieser Anteil mit 50 % (26 von 52) etwas höher. Die korrekte Benennung war in der befragten Stichprobe zudem denjenigen Teilnehmern häufiger möglich, die regelmäßiger über Bahnübergänge fahren. 32 % (8 von 25) der Teilnehmer die angaben, in ihrem Alltag nie über einen Bahnübergang zu fahren, wussten das ihnen vorgelegte Schild als Andreaskreuz zu bezeichnen. Unter den Teilnehmern, die häufiger als zehnmal in der Woche einen Bahnübergang überqueren lag dieser Anteil mit 54,2 % (13 von 24) höher. In den Gruppen die angaben, ein- bis zweimal in der Woche einen Bahnübergang zu überqueren beziehungsweise drei- bis neunmal lag der Anteil der Teilnehmer, die das Andreaskreuz korrekt benennen konnten bei 48,3 % (14 von 29) beziehungsweise bei 50 % (11 von 22).

52 von 100 Teilnehmern entgegneten auf die Frage nach dem erforderlichen Verhalten, wenn man im Straßenverkehr dem Andreaskreuz begegnet nicht, dass man nach links und rechts schauen sollte. Die Dauer des Führerscheinbesitzes hatte in der Stichprobe keine Auswirkung auf die Ausführungen zur Sichtprüfung. Die Feststellung der Relevanz, nach links und rechts zu schauen zeigte in der befragten Stichprobe einen leicht abnehmenden Trend mit zunehmender Anzahl der wöchentlichen Bahnübergangsüberfahrten in den Teilstichproben. Von den Teilnehmern die angaben, nie über einen Bahnübergang zu fahren bemerkten 52 % (13 von 25), dass man nach links und rechts schauen sollte. Der Anteil unter den Teilnehmern, die ein- bis zweimal pro Wochen einen Bahnübergang überquerten war mit 51,7 % (15 von 29) nahezu gleich. Unter den Teilnehmern, die drei- bis neunmal in der Woche einen Bahnübergang überqueren bemerkten 45,5 % (10 von 22), man müsse nach links und rechts schauen. Unter den Teilnehmern die angaben, in der Woche zehnmal oder häufiger einen Bahnübergang zu überqueren, war der Anteil mit 41,7 % (10 von 24) der Befragten die sagten, man müsse nach links und rechts schauen am geringsten.

In Bezug auf das Fahrverhalten in Gegenwart des Andreaskreuzes bemerkten 25 der 100 Teilnehmer korrekt, dass man die Geschwindigkeit reduzieren sollte, wenn man auf ein Andreaskreuz zufährt. 12 Teilnehmer merkten an, dass man halten müsse, was an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen nicht zwangsläufig erforderlich ist. Fasst man die 25 Teilnehmer, die bemerkten, dass man verlangsamen müsse und die 12 Teilnehmer, die sagten man

müsse anhalten zusammen, ergibt sich eine Summe von 37 Teilnehmern, die eine Aussage traf, die in Zusammenhang mit einem angepassten Fahrverhalten steht. Unter diesen 37 Befragten konnte ein leichter Unterschied in Abhängigkeit der Dauer des Führerscheinbesitzes festgestellt werden. Unter den Teilnehmern, die den Führerschein zwischen einem und zehn Jahren besitzen, bemerkten 20 von 48, beziehungsweise 41,7 % der Teilnehmer, man solle die Geschwindigkeit verringern (oder anhalten), unter den 52 Teilnehmern, die den Führerschein seit über zehn Jahren besitzen sagten 17, beziehungsweise 32,7 %, dass man die Geschwindigkeit verringern (oder anhalten) muss.

Unter den Teilnehmern, die in ihrem Alltag häufiger über einen Bahnübergang fahren, wurde die Aussage, dass man an einem Andreaskreuz verlangsamen oder anhalten sollte verhältnismäßig seltener getätigt. Der Anteil der Teilnehmer die sagten, man solle als Reaktion auf ein Andreaskreuz verlangsamen oder anhalten lag bei den Teilnehmern, die in ihrem Alltag nie über einen Bahnübergang fahren bei 40 % (10 von 25 Teilnehmern, die angaben, *nie* über Bahnübergänge zu fahren). Bei den Teilnehmern, die häufiger als zehnmal in der Woche einen Bahnübergang überqueren lag dieser Anteil hingegen nur bei 29,2 % (7 von 24 Teilnehmern die angaben, *häufiger als zehnmal* in der Woche über Bahnübergänge zu fahren). Die Tatsache, dass das Andreaskreuz eine Vorfahrtbedeutung hat und dem Zug Vorrang gewährt werden muss, wurde nur von zweien der 100 Teilnehmer angemerkt.

Tabelle 1

Ergebnisse der Befragung zur Bedeutung des Andreaskreuzes

Inhalt der Aussage zum Andreaskreuz	genannt	nicht genannt
Korrekte Bezeichnung <i>Andreaskreuz</i>	46	54
Begriff <i>Bahnübergang</i>	87	13
Begriff <i>Zug</i>	43	57
<i>Man muss nach links und rechts schauen.</i>	48	52
<i>Man sollte die Geschwindigkeit verringern.</i>	25	75
<i>Man muss anhalten.</i>	12	88
<i>Das Andreaskreuz kennzeichnet eine Vorfahrtsituation.</i>	2	98
<i>Ich kenne dieses Schild nicht.</i>	13	87

4.3.2 Blinklicht, Lichtsignalanlage und Lichtsignalanlage (Straßenverkehr)

Das rot leuchtende Blinklicht am Bahnübergang erfordert von den Straßenverkehrsteilnehmern zwingend ein Anhalten, ebenso wie die rot zeigende Lichtsignalanlage. Es muss gewartet werden, bis alle Eisenbahnfahrzeuge passiert haben und das Blinklicht beziehungsweise das Dauerlicht erlischt. Erst dann ist ein Überqueren des Bahnübergangs sicher und erlaubt. Den Befragten in der Studie wurden sowohl Blinklicht als auch Lichtsignalanlage oberhalb eines Andreaskreuzes gezeigt, um den Kontext besser zu verdeutlichen (Abbildung 7 und Abbildung 8).

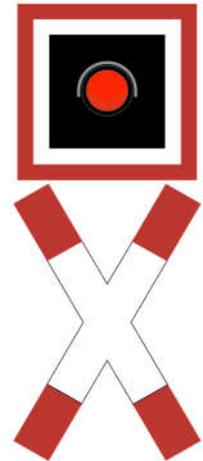


Abbildung 7.

In Bezug auf das angemessene Verhalten, wenn man im Straßenverkehr dem aktiven Blinklicht oberhalb eines Andreaskreuzes begegnet, sagte die Hälfte der Teilnehmer (50 von 100), dass man nicht zwingend stehen bleiben muss. Die fehlerhaften Ausführungen wurden teilweise von der Bemerkung begleitet, es handele sich beim Blinklicht um eine Warnung beziehungsweise man müsse vorsichtig sein (13 von 100 Teilnehmern), man müsse aufmerksam nach links und rechts schauen vor der Überfahrt (6 von 100 Teilnehmern) oder man solle die Geschwindigkeit verringern (4 von 100 Teilnehmern). 37 der 100 Befragten gaben an, das über dem Andreaskreuz angeordnete Blinklicht sei ihnen nicht bekannt. 50 der 100 Teilnehmer benannten korrekt, dass ein Anhalten erforderlich sei.

Andreaskreuz mit roter Blinklichtanlage (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1967)

Nach der Bedeutung der über einem Andreaskreuz angebrachten Lichtsignalanlage mit aktivem roten Dauerlicht gefragt (Abbildung 8), wussten 90 der 100 Befragten, dass ein Anhalten erforderlich ist. Ein Teilnehmer bemerkte, man müsse aufmerksam nach links und rechts schauen, zwei Teilnehmer sagten, man müsse vorsichtig fahren. Sieben Teilnehmer gaben an, ihnen sei die rot zeigende Lichtsignalanlage unbekannt.

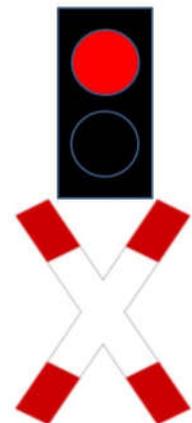


Abbildung 8. Andreaskreuz mit zweifarbigem Lichtsignalanlage und rot zeigendem Dauerlicht (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1967)

In Bezug auf die im Straßenverkehr gebräuchliche Lichtsignalanlage mit drei Signalpositionen, die Rot zeigt (Abbildung 9), waren alle 100 Teilnehmer in der Lage korrekt anzugeben, dass das richtige Verhalten das Anhalten beziehungsweise das Warten auf Grün ist.



Abbildung 9. Rot zeigende Lichtsignalanlage
(Bundesministerium der Justiz und für
Verbraucherschutz, 2013)

Tabelle 2

*Ergebnisse der Befragung zum roten Blinklicht und den Lichtsignalanlagen am
Bahnübergang und im Straßenverkehr*

	Rot leuchtende Blinklichtanlage über Andreaskreuz	Rote Licht- signalanlage über Andreaskreuz	Rot zeigende Licht- signalanlage aus dem Straßenverkehr
Erwähnt, dass man anhalten oder warten muss	50	90	100
Nicht erwähnt, dass man anhalten oder warten muss	50	10	0
Gesamt	100	100	100
„Ist mir bekannt.“	63	93	100
„Ist mir nicht be- kannt.“	37	7	0
Gesamt	100	100	100

Unter den Teilnehmern, die den Führerschein zum Zeitpunkt der Befragung seit einem bis zehn Jahren besaßen, bemerkten 56,3 % (27 von 48), dass man an einem roten Blinklicht anhalten müsse. Unter den Teilnehmern, die den Führerschein länger als zehn Jahren besaßen, war der Anteil der bemerkte, dass man anhalten müsse mit 44,2 % (23 von 52) geringer. Auch der Anteil der Teilnehmer, der angab, das rote Blinklicht über dem Andreaskreuz nicht zu kennen oder ihm noch nicht begegnet zu sein, war höher unter den Teilnehmern, die den Führerschein länger besaßen. 42,3 % (22 von 52) dieser Teilnehmer gaben an, das rote Blinklicht sei ihnen unbekannt. Unter den Teilnehmern, die den Führerschein zwischen einem und zehn Jahren besaßen, gaben 31,3 % (15 von 48) an, das Blinklicht nicht zu kennen.

Unter den Teilnehmern, die häufiger über einen Bahnübergang fahren, war der Anteil der Teilnehmer die korrekt benannten, dass man an einem roten Blinklicht anhalten müsse höher als bei den Teilnehmern, die seltener Bahnübergänge überqueren. 48 % (12 von 25) der Teilnehmer die angaben, in ihrem Alltag nie einen Bahnübergang zu überqueren, bemerkten, dass man an einem roten Blinklicht stehen bleiben muss. Bei den Teilnehmern die angaben, ein- bis zweimal in der Woche einen Bahnübergang zu überqueren lag der Anteil mit 37,9 % (11 von 29) noch darunter. Unter den Teilnehmern die angaben, drei- bis neunmal in der Woche einen Bahnübergang zu überqueren bemerkten 54,5 % (12 von 22), man müsse an einem Blinklicht anhalten. Am größten war der Anteil der Teilnehmer, die richtig anmerkten, dass man an einem roten Blinklicht anhalten müsse unter den Teilnehmern, die mit über zehn Überfahrten in der Woche am häufigsten Bahnübergänge überquerten. Bei diesen Teilnehmern lag der Anteil bei 62,5 % (15 von 24). Bezogen auf die rote Lichtsignalanlage und die rote Lichtsignalanlage aus dem Straßenverkehr gab es keine besonderen Einflüsse der Dauer des Führerscheinbesitzes oder der Häufigkeit der Bahnübergangsüberquerungen.

4.3.3 Weitere bahnübergangsbezogene Schilder



Abbildung 10.
Entfernungsbake
160m vor dem
Bahnübergang
(Bundesministerium
der Justiz und für
Verbraucherschutz,
2013)

Bezogen auf die zweigestreifte Entfernungsbake (Abbildung 10) sagten 66 der 100 Teilnehmer, dass ihnen dieses Schild bekannt sei. Diese 66 Teilnehmer wussten auch, dass die Bake eine Entfernung ankündigt. 54 der Befragten wussten, dass die Bake eine Entfernung zu einem Bahnübergang anzeigt, 12 verwechselten sie mit einem Ausfahrtsschild das auf Autobahnen zum Einsatz kommt. Die korrekte Distanz von 160 m zum Bahnübergang konnten 16 der Befragten benennen. 34 der Befragten war die Bake als Verkehrsschild gänzlich unbekannt und sie waren nicht in der Lage, eine Aussage in Bezug auf ihre Bedeutung zu treffen. Bezogen auf die Dauer des Führerscheinbesitzes oder die Häufigkeit der Bahnübergangsüberfahrten gab es keine auffälligen Unterschiede.



Abbildung 11.
Warnschild vor
unbeschränktem
Bahnübergang
(Bundesministerium
der Justiz und für
Verbraucherschutz,
2013)



Abbildung 12.
Exemplarisches
Kombinations-
schild aus
Andreaskreuz und
Stoppschild (Eigene
Darstellung)

Das Warnschild vor einem unbeschränkten Bahnübergang, das in Zukunft als Warnschild vor allen Arten von Bahnübergängen eingesetzt werden wird, bezeichneten 77 der 100 Befragten als ein ihnen bekanntes Schild. Von den 23 Befragten, denen das Schild zur Vorankündigung unbekannt war, waren sieben aus der Gruppe der 48 Teilnehmer, die seit einem bis zehn Jahren in Besitz des Führerscheins waren (14,6 %) und 16 aus der Gruppe der 52 Teilnehmer, die seit über zehn Jahren in Besitz des Führerscheins waren (30,8 %). 85 der 100 Befragten verwendeten den Begriff *Zug* in Zusammenhang mit ihren Beschreibungen der Bedeutung des Warnschildes. In Bezug auf die Frage, wie man sich verhalten

solle, sagten 46 der 100 Befragten, man müsse sich vorsichtig verhalten. 21 Teilnehmer sagten konkret, man müsse aufmerksam sein beziehungsweise schauen, ob ein Zug kommt.

In Bezug auf das in Deutschland nicht im öffentlichen Verkehr vorkommende Kombinationsschild aus Andreaskreuz und Stoppschild urteilten 94 der 100 Befragten, dass man anhalten müsse, wenn man diesem Schild im Verkehr begegne. Fünf Teilnehmer waren der Meinung, man müsse die Geschwindigkeit als Reaktion auf das Kombinationsschild verringern. Insgesamt 97 der 100 Teilnehmer urteilten zudem, dass sie dieses Schild kennen. 34 der 100 Teilnehmer erwähnten in ihren Ausführungen, dass man als Reaktion auf dieses Schild nach links und rechts schauen müsse, um zu prüfen, ob sich querender Verkehr annähert.

4.3.4 Straßenverkehrsschilder

Um einen Vergleich der Beschilderung von Bahnübergängen zu Vorfahrtsymbolik aus dem Straßenverkehr zu ermöglichen, wurden die Teilnehmer der Befragung zur Bedeutung des Stoppschildes und des Schildes *Vorfahrt gewähren* befragt.



Abbildung 13.
Stoppschild
(Bundesministerium
der Justiz und für
Verbraucherschutz,
2013)

Alle 100 Teilnehmer waren in der Lage, das Stoppschild (Abbildung 13) korrekt zu benennen. 99 der 100 Teilnehmer waren sich der Hauptbedeutung des Stoppschildes bewusst und bemerkten, man müsse als Reaktion im Verkehr stehen bleiben. Der Teilnehmer, der dies nicht äußerte bemerkte, man müsse vorsichtig sein. 21 der Teilnehmer führten an, man müsse am Stoppschild nach links und rechts schauen. Keiner der Teilnehmer äußerte konkret, dass man am Stoppschild dem kreuzenden Verkehr die Vorfahrt gewähren muss.



Abbildung 14. Schild
Vorfahrt gewähren
(Bundesministerium
der Justiz und für
Verbraucherschutz,
2013)

In Bezug auf das Vorfahrtsschild (Abbildung 14) sagten alle 100 Teilnehmer der Befragung, dass man an diesem Schild die Vorfahrt gewähren müsse. Keinem der Teilnehmer war das Schild unbekannt. 16 der 100 Teilnehmer erwähnten zudem, man müsse aufmerksam schauen, ob ein vorfahrtberechtigter anderer Verkehrsteilnehmer den Weg kreuzt und vier der Teilnehmer, man müsse generell vorsichtig sein.

4.4 Diskussion

4.4.1 Andreaskreuz

In der Befragung fiel insbesondere auf, dass vielen Teilnehmern der Befragung die Bedeutung des Andreaskreuzes, das international gebräuchlich ist und an jedem Bahnübergang Verwendung findet, nicht klar war. Die Tatsache, dass weniger als die Hälfte der Teilnehmer in der Lage war, das Schild korrekt als *Andreaskreuz* zu benennen wiegt dabei weniger schwer als die mangelhafte Fähigkeit, die korrekten Skripte zum richtigen Verhalten abzurufen. Beinahe die Hälfte der Teilnehmer erwähnte nicht die wichtigste Verhaltensregel in Gegenwart eines Andreaskreuzes, nämlich dass man nach links und rechts schauen sollte. Der

Anteil der Teilnehmer, die in der vorliegenden Befragung die Sichtprüfung als wichtige Verhaltensweise nicht benannte, lag damit noch höher als in der einleitend zitierten Umfrage von Ellinghaus und Steinbrecher (2006), in der ein Drittel der Befragten sich nicht im Klaren über die Bedeutung des Andreaskreuzes war. Auch die erforderliche Wahl einer angemessenen Geschwindigkeit erwähnte lediglich ein Viertel der befragten Teilnehmer.

Abgesehen vom mangelhaften Wissen bezüglich der Sichtprüfung des Bahnübergangs und der Geschwindigkeitsanpassung ist auffällig, dass nahezu kein Teilnehmer der Befragung (2 von 100) äußerte, dass das Andreaskreuz eine Bedeutung in Bezug auf die Regulierung der Vorfahrt hat. Ein denkbarer Grund ist, dass die Teilnehmer der Befragung das erforderliche Verhalten lediglich nicht verbalisierten, aber implizit wissen was zu tun ist. Diese Vermutung leitet sich aus dem Ergebnis ab, dass 87 der 100 Befragten in ihren Äußerungen den Begriff *Bahnübergang* verwendeten und 43 den Begriff *Zug*, was zumindest für einen Teil der Stichprobe auf rudimentäres Bewusstsein eines Kreuzungskontextes schließen lässt. Auch bei der Frage nach dem Stoppschild äußerte keiner der Befragten, dass man Vorfahrt gewähren muss. Eine weitere Interpretationsmöglichkeit, die in Bezug auf das festgestellte mangelhafte Wissen zum Andreaskreuz in Erwägung gezogen werden sollte ist, dass viele Verkehrsteilnehmer potentiell daran gewöhnt sind im Straßenverkehr an Stellen, an denen eine Gefahr besteht, durch eine aktive technische Einrichtung gewarnt zu werden. Bahnübergänge, die häufig von Eisenbahnfahrzeugen und motorisierten Verkehrsteilnehmern frequentiert werden, sind in der Regel auch durch Lichtsignale oder Schrankenanlagen technisch gesichert (vgl. Kapitel 2). Es ist denkbar, dass viele Personen eher an einen technisch gesicherten als an einen nicht technisch gesicherten Bahnübergang denken, wenn sie ihr mentales Modell zu Bahnübergängen aktivieren. Das Andreaskreuz kommt auch an technisch gesicherten Bahnübergängen zum Einsatz, an denen jedoch vor allem eine technische Sicherung gut sichtbar Auskunft darüber gibt, wie man sich verhalten muss. An technisch gesicherten Bahnübergängen ist die Sichtprüfung der linken und rechten Peripherie des Bahnübergangs durch die aktive Warnung mittels einer technischen Sicherung nicht von solch elementarer Bedeutung wie in der Zufahrt auf nicht technisch gesicherte Bahnübergänge.

Neben den generellen Interpretationen in Bezug auf die gesamte Stichprobe sind weitere Auffälligkeiten zu reflektieren, die im Vergleich zwischen den Teilnehmern festzustellen waren, abhängig von der Dauer ihres Führerscheinbesitzes oder der Häufigkeit ihrer Bahnübergangsüberfahrten. Dass Teilnehmer, die häufiger über Bahnübergänge fahren das Andreaskreuz eher korrekt benennen können, erscheint plausibel. Die regelmäßige Konfrontation

mit dem Andreaskreuz führt potentiell eher zu einer Begriffsbildung als es bei Personen der Fall ist, die diesem Verkehrszeichen in ihrem Alltag nie oder nur selten begegnen.

Ein bemerkenswerter Befund der Befragung war, dass der Anteil der Befragungsteilnehmer, die sagten, dass man am Bahnübergang nach links und rechts schauen muss geringer war, je häufiger sie Bahnübergänge überqueren. Dieser Unterschied könnte durch Gewöhnungseffekte zu begründen sein (vgl. Kapitel 3). Häufigere Überquerungen von Bahnübergängen und die regelmäßige Feststellung, dass meist kein Zug kommt beziehungsweise die Erfahrung, dass man, wenn ein Zug kommt von technischen Sicherungseinrichtungen aktiv gewarnt wird, können eine gewohnheitsmäßige Nachlässigkeit bezüglich der Sichtprüfung verursachen (Seehafer, 1997). Dies kann aus den vorliegenden Daten jedoch nicht zweifelsfrei abgeleitet werden, unter anderem da nicht nachgefragt wurde, wie die Bahnübergänge gesichert sind, welche die Teilnehmer der Befragung regelmäßig überfahren. Der Einfluss von Gewöhnungseffekten auf das Verhalten der Straßenverkehrsteilnehmer an Bahnübergängen sollte gesondert in einer zukünftigen Untersuchung betrachtet werden.

4.4.2 Stoppschild, Vorfahrt gewähren und Kombinationsschild

Auffällig ist, dass den Teilnehmern die Bedeutung des Andreaskreuzes deutlich unbekannter ist verglichen mit vorfahrtbezogenen Verkehrszeichen, die im Straßenverkehrskontext häufiger vorkommen. Nahezu allen Verkehrsteilnehmern ist klar, dass man am Stoppschild anhalten muss und dass man am Schild *Vorfahrt gewähren* anderen Verkehrsteilnehmern die Vorfahrt gewähren muss. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die meisten Verkehrsteilnehmer diesen Schildern im Alltag häufiger begegnen als dem Andreaskreuz. Zudem ist ihre Bedeutung zum Schutz des Verkehrsteilnehmers je nach Kreuzung möglicherweise häufiger unmittelbar relevant, wenn an Kreuzungen, an denen diese Verkehrszeichen positioniert sind regelmäßig vorfahrtberechtigte Verkehrsteilnehmer den eigenen Weg kreuzen. Der Einsatz von Stoppschildern oder *Vorfahrt gewähren* Schildern an Bahnübergängen scheint naheliegend, um sich das bestehende Wissen der Verkehrsteilnehmer sowie vorherige Erfahrungen zunutze zu machen.

Die Antworten der Befragung bezüglich der erforderlichen Verhaltensweisen, wenn man dem Kombinationsschild aus Andreaskreuz und Stoppschild begegnet, sind im Sinne einer potentiellen Erhöhung der Sicherheit der Bahnübergangsüberquerung als positiv zu bewerten. Auch wenn das Schild in Deutschland im regulären Straßenverkehr nicht existiert, behaupteten fast alle Teilnehmer, das Schild zu kennen und bemerkten, dass man anhalten

müsse, wenn man ihm im Verkehr begegne. Zwar sagten beim Kombinationsschild nur ein Drittel der Teilnehmer explizit, dass man nach links und rechts schauen müsse, es ist jedoch zu hoffen, dass mehr Verkehrsteilnehmer dieses Verhalten tatsächlich zeigen würden. Auch in der Beschreibung des erforderlichen Verhaltens als Reaktion auf das Stoppschild (ohne Andreaskreuz) war der Anteil der Befragten gering, der in seinen Ausführungen auf das Blickverhalten einging. Es ist anzunehmen, dass in der Befragung zu dem Verhalten den Teilnehmern zunächst das offensichtlichste Verhalten als Antwort einfällt, nämlich das Anhalten. Diese Antwort wird möglicherweise auch durch die Aufschrift *STOP* und deren schnelle mentale Verarbeitung begünstigt. Das Blickverhalten zur Sicherung der freien Fahrt im Kreuzungszusammenhang ist möglicherweise eine Verhaltensregel, die eher implizit abgespeichert ist und im tatsächlichen Verkehrskontext routinemäßig Anwendung findet wird. Dies würde erklären, warum sie nur von wenigen Befragten verbalisiert wurde.

Um das tatsächliche Blickverhalten in der Zufahrt auf einen nicht technisch gesicherten Bahnübergang nachvollziehen zu können, bietet sich eine Eye-Tracking-Untersuchung im realen Verkehrskontext an (vgl. Kapitel 5). Um das Potential des Kombinationsschildes aus Andreaskreuz und Stoppschild näher zu betrachten, wurde darüber hinaus eine vertiefende Untersuchung durchgeführt, um seine Wirksamkeit in Bezug auf die Aktivierung angemessener Verhaltensassoziationen zu analysieren (vgl. Kapitel 7).

4.4.3 Vorwarnschild unbeschränkter Bahnübergang

Die Bekanntheit des Warnschildes mit dem darauf abgebildeten Zug unter den Teilnehmern ist als positiv zu beurteilen. Fast 80 % der Teilnehmer gaben an das Schild zu kennen. Häufig wurde erwähnt, man müsse vorsichtig sein oder werde vor einem Zug gewarnt. Diese Ergebnisse entsprechen den Ergebnissen, die von Basacik et al. (2014) in Großbritannien zum Verständnis des Vorwarnschildes ermittelt wurden. In dieser Befragung gaben 80 % der Befragten an, das Vorwarnschild mit dem Piktogramm eines Zuges zu kennen. Die Verwendung eines gut zu erkennenden Piktogramms ist als weitere Möglichkeit neben der Verwendung von Schrift (wie beim Stoppschild) eine Eigenschaft, die ein gut verständliches Warnschild von einem schlecht verständlichen Warnschild (wie dem Andreaskreuz) unterscheidet (Wogalter, Conzola & Smith-Jackson, 2002). Die Vorteile einfach zu erfassender Piktogramme sollten in der Gestaltung ergänzender Warnsysteme berücksichtigt werden.

4.4.4 Lichtsignalanlagen

Ähnlich wie das Andreaskreuz ist auch die an Bahnübergängen eingesetzte Blinklichtanlage bezogen auf das Verständnis der Befragungsteilnehmer als ungünstig zu bewerten. Die Hälfte der befragten Teilnehmer sagte, dass man an einem aktiven roten Blinklicht nicht anhalten müsse. Damit liegt der Anteil der Teilnehmer, die sich potentiell in gefährlicher Weise falsch verhalten könnten noch höher als die 39 % der Teilnehmer der Befragung von Ellinghaus und Steinbrecher (2006), die annahmen, dass das rote Blinklicht nur als Warnung zu verstehen sei. Im Falle der zweifarbigen Lichtsignalanlage, die rotes Dauerlicht zeigt sagten 90 % Teilnehmer, dass man anhalten müsse. Die an Bahnübergängen gebräuchliche Lichtsignalanlage mit rotem Dauerlicht scheint damit im Vergleich zum roten Blinklicht besser verständlich zu sein. Dennoch ist es auch in Bezug auf diese Variante der Lichtsignalanlage hervorzuheben, dass jeder zehnte Befragte nicht korrekt sagen konnte, dass man anhalten müsse und sieben Teilnehmern die Lichtsignalanlage über dem Andreaskreuz gänzlich unbekannt war. Bezogen auf die im Straßenverkehr gebräuchliche Lichtsignalanlage mit drei Signalpositionen, die Rot zeigt bestand dieses Problem nicht. Jeder Teilnehmer wusste und sagte, dass man anhalten muss, wenn die im Volksmund sogenannte *Ampel* Rot zeigt. Aus der Perspektive des Nutzerverständnisses und des Abrufs angemessener Skripte erscheint die dreifarbige Lichtsignalanlage auch für den Kreuzungsbereich am Bahnübergang empfehlenswert.

4.4.5 Zusammenfassung

Als Schlussfolgerung der Befragung ist festzustellen, dass viele Befragten ein mangelhaftes Verständnis bahnübergangsbezogener Schilder und Lichtsignale hatten. Dementgegen hatten die meisten gute Kenntnisse bezüglich Verkehrszeichen, die im Straßenverkehr gebräuchlich sind. Die Konvention in Bezug auf die Beschilderung von Bahnübergängen sollte angesichts dieser Ergebnisse hinterfragt werden. Es sollte die Möglichkeit erwogen werden, besser bekannte Verkehrszeichen aus anderen Bereichen des Straßenverkehrs auch am Bahnübergang einzusetzen.

In Bezug auf die verwendeten Lichtsignale ist zu hinterfragen, warum dreifarbige Lichtsignalanlagen, wie sie im Straßenverkehr verwendet werden nicht auch an Bahnübergängen zum Einsatz kommen. Der parallele Einsatz zweier Signalsysteme, von denen das Blinklicht offensichtlich missverständlich ist, scheint nicht sinnvoll. Das Stoppschild, das beispielsweise in Nachbarländern wie Österreich oder Frankreich an einigen nicht technisch gesicherten Bahnübergängen zum Einsatz kommt, könnte auch in Deutschland eine kostengünstige Mög-

lichkeit zur Erhöhung der Sicherheit bieten. Die Ergebnisse der Befragung sind unter dem Vorbehalt zu betrachten, dass die 100 Befragungsteilnehmer keine repräsentative Stichprobe aller Verkehrsteilnehmer in Deutschland darstellen. Eine größer angelegte Befragung wäre erforderlich, um die Erkenntnisse dieser Umfrage zu untermauern.

Um angesichts der Ergebnisse der Befragung genauer zu betrachten, wie sich Straßenverkehrsteilnehmer insbesondere an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen tatsächlich verhalten und welche Verhaltensassoziationen Verkehrsteilnehmer mit bahnübergangsbezogener Symbolik haben, wurden weiterführende Untersuchungen durchgeführt, die in den folgenden Kapiteln 5 und 7 dargestellt werden.

5 Untersuchung 2: Blick- und Fahrverhalten von Autofahrern an unbeschränkten Bahnübergängen⁵

5.1 Einleitung

Wie in Abschnitt 3.5 beschrieben, besteht eine Forschungslücke in Bezug auf die visuelle Wahrnehmung von Straßenverkehrsteilnehmern in der Annäherung an nicht technisch gesicherte Bahnübergänge. Der Stand der Forschung basiert auf Ergebnissen aus Untersuchungen, die methodisch ungeeignet oder nicht mehr zeitgemäß sind. Dies erfordert die Durchführung einer Studie, in der das Blick- und Fahrverhalten in der Zufahrt auf Bahnübergänge mit geeigneterer Methodik untersucht wird. Die Ergebnisse der in Kapitel 4 beschriebenen Befragungen weisen zudem darauf hin, dass viele Verkehrsteilnehmer ein mangelhaftes Wissen zur Bedeutung der Beschilderung von Bahnübergängen sowie den Arten von Lichtsignalanlagen haben, die an Bahnübergängen vorkommen. Insbesondere wurde von vielen Teilnehmern der Befragung nicht explizit festgestellt, dass es wichtig ist, eine Sichtprüfung der peripheren Bahnübergangsbereiche vorzunehmen und die Geschwindigkeit anzupassen, wenn man im Verkehr einem Andreaskreuz begegnet.

Es ist nicht auszuschließen, dass dies damit zusammenhängt, dass den Befragungsteilnehmern lediglich grafische Abbildungen der Verkehrsschilder vorgelegt wurden, die nicht den natürlichen Kontext einer Zufahrt auf einen Bahnübergang wiedergaben. Es ist denkbar, dass Teilnehmer der Befragung lediglich nicht in der Lage waren, implizit vorhandenes Wissen zu notwendigen Handlungen zu verbalisieren. Es muss die Möglichkeit in Erwägung gezogen werden, dass dieses Wissen gegebenenfalls besser abgerufen und in angemessene Verhaltensweisen überführt werden kann, wenn man im realen Straßenverkehrskontext auf einen Bahnübergang zufährt.

Den Wissensabruf beschreiben Gripenkoven & Dietsch (2016) als einen von fünf erforderlichen Teilschritten, der vor der Überquerung eines Bahnübergangs erfolgreich durchlaufen werden muss (vgl. 3.1). Im Zusammenhang mit diesen Teilschritten ist es zudem denkbar, dass in einem früheren Schritt Verkehrszeichen am Bahnübergang nicht detektiert werden und daraus ein gefährliches Verhalten resultieren kann. Eine andere denkbare Möglichkeit ist,

⁵ Die Datenerhebung der in diesem Abschnitt beschriebenen Untersuchung wurde im Rahmen einer von Jan Gripenkoven betreuten Masterarbeit von Sandra Dietsch unterstützt.

dass Fahrer die Verkehrszeichen am Bahnübergang zwar detektieren, in der Folge allerdings fehlerhafte Skripte zu Abläufen und dem Verhalten an Bahnübergängen aus dem Langzeitgedächtnis abrufen. In unterschiedlichen Teilschritten kann es demnach zu Fehlern kommen, die zu einer gefährlichen Situation in der Überfahrt des Bahnübergangs führen können.

Durch eine Untersuchung des Blick- und Fahrverhaltens von Autofahrern im Vorgang der Bahnübergangsannäherung soll festgestellt werden, ob ein Fehlverhalten eher auf ein *Übersehen* der Beschilderung zurückzuführen ist oder eher auf das *Unverständnis* beziehungsweise die *Missachtung* dieser Beschilderung. Dabei liegt der Fokus auf nicht technisch gesicherten Bahnübergängen. Wigglesworth (1978) formulierte zu möglichen Ursachen des Ausbleibens einer angemessenen Sichtprüfung in der Zufahrt auf Bahnübergänge zwei Hypothesen: Eine Möglichkeit sei es, dass Fahrer die Schilder beziehungsweise Infrastrukturelemente, die den Bahnübergang ankündigen nicht detektieren, also den Bahnübergang *übersehen*. Die andere Möglichkeit bestehe darin, dass Fahrer Schilder und Infrastrukturelemente des Bahnübergangs zwar detektieren, aber nicht in der Lage seien, korrekte mentale Modelle abzurufen, um in der Folge eine angemessene Verhaltensintention zu formen und ihr Verhalten anzupassen. Anhand einer Eye-Tracking-Untersuchung in der Zufahrt auf den Bahnübergang sollen diese Alternativen überprüft werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wird zudem ein Vergleich der Überfahrt zwischen einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang und einem Bahnübergang mit zweifarbiger Lichtzeichenanlage durchgeführt.

5.2 Hypothesen

Zum Vergleich des Verhaltens am nicht technisch gesicherten Bahnübergang und am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage wurden im vorliegenden Versuch Hypothesen untersucht, die aus den wesentlichen Vorbedingungen für eine sichere Bahnübergangsüberquerung abgeleitet wurden. Das zentrale Kriterium sicheren Verhaltens an Bahnübergängen ist ein angemessenes Blickverhalten der Straßenverkehrsteilnehmer. Nur wenn ein Straßenverkehrsteilnehmer die Fahrumgebung einer aufmerksamen Sichtprüfung unterzieht, ist eine Anpassung des Fahrverhaltens als Konsequenz einer korrekt erfassten Verkehrssituation möglich. In Bezug auf den vorliegenden Versuch bedeutet dies, dass in der Zufahrt auf den nicht technisch gesicherten Bahnübergang Elemente der Bahnübergangsbeschilderung detektiert und anschließend eine Sichtprüfung der peripheren Bereiche des Bahnübergangs, aus der ein Zug herannahen kann, durchgeführt werden sollte. In Bezug auf den nicht technisch gesicherten Bahnübergang besteht das sicherheitskritische Blickverhalten daher in einer Blickzuwendung

des linken und rechten peripheren Bereichs am Bahnübergang. Zudem ist eine Verringerung der Fahrgeschwindigkeit von Vorteil, um Zeit zu haben eine angemessene Sichtprüfung durchzuführen und in der Lage zu sein anzuhalten, falls ein Zug kommt.

Im Fall des Bahnübergangs mit Lichtsignalanlage ist während der Zufahrt die Prüfung der Lichtsignalanlage erforderlich. Zeigt sie ein gelbes beziehungsweise rotes Lichtsignal, hat der Straßenverkehr anzuhalten, um dem Eisenbahnverkehr Vorfahrt zu gewähren. Eine Sichtprüfung des linken und rechten peripheren Bereichs ist ebenfalls anzuraten, jedoch nicht von gleichermaßen sicherheitskritischer Relevanz wie am nicht technisch gesicherten Bahnübergang.

Hypothese 1:

Es besteht ein Unterschied im Vergleich der beiden Bahnübergangsüberfahrten in Bezug auf die Anzahl der Versuchsteilnehmer, die eine gezielte Sichtprüfung zur Ableitung des angemessenen Verhaltens (Anhalten oder Weiterfahren) durchführen.

Hypothese 2:

Mehr Teilnehmer schauen am nicht technisch gesicherten Bahnübergang nach links und rechts als am Bahnübergang mit Lichtzeichenanlage.

Hypothese 3:

Am nicht technisch gesicherten Bahnübergang ist eine stärkere Geschwindigkeitsverringerung festzustellen als am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage.

5.3 Methoden

5.3.1 Versuchsteilnehmer

Die vollständigen Datensätze von $n = 24$ Versuchsteilnehmern wurden im Nachgang der Versuchsdurchführung ausgewertet. Unter den 24 Versuchsteilnehmern befanden sich neun weibliche und 15 männliche Teilnehmer. Alle Teilnehmer waren zum Zeitpunkt der Untersuchung im Besitz eines gültigen Führerscheins, im Durchschnitt seit 7,00 Jahren bei einer Standardabweichung von 3,31 Jahren. Die Versuchsteilnehmer waren Mitarbeiter des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt e. V., die zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung nicht im Bereich des bodengebundenen Verkehrs forschten sowie Studenten der Technischen Universität Braunschweig. Das Durchschnittsalter der Teilnehmer in der Stichprobe betrug 24,88 Jahre, bei einer Standardabweichung von 4,23 Jahren. Es wurden nur Versuchsteilnehmer ausgewählt, die beim Autofahren keine Brille benötigen, um die Datenqualität der Eye-

Tracking-Untersuchung nicht zu beeinträchtigen. Zudem wurde darauf geachtet, keine Teilnehmer zu selektieren, die in den Braunschweiger Vororten wohnen, in denen sich die im Versuch betrachteten Bahnübergänge befinden. Die ursprüngliche Stichprobe des Versuchs umfasste 35 Teilnehmer, von denen elf Teilnehmer entweder aufgrund der Verkehrslage an den untersuchten Bahnübergängen während der Zufahrt oder aufgrund technischer Probleme der Datenaufzeichnung von der Datenauswertung ausgeschlossen werden mussten. Es wurden nur Datensätze von Verkehrsteilnehmern in die Auswertung mit aufgenommen, die beide Bahnübergänge überquerten, ohne dass ein anderes Fahrzeug unmittelbar vorausfuhr oder folgte. Die Versuchsteilnehmer wurden für ihre Teilnahme am Versuch mit 20 € vergütet.

5.3.2 Design

Die Untersuchung diente dem Zweck, das generelle Blick- und Fahrverhalten von Autofahrern in der Zufahrt und bei der Überfahrt von Bahnübergängen zu ermitteln. In einem Innersubjekt-Design überfuhren alle Verkehrsteilnehmer zunächst einen nicht technisch gesicherten Bahnübergang und danach einen technisch gesicherten Bahnübergang mit Blinklichtanlage. Die Art der Bahnübergangssicherung ist die einzige unabhängige Variable im Versuch. Sie hat zwei Stufen (nicht technische Sicherung oder Lichtsignalanlage). Als abhängige Variablen wurden im Versuch Parameter des Blickverhaltens untersucht sowie die Annäherungsgeschwindigkeit an die Bahnübergänge als fahrdynamischer Parameter.

Unter den Blickdaten war es für die Untersuchung der Hypothesen von besonderem Interesse, ob die Untersuchungsteilnehmer eine Sichtprüfung des linken und rechten peripheren Bereiches am Bahnübergang vornahmen. Als weiterer Eye-Tracking-Parameter wurden Fixationsanteile auf den letzten 300 m der Bahnübergangszufahrt in sogenannten *Areas of Interest (AOI)* untersucht, Interessensbereiche in der Zufahrt auf den Bahnübergang. Als relevante AOI wurden verschiedene Elemente der Bahnübergangsinfrastruktur definiert. Darunter war das Warnschild bei einer Distanz von 240 m zum Bahnübergang, die Entfernungsbaken, die Andreaskreuze, die sich an beiden Bahnübergängen jeweils links und rechts der Straße befanden sowie im Fall des technisch gesicherten Bahnübergangs die Lichtsignalanlage. Als Kontrolle wurden Straße und Umgebung (fahrzeugextern und -intern) gemeinsam als zusätzliche neutrale AOI definiert.

Die beiden Bahnübergänge im Versuch wurden in einer festen Reihenfolge überfahren, zuerst der nicht technisch gesicherte, dann der technisch gesicherte Bahnübergang. Die feste Reihenfolge der Überfahrt war eine praktische Notwendigkeit, die unter anderem zum Zweck

der Standardisierung erfolgte. Jeder Versuchsteilnehmer sollte die Bahnübergänge von der gleichen Seite befahren, was bei einer Randomisierung der Reihenfolge nicht ohne große Umwege und eine deutliche Verlängerung des Versuchs möglich gewesen wäre.

5.3.3 Materialien und Versuchsfahrzeug

Die Fahrversuche wurden unter Verwendung des DLR ViewCar (Vollrath, Rataj & Lemmer, 2004) durchgeführt, einem speziell zur Durchführung von Fahrversuchen ausgestatteten Audi A6 Avant 3.0 Versuchsfahrzeug. Mit der eingebauten Technik konnten kontinuierlich fahrdynamische Daten auf Grundlage der aktuellen Position des *Globalen Positionsbestimmungssystems* (GPS) aufgezeichnet werden.

Zur Erfassung der Eye-Tracking-Daten wurde in diesem Versuch eine Eye-Tracking-Brille der Hersteller SMI (SensoMotoric Instruments GmbH) verwendet. Das kopfbasierte Eye-Tracking-System wurde über ein Kabel mit einem Aufzeichnungsnotebook verbunden. Dieses Notebook hatte der Versuchsleiter während des Versuchs neben sich auf der Rückbank des Fahrzeugs positioniert. Die Verkabelung wurde in einer Weise von der Brille weggeführt, dass sie die Versuchsteilnehmer während der Fahrt nicht störte oder in ihrer Beweglichkeit beeinträchtigte. Der Eye Tracker selbst bestand aus einem brillenähnlichen Gestell, in dem drei Miniaturkameras integriert waren, je eine pro Auge des Trägers (binokulares Tracking-System), und eine hochauflösende Kamera, die das visuelle Feld der Versuchsteilnehmer während des Fahrens aufzeichnete. Die Aufzeichnungsrate des Eye-Tracking-Systems betrug 30 Hz. Als Fixationen wurden visuelle Zuwendungen einer Dauer von mindestens 120 ms in einen räumlichen Bereich unter 1° Schwinkel definiert (DIN EN ISO 15007-1, 2003).

5.3.4 Durchführung

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung fuhren die Teilnehmer in einem Versuchsfahrzeug eine festgelegte Strecke in Braunschweig ab, die ihnen durch standardisierte Kommandos des Versuchsleiters angesagt wurde, der auf der Rückbank des Versuchsfahrzeugs saß. Vor Beginn der Fahrt wurden die Versuchsteilnehmer vom Versuchsleiter begrüßt und zum Fahrzeug geführt. Im stehenden Fahrzeug wurde das im Versuch eingesetzte kopfbasierte Eye-Tracking-System angelegt und kalibriert. Die Teilnehmer wurden im Folgenden zum Versuchsablauf und ihrer Aufgabe instruiert. Alle Teilnehmer wurden bewusst darüber im Unklaren gelassen, dass es im Versuch um ihr Verhalten an Bahnübergängen geht. Ihnen wurde durch den Versuchsleiter die allgemeine Information gegeben, dass im Rahmen des

Versuches ihr natürliches Blick- und Fahrverhalten in unterschiedlichen Verkehrsbereichen untersucht wird. Die gesamte Fahrt dauerte je nach Verkehrslage ungefähr 40 Minuten.

Im Versuch wurden ein nicht technisch gesicherter Bahnübergang und ein technisch gesicherter Bahnübergang mit Blinklichtsicherung befahren. Der zunächst befahrene nicht technisch gesicherte Bahnübergang lag zwischen der Hans-Jürgen-Straße und der Bundesallee im Braunschweiger Vorort Watenbüttel. Am Übergang zwischen diesen beiden Straßen kreuzt die aus Südwesten zuführende Straße die eingleisige Bahnstrecke in einem Winkel von annähernd 90° . In den Versuchen wurde der Bahnübergang aus südwestlicher Richtung befahren. Der zweite Bahnübergang verfügte über eine technische Sicherung mit einer Lichtsignalanlage mit zwei Signalpositionen. Der technisch gesicherte Bahnübergang, der im Versuch aus Nordwesten kommend überfahren wurde, liegt zwischen den Braunschweiger Stadtteilen Rühme und Vorwerksiedlung an der Grenze zwischen der Pfälzerstraße und der Schmalbachstraße. An diesem Bahnübergang kreuzt die Straße die Schienen etwa in einem Winkel von 45° (bzw. 135°) bei einem leichten Gefälle. Beide Bahnübergänge waren zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung von der Straßenseite aus gut einsehbar. Die Versuchsstrecke ist im Anhang unter Anlage B dargestellt.

Da eine Realfahrtuntersuchung anders als eine Untersuchung im Fahrsimulator unter dem Einfluss einer Vielzahl potentieller Störeinflüssen steht, wurde darauf geachtet, einige Randbedingungen konstant zu halten, um einen möglichst hohen Standardisierungsgrad zu erreichen. Alle Versuche wurden unter Tageslichtbedingungen durchgeführt. Die Bahnübergänge wurden nur zu den Zeiten überquert, zu denen kein Zug den Bahnübergang befährt. Versuchsteilnehmer wurden nur dann in die Datenauswertung mit aufgenommen, wenn kein anderer Verkehrsteilnehmer ihnen in der Zufahrt auf die Bahnübergänge vorausfuhr, um zu vermeiden, dass die Fahrer ihr Verhalten dem Verhalten des vorausfahrenden Fahrers anpassen. Auch wenn ein Fahrzeug in geringem Abstand folgte, wurden die Teilnehmer von der weiteren Datenanalyse ausgeschlossen. Zudem wurden nur die Daten von Teilnehmern ausgewertet, die keinen der überquerten Bahnübergänge vorher kannten. Somit wurden Störeffekte ausgeschlossen, die aus der Erfahrung mit dem Bahnübergang und seiner Zugfrequenz hätten entstehen können. In der Zufahrt beider überquerten Bahnübergänge herrschte straßenseitig eine vorgeschriebene Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h. Vor Beginn der Fahrt wurden alle Versuchsteilnehmer darauf hingewiesen, dass sie ihre Geschwindigkeit an den vorgeschriebenen Höchstgeschwindigkeiten orientieren sollen.

5.4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden zunächst die Ergebnisse der Eye-Tracking-Untersuchung dargestellt, anschließend die Ergebnisse der Analyse der fahrdynamischen Daten.

5.4.1 Blickverhalten

Die Blickdaten der 24 Teilnehmer wurden bezogen auf die letzten 300 m der Bahnübergangszufahrt ausgewertet. Ab diesem Abstand zum Bahnübergang konnten die Versuchsteilnehmer mit der Kombination aus Bake und Warnschild die ersten Schilder sehen, die auf die Bahnübergänge hinweisen. Zunächst wurde betrachtet, ob die Teilnehmer die unter Abschnitt 5.3.2 definierten AOI überhaupt mit ihrem Blick fixiert haben. Die Anzahl der Teilnehmer, bei denen mindestens eine Fixation der jeweiligen AOI an beiden Bahnübergängen festgestellt wurde, sind in Abbildung 15 dargestellt.

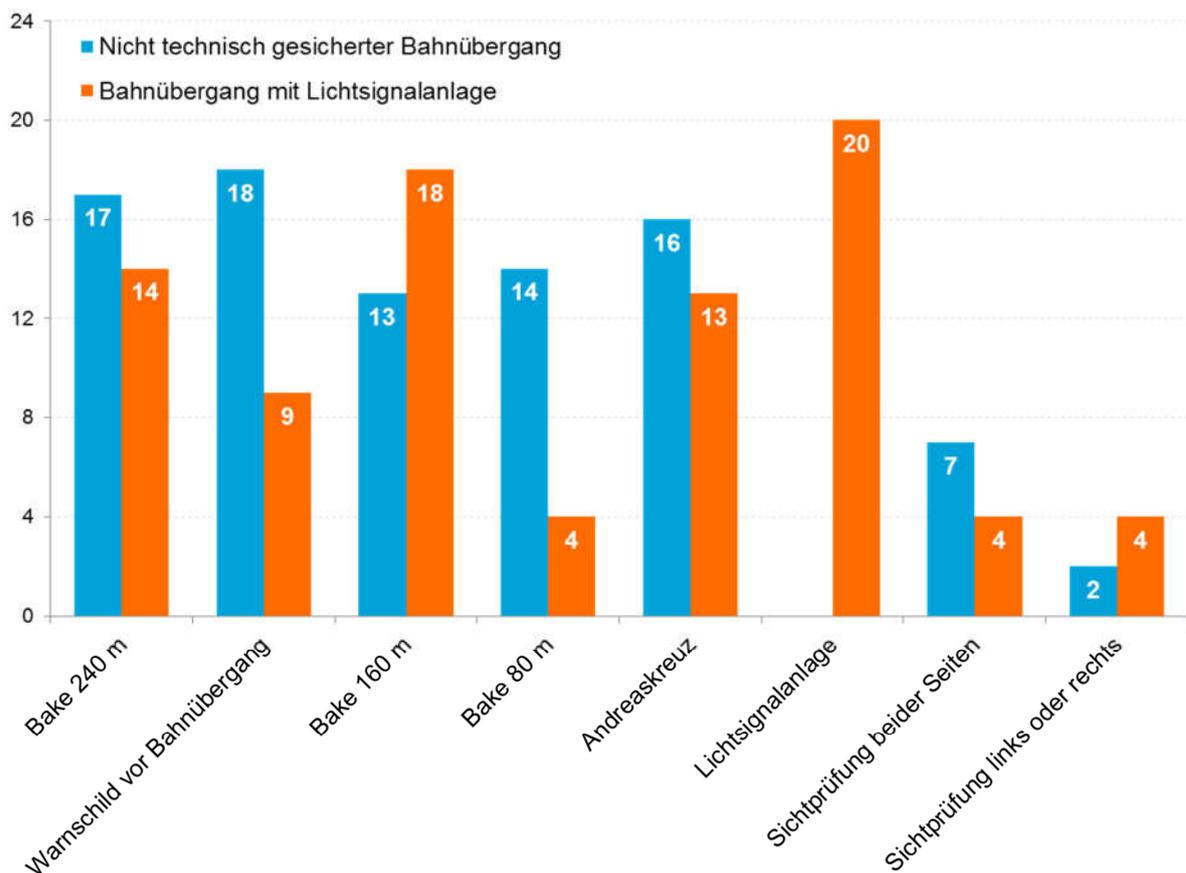


Abbildung 15. Anzahl der Versuchsteilnehmer, die Bahnübergangsinfrastrukturelemente in der Zufahrt mindestens einmal fixierten.

An beiden Bahnübergängen fixierte jeder Teilnehmer in der Zufahrt mindestens eines der Schilder, die den Bahnübergang ankündigen. Nach der Fixierung der bahnübergangsbezo-

genen Beschilderung wurde an beiden Bahnübergängen von Teilen der Versuchsteilnehmer nicht das angemessene sicherheitskritische Blickverhalten gezeigt. In der Zufahrt auf den nicht technisch gesicherten Bahnübergang schauten 17 der 24 Teilnehmer nicht nach links und rechts. Am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage zeigten vier der 20 Teilnehmer keine Fixation der Lichtsignalanlage.

Zur Untersuchung der ersten Hypothese wurde ein McNemar-Test zum statistischen Vergleich der Anzahl der Teilnehmer, die an beiden Bahnübergängen ein sicherheitsrelevantes Blickverhalten gezeigt haben durchgeführt. Als statistisches Signifikanzniveau wurde $p < ,05$ festgelegt. Die deskriptiven Daten des sicherheitskritischen Blickverhaltens bei der Überfahrt beider untersuchter Bahnübergänge ist in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3

Übersicht der Anzahl der Versuchsteilnehmer, die an den Bahnübergängen ein sicherheitsrelevantes Blickverhalten gezeigt haben

		Sicherheitsrelevantes Blickverhalten am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage (Fixation der LSA)		
		nein	ja	Gesamt
Sicherheitsrelevantes Blickverhalten am nicht technisch gesicherten Bahnübergang (Blick nach links und rechts)	nein	2	15	17
	ja	2	5	7
	Gesamt	4	20	24

Von den 24 Teilnehmern der Untersuchung führten sieben Teilnehmer am nicht technisch gesicherten Bahnübergang eine Sichtprüfung der linken und rechten Peripherie durch. 17 Teilnehmer führten keine ausreichende Sichtprüfung durch. Von den sieben Teilnehmern, die nach links und rechts schauten fixierten anschließend fünf die Lichtsignalanlage, zwei taten dies nicht. Von den 17 Teilnehmern, bei denen keine Sichtprüfung der linken und rechten Peripherie festzustellen war, fixierten zwei in der Überfahrt des Bahnübergangs mit Lichtzeichenanlage auch nicht die Lichtzeichenanlage, 15 zeigten hier jedoch mindestens eine Fixation und damit das für die Sicherheit relevante Blickverhalten. Insgesamt fixierten am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage 20 der 24 Teilnehmer mindestens einmal die Lichtsignalanlage. Bei vier Teilnehmern konnte keine Fixation der Lichtsignalanlage festgestellt werden. Zusammengefasst zeigten am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage dreizehn Versuchs-

teilnehmer mehr ein sicherheitsrelevantes Blickverhalten als am nicht technisch gesicherten Bahnübergang. Anhand des McNemar-Tests konnte festgestellt werden, dass ein statistisch signifikanter Unterschied bei der Anzahl der Versuchsteilnehmer bestand, die ein sicherheitsrelevantes Blickverhalten am nicht technisch gesicherten Bahnübergang und am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage zeigten (McNemar's $\chi^2 = 8,471$, $df = 1$, $p = ,004$). Hypothese 1 wird daher für die untersuchte Stichprobe angenommen.

Zur Untersuchung der zweiten Hypothese wurde die Anzahl der Teilnehmer verglichen, die an den überfahrenen Bahnübergängen eine Sichtprüfung der linken und rechten Peripherie durchführten (Tabelle 4).

Tabelle 4

Übersicht der Anzahl der Versuchsteilnehmer, die an den Bahnübergängen eine Sichtprüfung der linken und rechten Peripherie durchgeführt haben

		Blick nach links und rechts am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage		
		nein	ja	Gesamt
Blick nach links und rechts am nicht technisch gesicherten Bahnübergang	nein	17	0	17
	ja	3	4	7
	Gesamt	20	4	24

Von den 24 Teilnehmern der Untersuchung führten sieben Teilnehmer am nicht technisch gesicherten Bahnübergang eine Sichtprüfung der linken und rechten Peripherie durch. 17 Teilnehmer führten keine ausreichende Sichtprüfung durch. Von den sieben Teilnehmern, die eine Sichtprüfung zeigten, konnte bei vieren ebenfalls eine Sichtprüfung der peripheren Bereiche am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage festgestellt werden. Von den 17 Teilnehmern, die am nicht technisch gesicherten Bahnübergang keine Sichtprüfung durchführten, schaute auch kein Teilnehmer am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage nach links und rechts. Am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage führten insgesamt vier Teilnehmer eine Sichtprüfung der linken und rechten Peripherie durch. Bei 20 Teilnehmern war keine Sichtprüfung beider Seiten festzustellen.

Der berechnete McNemar-Test weist in Bezug auf die Anzahl der Personen, die eine Sichtprüfung der linken und rechten peripheren Bereiche durchführten keinen statistisch signifikanten Unterschied im Vergleich des nicht technisch gesicherten Bahnübergangs und des

Bahnübergangs mit Lichtsignalanlage auf (McNemar's $\chi^2 = 1,333$, $df = 1$, $p = ,248$). Hypothese 2 wird für die untersuchte Stichprobe daher abgelehnt.

Neben der Untersuchung der absoluten Anzahl der Teilnehmer, die mindestens eine Fixation auf die Elemente der Bahnübergangssicherungen zeigten, wurden auch die kumulierten Fixationsdauern der Versuchsteilnehmer auf diese Elemente betrachtet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt. Darin werden die durchschnittlichen kumulierten Fixationsdauern auf den Bahnübergangselementen dargestellt unter Einbezug der Teilnehmer, von denen die jeweiligen Elemente in der Zufahrt auf die Bahnübergänge mindestens einmal fixiert wurden. Am nicht technisch gesicherten Bahnübergang wurde das Warnschild 240 m vor dem Bahnübergang, das auf einen Bahnübergang hinweist, durchschnittlich am längsten von allen Schildern fixiert. Die 17 Teilnehmer, die dieses Schild fixierten wiesen im Durchschnitt kumulierte Fixationsdauern von 1200 ms auf ($SD = 1131$ ms). Das Andreaskreuz am nicht technisch gesicherten Bahnübergang wurde von den 16 Teilnehmern, die es fixierten im Durchschnitt 633 ms ($SD = 473$ ms) fixiert. Die Baken 240 m, 160 m und 80 m wurden von 17, 13 beziehungsweise 14 Teilnehmern für 963 ms ($SD = 861$ ms), 614 ms ($SD = 497$ ms) beziehungsweise 1083 ms ($SD = 975$ ms) fixiert.

Am technisch gesicherten Bahnübergang mit Lichtsignalanlage wurde das Warnschild bei 240 m lediglich von 9 Teilnehmern für durchschnittlich 528 ms ($SD = 495$ ms) fixiert. Das Andreaskreuz wurde von 13 Teilnehmern durchschnittlich 926 ms ($SD = 515$ ms) fixiert. Die Baken 240 m, 160 m und 80 m wurden von 14, 18 beziehungsweise 4 Teilnehmern für 816 ms ($SD = 972$ ms), 1322 ms ($SD = 1605$ ms) beziehungsweise 915 ms ($SD = 646$ ms) fixiert. Die Lichtsignalanlage wurde von den 20 Teilnehmern, die sie fixierten für eine durchschnittliche kumulierte Dauer von 1504 ms ($SD = 1313$ ms) fixiert und damit am längsten von allen Sicherungselementen am technisch gesicherten Bahnübergang.

Tabelle 5

Fixationsdaten der Zufahrt auf den nicht technisch gesicherten Bahnübergang

	Anzahl der Teilnehmer, die das Objekt mindestens einmal fixiert haben		Durchschnitt der kumulierten Fixationsdauer der Teilnehmer, die das Objekt angeschaut haben in ms (Standardabweichung)		Anteil des Durchschnitts der kumulierten Fixationsdauer der Teilnehmer, die das Objekt angeschaut haben an der Dauer der Zufahrt ab 300 m vor den Bahnübergängen	
	Nicht technisch gesicherter Bahnübergang	Bahnübergang mit Lichtsignalanlage	Nicht technisch gesicherter Bahnübergang	Bahnübergang mit Lichtsignalanlage	Nicht technisch gesicherter Bahnübergang	Bahnübergang mit Lichtsignalanlage
Bake 240 m	17	14	963 (861)	816 (972)	3,67 %	2,88 %
Warnschild vor Bahnübergang	18	9	1200 (1131)	538 (495)	4,57 %	1,90 %
Bake 160 m	13	18	614 (497)	1322 (1605)	2,34 %	4,67 %
Bake 80 m	14	4	1083 (975)	915 (646)	4,13 %	3,23 %
Andreaskreuz	16	13	633 (473)	926 (515)	2,41 %	3,27 %
Lichtsignalanlage	Nicht zutreffend	20	Nicht zutreffend	1504 (1313)	Nicht zutreffend	5,31 %
Rest	24	24	21748 (4070)	18706 (3516)	82,88 %	75,65 %
Summe (<i>Use Case</i> Dauer)	-	-	26240	24726	100,00 %	100,00 %

5.4.2 Fahrverhalten

In der Zufahrt auf beide Bahnübergänge konnte eine Verringerung der Geschwindigkeit mit zunehmender Nähe zum Bahnübergang festgestellt werden. Die Geschwindigkeit in der Zufahrt auf den Bahnübergang wurde zur Auswertung über alle Versuchsteilnehmer für vier Distanzen vor dem Bahnübergang bestimmt. Gemäß der Bakenpositionen am Fahrbahnrand wurden die Geschwindigkeiten bei einer Distanz von 240 m, 160 m und 80 m vor den Bahnübergängen ermittelt. Weiterhin wurde die Zielgeschwindigkeit einen Meter vor dem Bahnübergang bestimmt. Die Geschwindigkeitsdaten in der Zufahrt auf beide Bahnübergänge sind in Abbildung 16 dargestellt.

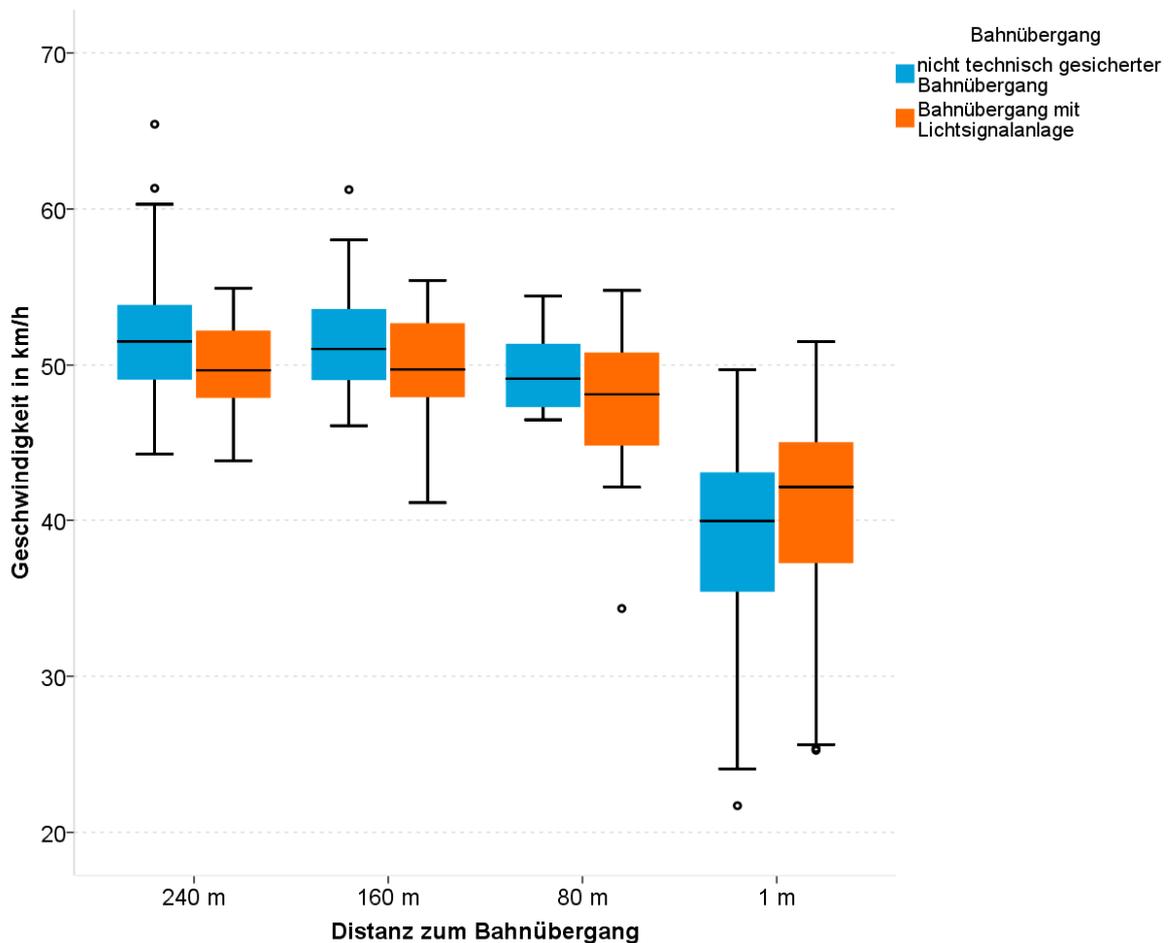


Abbildung 16. Boxplots der Geschwindigkeit (in km/h) der Versuchsteilnehmer in der Zufahrt auf die Bahnübergänge bei den Distanzen 240 m, 160 m, 80 m und 1 m.

An beiden Bahnübergängen war die ermittelte Geschwindigkeit an den ersten drei Messdistanzen relativ konstant. Es konnte keine nennenswerte Verlangsamung festgestellt werden. Vor dem nicht technisch gesicherten Bahnübergang konnte bei einer Distanz von 240

m im Mittel eine Geschwindigkeit von 52,19 km/h ($SD = 4,82$ km/h) festgestellt werden. Bei einer Distanz von 160 m betrug die durchschnittliche Geschwindigkeit 51,64 km/h ($SD = 3,53$ km/h). Bei einer Distanz von 80 m betrug die durchschnittliche Geschwindigkeit 49,55 km/h ($SD = 2,40$ km/h).

Vor dem Bahnübergang mit Lichtsignalanlage lag die mittlere Geschwindigkeit bei einer Distanz von 240 m bei 49,62 km/h ($SD = 2,87$ km/h). Bei einer Distanz von 160 m betrug die durchschnittliche Geschwindigkeit 50,19 km/h ($SD = 3,51$ km/h). Bei einer Distanz von 80 m betrug die durchschnittliche Geschwindigkeit 47,56 km/h ($SD = 4,54$ km/h).

Eine deutlichere Verlangsamung konnte im Fall beider Bahnübergänge im Vergleich der mittleren Geschwindigkeit erst im Bereich zwischen 80 m und 1 m vor dem Bahnübergang festgestellt werden. Am nicht technisch gesicherten Bahnübergang betrug die durchschnittliche Geschwindigkeit unmittelbar vor dem Bahnübergang 38,62 km/h ($SD = 6,66$ km/h). Damit liegt sie 10,93 km/h unter der Geschwindigkeit, die bei einer Distanz von 80 m vor dem nicht technisch gesicherten Bahnübergang ermittelt wurde. Am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage betrug die durchschnittliche Geschwindigkeit unmittelbar vor dem Bahnübergang 40,16 km/h ($SD = 7,56$ km/h). Sie ist 7,4 km/h geringer als die Geschwindigkeit, die bei einer Distanz von 80 m vor dem Bahnübergang mit Lichtsignalanlage ermittelt wurde. Die Differenz der Geschwindigkeit kurz vor der Überquerung des Bahnübergangs zwischen beiden überfahrenen Bahnübergängen beträgt 1,54 km/h. Bezogen auf Hypothese 3 (vgl. Abschnitt 5.2) wurde die Geschwindigkeit in der Zufahrt auf die beiden untersuchten Bahnübergänge anhand der Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs bei einer Distanz von einem Meter vor dem Bahnübergang verglichen. Der t-Test für verbundene Stichproben wies bei einem Signifikanzniveau von $p = ,05$ keinen statistisch signifikanten Unterschied in Bezug auf die Geschwindigkeit vor beiden Bahnübergängen aus, $t(23) = -,982$, $p = ,336$. Hypothese 3 wird daher abgelehnt.

Im Nachgang der Untersuchung des Fahrverhaltens über alle Versuchsteilnehmer wurde die Stichprobe für einen erweiterten Vergleich in zwei Untergruppen unterteilt. Das Fahrverhalten wurde zwischen den Teilnehmern verglichen, die in der Zufahrt auf den Bahnübergang mindestens zu einer Seite geschaut haben, um eine Sichtprüfung durchzuführen und den Teilnehmern, die keine Sichtprüfung durchführten. In der Zufahrt auf den nicht technisch gesicherten Bahnübergang schauten neun Teilnehmer mindestens zu einer Seite (sieben davon schauten zu beiden Seiten, zwei zu einer Seite). In der Zufahrt auf den Bahnübergang mit Lichtsignalanlage schauten acht Teilnehmer mindestens zu einer Seite (vier führten eine

Sichtprüfung beider Seiten durch, vier schauten zu einer Seite). Die Geschwindigkeiten an den vier untersuchten Distanzen ist unterteilt nach dem überfahrenen Bahnübergang und dem Blickverhalten in Abbildung 17 dargestellt.

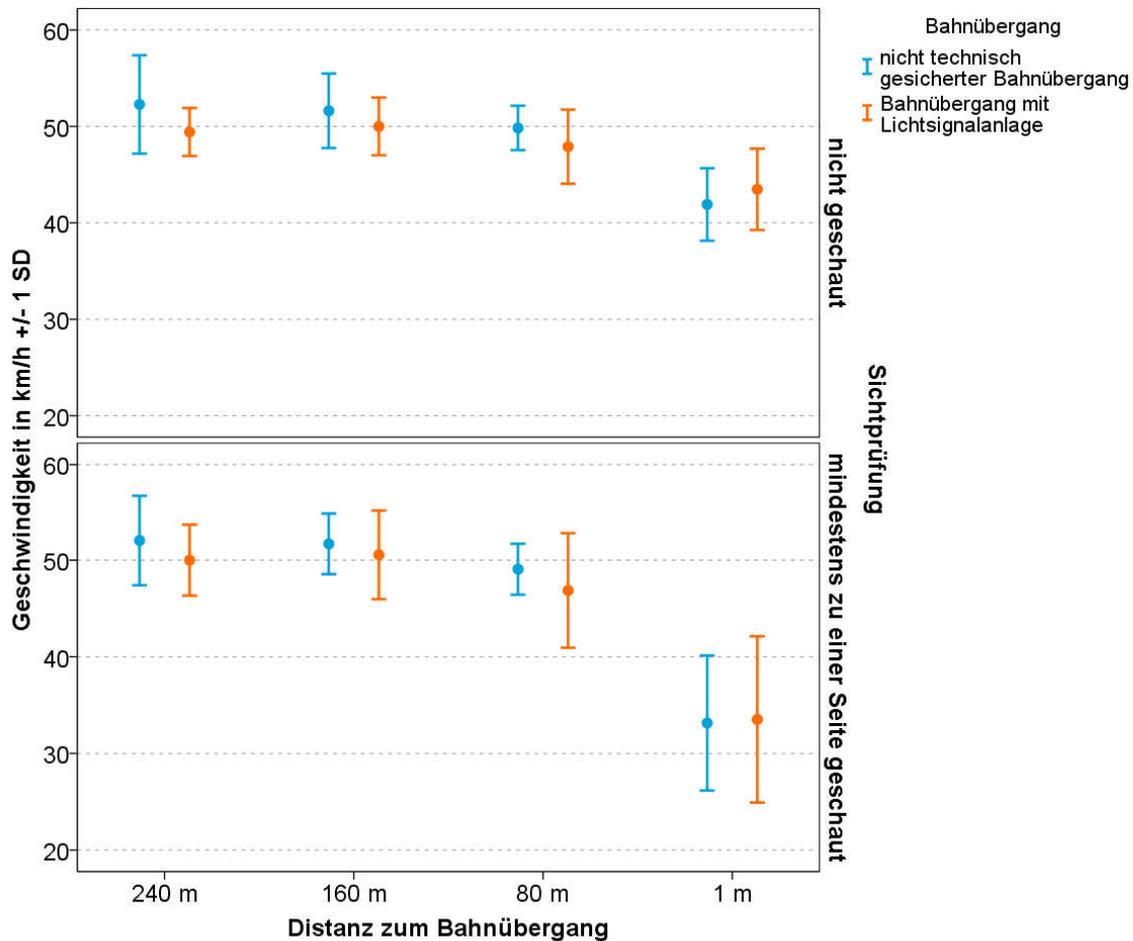


Abbildung 17. Durchschnittliche Geschwindigkeit in der Zufahrt auf die Bahnübergänge bei den Distanzen 240 m, 160 m, 80 m und 1 m, unterteilt nach Teilnehmern, die vor dem Bahnübergang eine Sichtprüfung mindestens einer Seite durchgeführt haben oder nicht.

In den Distanzen 240 m, 160 m und 80 m konnten auch im Vergleich zwischen den Teilnehmern, die eine Sichtprüfung durchführten und den Teilnehmern, die nicht schauten kein deutlicher Unterschied festgestellt werden. Die Geschwindigkeit unmittelbar vor der Überfahrt des Bahnübergangs unterschied sich an beiden Bahnübergängen hingegen merklich im Vergleich zwischen den Teilnehmern, die nach links und/oder rechts schauten und den Teilnehmern, die nicht schauten: Am nicht technisch gesicherten Bahnübergang betrug die Geschwindigkeit einen Meter vor dem Bahnübergang unter den neun Teilnehmern, die eine Sichtprüfung zu mindestens einer Seite durchführten im Mittel 33,17 km/h ($SD = 6,99$ km/h). Unter den 15 Teilnehmern, die keine Sichtprüfung durchführten betrug die Geschwindigkeit an dieser Stelle im Durchschnitt 41,9 km/h ($SD = 3,76$ km/h). Als Post-hoc-Vergleich der

Geschwindigkeit unmittelbar vor der Bahnübergangsüberfahrt zwischen diesen Gruppen wurde aufgrund der nicht erfüllten Normalverteilung der Daten anstelle eines t-Tests der Mann-Whitney-U-Test durchgeführt. Der Mann-Whitney-U-Test ergab einen signifikanten Unterschied zwischen den Fahrgeschwindigkeiten der Gruppen der Teilnehmer, die am nicht technisch gesicherten Bahnübergang eine Sichtprüfung durchführten und den Teilnehmern, die nicht schauten ($U = 16,000$, $n_{\text{Sichtprüfung}} = 9$, $n_{\text{keine Sichtprüfung}} = 15$, $p = ,002$).

Am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage betrug die Geschwindigkeit einen Meter vor dem Bahnübergang unter den acht Teilnehmern, die eine Sichtprüfung durchführten im Mittel 33,52 km/h ($SD = 8,61$ km/h). Unter den 16 Teilnehmern, die keine Sichtprüfung durchführten betrug die Geschwindigkeit unmittelbar vor dem Bahnübergang im Durchschnitt 43,48 km/h ($SD = 4,22$ km/h). Als Post-hoc-Vergleich der Geschwindigkeit unmittelbar vor der Bahnübergangsüberfahrt wurde auch im Fall des Bahnübergangs mit Lichtsignalanlage ein Mann-Whitney-U-Test durchgeführt. Der Mann-Whitney-U-Test ergab einen signifikanten Unterschied zwischen den Fahrgeschwindigkeiten den Gruppen der Teilnehmer, die am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage eine Sichtprüfung durchführten und den Teilnehmern, die nicht schauten ($U = 20,000$, $n_{\text{Sichtprüfung}} = 8$, $n_{\text{keine Sichtprüfung}} = 16$, $p = ,007$).

5.5 Diskussion

Das Ziel der Untersuchung bestand in einer Untersuchung des regulären Blick- und Fahrverhaltens von Autofahrern in der Zufahrt auf einen nicht technisch gesicherten Bahnübergang und einen Bahnübergang mit Lichtsignalanlage. In der durchgeführten Untersuchung fixierte jeder der 24 Teilnehmer an beiden Bahnübergänge zumindest Teile der Bahnübergangsinfrastruktur vor der Überfahrt. Angesichts der kumulierten Dauern der Fixationen und der Dauer der Zufahrt auf die Bahnübergänge von etwa 25 Sekunden auf den letzten 300 m sollte jeder Fahrer in der Lage sein, rechtzeitig vor der Überfahrt zur Kenntnis zu nehmen, dass er einen Bahnübergang überfährt. Dennoch konnte in der untersuchten Stichprobe bei der Mehrzahl der Teilnehmer keine angemessene Sichtprüfung der auf den Bahnübergang zuführenden peripheren Schienenbereiche in Vorbereitung der Bahnübergangsquerung festgestellt werden. Insbesondere am nicht technisch gesicherten Bahnübergang führten lediglich sieben der 24 Teilnehmer eine vollständige Sichtprüfung der linken und rechten Peripherie des Bahnübergangs durch. Auch die Geschwindigkeit wurde im Durchschnitt über die Teilnehmer der Untersuchung nur geringfügig verringert. Dies war vor allem bei denjenigen Fahrern festzustellen, die auch keine Sichtprüfung durchführten. Dieses Ergebnis erscheint plausibel, da

diese Fahrer potentiell mangels angemessener Skripte zu Bahnübergängen weder eine Verhaltensintention zu der erforderlichen Sichtprüfung noch zur Verlangsamung bildeten, trotz der vorherigen Detektion von bahnübergangsbezogenen Schildern.

Aus diesen Ergebnissen, vor allem aus der Tatsache, dass alle Versuchsteilnehmer Elemente der Bahnübergangssicherung fixierten, kann geschlussfolgert werden, dass das mangelhafte Blick- und Fahrverhalten vieler Verkehrsteilnehmer nicht auf ein Übersehen des Bahnübergangs zurückzuführen ist. Ankündigende Schilder wurden zwar fixiert, dennoch verhielten sich viele Teilnehmer unangemessen und führten gerade am nicht technisch gesicherten Bahnübergang nicht die sicherheitskritische Sichtprüfung durch. Es scheint, dass viele Verkehrsteilnehmer das Wissen über angemessene Verhaltensweisen in der Gegenwart bahnübergangsbezogener Beschilderung nicht ohne weiteres abrufen können oder keine angemessenen mentalen Modelle in Bezug auf die Bahnübergangsüberquerung in ihrem Langzeitgedächtnis gespeichert haben und daher keine Sichtprüfung durchführten.

Die Ergebnisse der in Kapitel 4 beschriebenen Befragungen zum Verständnis der Beschilderung wiesen unter vielen Teilnehmern ein mangelhaftes Wissen in Bezug auf die Bahnübergangsbeschilderung aus. In der Beurteilung der Wissensmängel, die in den Befragungen zutage traten wurde die Möglichkeit erwogen, dass bahnübergangsbezogenes Wissen implizit vorhanden sein könnte, schwer verbalisiert werden kann, aber sich am Bahnübergang in einem richtigen Verhalten möglicherweise dennoch zeigt. Die Ergebnisse der in den vergangenen Abschnitten beschriebenen Untersuchung weisen darauf hin, dass diese Erwägung falsch ist. Sie sind ein weiteres Indiz, das eher für die Annahme spricht, dass Wissensmängel in Form nicht vorhandener oder fehlerhafter Schemata und Skripte ursächlich für Fehler in der Bahnübergangsüberquerung sind. Die Ergebnisse der Eye-Tracking-Untersuchung sprechen im Wesentlichen für die einleitend dargestellte Hypothese von Wigglesworth (1978), dass Fahrer Schilder und Infrastrukturelemente des Bahnübergangs zwar detektieren, aber nicht in der Lage sind korrekte mentale Modelle abrufen, um in der Folge eine angemessene Verhaltensintention zu formen und ihr Verhalten anzupassen (vgl. Abschnitt 5.1).

Frühere Befunde, die darstellen, dass ein maßgeblicher Anteil der Verkehrsteilnehmer keine Sichtprüfung durchführt (vgl. Heilmann, 1984; Wigglesworth, 1978), die zunächst aufgrund der aus heutiger Sicht primitiveren Methodenauswahl angezweifelt wurden, werden durch die vorliegende Untersuchung untermauert. Da an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen in der Abwesenheit aktiver Sicherungsanlagen die Sichtprüfung in der Verant-

wortung des Straßenverkehrsteilnehmers liegt und das maßgebliche Verhalten für die sichere Überquerung darstellt, ist dies eine beunruhigende Erkenntnis.

Das Verhalten der Untersuchungsteilnehmer bei der Überquerung des Bahnübergangs mit Lichtsignalanlage ist im Vergleich mit dem Verhalten am nicht technisch gesicherten Bahnübergang nicht gleichermaßen beunruhigend. Bei 20 von 24 Teilnehmern konnten eine oder mehr Fixationen der Lichtsignalanlage festgestellt werden. Mit einer mittleren kumulierten Fixationsdauer von 1,5 s, die von den 20 Teilnehmern aufgewendet wurde, die die Lichtanlage fixierten ist die Lichtsignalanlage das am längsten fixierte Bahnübergangsinfrastrukturelement in der Zufahrt gewesen. Bezogen auf die vier Teilnehmer, von denen die Lichtsignalanlage nicht fixiert wurde können auf Grundlage der erhobenen Daten keine fundierten Vermutungen zu den Gründen formuliert werden, warum sie dies nicht taten. Da die Lichtsignalanlage bei allen Teilnehmern während der Überquerung des Bahnübergangs inaktiv war, kann vermutet werden, dass durch die erhöhte Salienz eines gelben beziehungsweise roten Lichtsignals die Fixationswahrscheinlichkeit erhöht werden würde. Dennoch – auch angesichts des relativ hohen Anteils, den Untersuchungsteilnehmer bezüglich der Fixationen der Lichtsignalanlage zeigen – kann ein Problem entstehen, wenn die Lichtsignalanlage aktiv ist und das Lichtsignal missdeutet wird. In den Ergebnissen der in Kapitel 4 dokumentierten Befragungen war jeder zehnte Teilnehmer nicht in der Lage festzustellen, dass man an einem Bahnübergang in Gegenwart einer Rot zeigenden Lichtsignalanlage anhalten muss (vgl. Abschnitt 0).

Die Anteile der Teilnehmer, die Fixationen auf die Schilder in der Bahnübergangszufahrt zeigten waren zwischen beiden Bahnübergängen unterschiedlich (vgl. Tabelle 5). Auch in Bezug auf beide Bahnübergänge für sich betrachtet sind die Fixationshäufigkeiten eher als unsystematisch zu bezeichnen und auch unter Berücksichtigung der Fahrumgebung weitestgehend schwierig zu interpretieren. Auch die Standardabweichungen der kumulierten Fixationsdauern sind groß, so dass keine klare Systematik festzustellen ist. Beispielsweise wurde am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage von 18 Teilnehmern die Bake in 160 m Distanz zum Bahnübergang fixiert, die darauffolgende 80m-Bake lediglich von vier Teilnehmern. Dies ist möglicherweise durch die leichte Kurvenlage der auf den Bahnübergang zuführenden Straße zu erklären. Die Bake bei 160 m lag vor dem Eingang der Kurve, die Bake bei 80 m noch vor dem Ausgang der Kurve. Dies könnte dazu geführt haben, dass die Teilnehmer die 80m-Bake größtenteils nicht fixierten, da sie ihre Aufmerksamkeit stärker auf die Spurhaltung in der Kurvenfahrt gerichtet haben. Allerdings handelt es sich dabei um Annahmen, die anhand der

erhobenen Daten nicht einwandfrei beurteilt werden können. In diesem Zusammenhang ist auf die Stichprobengröße von $n = 24$ zu verweisen, die im Sinne eines systematischen Vergleichs der Blickzuwendung auf die einzelnen Schilder zwischen den beiden Bahnübergängen als klein zu beurteilen ist. Ursächlich für den geringen Stichprobenumfang war unter anderem die Tatsache, dass im Bestreben der Standardisierung elf Teilnehmer der ursprünglichen Untersuchungsstichprobe von 35 Teilnehmern von der Datenanalyse ausgeschlossen werden mussten und aus praktischen Gründen keine weiteren Datenerhebungen möglich waren.

Die Untersuchung der Fahrdaten ergab für beide überfahrene Bahnübergänge, dass eine deutliche Verlangsamung vor beiden Bahnübergängen erst im Bereich zwischen 80 m und dem Bahnübergang selbst stattfand. Diese Verlangsamung betrug am nicht technisch gesicherten Bahnübergang 10,93 km/h (von 49,55 km/h auf 38,62 km/h) und am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage 7,4 km/h (von 47,56 km/h auf 40,16 km/h). Diese Ergebnisse können bezogen auf die Gesamtstichprobe nicht eindeutig als Reaktion auf die Identifikation des Bahnübergangs interpretiert werden, da das weitere Verhalten, insbesondere das in den vorherigen Abschnitten beschriebene Blickverhalten, nicht dafür spricht, dass alle Teilnehmer sich im Klaren darüber waren, dass sie im Begriff sind einen Bahnübergang zu überqueren. Aufschlussreich waren die Kommentare zweier Versuchsteilnehmer im Nachgang der Untersuchung, die bemerkten, sie haben an den Bahnübergängen aufgrund der leichten Erhöhung der Straße und der Schienen verlangsamt, aus Sorge das Versuchsfahrzeug zu beschädigen. Der Grund der Verlangsamung wurde nicht systematisch erfragt, diese Aussagen sind dennoch ein interessanter Anhaltspunkt dafür, dass Verlangsamungen vor einem Bahnübergang nicht zwingend stattfinden, um die Möglichkeit zu verbessern vor einem Bahnübergang anhalten zu können, sondern dass der Bahnübergang möglicherweise von manchen Fahrern eher als bloßes Verkehrshindernis wahrgenommen wird denn als gefährlicher Kreuzungsbereich.

Auch die nahezu gleiche durchschnittliche Anfahrtsgeschwindigkeit auf beide Bahnübergänge spricht eher dafür, dass die festgestellte Verlangsamung nicht in Zusammenhang mit dem Verständnis des Bahnübergangs als gefährlichen Kreuzungspunkt steht. Wäre dies der Fall gewesen, wäre in der Zufahrt auf den nicht technisch gesicherten Bahnübergang, an dem der Fahrer mit seinem Fahr- und Blickverhalten in erster Linie selbst für die sichere Überquerung verantwortlich ist, eine deutlichere Verlangsamung zu erwarten als am Bahnübergang mit Lichtzeichenanlage.

Bezüglich der Verlangsamung lieferten die Post-hoc-Vergleiche des Fahrverhaltens derjenigen Teilnehmer, die in der Zufahrt eine Sichtprüfung in mindestens eine Richtung bezie-

hungsweise keine Sichtprüfung durchführten aufschlussreiche Erkenntnisse. Sowohl am nicht technisch gesicherten Bahnübergang als auch am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage konnte ein signifikanter Unterschied in der Geschwindigkeit unmittelbar vor der Überfahrt zwischen den Teilnehmern festgestellt werden, die vor der Überfahrt mindestens zu einer Seite geschaut haben und den Teilnehmern, die keine Sichtprüfung durchführten. Am nicht technisch gesicherten Bahnübergang betrug die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen diesen zwei Gruppen 8,73 km/h (Fahrer, die eine Sichtprüfung durchführten: 33,17 km/h; Fahrer, die keine Sichtprüfung durchführten: 41,9 km/h). Am Bahnübergang mit Lichtsignalanlage betrug die Differenz zwischen den Gruppen 9,96 km/h (Fahrer, die eine Sichtprüfung durchführten: 33,52 km/h; Fahrer, die keine Sichtprüfung durchführten: 43,48 km/h). Dies spricht dafür, dass die Teilnehmer, die eine angemessene Blickstrategie im Prozess der Bahnübergangsüberquerung verfolgen auch ihr Fahrverhalten in einer Art und Weise anpassen, das sie in der Lage versetzt anzuhalten, falls ein Zug herannaht. Entsprechend passten die Teilnehmer, von denen aufgrund der Datenlage zu vermuten ist, dass sie keine korrekten Skripte zur Überquerung des Bahnübergangs abrufen konnten ihre Fahrgeschwindigkeit nicht gleichermaßen an. Berechnet man den Bremsweg der Fahrer, die nicht nach einem Zug schauen exemplarisch für die Fahrer, die auf den nicht technisch gesicherten Bahnübergang zufahren ergibt sich je nach angenommener Bremsverzögerung des Fahrzeugs in etwa ein Anhalteweg von 20,67 m–22,06 m⁶. Besteht also keine angemessene Blickstrategie am Bahnübergang und wird erst jenseits der berechneten Distanzen eine Bremsung eingeleitet, wenn ein Schienenfahrzeug den Bahnübergang kreuzt ist alleine durch die Fahrzeugverzögerung ein Zusammenstoß nicht mehr zu vermeiden.

Zusammenfassend sprechen die Ergebnisse dieser Untersuchung dafür, dass die Mehrheit der Straßenverkehrsteilnehmer Kreuzungen zwischen Straße und Schiene nicht mit der notwendigen Vorsicht begegnet. Straßenverkehrsteilnehmer scheinen aus Schildern, die auf einen Bahnübergang hinweisen häufig keinen handlungsrelevanten Vorfahrtsbezug abzuleiten. Für diese Schlussfolgerung sprechen auch die Ergebnisse der in Kapitel 4 beschriebenen

⁶ In der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung § 41 (4) wird für die Zulassung von Kraftfahrzeugen eine mittlere Vollverzögerung von mindestens 5,0 m/s² vorgeschrieben (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2012). Die meisten neueren Fahrzeuge sind jedoch zu deutlich höheren Bremsverzögerungsleistungen im Stande. Jedoch wurde für die Berechnung die Annahme getroffen, dass durch Kraftfahrzeugführer nicht die volle Bremsverzögerungsmöglichkeit des Fahrzeuges ausgeschöpft wird. Daher wurden Bremsverzögerungswerte von -6,5 m/s² und -7,5 m/s² bei einer Geschwindigkeit von 41,9 km/h als Berechnungsgrundlage verwendet.

Befragung, die zudem Vorteile von Verkehrszeichen aus anderen Verkehrsbereichen nahelegen. Auf Grundlage der Erkenntnisse dieser und der in Kapitel 4 beschriebenen Ergebnisse ist in Erwägung zu ziehen, Verkehrszeichen mit Vorfahrtbezug, die im Straßenverkehr zum Einsatz kommen auch und vor allem an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen einzusetzen. Das Stoppschild beispielsweise, das bereits in einigen Ländern an Bahnübergängen zum Einsatz kommt, könnte auch an deutschen Bahnübergängen eine günstige und sinnvolle Ergänzung des Andreaskreuzes darstellen, um die Kreuzungssicherheit zu erhöhen. Sowohl die Erkenntnisse aus der in Kapitel 4 beschriebenen Befragung als auch die in Abschnitt 3.4 dargestellten Erkenntnisse aus der *Naturalistic Driving Study* von Ngamdung und daSilva (2013) unterstützen die Möglichkeit eines Einsatzes des Stoppschildes als Ergänzung des Andreaskreuzes an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen.

Abgesehen von möglichen Änderungen in der Bahnübergangsbeschilderung sollte dem Thema der Bahnübergangsüberquerung als Lehrinhalt in Fahrschulen ein stärkeres Gewicht gegeben werden, um das handlungsbezogene Wissen von Straßenverkehrsteilnehmern in der Gegenwart von Bahnübergängen zu verbessern. Die recht homogene junge Stichprobe ist einerseits kritisch in Bezug auf die Generalisierbarkeit der Ergebnisse zu erachten, weist andererseits jedoch deutlich auf Mängel in der Fahrausbildung hin: Mit einem durchschnittlichen Alter der untersuchten Stichprobe von 24,8 Jahren lag die Fahrschulzeit bei vielen Teilnehmern noch nicht sehr lange zurück, dennoch konnte bei vielen Teilnehmern ein klares Fehlverhalten in der Bahnübergangsüberquerung festgestellt werden. Weiterhin sollte nach neuen technischen Möglichkeiten gesucht werden, die Straßenverkehrsteilnehmer zu einer Blickverlagerung in die Peripherie des Bahnübergangs zu veranlassen.

Wie in vielen Feldstudien so gab es auch in dieser Studie Einschränkungen, die hier Erwähnung finden sollen. Als Vergleich der Blickzuwendung und des Fahrverhaltens in der Annäherung zweier Bahnübergänge ist der Stichprobenumfang von 24 Teilnehmern akzeptabel. Die Altersstruktur des Teilnehmerkreises war wie zuvor bemerkt jedoch recht homogen, was die Generalisierbarkeit der Ergebnisse auf diese Altersstufe eingrenzt. Ein größerer Stichprobenumfang mit einer heterogeneren Altersstruktur der Untersuchungsteilnehmer wäre für eine erhöhte Generalisierbarkeit notwendig. Daher können die beschriebenen Ergebnisse als Indiz für ein häufig nicht optimales Verhalten an Bahnübergängen gewertet, jedoch nicht auf die gesamte Population der Autofahrer in Deutschland übertragen werden.

Des Weiteren ist es in einer Fahruntersuchung im Realverkehr kaum möglich, gänzlich vergleichbare Bedingungen über alle Versuchsteilnehmer herzustellen. In dieser Untersu-

chung war beispielsweise die Witterung zwischen den Versuchsteilnehmern teilweise unterschiedlich und auch die Verkehrslage während den Fahrten war nicht immer gleich. Es wurde im Rahmen des Möglichen versucht, die Standardisierung für die Überfahrten der Bahnübergänge hoch zu halten, insbesondere wurde auf die Abwesenheit weiterer Verkehrsteilnehmer geachtet. Dies war erforderlich, um eine Vergleichbarkeit der Daten dieser Untersuchung zu gewährleisten, führte jedoch zu einem Ausschluss von fast einem Drittel der Teilnehmer der ursprünglichen Stichprobe. Dieses Vorgehen war im Sinne der Auswertung der Untersuchung notwendig, jedoch ist auch diesbezüglich mit Blick auf die Generalisierbarkeit der Ergebnisse anzumerken, dass Autofahrer nicht immer in Abwesenheit anderer Verkehrsteilnehmer auf Bahnübergänge zufahren. Allerdings ist anzunehmen, dass für solche Situationen Ergebnisse verkehrspsychologischer Untersuchungen, beispielsweise zum Kolonnenverhalten von Fahrern, auf die Situation am Bahnübergang auch unabhängig von gesonderten Situationen übertragbar sind.

Für folgende Fahruntersuchungen ist zu erwägen, unmittelbar vor den Bahnübergangsüberfahrten ein bestimmtes Manöver zu instruieren, wie zum Beispiel ein Einparken und in der Folge das Ausparken auf Kommando durchführen zu lassen. Auf diese Weise kann durch den Versuchsleiter besser überprüft werden, dass kein Fahrzeug dem Versuchsteilnehmer vorausfährt oder folgt. So könnte ein erhöhter Standardisierungsgrad sichergestellt werden, ohne dass ein großer Anteil der Versuchsteilnehmer ausgeschlossen werden muss. Abgesehen von Einschränkungen bezüglich der Stichprobe ist zu erwähnen, dass auch die Erscheinung von Bahnübergängen sehr unterschiedlich sein kann, beispielsweise bezüglich des Kreuzungswinkels, der Sichtbedingungen oder der örtlichen Lage. Die Übertragung der Ergebnisse einer Untersuchung an einem bestimmten Bahnübergang auf alle möglichen Bahnübergänge ist nicht vorbehaltlos möglich. Dennoch, allen Einschränkungen von Untersuchungen in einer Realfahrtsituation zum Trotz, beinhaltet diese Vorgehensweise im Vergleich zu Fahrstudienuntersuchungen auch wesentliche Vorteile, insbesondere die externe Validität ist höher. In der artifiziellen Umgebung des Fahrstudien sind die Untersuchungsbedingungen nicht so natürlich wie unter Realfahrbedingungen.

In Bezug auf das Ziel, eine nutzerzentrierte Gestaltungsmaßnahme zu identifizieren, mit der die Kreuzungssicherheit an Bahnübergängen zukünftig erhöht werden kann muss auf Basis der Untersuchung des Blick- und Fahrverhaltens der Tatsache Rechnung getragen werden, dass Straßenverkehrsteilnehmer zwar einzelne Elemente des Bahnübergangs wahrnehmen, daraus aber nicht die angemessenen handlungsbezogenen Schlussfolgerungen ableiten. Eine

nutzerzentrierte Maßnahme muss die Verkehrsteilnehmer effektiv dazu veranlassen, am nicht technisch gesicherten Bahnübergang nach links und rechts zu schauen. Im folgenden Kapitel werden einige bekannte Maßnahmen aus Literatur und Praxis vorgestellt und unter anderem hinsichtlich des Kriteriums der effektiven Blicklenkung beurteilt. In den darauffolgenden Kapiteln 7, 8 und 9 werden konkrete Maßnahmen dargestellt und untersucht, mit denen Wissenslücken begegnet werden können und eine verbesserte Blicklenkung an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen gewährleistet werden soll.

6 Bestehende Ansätze zur nutzerzentrierten Erhöhung der Sicherheit an Bahnübergängen

Das erklärte Ziel von Verkehrsunternehmen, Bahnübergänge zu schließen, zu untertunneln oder zu überbrücken ist zu begrüßen, da dies die wirksamste Methode ist, um Unfälle an Bahnübergängen zu vermeiden. Allerdings sind den Möglichkeiten des Rückbaus und der Aufwertung von Bahnübergangssicherungen Grenzen gesetzt. Insbesondere aufgrund der hohen Kosten ist es kaum möglich, alle Bahnübergänge zu schließen oder mit den gängigen technischen Sicherungssystemen aufzuwerten. Daher wurden in Forschung und Bahnpraxis unterschiedliche Ideen zu Maßnahmen entwickelt, mit denen die Überquerung von Bahnübergängen, die nicht geschlossen werden können, auf alternative Weise sicherer gestaltet werden kann.

Zur Beurteilung von Maßnahmen legen die Ergebnisse der Untersuchungen der vorherigen Kapitel nahe, dass eine effektive Maßnahme zum einen dem häufig mangelhaften Wissen von Straßenverkehrsteilnehmern Rechnung tragen muss und zum anderen Straßenverkehrsteilnehmer dazu bewegen sollte, an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen vor der Überquerung eine Sichtprüfung durchzuführen. Die festgestellten Mängel im Blickverhalten sind vor allem an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen problematisch. Im folgenden theoretischen Kapitel liegt der Fokus daher auf der Darstellung bestehender Ideen und Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit für nicht technisch gesicherte Bahnübergänge.

Die vorgestellten Maßnahmen zur Sicherheitserhöhung werden in Unterabschnitten entsprechend ihrer Wirkweise nach den in Abschnitt 3.1 beschriebenen zu durchlaufenden kognitiven Teilschritten in der Bahnübergangszufahrt untergliedert. Zunächst werden unter dem Überbegriff der Wahrnehmbarkeit Maßnahmen dargestellt, die Detektion und Informationsverarbeitung verbessern sollen, danach werden Maßnahmen beschrieben, die einen Bezug zum Wissensabruf haben und anschließend werden Ansätze zur Erhöhung der Sicherheit eingeführt, die auf die Handlungsintention und die Handlungsausführung wirken.

6.1 Maßnahmen zur Verbesserung der Wahrnehmbarkeit von Bahnübergängen

Zur Wahrnehmbarkeit eines Bahnübergangs sowie des herannahenden Zuges ist zunächst sicherzustellen, dass alle nicht technischen und/oder technischen Sicherungselemente des Bahnübergangs objektiv sichtbar sind. Dafür ist insbesondere auf das regelmäßige Zu-

rückschneiden von Pflanzen im unmittelbaren Umfeld des Bahnübergangs zu achten. Pflanzen sollten weder Sicherungselemente noch Sichtflächen vor dem Bahnübergang verdecken. Während diese Maßnahme eher als Instandhaltungsmaßnahme des Bahnübergangs zu betrachten ist, die keinen besonderen Innovationsgehalt besitzt gibt es weitere Maßnahmen zur Verbesserung der Wahrnehmbarkeit des Bahnübergangs, die gegenwärtig noch nicht flächendeckend eingesetzt werden.

Sollte die Freihaltung des Sichtdreiecks an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang nicht umsetzbar sein, besteht eine denkbare Möglichkeit, gerade im Bereich von Fußgängerüberwegen, im Einsatz von Spiegeln. Konvexe Spiegel können links und rechts des Weges am Bahnübergang derart platziert werden, dass auch bei schlechter Einsehbarkeit feststellbar ist, ob ein Schienenfahrzeug herannaht (Rail Safety and Standards Board (RSSB), 2015). Diese Spiegel scheinen vor allem an Fußgängerbahnübergängen eine geeignete Möglichkeit zur Unterstützung der Sichtprüfung zu sein. An nicht technisch gesicherten Bahnübergängen, die von Autofahrern befahren werden kann aufgrund der Fahrgeschwindigkeit nicht von einer ausreichenden Zeit für eine Sichtprüfung durch einen Blick in einen Verkehrsspiegel ausgegangen werden.

Die Umgestaltung des Fahrbahnuntergrundes durch Signalfarben oder mit Mustern stellt eine häufig empfohlene Maßnahme zur Veränderung der Infrastruktur in der Zufahrt auf den Bahnübergang dar. Indem der Gefahrenraum oder die zuführende Straße deutlich in ihrer Erscheinung verändert wird, soll beim Verkehrsteilnehmer das Bewusstsein erweckt werden, dass er sich in einer besonderen Verkehrssituation befindet, nämlich in der Zufahrt auf einen Bahnübergang. Das britische Rail Safety and Standards Board (RSSB) schlägt in diesem Zusammenhang vor, die Fahrbahnoberfläche in der Zufahrt auf den Bahnübergang und auf dem Bahnübergang mit einem grobmaschigen gelben Muster zu versehen (Rail Safety and Standards Board (RSSB), 2015). Dieser Vorschlag wird auch von Salmon et al. (2015) aufgegriffen, die ergänzend zum rautenförmigen Design im Gefahrenraum horizontale Markierungslinien in regelmäßigen Abständen auf der Fahrbahn in der Zufahrt auf den Bahnübergang vorschlagen, ergänzt durch die Aufschrift *RAIL*. Die horizontalen Linien auf der Straße in Richtung der Zufahrt auf den Bahnübergang wurden zuvor auch von Cale, Gellert, Katz & Sommer (2013) beschrieben, von denen die einzigen belastbaren Ergebnisse einer verkehrspsychologischen Untersuchung zu besonderen Fahrbahnmarkierungen vor und an Bahnübergängen stammen. In einer Fahrsimulatorstudie untersuchten Cale et al. (2013) neben den parallelen Linien zwei weitere Gestaltungsmaßnahmen der Fahrbahn, darunter die Darstellung

der gesamten auf den Bahnübergang zuführenden Straßendeckschicht in Blau sowie Markierungen entlang der auf den Bahnübergang zuführenden Straße, die eine trichterförmige Verengung der Fahrbahn suggerieren. Es wurden keine Ergebnisse zum Blickverhalten berichtet, allerdings konnte festgestellt werden, dass die Fahrer im Versuch ihre Geschwindigkeit beim Einsatz aller drei Maßnahmen um 5-10 km/h im Vergleich zu einer Kontrollgruppe verringerten (Cale et al., 2013). Dies wurde unter anderem mit dem erhöhten optischen Fließen im Fall der parallelen Linien begründet, die neben der Wahrnehmung einer besonderen Verkehrssituation auch eine Illusion einer erhöhten Fahrgeschwindigkeit erzielen können. In Bezug auf die Variation der farblichen Gestaltung des Fahrbahnuntergrundes gibt es keine Erkenntnisse hinsichtlich der Wirkung auf die Blickzuwendung in die peripheren Bereiche. Die ermittelte Möglichkeit, auf diese Weise die Geschwindigkeit zu verringern ist als positiv zu beurteilen. Unklar ist, ob der Verlangsamungseffekt bei einem längerfristigen Einsatz anhält.

Neben der Gestaltung des Bereichs um den Bahnübergang mit Farben und Mustern schlagen andere Autoren vor, rot oder gelb leuchtende LED-Einheiten in der Deckschicht der Straße zu verbauen, sogenannte *Lanelights*, um bei Straßenverkehrsteilnehmern die Wahrnehmung des Bahnübergangs und der kreuzenden Schienen zu unterstützen. LED-Einheiten, die parallel zur Schiene in der Straße eingelassen sind und aufleuchten, wenn ein Zug herannaht sollen Verkehrsteilnehmer zu erhöhter Vorsicht veranlassen, indem sie eine visuelle Barriere vor dem Bahnübergang erzeugen und das Bewusstsein des kreuzenden Verkehrs schärfen (Aigner-Breuss et al., 2011; SWARCO AG, 2017). Zu keiner Form von Lanelights sind im Bahnübergangskontext bislang publizierte empirische Forschungsarbeiten bekannt. Es ist anzunehmen, dass der Lichtreiz in der Lage ist, die Aufmerksamkeit der Straßenverkehrsteilnehmer auf sich zu ziehen, da er in der Umgebung eines Bahnübergangs potentiell sehr salient sein kann. Es ist denkbar, dass dies vor allem zu einer Verlangsamung führen könnte durch die Wirkung als optische Barriere, die ein rotes Lichtband auf der Straße darstellen könnte. Inwiefern Lanelights in dieser Anordnung Fahrer dazu bewegen, nach links und rechts zu schauen ist zu hinterfragen und wäre zu untersuchen. Ein Aspekt der im Einsatz von Lanelights beachtet werden muss, ist dass sie durch einen Sensor auf Schienenseite ausgelöst werden. Dies nimmt den Netzbetreiber in die Pflicht, die verlässliche Auslösung sicherzustellen und stellt damit einen nicht zu unterschätzenden Kostenfaktor dar. Dies könnte einer flächendeckenden Ausrüstung im Wege stehen.

Neben einer auffälligeren Gestaltung der Straßendeckschicht ist es möglich, die Salienz der nicht technischen und technischen Bahnübergangsinfrastruktur zu erhöhen. Es wird

vorgeschlagen, insbesondere zur besseren visuellen Wahrnehmbarkeit bei Dunkelheit, die Masten, an denen bahnübergangsbezogene Schilder montiert sind mit reflektierenden Materialien zu ummanteln (National Transportation Safety Board (NTSB), 1998). Einem ähnlichen Gedanken folgt der Ansatz, in Schrankenbäume LED zu integrieren, die es Straßenverkehrsteilnehmer leichter machen sollen, bereits aus großer Distanz die Schrankenposition erkennen zu können (Rail Safety and Standards Board (RSSB), 2015). In Finnland wurde als zusätzlicher salienter Reiz ein gelbes Blinklicht als Warnung entwickelt, das einen Zug zeigt und unmittelbar vor nicht technisch gesicherten Bahnübergängen eingesetzt werden kann. Es wird gegenwärtig in Feldversuchen technisch erprobt (Kantamaa, 2017). In nicht näher beschriebenen Nutzerbefragungen wurde das System angeblich durch Verkehrsteilnehmer positiv beurteilt (Kantamaa, 2017). Es ist kritisch anzumerken, dass der Innovationsgehalt dieses Systems im Vergleich mit einer regulären Bahnübergangssicherungsanlage mit Blinklicht nicht groß ist, was für die Anschaffungskosten und die Instandhaltung vermutlich ebenfalls gilt. Zudem ist wie im Falle der Lanelights zu hinterfragen, ob das System eine Sichtprüfung der peripheren Bahnübergangsbereich unterstützt, was vor dem Hintergrund der in Kapitel 5 beschriebenen Ergebnisse von zentraler Bedeutung ist.

Neben der Ergänzung eines gesonderten Warnlichts schlagen einige Autoren vor, die bestehenden Schilder in der Zufahrt auf Bahnübergänge mit Leuchtquellen zu versehen, um ihre Sichtbarkeit zu erhöhen. Wullems (2011) erwägt unter ökonomischen und eisenbahnbetrieblichen Gesichtspunkten den Einsatz illuminierten Vorwarnzeichen für den australischen Eisenbahnverkehr und stellt unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten dar. Tey, Ferreira und Dia (2009) beschreiben in diesem Zusammenhang unter anderem das sogenannte *O'Connor System*, das die Umrahmung der australische Variante des Andreaskreuzes mit LED vorsieht. Diese LED sollen aufleuchten, wenn ein Schienenfahrzeug einen solarbetriebenen Radsensor in einer Distanz von drei Kilometern vor dem Bahnübergang befährt. Damit soll die visuelle Aufmerksamkeit der Straßenverkehrsteilnehmer auf das Schild gezogen werden. Angesichts der gewonnenen Erkenntnisse zu Wissensmängeln bezüglich des Andreaskreuzes ist in diesem Zusammenhang jedoch nicht davon auszugehen, dass die Illumination eines Verkehrszeichens, das von vielen Verkehrsteilnehmern nicht verstanden wird der Faktor ist, der sie zu einer Sichtprüfung der Bahnübergangspanapherien bewegt (vgl. Kapitel 4 und 5).

Noyce und Fambro (1998) untersuchten die Wirksamkeit der Installation von stroboskopartigen pulsierenden Lichtern in unmittelbarer räumlicher Verbindung mit einem gelb-schwarzen Zusatzschild in den USA. Dieses Zusatzschild trägt die Aufschrift *Look for train at crossing* (Schau an der Kreuzung nach dem Zug) in Kombination mit einem horizontal angeordneten Doppelpfeil an einem Bahnübergang. Sie konnten einen geringfügigen verlangsamenden Effekt der Maßnahme auf die Geschwindigkeitswahl der motorisierten Verkehrsteilnehmer in der Bahnübergangsannäherung nachweisen. Es wird durch die Autoren jedoch kein Bezug auf das Blickverhalten auf Seiten der Straßenverkehrsteilnehmer genommen.

Alternativ zu Schildern, die auf den Bahnübergang hinweisen oder Maßnahmen zur Erhöhung der Salienz der Bahnübergangsinfrastruktur schlagen verschiedene Autoren vor, die Salienz der Schienenfahrzeuge zu erhöhen, da sie als zentrale Gefährdungsquellen der wichtigste Zielreiz der visuellen Wahrnehmung der Straßenverkehrsteilnehmer sind. Eine gute Sichtbarkeit des Schienenfahrzeugs kann neben der Einhaltung ausreichender Sichtdreiecke in der Bahnübergangszufahrt auch durch fahrzeugeigene Charakteristika begünstigt werden, wie Farbgebung und Scheinwerfergestaltung.

Caroll, Multer und Markos (1995) beschreiben eine Untersuchung von Maßnahmen zur Erhöhung der Sichtbarkeit von Schienenfahrzeugen in der Annäherung an Bahnübergänge. Hauptgegenstand der Untersuchung waren verschiedene Arten von Warnlichtern, die am Schienenfahrzeug angebracht wurden und die für eine frühzeitige Detektierbarkeit sorgen sollen. Diese Systeme wurden den regulären Frontscheinwerfern an Triebfahrzeugen gegenübergestellt. Drei Warnlichtsysteme wurden ergänzend zu den Frontscheinwerfern am Triebfahrzeug angebracht und untersucht. Das *Kreuzungslicht (crossing light)* ist ein Scheinwerfertyp, der während der Annäherung des Schienenfahrzeuges an den Bahnübergang blinkt. Neben diesem System wurde ein *Fernlichtsystem (ditch light)* untersucht, das in der Annäherung an Bahnübergänge die Aufmerksamkeit der Straßenverkehrsteilnehmer durch einen lichtstarken Scheinwerfer im Dauerleuchtbetrieb erhöhen soll. Das dritte untersuchte System bestand aus *Stroboskoplichtern (strobe lights)*, reinweiße, lichtstarke und hochfrequent pulsierende Lichtquellen am Triebfahrzeug.

Alle drei untersuchten Systeme verbesserten die Detektierbarkeit des Zuges im Vergleich zu einer Kontrollbedingung, in der nur die Standardfrontscheinwerfer verwendet wurden sowohl bei Tag als auch bei Nacht. Insgesamt wurde das Kreuzungslicht in Kombination mit den Standardscheinwerfern als effektivste zusätzliche Leuchteinrichtung

beurteilt. Aufgrund der Untersuchungsmethoden sind die Ergebnisse nur eingeschränkt auf den regulären Verkehr am Bahnübergang übertragbar. Die Versuchsteilnehmer wussten, dass ein Zug als Zielstimulus herannahen würde, den sie detektieren müssen und waren dementsprechend vorbereitet. Zudem bewegten sich die Versuchsteilnehmer nicht dynamisch auf den Bahnübergang zu, beispielsweise als Fahrer eines PKW, sondern wurden stationär in einiger Distanz zum Bahnübergang auf einem Stuhl sitzend positioniert. Um die straßenverkehrsbezogenen Aufmerksamkeitsanforderungen an Autofahrer nachzuempfinden, mussten die Versuchsteilnehmer während der gesamten Versuchsdauer eine computergestützte Monitoringaufgabe durchführen. Das Kreuzungslicht wurde im Nachgang der Studie in den Testbetrieb dreier US-amerikanischer Bahnbetreiber überführt. Im Testbetrieb konnte nach Angabe der Autoren eine Verringerung der Anzahl an Bahnübergangsunfällen festgestellt werden. Carroll et al. (1995) verweisen in diesem Zusammenhang allerdings darauf, dass dieses Ergebnis aus dem Testbetrieb aufgrund der begrenzten Datenmenge mit Vorsicht zu betrachten sei.

Auch Cairney (2005) schlägt in seinem Sicherheitsbericht mit der Verwendung von Stroboskobluchtern an Schienenfahrzeugen einen vergleichbaren Ansatz vor. Um die Sichtbarkeit bei Tag zu erhöhen, wird die Verwendung von farbigem Licht anstelle rein weißer Lichtquellen empfohlen. Auch zusätzliche Lichtquellen seitlich am Schienenfahrzeug beschreibt Cairney (2005) als sinnvolle Maßnahme. Zudem werden reflektierende Materialien diskutiert, aber für nicht so sinnvoll wie zusätzliche Lichtquellen befunden, da die meisten Reflektoren nur zu einer erhöhten Sichtbarkeit führen, wenn der Lichtkegel eines Fahrzeugs relativ frontal auf das reflektierende Material fällt, was erst der Fall ist, wenn sich das Schienenfahrzeug vor einem Auto befindet.

Einen verwandten Ansatz zur Erhöhung der Sichtbarkeit von Güterzügen beschreiben Malzacher, Krüger, Winter und Wojtaszek (2017). In ihrer Designstudie zum Güterzug der Zukunft, dem *Next Generation Train (NGT) - Cargo* haben sie als Gestaltungselement einen LED-Streifen vorgesehen, der seitlich entlang des gesamten Zuges verlaufen soll und ihn so auch von der Seite besser sichtbar machen soll (Malzacher et al., 2017). Das US-amerikanische Verkehrsministerium (2008) verweist auf positive Befunde aus nicht näher beschriebenen Feldversuchen die zeigen, dass Warnlichter und reflektierende Markierungen an Schienenfahrzeugen effektive Maßnahmen zur Sicherheitserhöhung seien (U.S. Department of Transportation, 2008). Auch wenn die Evidenz zu zusätzlichen Lichtquellen an Zügen mangels systematischer Untersuchungen bislang nicht ausreichend ist, erscheinen diese

Maßnahmen zur Sicherheitserhöhung zusammenfassend plausibel und prinzipiell empfehlenswert.

Neben der Erhöhung der Sichtbarkeit eines Schienenfahrzeugs kann auch die Verbesserung seiner Hörbarkeit eine frühzeitigere Wahrnehmung ermöglichen. Pfeifsignale der Schienenfahrzeuge werden bislang an bestimmten nicht technisch gesicherten Bahnübergängen eingesetzt, um Straßenverkehrsteilnehmer zu warnen. Weiterhin werden an technisch gesicherten Bahnübergängen zum Teil ergänzende Lätwerke eingesetzt, die den Verschluss ankündigen. Eine vorgeschlagene Variation ist der Einsatz ortsfester akustischer Warnungen in Form von Pfeiftönen unmittelbar an Bahnübergängen, die aus der Entfernung aktiviert werden (Roop, 2000). Da das Pfeifen von Schienenfahrzeugen sehr laut sein muss, um schon aus der Entfernung Straßenverkehrsteilnehmer in gut schallisolierten Fahrzeugen zu warnen, ist diese Art der Warnung häufig störend für Anwohner von Bahnstrecken. Durch ortsfeste Signalgeber sollen einerseits diese Störung verhindert und andererseits schalldämpfende Effekte der Umgebung vermieden werden, durch die die akustische Wahrnehmbarkeit der Pfeifsignale von Schienenfahrzeugen für Straßenverkehrsteilnehmer eingeschränkt werden kann. Getestet wurde das System bislang an einem Bahnübergang mit Vollschranken (Roop, 2000). Unter Einsatz der ortsfesten Signalgeber konnte eine Verringerung des Anteils der Straßenverkehrsteilnehmer festgestellt werden, die den Bahnübergang noch schnell überquerten, während sich die Schranken bereits im Verschlussvorgang befanden, als in der Kontrollbedingung ohne das System. Bei geschlossenen Schranken wurde unter Verwendung des Systems keine Verringerung gezielter Verstöße festgestellt. Interessanter als das Verhalten an Bahnübergängen mit technischen Sicherungssystemem wäre die Wirkung von ortsfesten Pfeifsystemen an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen, da die Aufmerksamkeitserhöhung an diesen Bahnübergängen eher erforderlich erscheint. Kritisch zu hinterfragen ist, ob durch ortsfeste akustische Warnungen ein Richtungsbezug vermittelt werden kann, der Straßenverkehrsteilnehmer zu einer Sichtprüfung der peripheren Bahnübergangsbereiche links und rechts veranlasst.

Nachrichten und Warnungen, die dem Fahrer akustisch und über Piktogramme oder Schrift im Fahrzeuginneren dargeboten werden, sind als Teil des Trends der zunehmenden Digitalisierung des Straßenverkehrs eine populäre Maßnahme zur Unterstützung der Detektion von Bahnübergängen, die vielerorts erprobt wurde (Öörni, 2014; Singh et al., 2012; Tey, Ferreira & Dia, 2009). Nutzern wird durch diese Systeme eine visuelle oder akustische Warnung dargeboten, wenn sie sich einem Bahnübergang annähern, je nach System entweder

bei jeder Bahnübergangsannäherung oder nur im Falle eines herannahenden Schienenfahrzeugs.

Neben speziellen Empfangsgeräten und Kommunikationsschnittstellen in Fahrzeugen bieten auch Smartphones eine Möglichkeit, um Warnmeldungen zur Verbesserung der Detektion von Bahnübergängen darzubieten (Larue et al., 2015). Larue et al. (2015) beschreiben auf Grundlage einer Fahrsimulatorstudie positive Effekte smartphonebasierter Bahnübergangswarnungen, die aufgrund eines mangelhaften experimentellen Designs jedoch nicht belastbar erscheinen. Generell ist eine Einschränkung bei Apps oder fahrzeugeigenen Systemen, die Fahrer auf einen Bahnübergang aufmerksam machen sollen, dass nur Personen davon profitieren können, die ein geeignetes Empfangsgerät besitzen und die Software installiert haben. Damit werden durch derartige Maßnahmen nicht alle Personen erreicht, die einen Bahnübergang überqueren.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass zahlreiche Ansätze bestehen, um die Detektion von Bahnübergängen und Schienenfahrzeugen zu verbessern. Diese Maßnahmen bestehen in Variationen der Umgebung oder der Infrastrukturelemente, der Erhöhung der Salienz von Bahnübergängen und Schienenfahrzeugen, verschiedenen optischen oder akustischen Warnsignalen oder beschreiben den Einsatz moderner Kommunikationstechnik zur frühzeitigen Wahrnehmung eines Bahnübergangs. Viele der in diesem Abschnitt beschriebenen Maßnahmen erscheinen plausibel und im Verhältnis zu gängiger Sicherheitstechnik potentiell kostengünstig. Die meisten wurden allerdings nicht ausreichend empirisch untersucht. Auch eine Blicklenkung in periphere Bahnübergangsregionen wird von vielen Maßnahmen nicht ausreichend bewirkt. Die einzige Maßnahme, die potentiell dazu führen würde, dass Fahrer ihre Aufmerksamkeit trotz eines Wissensmangels zu Bahnübergängen in die peripheren Bahnübergangsbereiche richten würden, besteht in der Anbringung zusätzlicher Leuchteinrichtungen an der Front und der Seite von Schienenfahrzeugen.

6.2 Maßnahmen zur Vermittlung des Wissens zu richtigen

Verhaltensweisen an Bahnübergängen

Ein Andreaskreuz zu sehen, das Pfeifen eines Zuges zu hören, festzustellen, dass ein rotes Blinklicht leuchtet oder eine Schranke sich senkt sind notwendige, jedoch keine hinreichenden Voraussetzungen, um sich an Bahnübergängen sicher zu verhalten. Für ein sicheres Verhalten müssen nach der Wahrnehmung des Bahnübergangs prozedurale Abfolgen von Schemata, sogenannte Skripte (Tomkins, 1987), zum angemessenen Verhalten an Bahnüber-

gängen abgerufen werden. Das notwendige Wissen zu bahnübergangsbezogenen Symbolen und Verhaltensweisen können Straßenverkehrsteilnehmer sich auf unterschiedliche Weisen aneignen beziehungsweise sich in der Vergangenheit angeeignet haben. Die Verkehrserziehung im Elternhaus, der Schulunterricht, eigene Beobachtungen im Verkehrsalltag oder Fahrerschulinhalt in der Führerscheinvorbereitung sind Beispiele für Möglichkeiten, wie Wissen zu Bahnübergängen vermittelt werden kann. Sind angemessene Schemata und Skripte im Langzeitgedächtnis eines Straßenverkehrsteilnehmers vorhanden und abrufbar, ist eine wesentliche Voraussetzung erfüllt, um einen Bahnübergang sicher überqueren zu können. Sind diese Wissensstrukturen nicht vorhanden, unvollständig, fehlerhaft oder wurden sie vergessen, ist das Risiko erhöht, dass ein Straßenverkehrsteilnehmer sich am Bahnübergang falsch verhält und dadurch in Gefahr gerät.

Um Verkehrsteilnehmer regelmäßig an die richtigen Verhaltensweisen bei der Überquerung von Bahnübergängen zu erinnern und auf Gefahren von Fehlverhalten hinzuweisen, gibt es zahlreiche Kampagnen. In Europa setzt sich die UIC mit einem speziellen Tag, dem *International Level Crossing Awareness Day* (ILCAD) dafür ein, dass unter den Bürgern der teilnehmenden Länder ein stärkeres Bewusstsein für die spezielle Verkehrssituation am Bahnübergang geschaffen wird (UIC – International Union of Railways, 2017). Im Rahmen von ILCAD gibt es Plakataktionen und Werbevideos, mit denen in unterschiedlichen Medien Sicherheitsbotschaften verbreitet werden sowie zielgruppenspezifische Aktivitäten, wie zum Beispiel Programme für Kinder und Schulklassen. Das amerikanische Äquivalent zu ILCAD nennt sich *Operation Lifesaver* und ist eine Organisation, in deren Namen zahlreiche Kampagnen und Aktionen in den USA und Kanada mit Slogans wie *See Tracks? Think Train!* (Siehst Du Schienen? Denk an den Zug!) durchgeführt werden (Operation Lifesaver, Inc., 2017).

Auch in Deutschland werden mit der Kampagne *Geblickt? Sicher drüber!* in verschiedenen Medien Lernbotschaften zu Bahnübergängen verbreitet (Deutsche Bahn AG, 2017). Weitere Beispiele für die Wissensvermittlung über Sicherheitskampagnen zu Bahnübergängen finden sich in großer Zahl in nahezu allen Ländern, in denen es Schienenverkehr gibt. Wenngleich der Versuch, mit Bahnübergangskampagnen ein Sicherheitsbewusstsein unter Straßenverkehrsteilnehmern zu schaffen generell zu begrüßen ist, ist die Wirksamkeit solcher Kampagnen nur schwer zu quantifizieren. Grundsätzlich ist anzunehmen, dass eine Kampagne regelmäßig durchgeführt werden muss, damit vermittelte Schemata und Skripte von den Adressaten nachhaltig erinnert werden.

Eine mögliche Alternative zu Kampagnen besteht darin, einen Bahnübergang derart zu gestalten, dass Straßenverkehrsteilnehmer auf vorhandene und verfestigte Skripte aus anderen Straßenverkehrskontexten zurückgreifen können. So scheint es aufgrund der Erkenntnisse der in Kapitel 4 durchgeführten Befragung wie auch aufgrund positiver Befunde in der Fachliteratur (Ngamdung & daSilva, 2013; Schöne & Buder, 2011) denkbar und sinnvoll, das Stoppschild als bekanntes und durch die Aufschrift stark selbsterklärendes Verkehrszeichen als Ergänzung zum Andreaskreuz einzusetzen. Auch der Einsatz der dreifarbigen Lichtsignalanlage inklusive Grünlicht an Bahnübergängen wäre ein Rückgriff auf verfestigte Wissensstrukturen aus anderen Verkehrsbereichen. Auf diese Weise könnte der Abruf des angemessenen Verhaltens verglichen mit den an Bahnübergängen gebräuchlichen Lichtsignalanlagen, die in anderen Verkehrskontexten nicht gebräuchlich sind erleichtert werden (Grippenkoven, 2017; Lenné et al., 2011).

Eine wissensbezogene Sicherheitsmaßnahme, die in England Anwendung findet besteht in der Ansteuerung einer roten Leuchte, die in einem Schild eingelassen ist, das den Straßenverkehrsteilnehmer schriftlich am Bahnübergang darauf hinweist, dass der Bahnübergang bei rotem Licht nicht zu überqueren ist (Rail Safety and Standards Board (RSSB), 2015). Durch die Aufschrift *STOP Look Listen* (Halte an, schaue, höre), werden zudem verhaltensbezogene Botschaften vermittelt, die dem Aufbau oder der Verfestigung grundlegender Skripte zum korrekten Verhalten an Bahnübergängen dienen können. Das erleuchtende rote Licht dient im Rahmen dieser Maßnahme neben seiner Funktion als Kontrollleuchte zudem der Erhöhung der Salienz. Dadurch wirkt diese Maßnahme bezogen auf den Prozess der Informationsverarbeitung neben der Unterstützung des Wissensabrufes auch durch die Erhöhung der Detekti-onswahrscheinlichkeit, ähnlich wie die im letzten Abschnitt 6.1 beschriebenen Maßnahmen.

Aufbauend auf den Maßnahmen zur Verbesserung der Wahrnehmbarkeit von Bahnübergängen, die in Abschnitt 6.1 dargestellt sind, wurden in diesem Unterkapitel Ansätze aus der Fachliteratur und Praxis präsentiert, mit denen der Wissensabruf als wichtiger Teilschritt in der Informationsverarbeitungskette während der Zufahrt auf den Bahnübergang unterstützt werden kann. Am weitesten verbreitet sind in diesem Zusammenhang edukative Kampagnen. Auch konkrete Handlungsanweisungen auf Schildern oder Plakaten in der Zufahrt auf einen Bahnübergang können den Verkehrsteilnehmer potentiell dabei unterstützen, Skripte und Schemata zum angemessenen Verhalten abzurufen oder Wissensstrukturen anzupassen, die nicht vorhanden, unvollständig oder fehlerhaft sind. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung, eine effektive nutzerzentrierte Maßnahme zu untersuchen, die auf kostengünstige Weise die

Sicherheit an Bahnübergängen erhöhen kann, ist unter den vorgestellten Maßnahmen das Stoppschild als Ergänzung zum Andreaskreuz eine der vielversprechendsten Maßnahmen, die weiterverfolgt werden sollte.

6.3 Maßnahmen zur Einflussnahme auf die Handlungsintention im Kontext von Bahnübergängen

Zwischen dem abgerufenen Wissen in Form von Schemata und Skripten und der motorischen Handlungsausführung steht in der Kette der Informationsverarbeitung die Handlungsintention. Im Kontext des Bahnübergangs muss der Straßenverkehrsteilnehmer die Motivation haben, die angemessenen Handlungen auszuführen. Ein Fahrer muss nicht nur wissen, dass er vor einer Rot zeigenden Lichtsignalanlage an einem Bahnübergang anhalten muss, er muss es auch wollen. Insbesondere die entstehende Wartezeit an geschlossenen Bahnübergängen kann bei manchen Straßenverkehrsteilnehmern zu unangemessenen Handlungsintentionen führen, nämlich der Absicht einen Verstoß zu begehen und beispielsweise das Rotlicht absichtlich zu ignorieren oder geschlossene Halbschranken zu umfahren, um auf diese Weise Zeit zu sparen.

An nicht technisch gesicherten Bahnübergängen, an denen der aufmerksam prüfende Blick nach links und rechts höchste Priorität für die sichere Bahnübergangsüberquerung hat, ist es denkbar, dass Autofahrer sich beispielsweise aus Komfortgründen dagegen entscheiden, eine Drehung des Kopfes vorzunehmen, da sie je nach Sichtbedingungen und körperlicher Konstitution möglicherweise unkomfortabel sein kann. Somit sind Fehler im Informationsverarbeitungsschritt der Handlungsintention unter der Bedingung, dass zuvor das richtige Skript abgerufen wurde, als bewusste Verstöße gegen das angemessene Verhalten zu klassifizieren. Maßnahmen, die auf die Beeinflussung der Handlungsintention zielen, müssen dementsprechend Motivatoren beinhalten, die stärker sind als die intentionalen Aspekte, die Verkehrsteilnehmer zu einem Verstoß verleiten.

Ein lerntheoretischer Ansatz, um Verkehrsteilnehmer dazu zu bewegen, keine Verstöße zu begehen besteht in der konsequenten Bestrafung von Verstößen. Auch im Verkehrskontext von Bahnübergängen wird die Strafverfolgung von Verkehrssündern von vielen Experten als geeignetes Mittel zur Verringerung der Anzahl an Verstößen erachtet. Dafür können beispielsweise die unter dem Begriff *Blitzer* bekannten Rotlichtüberwachungsanlagen eingesetzt werden (Aigner-Breuss et al., 2013; Naish & Blais, 2014; Rail Safety and Standards Board (RSSB), 2015) oder auch Kamerasysteme, die eine kontinuierliche Überwachung des Ver-

kehrsteilnehmerverhaltens an Bahnübergängen ermöglichen (Rail Safety and Standards Board (RSSB), 2015).

Die Wirksamkeit der Rotlichtüberwachung wurde wiederholt in Veröffentlichungen statistisch belegt. Naish und Blais (2014) berichten von Untersuchungen, in denen sich die Häufigkeit von Rotlichtverstößen nach Einführung der Rotlichtüberwachung in Kanada um 50 % – 69 % verringert hat. Aigner-Breuss et al. (2013) beziehen sich auf die Übersichtsstudie von Saccomanno, Young und Fu (2007), nach der die Implementierung einer Rotlichtüberwachung an Bahnübergängen die Häufigkeit von Verstößen um bis zu 75 % reduzieren kann. Trotz der Wirksamkeit ist die Einsatzmöglichkeit von Rotlichtüberwachungssystemen eingeschränkt und teuer. Sie kommt nahezu ausschließlich im Kontext technisch gesicherter Bahnübergänge in Frage und wurde in der Vergangenheit zudem aufgrund des damit verbundenen administrativen Aufwandes als nicht besonders attraktiv beurteilt (Seehafer, 1997).

Für die Zufahrt auf den Bahnübergang werden zudem Rüttelschwellen oder Aufpflasterungen empfohlen, die motorisierte Verkehrsteilnehmer dazu motivieren sollen, ihr Verhalten in der Zufahrt auf den Bahnübergang anzupassen (Aigner-Breuss, et al., 2013). Rüttelschwellen oder Aufpflasterungen wirken auch auf die Handlungsausführung, motivieren Fahrer jedoch vor allem zur Verlangsamung in der Bahnübergangszufahrt, um Stöße und starke Vibrationen zu vermeiden (Aigner-Breuss et al., 2013). Eine verlangsamte Fahrt ermöglicht dem Fahrer wiederum eine längere Orientierung und Suche nach einem Zug und hat einen kürzeren Bremsweg zur Folge, falls ein herannahendes Schienenfahrzeug detektiert wird.

Eine ähnliche Wirkung geht von Rüttelstreifen aus, die durch Fräsungen in der Fahrbahnoberfläche oder Fahrbahnmarkierungen Vibrationen und Geräusche im Fahrzeuginneren erzeugen (Dinhobl, 2017; Koschutnig & Dinhobl, 2017; Radalj & Kidd, 2005; Tey, Wallis, Cloete & Ferreira, 2013). Rüttelstreifen erfordern nicht zwingend eine Verlangsamung, motivieren aber dennoch dazu, um Vibrationen und Geräuschpegel zu reduzieren. In einer österreichischen Felduntersuchung zu Rüttelstreifen konnten signifikante Verlangsamungen motorisierter Verkehrsteilnehmer im Bereich von 5–12 km/h in der Zufahrt auf einen nicht technisch gesicherten Bahnübergang festgestellt werden (Dinhobl, 2017). Radalj und Kidd (2005) schlussfolgern in Bezug auf Rüttelstreifen, dass ihr Effekt auf die Geschwindigkeitsverringerung stark von ihrer Anzahl und Position in der Zufahrt auf den Bahnübergang zusammenhängt: Je mehr Rüttelstreifen in die Straße integriert werden, desto

stärker sei der zu erwartende Effekt. Diese Schlussfolgerung ist mit Vorsicht zu betrachten, da sie nicht bewiesen ist und zu bezweifeln ist, dass mehr Rüttelstreifen zwingend zu einem sichereren Verhalten führen.

Tey et al. (2013) schlussfolgern aus den Ergebnissen ihrer Simulatoruntersuchung, dass Rüttelstreifen keine effektive Maßnahme sind, um Straßenverkehrsteilnehmer zu einem angemessenen Verhalten an Bahnübergängen zu bewegen. Sie sehen Rüttelstreifen eher als mögliche zusätzliche Maßnahme zu anderen Sicherungsarten und betonen die potentielle Nützlichkeit ihrer aufmerksamkeitssteigernden Wirkung für monotone Fahrstrecken in Australien, auf denen die Ermüdung des Fahrers ein Risiko für seine Aufmerksamkeit darstellen kann. Schlag, Fischer und Rößger (2004) bezweifeln, ob die empfundene Vibration bei der Überfahrt von Rüttelstreifen bei Fahrern die gewünschten Assoziationen in Zusammenhang mit Bahnübergängen wecken. Sie merken an, dass Rüttelstreifen weder spezifische bauliche Einrichtungen für Bahnübergänge sind noch konkrete, individualisierte Hinweise an die Fahrer geben.

Aus den Ergebnissen bisheriger Untersuchungen zu Rüttelstreifen in der Bahnübergangszufahrt kann zusammenfassend geschlussfolgert werden, dass sie den positiven Effekt haben können Fahrer dazu zu motivieren, ihre Geschwindigkeit zu verringern, jedoch vermutlich keinen unmittelbaren Einfluss auf die Handlungsintention von Fahrern in konkretem Zusammenhang mit der Bahnübergangsüberquerung haben. Zudem vermitteln Rüttelstreifen keinerlei Information, die Straßenverkehrsteilnehmer dazu veranlasst, eine Sichtprüfung durchzuführen.

Unter den Maßnahmen, die einen Einfluss auf die Motivation des Straßenverkehrsteilnehmers haben und damit auf Ebene der Handlungsintention wirksam sind, kann zusammenfassend zwischen zwei Varianten unterschieden werden: Strafverfolgung und bauliche Veränderung des Fahrbahnuntergrunds zur Geschwindigkeitsverringern. Strafverfolgung setzt auf den Mechanismus der Bestrafung, um die Wahrscheinlichkeit des erneuten Auftretens eines Fehlverhaltens am Bahnübergang zu verringern. Rüttelstreifen, Schwellen und Straßenmarkierungen, die Geschwindigkeitsillusionen erzeugen sollen motorisierte Verkehrsteilnehmer vor allem zu einer Geschwindigkeitsverringern veranlassen. Beide Möglichkeiten sind zwar keinesfalls als untauglich zu bewerten, werden jedoch nicht weiterverfolgt, da sie weder einen Einfluss auf das Blickverhalten versprechen noch dem mangelhaften bahnübergangsbezogenen Wissen begegnen.

Im letzten Teilschritt der Annäherung an einen Bahnübergang muss der Straßenverkehrsteilnehmer die intendierte Handlung in die dafür erforderlichen motorischen Abläufe überführen. Um die motorischen Vorgänge der Bahnübergangsüberquerung zu unterstützen, können vor allem bauliche Maßnahmen hilfreich sein. Zusammenfassend kann die motorische Ausführung der erforderlichen Handlungen in der Bahnübergangsüberquerung durch zwei Arten von baulichen Modifikationen des Bahnübergangs und seiner Umgebung beeinflusst werden: Zum einen können bauliche Veränderungen vorgenommen werden, die dazu führen, dass gewünschte Handlungen leicht und sicher ermöglicht werden, zum anderen können physische Barrieren eingesetzt werden, die unerwünschte Fehlhandlungen unterbinden.

Ein Beispiel für eine solche Barriere sind Hängegitter, die an Schrankenbäumen installiert werden und Versuche verhindern sollen, unter den Schranken hindurch den Bahnübergang zu überqueren (Aigner-Breuss et al., 2013). Um Kraftfahrzeugführer von Verstößen in Form einer Umfahrung von Halbschranken abzuhalten, ist eine Mitteltrennung der Fahrbahn am Bahnübergang durch ein physisches Hindernis ein weiteres Beispiel für eine sinnvolle ergänzende Barriere am Bahnübergang (Aigner-Breuss et al., 2013). Die Installation zusätzlicher Leitelemente in der Fahrbahnmitte, wie zum Beispiel Leitbaken oder Leitplanken, kann verhindern, dass motorisierte Verkehrsteilnehmer die Halbschranken unerlaubt umfahren. Diese Barrieren sind insbesondere für technisch gesicherte Bahnübergänge mit langen Verschlusszeiten geeignet, an denen steigende Ungeduld bei zunehmenden Wartezeiten Fahrer in die Versuchung führen kann, einen Verstoß in Form einer Umfahrung zu begehen (Seehafer, 1997).

Wie zuvor beschrieben können auch Rüttelschwellen oder Aufpflasterungen (Aigner-Breuss et al., 2013) eine Barrierefunktion erfüllen und in der Bahnübergangszufahrt und beim Straßenverkehrsteilnehmer sowohl auf den kognitiven Teilschritt der Handlungsintention wirken als auch auf die Handlungsausführung. Wird eine Bodenschwelle frühzeitig erkannt, motiviert sie einen Kraftfahrer wahrscheinlich zu verlangsamen. Wird sie übersehen, verlangsamt sie die Fahrt potentiell dennoch oder bewegt den Fahrer durch die resultierende Schreckreaktion eventuell dazu, sein Fahrzeug zu verlangsamen. Auch Fahrbahnverschwenkungen können in der Zufahrt auf den Bahnübergang eingesetzt werden, um Fahrer durch das erforderliche Umfahrungsmanöver zu verlangsamen (Aigner-Breuss et al., 2013).

In Bezug auf die Handlungsausführung ist kritisch zu bemerken, dass das Fahrmanöver in der Bahnübergangszufahrt durch bestimmte Barrieren oder Fahrbahnveränderungen

erschwert werden kann. Durch die Erschwerung des Fahrmanövers werden Aufmerksamkeitsressourcen gebunden, die nicht der visuellen Prüfung des Bahnübergangs und seiner Infrastruktur gewidmet werden können (Aigner-Breuss et al., 2013). In der Phase, in der ein Kraftfahrer eine Bodenschwelle mit seinem Blick fixiert kann er beispielsweise kein Ankündigungsschild detektieren, das ihn auf einen Bahnübergang hinweist. Trotz der Kritikpunkte können Bodenschwellen und Fahrbahnverschwenkungen durch die erzwungene Verlangsamung des Straßenverkehrs gute unterstützende Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit darstellen. Bei der Installation sollte jedoch genau auf die Art der Ausführung und die Distanz zum Bahnübergang geachtet werden, in der die Verlangsamungseinrichtung installiert wird. Befindet sie sich zu nah am Bahnübergang, ist zu vermuten, dass sie den Verkehrsteilnehmer vom Vorgang der Überfahrt ablenken kann, wird sie in zu großem Abstand installiert, würde sie eine erneute Beschleunigung auf die Ausgangsgeschwindigkeit ermöglichen.

Um eine möglichst hindernisfreie Überquerung des Gefahrenraums zu ermöglichen, werden von unterschiedlichen Herstellern Hartgummierelemente angeboten, die exakt höhen- gleich mit den Schienen sind und mit geringen seitlichen Abständen zu den Schienen im Bahnübergangsuntergrund verbaut werden. So wird insbesondere Fahrrad- und Rollstuhlfahrern sowie Nutzern von Rollatoren eine leichte Überquerung ermöglicht und das Risiko eines Sturzes verringert (KRAIBURG Elastik GmbH, 2010).

Hinsichtlich der Zielsetzung, eine nutzerzentrierte und kostengünstige Maßnahme zu identifizieren, mit der die Sicherheit an Bahnübergängen erhöht werden kann, gibt es verschiedene als geeignet einzuschätzende Möglichkeiten, die eine unmittelbare Auswirkung auf den Teilschritt der Handlungsausführung im Vorgang der Bahnübergangsüberquerung haben. Hängegitter oder eine Mitteltrennung der Fahrbahn können gut geeignet sein, um Fahrer an technisch gesicherten Bahnübergängen von Verstößen abzuhalten. Auch an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen können Rüttelstreifen unter Umständen geeignet sein, um insbesondere Geschwindigkeitsübertretungen zu vermeiden. Hartgummierelemente, die zwischen den Schienen platziert werden können an allen Bahnübergängen die Überquerung erleichtern, gerade für Fußgänger und Fahrradfahrer. Als zusätzliche Ergänzung zu Maßnahmen, mit denen Straßenverkehrsteilnehmer an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen zu einer Sichtprüfung der zuführenden Schienenbereiche veranlasst werden sind Maßnahmen zu begrüßen, die einen Einfluss auf die Handlungsausführung haben, indem sie entweder Fehlverhalten erschweren oder sicheres Verhalten begünstigen.

6.4 Fazit zu bestehenden Ansätzen der nutzerzentrierten Erhöhung der Sicherheit an Bahnübergängen

Auf der Suche nach effektiven Maßnahmen, um dem zuvor festgestellten teils mangelhaften Wissen von Straßenverkehrsteilnehmern zu begegnen (vgl. Kapitel 4) und Straßenverkehrsteilnehmer dazu zu bringen, an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen vor der Überquerung eine Sichtprüfung durchzuführen (vgl. Kapitel 5), wurden bestehende Maßnahmen aus der Fachliteratur und der Bahnpraxis recherchiert und ihre Wirksamkeit eingeschätzt. Maßnahmen wie Barrieren, die sich auf die unmittelbare Handlungsausführung auswirken, sind insbesondere für den Einsatz an technisch gesicherten Bahnübergängen geeignet und werden daher nicht näher untersucht.

Unter den recherchierten Möglichkeiten wird einzig die Anbringung zusätzlicher Leuchteinrichtungen an der Front und der Seite von Schienenfahrzeugen als besonders geeignet in Bezug auf die frühzeitige Detektion eines Schienenfahrzeugs eingeschätzt (vgl. 6.1). Es ist anzunehmen, dass aufgrund der erhöhten Saliens eine Verbesserung der Detektierbarkeit eines Schienenfahrzeugs erzielt werden kann. Aufbauend auf diesem Ansatz scheint es angebracht, mit dem Ziel der effektiven Blicklenkung Lichtquellen einzusetzen, die sich nicht unmittelbar neben der Straße befinden. Lichtreize, die aus der erweiterten Peripherie des Bahnübergangs auf die Straßenverkehrsteilnehmer einwirken könnten geeignet sein, um Straßenverkehrsteilnehmer zu einer Sichtprüfung zu bewegen. In diesem Zusammenhang könnte es einen Vorteil darstellen, ortsfeste Lichtquellen in der Bahnübergangsperipherie einzusetzen, um eine Sichtprüfung zu provozieren, unabhängig davon, ob ein kreuzendes Schienenfahrzeug über salienzerhöhende Leuchteinrichtungen verfügt oder nicht. Die Ausgestaltung eines technischen Prototyps und dessen experimentelle Untersuchung werden in den Kapiteln 8 und 9 dargestellt.

In Bezug auf den Wissensabruf relevanter Schemata und Skripte, die Straßenverkehrsteilnehmer effektiv zu einem sicheren Verhalten veranlassen können, wird die Durchführung von Kampagnen aufgrund des verbundenen Aufwands und der damit verbundenen Kosten als konkrete Maßnahme nicht weiterverfolgt. Hier erscheint es geeignet auf Verkehrszeichen zurückzugreifen, die es Straßenverkehrsteilnehmern ermöglichen, auf vorhandene und verfestigte Skripte aus anderen Straßenverkehrskontexten zurückzugreifen (vgl. 6.2). Unter den vorgestellten Maßnahmen ist das Stoppschild als Ergänzung zum Andreaskreuz die potentiell kostengünstigste und vielversprechendste Maßnahme. Eine vertiefende empirische Untersuchung ist Gegenstand des folgenden Kapitels 7.

Mit der Untersuchung der Wirksamkeit von Lichtreizen in der Peripherie des Bahnübergangs und der Untersuchung des Wissensabrufs verhaltensrelevanter Schemata und Skripte werden zwei Maßnahmen verfolgt, die angesichts der Ergebnisse der Befragung zum Verständnis bahnübergangsbezogener Verkehrszeichen und der Untersuchung zum Blick- und Fahrverhalten konsequent scheinen. Während vom Einsatz des Stoppschildes angenommen wird, dass es Straßenverkehrsteilnehmern hilft, aufgrund einer stärkeren Vertrautheit in Form besser verfestigter Wissensstrukturen korrekte Verhaltensassoziationen abzuleiten, wird vom Einsatz peripherer Lichtreize angenommen, dass sie die Wahrscheinlichkeit einer Sichtprüfung von Straßenverkehrsteilnehmern erhöhen können.

7 Untersuchung 3: Assoziationsstärke und Verständnis bahnübergangsbezogener Vorfahrtssymbolik⁷

7.1 Einleitung

Unter den in Kapitel 6 dargestellten und reflektierten Maßnahmen stellt das Stoppschild als Ergänzung zum Andreaskreuz eine Maßnahme dar, die im Sinne der Zielstellung dieser Arbeit sowohl nutzerzentriert als auch kostengünstig ist. Sowohl aus der in Kapitel 4 dargestellten Interviewstudie als auch der in Kapitel 5 beschriebenen Untersuchung zum Blick- und Fahrverhalten von Autofahrern in der Zufahrt auf Bahnübergänge entstand der Eindruck, dass viele Straßenverkehrsteilnehmer nicht über ausreichende Grundkenntnisse in Bezug auf das Andreaskreuz verfügen und einzelne Verkehrsteilnehmer sich auch nicht im Klaren über die Bedeutung der Lichtsignalanlage am Bahnübergang sind. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass Verkehrsteilnehmer Wissen zur Bedeutung des Stoppschildes leichter abrufen können als zur Bedeutung des Andreaskreuzes beziehungsweise häufiger angemessene Skripte im Langzeitgedächtnis gespeichert haben. Auch in der Untersuchung zum Blick- und Fahrverhalten (Kapitel 5) fixierten zwar alle Versuchsteilnehmer in der Zufahrt auf den nicht technisch gesicherten Bahnübergang das Andreaskreuz oder andere Verkehrszeichen der Bahnübergangsbeschilderung, jedoch leitete nur ein Bruchteil der Teilnehmer in der Folge das richtige Verhalten ab, nach links und rechts zu schauen, um zu prüfen, ob ein Zug herannaht.

Eine mögliche Schlussfolgerung ist, dass die Assoziation zwischen dem Andreaskreuz und den Skripten zu Verhaltensweisen, die an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen gezeigt werden müssen nicht oder nicht in ausreichender Stärke vorhanden ist und somit richtige Regeln und Verhaltensweisen von Teilen der Verkehrsteilnehmer nicht abgerufen werden können. Hommel und Nattekemper (2011) beschreiben, dass Skripte, die im Langzeitgedächtnis abgespeichert sind mit individuellen Aktivierungsniveaus verknüpft sind, die je nach Häufigkeit des Vorkommens und der Salienz des auslösenden Reizes variieren. Im Vergleich zum Andreaskreuz ist daher zu erwarten, dass im Fall von Schildern, die an Straßenkreuzungen vorkommen, die angemessenen Verhaltensweisen leichter abgerufen werden können, da

⁷ Die Datenerhebung der in diesem Abschnitt beschriebenen Untersuchung wurde im Rahmen einer von Jan Grippenkoven betreuten Bachelorarbeit von Henrike Rawert unterstützt.

viele Verkehrsteilnehmer diesen Schildern potentiell häufiger begegnen und sie daher vertrauter mit ihnen sind.

Die Kombination aus Andreaskreuz und Stoppschild stellt keine absolute Neuheit an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen dar. Dieses Kombinationsschild wird an Bahnübergängen ohne technische Sicherungsanlage in zahlreichen Ländern mit Eisenbahnverkehr eingesetzt, darunter Australien, Frankreich, Kanada, Österreich, Polen und die USA. Jedoch wurde die Wirksamkeit der Kombination aus Andreaskreuz und Stoppschild bislang noch nicht ausreichend im Rahmen empirischer Untersuchungen belegt. In diesem Kapitel wird im Rahmen einer weiterführenden Untersuchung zur Befragung in Kapitel 4 die Fragestellung aus psychologischer Sicht vertieft, ob das Stoppschild als potentiell selbsterklärendes Verkehrszeichen eine sinnvolle Ergänzung zum Andreaskreuz darstellt.

Im Rahmen eines computergestützten Wahlreaktionszeitexperiments werden zwei für die Kreuzungssicherheit am Bahnübergang wesentliche Aspekte untersucht. Zum einen wird ermittelt, ob den Versuchsteilnehmern die notwendigen Verhaltensregeln zu Bahnübergangsbeschilderung und Lichtsignalen grundlegend bekannt sind. Darüber hinaus wird anhand der Wahlreaktionszeit die Annahme untersucht, dass mentale Skripte zu Handlungsabfolgen schwerer abzurufen sind, wenn sie in Zusammenhang zu bahnübergangsbezogener Symbolik stehen, als wenn sie zu vorfahrtregulierenden Verkehrszeichen gehören, die an Straßenkreuzungen zum Einsatz kommen. Das Hauptaugenmerk in den vergleichenden Untersuchungen liegt auf dem Vergleich zwischen Andreaskreuz, Stoppschild, dem Kombinationsschild aus Andreaskreuz und Stoppschild (kurz *Kombinationsschild*), dem Vorfahrtsschild sowie den Lichtsignalanlagen, die an Straßenkreuzungen (kurz *Straßenverkehrs-LSA*) und Bahnübergängen (kurz *BÜ-LSA*) eingesetzt werden. Im folgenden Abschnitt werden die Hypothesen der durchgeführten und in diesem Kapitel beschriebenen Wahlreaktionszeitexperimente dargestellt.

7.2 Hypothesen

Auf Grundlage der Befunde aus den in den Kapiteln 4 und 5 beschriebenen Untersuchungen können jeweils vier gerichtete Hypothesen zum Wissen und zur Wahlreaktionszeit der Versuchsteilnehmer in Bezug auf die relevanten Verkehrszeichen abgeleitet werden.

Es ist anzunehmen, dass mehr Versuchsteilnehmer systematisch falsche Wahlentscheidungen in der Reaktion auf das Andreaskreuz treffen als auf das Stoppschild.

Hypothese 1: Mehr Versuchsteilnehmer wählen systematisch falsche Eingaben in der Reaktion auf das Andreaskreuz als auf das Stoppschild.

Es wird angenommen, dass mehr Versuchsteilnehmer systematisch falsche Entscheidungen in der Reaktion auf das Andreaskreuz treffen als auf das Kombinationsschild. Daraus leitet sich die zweite Versuchshypothese ab:

Hypothese 2: Mehr Versuchsteilnehmer wählen systematisch falsche Eingaben in der Reaktion auf das Andreaskreuz als auf das Kombinationsschild.

Es wird angenommen, dass mehr Versuchsteilnehmer systematisch falsche Eingabeentscheidungen in der Reaktion auf das Andreaskreuz treffen als auf das *Schild Vorfahrt gewähren*. Daraus leitet sich die dritte Versuchshypothese ab:

Hypothese 3: Mehr Versuchsteilnehmer wählen systematisch falsche Eingaben in der Reaktion auf das Andreaskreuz als auf das Schild *Vorfahrt gewähren*.

Es wird angenommen, dass mehr Versuchsteilnehmer systematisch falsche Eingabeentscheidungen in der Reaktion auf die Bahnübergangs-LSA treffen als auf die Straßenverkehrs-LSA. Daraus leitet sich die vierte Versuchshypothese ab:

Hypothese 4: Mehr Versuchsteilnehmer wählen systematisch falsche Eingaben in der Reaktion auf das Andreaskreuz als auf das Schild *Vorfahrt gewähren*.

Neben der Annahme, dass unter den Versuchsteilnehmern das Wissen zur Bedeutung des Andreaskreuzes und der Bahnübergangs-LSA schlechter ausgeprägt ist als das Wissen zu den aus dem Straßenverkehr bekannten Vorfahrtsschildern und der Straßenverkehrs-LSA, ist auch anzunehmen, dass das Wissen nicht so schnell abrufbar ist. Daher werden äquivalent zu den vier Hypothesen zum Wissen vier Hypothesen bezüglich der Wahlreaktionszeit abgeleitet.

Es wird angenommen, dass das Wissen zur Bedeutung des Andreaskreuzes nicht so schnell abzurufen ist wie das Wissen zur Bedeutung des Stoppschildes und dies im Vergleich zu einer längeren Wahlreaktionszeit in der Reaktion auf das Andreaskreuz führt.

Hypothese 5: Auf das Stoppschild wird schneller reagiert als auf das Andreaskreuz.

Es wird angenommen, dass das Wissen zur Bedeutung des Andreaskreuzes nicht so schnell abzurufen ist wie das Wissen zur Bedeutung des Kombinationsschildes und dies im Vergleich zu einer längeren Wahlreaktionszeit in der Reaktion auf das Andreaskreuz führt.

Hypothese 6: Auf das Kombinationsschild wird schneller reagiert als auf das Andreaskreuz.

Es wird angenommen, dass das Wissen zur Bedeutung des Andreaskreuzes nicht so schnell abzurufen ist wie das Wissen zur Bedeutung des Schildes *Vorfahrt gewähren* und dies im Vergleich zu einer längeren Wahlreaktionszeit in der Reaktion auf das Andreaskreuz führt.

Hypothese 7: Auf das Schild *Vorfahrt gewähren* wird schneller reagiert als auf das Andreaskreuz.

Es wird angenommen, dass das Wissen zur Bedeutung der Bahnübergangs-LSA nicht so schnell abzurufen ist wie das Wissen zur Bedeutung der Straßenverkehrs-LSA und dies im Vergleich zu einer längeren Wahlreaktionszeit in der Reaktion auf die Bahnübergangs-LSA führt.

Hypothese 8: Auf die Straßenverkehrs-LSA wird schneller reagiert als auf die Bahnübergangs-LSA.

Alle acht beschriebenen Hypothesen gelten gleichermaßen für jede der drei aufeinander folgenden Versuchsbedingungen und werden damit für jede der drei Versuchsbedingungen wiederholt untersucht. Die Versuchsbedingungen werden im folgenden Methodenteil nach der Beschreibung der Stichprobe des Versuchs im Detail beschrieben.

7.3 Methoden

7.3.1 Versuchsteilnehmer

Der Versuch umfasste eine Stichprobe von $n = 57$ Teilnehmern. Das Alter der Versuchspersonen betrug im Mittel 25,1 Jahre ($SD = 6,3$ Jahre, Minimum: 19 Jahre, Maximum: 55 Jahre). Unter den Versuchsteilnehmern befanden sich 32 Frauen und 25 Männer. Bei einem Großteil der Versuchsteilnehmer handelte es sich um Studenten der Technischen Universität Braunschweig. Die ursprüngliche Stichprobe umfasste 60 Teilnehmer, von denen jedoch drei aufgrund eines Fehlers in der Versuchssoftware ausgeschlossen werden mussten. In den ersten beiden der drei Versuchsbedingungen musste jeweils ein weiterer Versuchsteilnehmer ausgeschlossen werden, da es zu systematischen Verwechslungen in Bezug auf die Eingaben kam, die als Reaktion auf die dargebotenen Verkehrszeichen stattfanden. Somit reduzierte sich die Stichprobe in den ersten beiden Versuchsbedingungen auf 56 Teilnehmer, während in der dritten Versuchsbedingung Datensätze von 57 Teilnehmern in die Auswertung einfließen. Alle Teilnehmer des Versuchs wurden mit einer Auszahlung in Höhe von zehn Euro vergütet.

7.3.2 Design

Dem Versuch liegt ein Innersubjekt-Design zugrunde. In allen drei Versuchsbedingungen mussten alle Versuchsteilnehmer auf dieselben, in unterschiedlicher Reihenfolge dargebotenen Verkehrszeichen reagieren. Die Art des Verkehrszeichens diente dabei als unabhängige Variable mit sechs Stufen. Die sechs Stufen ergaben sich aus den Verkehrszeichen, die für den Versuch von Interesse waren: Stoppschild, Andreaskreuz, Kombinationsschild, Schild *Vorfahrt gewähren*, Straßenverkehrs-LSA und BÜ-LSA (Abbildung 18). Neben den sechs Zielverkehrszeichen wurden die Versuchsteilnehmer in jeder Versuchsbedingung mit weiteren Schildern (Anlage C) konfrontiert, um den Fokus auf Verkehrszeichen in Zusammenhang mit Bahnübergängen nicht zu offensichtlich zu machen.

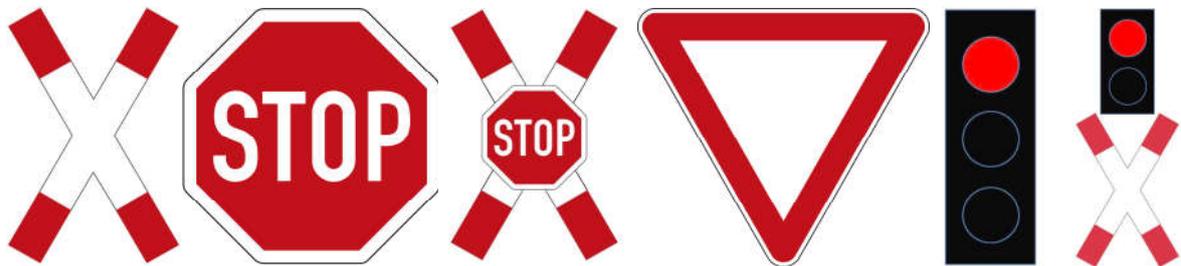


Abbildung 18. Zielschilder des Assoziationsversuchs (Grippenkoven, Rawert & Naumann, 2015)⁸

In allen drei Versuchsdurchgängen wurden die gleichen zwei abhängigen Variablen erhoben. Die erste abhängige Variable bestand in der Eingabeentscheidung je Verkehrszeichen, die entweder richtig oder falsch sein konnte und als Maß für das Verständnis der Bedeutung der jeweiligen Verkehrszeichen diente. Die zweite abhängige Variable stellte die Wahlreaktionszeit dar, die durch die Versuchsteilnehmer zur Eingabe der richtigen Antwort benötigt wurde.

In der ersten Bedingung mussten die Versuchsteilnehmer für jedes Verkehrszeichen in der Abfolge der ihnen präsentierten Verkehrszeichen die Entscheidung treffen, ob es eine Rolle bezüglich der Regulierung der Vorfahrt spielt oder nicht. Den Versuchsteilnehmern wurden in randomisierter Reihenfolge insgesamt 36 Verkehrszeichen dargeboten, darunter 18 mit Vorfahrtbezug und 18 ohne Vorfahrtbezug. Jedes einzelne Verkehrszeichen erschien dreimal, so dass insgesamt 108 Eingaben erforderlich waren.

⁸ Das Kombinationsschild aus Andreaskreuz und Stoppschild ist eine eigene Darstellung, die anderen Darstellungen entstammen der StVO (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013) beziehungsweise der EBO (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1967).

In der zweiten Bedingung wurden die Versuchsteilnehmer instruiert zu entscheiden, ob das dargebotene Verkehrszeichen ihnen im Verkehr signalisiert, dass sie Vorfahrt haben oder ob sie Vorfahrt gewähren müssen. Als dritte Entscheidungsmöglichkeit war es in dieser Bedingung möglich, keine Eingabe zu tätigen, wenn das dargebotene Verkehrszeichen in Bezug auf die Vorfahrtregulierung neutral war. In diesem Durchgang des Versuchs wurden ebenfalls insgesamt 36 Verkehrszeichen dargeboten, davon zwölf, an denen Vorfahrt gewährt werden muss, zwölf an denen man selbst Vorfahrt hat und zwölf die in Bezug auf die Vorfahrtregulierung neutral sind. Auch in der zweiten Versuchsbedingung waren somit insgesamt 108 Eingaben erforderlich.

In der dritten Bedingung mussten durch die Versuchsteilnehmer Entscheidungen in Bezug auf das Verhalten getroffen werden, das man in der Reaktion auf die dargebotenen Verkehrszeichen zeigen sollte. Auch in dieser Teilaufgabe gab es drei Entscheidungsmöglichkeiten. Die Versuchsteilnehmer mussten angeben, ob sie als Reaktion auf das Verkehrszeichen anhalten müssen, bremsbereit sein müssen oder keine Eingabe vornehmen, wenn das Fahrverhalten in der Reaktion auf das Verkehrszeichen nicht angepasst werden muss. In der dritten Bedingung mussten die Versuchsteilnehmer auf 24 verschiedene Verkehrszeichen reagieren. Darunter waren je acht, die ein Anhalten erfordern, acht, an denen man bremsbereit sein muss und acht, an denen man sein Verhalten nicht anpassen muss. Da auch in der dritten Versuchsbedingung für jedes Schild dreimal eine Auswahl getroffen werden musste, waren somit 72 Eingaben erforderlich.

Eine Übersicht aller im Versuch verwendeten Schilder ist in Anhang C dargestellt. Eine schematische Darstellung der Versuchsbedingungen sowie der abhängigen und unabhängigen Variablen findet sich in Tabelle 6.

Tabelle 6

Schematische Darstellung der Versuchsbedingungen und Variablen

Bedingungen	Unabhängige Variable	Abhängige Variablen
1) Vorfahrtschild oder neutrales Schild?	Verkehrszeichen 	Richtige oder falsche Antwort 
2) Vorfahrt gewähren, Vorfahrt haben oder neutrales Schild?		
3) Halten, erhöhte Bremsbereitschaft oder neutrales Schild?		Wahlreaktionszeit 

Der Ablauf der Versuchsdurchläufe, bestehend aus der Darbietung von Schildern und der erforderlichen Eingabereaktion ist in Form einer schematischen Teilsequenz aus dem dritten Versuchsdurchgang in Abbildung 19 dargestellt.

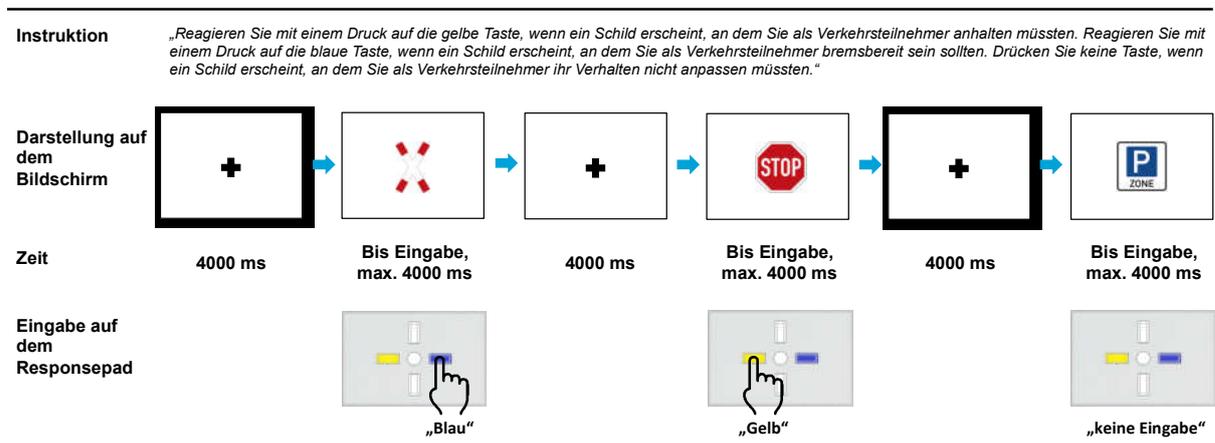


Abbildung 19. Schematische Darstellung des Versuchsablaufs am Beispiel der dritten Versuchsbedingung.

7.3.3 Materialien und Versuchsumgebung

Der Versuch wurde mit der Software E-Prime® (Version 2.0; Psychology Software Tools, Inc., 2012) programmiert. Als Peripheriegerät zur Eingabe wurde das *RB-540 5-button response pad* des Herstellers cedrus® eingesetzt (wie in Abbildung 19 und Tabelle 6 darge-

stellt). Dieses Eingabegerät verfügt über fünf kreuzförmig angeordnete Tasten zur Eingabe, von denen für den vorliegenden Versuch zwei zum Einsatz kamen. Die linke Taste wurde mit einer gelben Farbkappe versehen, die rechte mit einer blauen Farbkappe. Als Stimulusmaterial, das auf einem 19-Zoll-Monitor dargestellt wurde, dienten die einzeln dargebotenen Verkehrsschilder und Lichtsignalanlagen, die in Anlage C dargestellt sind. Es wurde darauf geachtet, dass alle Verkehrsschilder auf dem Monitor die gleiche Fläche einnehmen und gut sichtbar sind. Zwischen zwei aufeinanderfolgenden Verkehrsschildern wurde für jeweils 4000 ms ein Fixationskreuz auf dem Mittelpunkt des Bildschirms dargestellt. Instruktionen und Informationen zwischen den Bedingungen wurden schriftlich auf dem Bildschirm dargestellt. Der Abstand zwischen dem Kopf der Versuchsteilnehmer und dem Mittelpunkt des Bildschirms betrug ca. 80 cm. Der Versuch fand in einem 15 m² großen Laborraum unter konstanten Lichtbedingungen ohne Störgeräusche statt. Die Versuchsanordnung wurde auf einem Schreibtisch angeordnet und von den sitzenden Versuchsteilnehmern bedient.

7.3.4 Durchführung

In dem durchgeführten Computerexperiment musste jeder Teilnehmer in drei Bedingungen anhand einer Auswahl verschiedener Eingabemöglichkeiten so schnell wie möglich die korrekte Bedeutung beziehungsweise die korrekte Verhaltensweise in Bezug auf die nacheinander erscheinenden Verkehrszeichen angeben. Zu Beginn des Versuchs wurden die Versuchsteilnehmer vom Versuchsleiter begrüßt und in den Laborraum geführt. Danach begann der Versuch mit der ersten Versuchsbedingung (vgl. 7.3.2).

Vor jeder Versuchsbedingung wurden die Instruktionen schriftlich auf dem Versuchsmontitor dargestellt. Es bestand in der Folge die Gelegenheit, sich vor dem eigentlichen Versuchsdurchlauf mit der Versuchsbedingung in einem einminütigen Demonstrationsdurchlauf vertraut zu machen. Im Demonstrationsdurchlauf wurde den Versuchsteilnehmern über den Bildschirm eine Rückmeldung über die Richtigkeit ihrer Eingaben und ihre Reaktionszeit gegeben. Um Trainingseffekte in Bezug auf bestimmte Schilder zu vermeiden, wurden in den Demonstrationsdurchläufen keine Schilder dargeboten, die in dem darauffolgenden Versuchsdurchlauf auch zum Einsatz kamen. Nach Abschluss der Versuchsdurchläufe bestand für die Teilnehmer die Möglichkeit, offene Fragen mit dem Versuchsleiter zu besprechen. Zwischen den drei Versuchsdurchläufen konnten die Versuchsteilnehmer eine einminütige Pause einlegen, bevor sie mit der nächsten Versuchsbedingung fortfuhren.

Die drei Versuchsbedingungen wurden über alle Versuchsteilnehmer in fester Reihenfolge durchgeführt. Dies wurde so gehandhabt, da der Anteil bahnübergangsbezogener Verkehrszeichen an der Gesamtzahl der dargebotenen Verkehrszeichen in der dritten Bedingung deutlich höher war als in den ersten beiden Bedingungen. Bedingung 3 sollte daher nicht als erstes bearbeitet werden, damit den Versuchsteilnehmern der Bahnübergangsbezug nicht bereits zu Beginn des Versuchs deutlich wird. Es wurde vermutet, dass dies zu einer Verzeichnung des Verhaltens der Versuchsteilnehmer in den weiteren zwei Versuchsbedingungen hätte führen können, die sich negativer auswirkt als ein möglicher Reihenfolgeeffekt in den Bedingungen. Die Gesamtdauer des Versuchs betrug ungefähr 30 Minuten. Nach Abschluss aller drei Versuchsbedingungen wurden die Versuchsteilnehmer vom Versuchsleiter für ihre Teilnahme mit 5 € vergütet und verabschiedet.

7.4 Ergebnisse

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der statistischen Analysen zu den in Abschnitt 7.2 beschriebenen Hypothesen detailliert dargestellt. In einem abschließenden Abschnitt wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse über alle drei Teilversuche gegeben.

7.4.1 Bedingung 1 – Vorfahrtbedeutung oder nicht?

In der ersten Versuchsbedingung wurden die Versuchsteilnehmer instruiert, per Tastendruck als Reaktion auf jedes Verkehrszeichen anzugeben, ob es eine Bedeutung in Bezug auf die Regulierung der Vorfahrt hat oder nicht. Auf jedes Schild wurde dabei dreimal reagiert. Zur Untersuchung der Hypothesen 1 bis 4 in Bedingung 1 wurden je Verkehrsschild die Anzahl unter den 56 Versuchsteilnehmern, die mindestens einmal eine richtige Reaktion zeigten mit der Anzahl der Versuchsteilnehmer verglichen, die systematisch falsch antworteten. Eine systematisch falsche Antwort lag vor, wenn ein Versuchsteilnehmer in der Reaktion auf das gleiche Verkehrszeichen die maximal mögliche Anzahl von drei falschen Entscheidungen

traf. Die deskriptiven Ergebnisse zu dieser Untersuchung sind in Abbildung 20 dargestellt.

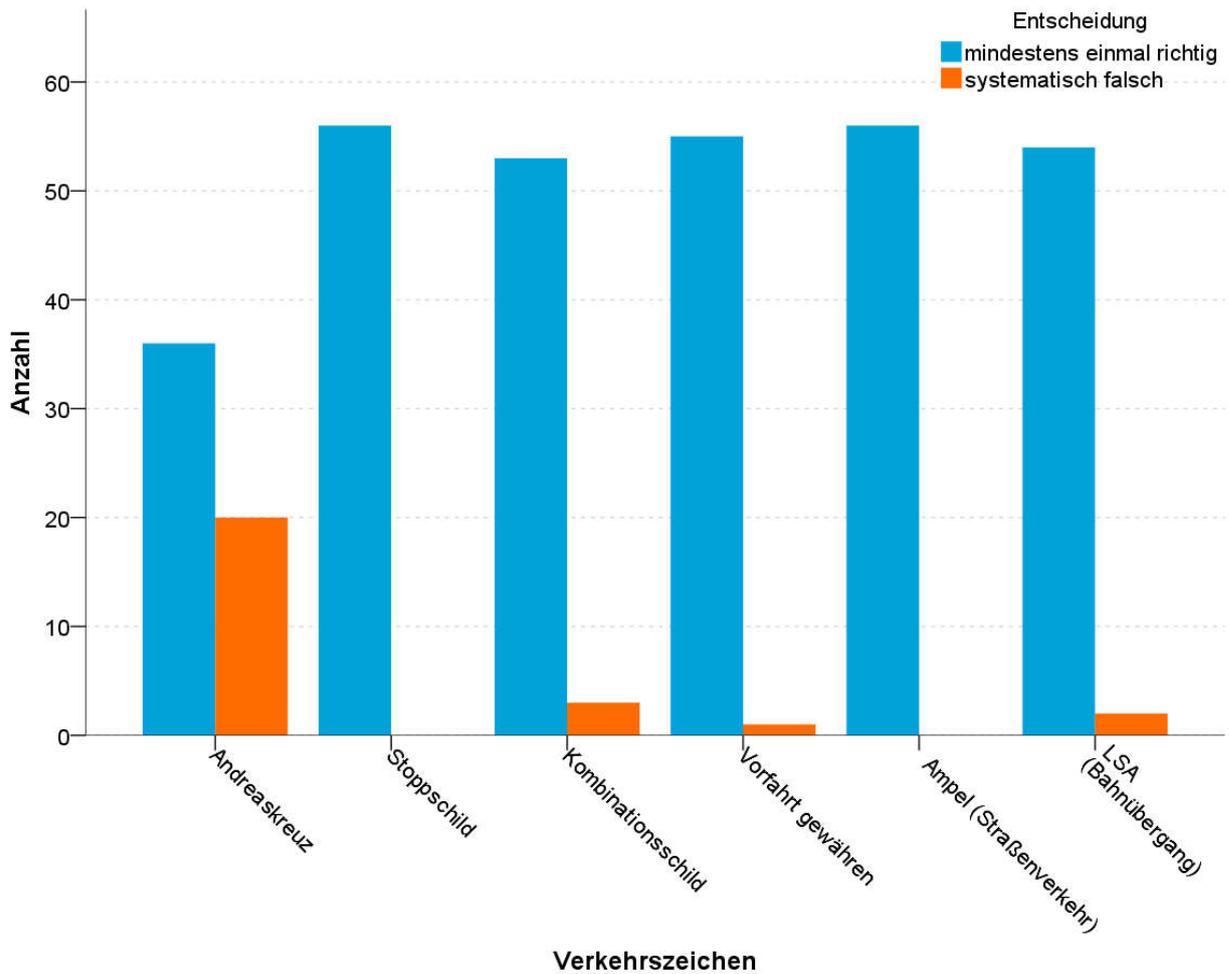


Abbildung 20. Übersicht der Anzahlen der Versuchsteilnehmer, die in Bedingung 1 mindestens einmal richtig reagierten beziehungsweise systematisch falsche Entscheidungen trafen

In den Ergebnissen zu den Wahlentscheidungen zeigte sich, dass die meisten Versuchsteilnehmer in der Lage waren, zu den meisten der Verkehrszeichen, die im Versuch von Interesse waren, eine korrekte Auswahl zu treffen. Ein Unterschied zeigte sich in Bezug auf die Wahlentscheidungen bezüglich des Andreaskreuzes. In der Entscheidung zur Bedeutung des Andreaskreuzes gaben nur 36 der 56 Versuchsteilnehmer mindestens einmal richtig an, dass dieses Schild eine Bedeutung in der Regulierung der Vorfahrt hat. Die übrigen 20 Versuchsteilnehmer reagierten systematisch falsch und gaben an, das Andreaskreuz habe keine Bedeutung in Bezug auf die Regulierung der Vorfahrt. Diese Verteilung unterscheidet sich von den Wahlentscheidungen in Bezug auf die anderen relevanten Verkehrszeichen. Als Reaktion auf das Stoppschild gaben alle 56 Versuchsteilnehmer mindestens einmal richtig ein, dass dieses Schild der Regulierung der Vorfahrt dient. In der Reaktion auf das Kombinationschild gaben 53 Teilnehmer richtige Antworten, drei antworteten systematisch falsch. Das Schild *Vorfahrt*

gewähren wurde von 55 Teilnehmern mindestens einmal richtig mit der Regulierung der Vorfahrt in Beziehung gesetzt, ein Versuchsteilnehmer antwortete bei diesem Schild systematisch falsch. In Bezug auf die Rot zeigende Straßenverkehrssampel mit drei Signalpositionen gab jeder Teilnehmer mindestens eine richtige Antwort. Kein Teilnehmer entschied systematisch falsch. Zu der Rot zeigende Lichtsignalanlage des Bahnübergangs mit zwei Signalpositionen gaben 54 Teilnehmer mindestens eine richtige Antwort, zwei trafen systematisch falsche Antwortentscheidungen.

Aufgrund der a priori festgelegten und gerichteten Versuchshypothesen 1 bis 4 wurden zur statistischen Auswertung nicht alle theoretisch möglichen Vergleiche unter den Verkehrszeichen durchgeführt, sondern gemäß den vier Hypothesen vier gezielte Vergleiche der Fehlerhäufigkeiten der im Versuch interessanten Schilder durchgeführt. Zum Vergleich der Anzahl der Teilnehmer, die mindestens einmal richtig beziehungsweise systematisch falsch antworteten wurden McNemar-Tests berechnet. Da vier Einzelvergleiche durchgeführt wurden, wurde das Signifikanzniveau über eine Bonferroni-Korrektur angepasst, um eine Alphafehler-Kumulierung zu verhindern. Pro Einzelvergleich wurde das Signifikanzniveau auf diese Weise auf $\alpha = ,05 / 4 = ,0125$ festgelegt.

Im Vergleich zwischen Andreaskreuz und Stoppschild konnte anhand des McNemar-Tests festgestellt werden, dass signifikant mehr Teilnehmer sich in ihrer Antworteingabe auf das Andreaskreuz systematisch falsch entschieden und angaben, es habe keine Bedeutung in Bezug auf die Regulierung der Vorfahrt (McNemar's $\chi^2 = 18,050$, $df = 1$, $p < ,001$). Hypothese 1 wird somit in Versuchsbedingung 1 angenommen.

Im Vergleich zwischen Andreaskreuz und Kombinationsschild entschieden ebenfalls signifikant mehr Teilnehmer systematisch falsch in ihrer Antworteingabe auf das Andreaskreuz und gaben an, es habe keine Bedeutung in Bezug auf die Regulierung der Vorfahrt (McNemar's $\chi^2 = 15,059$, $df = 1$, $p < ,001$). Auch Hypothese 2 wird in Versuchsbedingung 1 demnach angenommen.

Auch im Vergleich zwischen Andreaskreuz und dem Schild *Vorfahrt gewähren* entschieden signifikant mehr Teilnehmer systematisch falsch in ihrer Antworteingabe auf das Andreaskreuz und gaben fälschlicherweise an, es habe keine Bedeutung in Bezug auf die Regulierung der Vorfahrt (McNemar's $\chi^2 = 15,429$, $df = 1$, $p < ,001$). Somit wird auch Hypothese 3 in Versuchsbedingung 1 angenommen.

Der geringfügige Unterschied der richtigen Entscheidungen im Vergleich zwischen Straßenverkehrs-LSA und Bahnübergangs-LSA erreichte keine statistisch Signifikanz

(McNemar's $\chi^2 = 0$, $df = 1$, $p = 1$). In Bezug auf die Straßenverkehrs-LSA gaben alle Versuchsteilnehmer richtige Antworten und auch in Bezug auf die Bahnübergangs-LSA wurden nur von zwei der 56 Teilnehmer falsche Antworten gegeben. Hypothese 4 wird daher in Versuchsbedingung 1 abgelehnt.

Neben der Anzahl der Teilnehmer, die mindestens einmal richtig oder systematisch falsch antworteten, wurde die Wahlreaktionszeit in Bezug auf die sechs Verkehrszeichen, die im Versuch von Interesse waren, statistisch miteinander verglichen. In diesen Vergleichen wurden die durchschnittlichen Wahlreaktionszeiten aller Teilnehmer, die sich aus den drei Antworten je Verkehrszeichen ergaben gemäß den Hypothesen 5 bis 8 miteinander verglichen. In diesen Vergleichen wurden unter den Versuchsteilnehmern die mindestens einmal eine richtige Wahlentscheidung trafen sowohl die Wahlreaktionszeiten, die aus falschen Entscheidungen resultierten als auch die Wahlreaktionszeiten der richtigen Entscheidungen berücksichtigt. Die deskriptiven Ergebnisse der Wahlreaktionszeiten, die von den Versuchsteilnehmern benötigt wurden, bis eine Eingabe getätigt wurde, sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7

Deskriptive Statistik der Wahlreaktionszeiten in Bedingung 1

Verkehrszeichen	Durchschnittliche Wahlreaktionszeit in ms	Standardabweichung in ms
Andreaskreuz	907,5	303,6
Stoppschild	812,5	224,6
Kombinationsschild	879,5	265,0
Vorfahrt gewähren	866,4	280,3
Straßenverkehrs-LSA	679,7	248,1
Bahnübergangs-LSA	725,5	182,1

Wie in der statistischen Auswertung der richtigen und falschen Antworten wurde auch in der Auswertung der Wahlreaktionszeiten aufgrund der a priori festgelegten gerichteten Versuchshypothesen 5 bis 8 gezielte Paarvergleiche bezogen auf die Kombinationen der Verkehrszeichen durchgeführt, die im Versuch von Interesse waren. Daher wurden zur Untersuchung der Hypothesen 5 bis 8 vier einseitige t-Tests für abhängige Stichproben berechnet. Da vier Einzelvergleiche durchgeführt wurden, wurde das Signifikanzniveau über eine Bonferro-

ni-Korrektur angepasst, um eine Alphafehler-Kumulierung zu verhindern. Pro Einzelvergleich wurde das Signifikanzniveau auf diese Weise auf $\alpha = ,05 / 4 = ,0125$ festgelegt.

In keinem der vier Einzelvergleiche im Rahmen der ersten Versuchsbedingung zur Vorfahrtbedingung konnten statistisch signifikante Mittelwertsunterschiede festgestellt werden. Im Vergleich zwischen Andreaskreuz und Stoppschild waren die Wahlreaktionszeiten auf das Stoppschild mit durchschnittlich 812,5 ms ($SD = 224,6$ ms) zwar tendenziell kürzer als die Wahlreaktionszeiten auf das Andreaskreuz mit durchschnittlich 907,5 ms ($SD = 303,6$ ms) und es konnte ein kleiner Effekt festgestellt werden, allerdings erreicht dieser Unterschied nach Bonferroni-Korrektur des Signifikanzniveaus in der untersuchten Stichprobe keine statistische Signifikanz, $t(55) = 2,23$, $p = ,015$, $d = ,30$. Hypothese 5 wird in Versuchsbedingung 1 demnach verworfen.

Im Vergleich zwischen den Wahlreaktionszeiten auf das Andreaskreuz von $M = 907,5$ ms ($SD = 303,6$ ms) und auf das Kombinationsschild mit $M = 879,5$ ms ($SD = 265$ ms) konnte ebenfalls kein signifikanter Mittelwertsunterschied festgestellt werden, $t(55) = 0,74$, $p = ,233$, $d = ,10$. Auch im Vergleich der mittleren Wahlreaktionszeiten auf das Andreaskreuz und auf das Schild *Vorfahrt gewähren* ($M = 866,4$ ms, $SD = 280,3$), erreichte der in der Stichprobe festgestellte Unterschied zugunsten des Schilds *Vorfahrt gewähren* keine statistische Signifikanz $t(55) = 1,05$, $p = ,149$, $d = ,14$. Im Vergleich der Lichtsignalanlagen war festzustellen, dass durch die Versuchsteilnehmer auf die Straßenverkehrs-LSA ($M = 679,7$ ms, $SD = 248,1$ ms) schneller reagiert wurde als auf die Bahnübergangs-LSA ($M = 725,5$ ms, $SD = 182,1$). Zudem wurde ein kleiner Effekt festgestellt, doch auch dieser Mittelwertsunterschied erreichte keine statistische Signifikanz $t(55) = -1,41$, $p = ,083$, $d = -,19$. Auf Grundlage dieser Ergebnisse werden für die untersuchte Stichprobe die Hypothesen 6, 7 und 8 abgelehnt.

7.4.2 Bedingung 2 – Vorfahrt haben, Vorfahrt gewähren oder neutrales Verkehrszeichen?

In der zweiten Versuchsbedingung wurden die Versuchsteilnehmer instruiert, per Tastendruck als Reaktion auf jedes Verkehrszeichen anzugeben, ob man als Verkehrsteilnehmer an diesem Verkehrszeichen Vorfahrt hat oder ob man Vorfahrt gewähren muss. In Bezug auf die Verkehrszeichen, die hinsichtlich der Vorfahrt keine Bedeutung haben wurden die Versuchsteilnehmer instruiert keine Taste zu drücken. Jedes einzelne Verkehrszeichen erschien auch in dieser Bedingung dreimal. Äquivalent zur ersten Versuchsbedingung wurden zur Untersuchung der Hypothesen 1 bis 4 in Bedingung 2 für jedes Verkehrszeichen die Anzahl der 56

Versuchsteilnehmer, die mindestens einmal eine richtige Reaktion zeigten mit der Anzahl der Versuchsteilnehmer verglichen, die systematisch falsch antworteten. Die deskriptiven Ergebnisse zu dieser Untersuchung sind in Abbildung 21 dargestellt.

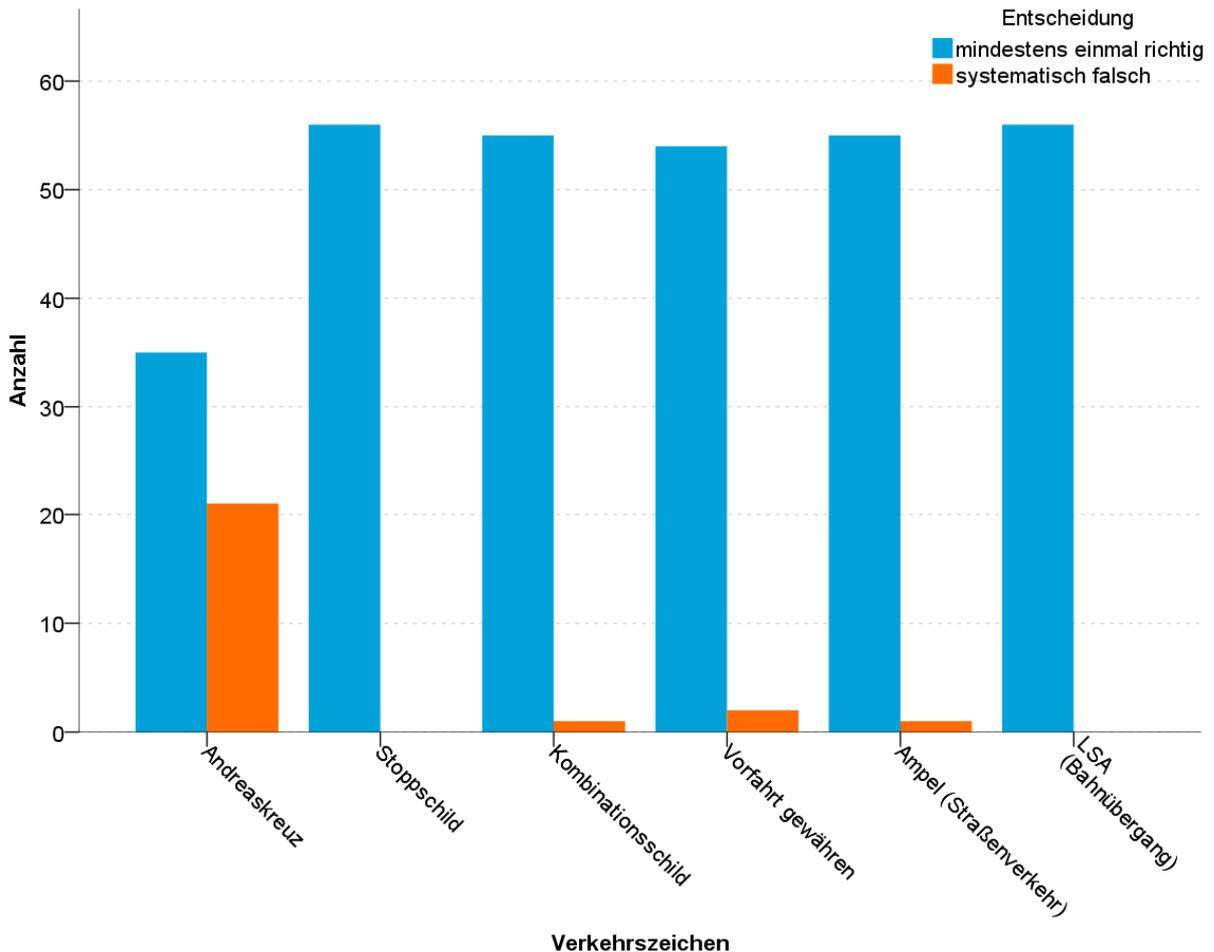


Abbildung 21. Übersicht der Anzahlen der Versuchsteilnehmer, die in Bedingung 2 mindestens einmal richtig reagierten beziehungsweise systematisch falsche Entscheidungen trafen

In der Entscheidung zur Bedeutung des Andreaskreuzes gaben 35 der 56 Versuchsteilnehmer mindestens einmal richtig an, dass man als Verkehrsteilnehmern an diesem Schild anderen Verkehrsteilnehmern die Vorfahrt gewähren muss. Die übrigen 21 Versuchsteilnehmer reagierten systematisch falsch. Keiner von diesen Teilnehmern gab an, man habe am Andreaskreuz Vorfahrt. Alle 21 Fehleinschätzungen stammten von Teilnehmern, die nicht reagierten, da sie der Meinung waren, das Andreaskreuz sei hinsichtlich der Vorfahrtregulierung ein neutrales Schild. Als Reaktion auf das Stoppchild gaben alle 56 Versuchsteilnehmer mindestens einmal richtig ein, dass dieses Schild der Regulierung der Vorfahrt dient. In der Reaktion auf das Kombinationsschild gaben 55 Teilnehmer richtige Antworten. Nur ein Teilnehmer antwortete systematisch falsch und nahm keine Eingabe vor in der Einschätzung, das

Kombinationsschild sei hinsichtlich der Vorfahrtregelung nicht von Bedeutung. Das Schild *Vorfahrt gewähren* wurde von 54 Teilnehmern mindestens einmal richtig mit der Regulierung der Vorfahrt in Beziehung gebracht, zwei Versuchsteilnehmer antworteten systematisch falsch. Beide gaben die Einschätzung ab, das Schild habe keine Bedeutung bezüglich der Vorfahrtregelung. In Bezug auf die Rot zeigende Straßenverkehrs-LSA mit drei Signalpositionen gaben 55 der Teilnehmer mindestens eine richtige Antwort. Ein Teilnehmer traf die falsche Entscheidung und nahm keine Eingabe vor als Einschätzung, die rote Straßenverkehrs-LSA sei hinsichtlich der Vorfahrtregelung nicht von Bedeutung. Auf die Rot zeigende Lichtsignalanlage des Bahnübergangs mit zwei Signalpositionen gaben alle 56 Teilnehmer mindestens eine richtige Antwort. Kein Teilnehmer traf eine systematisch falsche Antwortentscheidung.

Äquivalent zur ersten Versuchsbedingung wurden auch in der zweiten Versuchsbedingung gemäß den a priori festgelegten gerichteten Versuchshypothesen zur statistischen Auswertung vier gezielte Paarvergleiche anhand von McNemar-Tests berechnet. Damit wurde die Anzahl der Teilnehmer, die mindestens einmal richtig beziehungsweise systematisch falsch antworteten zwischen den Verkehrszeichen, die im Versuch von Interesse waren verglichen. Dies resultierte in vier Einzelvergleichen. Das Signifikanzniveau wurde über eine Bonferroni-Korrektur angepasst, um eine Alphafehler-Kumulierung zu verhindern. Für jeden der Einzelvergleiche wurde das Signifikanzniveau auf $\alpha = ,05 / 4 = ,0125$ festgelegt.

Im Vergleich zwischen Andreaskreuz und Stoppschild entschieden signifikant mehr Teilnehmer systematisch falsch in ihrer Antworteingabe auf das Andreaskreuz und gaben an, es habe keine Bedeutung in Bezug auf die Regulierung der Vorfahrt (McNemar's $\chi^2 = 19,048$, $df = 1$, $p < ,001$). Hypothese 1 wird in Versuchsbedingung 2 angenommen.

Im Vergleich zwischen Andreaskreuz und Kombinationsschild entschieden signifikant mehr Teilnehmer systematisch falsch in ihrer Antworteingabe auf das Andreaskreuz und gaben an, es habe keine Bedeutung in Bezug auf die Regulierung der Vorfahrt (McNemar's $\chi^2 = 16,409$, $df = 1$, $p < ,001$). Demnach wird auch Hypothese 2 in Versuchsbedingung 2 angenommen.

Im Vergleich zwischen Andreaskreuz und dem Schild *Vorfahrt gewähren* entschieden signifikant mehr Teilnehmer systematisch falsch in ihrer Antworteingabe auf das Andreaskreuz und gaben an, es habe keine Bedeutung in Bezug auf die Regulierung der Vorfahrt (McNemar's $\chi^2 = 14,087$, $df = 1$, $p < ,001$). Hypothese 3 wird daher in Versuchsbedingung 2 angenommen.

Im Vergleich zwischen der Straßenverkehrs-LSA und der Bahnübergangs-LSA wurde kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der Anzahl der Teilnehmer festgestellt, die richtige beziehungsweise falsche Entscheidungen trafen (McNemar's $\chi^2 = 0$, $df = 1$, $p = 1$). Hypothese 4 wird in Versuchsbedingung 2 abgelehnt.

Neben der Anzahl systematischer Falschantworten auf die sechs Verkehrszeichen wurden auch in der zweiten Bedingung die Wahlreaktionszeiten ausgewertet. Die durchschnittliche Wahlreaktionszeit aller Teilnehmer, die sich aus den drei Antworten je Verkehrszeichen ergab, wurde in vier Paarvergleichen miteinander verglichen. Die Teilnehmer, die in Bezug auf die sechs Verkehrsschilder systematisch keine Eingabe vornahmen, um anzugeben, dass ein Verkehrszeichen keine Bedeutung in Bezug auf die Vorfahrtregulierung hat, konnten in der statistischen Auswertung der Wahlreaktionszeiten nicht berücksichtigt werden. Die deskriptiven Ergebnisse der Wahlreaktionszeiten sind in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8

Deskriptive Statistik der Wahlreaktionszeiten in Bedingung 2

Verkehrszeichen	Durchschnittliche Wahlreaktionszeit in ms	Standardabweichung in ms
Andreaskreuz	949,5	434,3
Stoppschild	933,0	287,4
Kombinationsschild	873,3	242,9
Vorfahrt gewähren	1028,2	310,6
Straßenverkehrs-LSA	872,6	251,9
Bahnübergangs-LSA	844,3	228,9

Zur Auswertung der Wahlreaktionszeiten gemäß den gerichteten Versuchshypothesen 5 bis 8 wurden auch in der zweiten Versuchsbedingung vier Paarvergleiche anhand von einseitigen t-Tests für abhängige Stichproben berechnet. Das Signifikanzniveau wurde über eine Bonferroni-Korrektur angepasst, um eine Alphafehler-Kumulierung zu verhindern. Pro Einzelvergleich der Wahlreaktionszeit wurde das Signifikanzniveau auf diese Weise auf $\alpha = ,05 / 4 = ,0125$ angepasst. In den drei Paarvergleichen, in denen die Wahlreaktionszeit auf das Andreaskreuz Teil der Analyse war, konnten nur die Wahlreaktionszeiten von 35 der 56 Teilnehmer berücksichtigt werden. Die übrigen 21 Versuchsteilnehmer produzierten aufgrund ihrer systematischen Fehleinschätzungen keine gültigen Reaktionszeiten. Auch in Bezug auf

das Kombinationsschild, das Schild *Vorfahrt gewähren* und die Straßenverkehrs-LSA wurden die Teilnehmer, die keine Reaktionszeit produzierten nicht in den Paarvergleichen berücksichtigt. Durch die Anwendung von separaten Fallausschlüssen für die einzelnen Mittelwertvergleiche resultierten daher unterschiedliche Freiheitsgrade in den einzelnen Paarvergleichen.

In keinem der vier Einzelvergleiche konnten statistisch signifikante Mittelwertsunterschiede der Wahlreaktionszeit festgestellt werden. Im Vergleich zwischen Andreaskreuz und Stoppschild betragen die Wahlreaktionszeiten auf das Stoppschild durchschnittlich 933,0 ms ($SD = 287,4$ ms). Die Wahlreaktionszeiten auf das Andreaskreuz lagen im Durchschnitt bei 949,5 ms ($SD = 434,3$ ms). Der Unterschied ist statistisch nicht signifikant, $t(35) = 0,38$, $p = ,353$, $d = ,06$. Hypothese 5 wird in Versuchsbedingung 2 abgelehnt.

Der Unterschied zwischen den Wahlreaktionszeiten auf das Andreaskreuz mit $M = 949,5$ ms ($SD = 434,3$ ms) und auf das Kombinationsschild mit $M = 873,3$ ms ($SD = 242,9$ ms) erreichte trotz eines festgestellten kleinen Effektes angesichts des Bonferroni-korrigierten Signifikanzniveaus von $p = ,0125$ ebenfalls keine statistische Signifikanz, $t(35) = 1,80$, $p = ,041$, $d = ,30$. Hypothese 6 wird in Versuchsbedingung 2 daher abgelehnt.

Auch im Vergleich der mittleren Wahlreaktionszeiten auf das Andreaskreuz und auf das Schild *Vorfahrt gewähren* ($M = 1028,2$ ms, $SD = 310,6$ ms), erreichte der in der Stichprobe festgestellte Unterschied keine statistische Signifikanz $t(34) = -0,53$, $p = ,299$, $d = -,09$. In diesem Mittelwertvergleich war die mittlere Reaktionszeit auf das Schild *Vorfahrt gewähren* entgegen der Hypothese länger als die mittlere Reaktionszeit auf das Andreaskreuz. Hypothese 7 wird in Versuchsbedingung 2 abgelehnt.

Im Vergleich der Lichtsignalanlagen konnte kein signifikanter Unterschied in der mittleren Wahlreaktionszeit auf die Straßenverkehrs-LSA ($M = 872,6$ ms, $SD = 251,9$ ms) und die Bahnübergangs-LSA ($M = 844,3$ ms, $SD = 228,9$ ms) festgestellt werden, $t(55) = 0,57$, $p = ,286$, $d = ,08$. Hypothese 8 wird somit in Versuchsbedingung 2 abgelehnt.

7.4.3 Bedingung 3 – Anhalten, Bremsbereitschaft oder neutrales Verkehrszeichen?

In der dritten Bedingung des Versuchs mussten die Versuchsteilnehmer per Tastendruck als Reaktion auf jedes auf dem Bildschirm erscheinende Verkehrszeichen angeben, ob man als Verkehrsteilnehmer an diesem Verkehrszeichen anhalten muss, ob man bremsbereit sein muss oder ob das Verkehrszeichen weder ein Anhalten noch eine erhöhte Bremsbereitschaft erfordert. In Bezug auf die Verkehrszeichen, die weder ein Anhalten noch eine erhöhte

Bremsbereitschaft erfordern wurden die Versuchsteilnehmer instruiert keine Taste zu drücken. Jedes einzelne Verkehrszeichen erschien auch in dieser Bedingung dreimal. Wie in den ersten beiden Versuchsbedingungen wurden zur Untersuchung der Hypothesen 1 bis 4 in Bedingung 3 je Verkehrsschild die Anzahl der 57 Versuchsteilnehmer⁹, die mindestens einmal eine richtige Reaktion zeigten, mit der Anzahl der Versuchsteilnehmer verglichen, die systematisch falsch antworteten. Die deskriptiven Ergebnisse zu dieser Untersuchung sind in Abbildung 22 dargestellt.

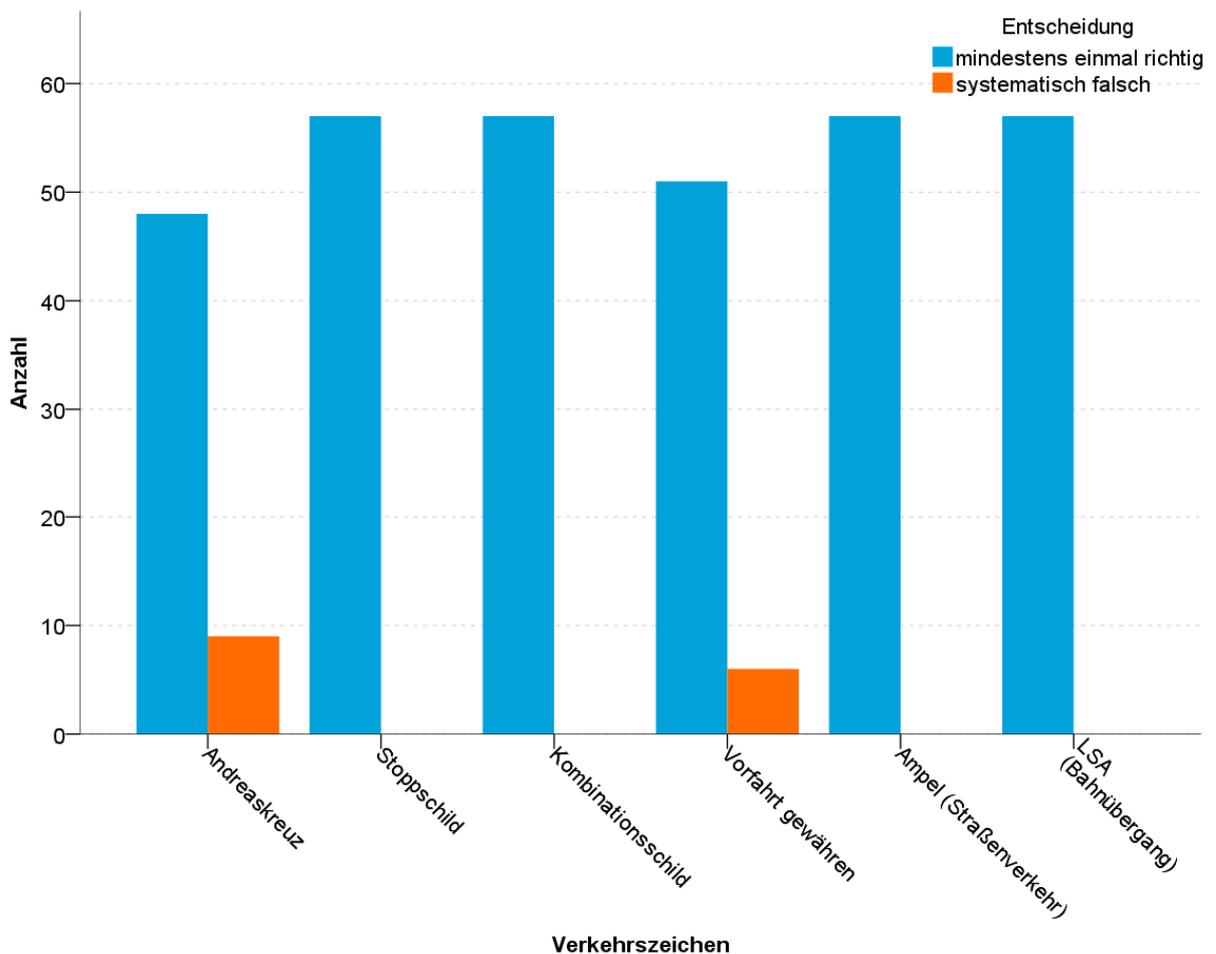


Abbildung 22. Übersicht der Anzahlen der Versuchsteilnehmer, die in Bedingung 3 mindestens einmal richtig reagierten beziehungsweise systematisch falsche Entscheidungen trafen.

In der Entscheidung zur Bedeutung des Andreaskreuzes gaben 48 der 57 Versuchsteilnehmer mindestens einmal richtig an, dass man als Verkehrsteilnehmer an diesem Schild bremsbereit sein muss. Die übrigen neun Versuchsteilnehmer reagierten systematisch falsch,

⁹ In der dritten Versuchsbedingung wurden die Datensätze von 57 Teilnehmern ausgewertet. In der ersten und zweiten Versuchsbedingung verwechselte jeweils ein Teilnehmer systematisch die Eingabetasten. Daher konnten in den ersten zwei Bedingungen nur die Datensätze von 56 Teilnehmern ausgewertet werden.

da sie der Meinung waren, dass man am Andreaskreuz weder anhalten noch bremsbereit sein müsse. Keiner der neun Teilnehmer gab an, man habe am Andreaskreuz Vorfahrt oder müsse anhalten. Als Reaktion auf das Stoppschild, das Kombinationsschild, die Straßenverkehrs-LSA und die Bahnübergangs-LSA gaben alle 57 Versuchsteilnehmer mindestens einmal richtig ein, dass man anhalten muss, wenn man den jeweiligen Verkehrszeichen als Verkehrsteilnehmer begegne. Bei keinem der in Versuchsbedingung 3 betrachteten Verkehrszeichen, die ein Anhalten erfordern kam es zu systematischen Fehlentscheidungen.

Das Schild *Vorfahrt gewähren* wurde unter den 57 Teilnehmern von 51 mindestens einmal richtig mit der Anforderung einer erhöhten Bremsbereitschaft in Verbindung gebracht. Sechs Teilnehmer antworteten systematisch falsch, wenn das Schild *Vorfahrt gewähren* auf dem Bildschirm erschien. Von den sechs Teilnehmern, die systematisch falsch antworteten, trafen fünf in jeder ihrer Reaktionen die Entscheidung, dass man anhalten muss und ein Teilnehmer, dass man weder anhalten noch bremsbereit sein muss.

Wie in den ersten zwei Versuchsbedingungen wurden auch in der dritten Versuchsbedingung zur statistischen Auswertung vier gezielte Paarvergleiche gemäß den vier gerichteten Versuchshypothesen 1 bis 4 berechnet. Anhand von McNemar-Tests wurde die Anzahl der Teilnehmer, die mindestens einmal richtig beziehungsweise systematisch falsch antworteten zwischen den relevanten Verkehrszeichen verglichen. Für jeden der vier Einzelvergleiche wurde das Signifikanzniveau über eine Bonferroni-Korrektur auf $\alpha = ,05 / 4 = ,0125$ reduziert.

Im Vergleich zwischen Andreaskreuz und Stoppschild entschieden signifikant mehr Teilnehmer systematisch falsch in ihrer Antworteingabe auf das Andreaskreuz und gaben an, man müsse weder anhalten noch bremsbereit sein (McNemar's $\chi^2 = 7,111$, $df = 1$, $p = ,008$). Hypothese 1 wird in Versuchsbedingung 3 angenommen.

Im Vergleich zwischen Andreaskreuz und Kombinationsschild entschieden signifikant mehr Teilnehmer systematisch falsch in ihrer Antworteingabe auf das Andreaskreuz (McNemar's $\chi^2 = 7,111$, $df = 1$, $p = ,008$). Auch Hypothese 2 wird daher in Versuchsbedingung 3 angenommen.

Im Vergleich zwischen Andreaskreuz und dem Schild *Vorfahrt gewähren* wurde kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen der Anzahl der Teilnehmer festgestellt, die richtige beziehungsweise falsche Entscheidungen trafen (McNemar's $\chi^2 = 0,364$, $df = 1$, $p = ,547$). Hypothese 3 wird somit für Versuchsbedingung 3 abgelehnt.

Im Vergleich zwischen der Straßenverkehrs-LSA und der Bahnübergangs-LSA wurde auf die Durchführung eines statistischen Vergleichs verzichtet, da bei beiden Verkehrszeichen

keiner der Teilnehmer systematische Fehlentscheidungen traf. Alle 57 Teilnehmer wussten bei beiden Verkehrszeichen, dass ein Anhalten erforderlich ist. Hypothese 4 wird daher in Bedingung 3 abgelehnt.

Die durchschnittlichen Wahlreaktionszeiten aller Teilnehmer, die sich aus den drei Antworten je Verkehrszeichen ergaben, wurden in vier Paarvergleichen miteinander verglichen. Die Teilnehmer, die keine Eingabe vornahmen um anzuzeigen, ein Verkehrszeichen erfordere weder ein Anhalten noch eine erhöhte Bremsbereitschaft konnten im statistischen Vergleich der Wahlreaktionszeiten nicht berücksichtigt werden. Die deskriptiven Ergebnisse der Wahlreaktionszeiten sind in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9

Deskriptive Statistik der Wahlreaktionszeiten in Bedingung 3

Verkehrszeichen	Durchschnittliche Wahlreaktionszeit in ms	Standardabweichung in ms
Andreaskreuz	1083,5	377,9
Stoppschild	785,9	243,4
Kombinationsschild	745,3	182,1
Vorfahrt gewähren	1193,9	401,7
Straßenverkehrs-LSA	669,5	138,5
Bahnübergangs-LSA	754,8	141,0

Zur Auswertung der Wahlreaktionszeiten für die Überprüfung der gerichteten Versuchshypothesen 5 bis 8 wurden vier Paarvergleiche anhand von einseitigen t-Tests für abhängige Stichproben berechnet. Das Signifikanzniveau wurde über eine Bonferroni-Korrektur angepasst und auf $\alpha = ,05 / 4 = ,0125$ festgelegt. In den drei Paarvergleichen, in denen die Wahlreaktionszeit auf das Andreaskreuz Teil der Analyse war, konnten maximal 50 der 57 Wahlreaktionszeiten der Versuchsteilnehmer berücksichtigt werden. Die sieben Versuchsteilnehmer, die nicht reagierten, da sie annahmen, dass man am Andreaskreuz weder bremsbereit sein noch anhalten müsse und keine Reaktionszeiten produzierten konnten nicht berücksichtigt werden. Im Paarvergleich zwischen Andreaskreuz und dem Schild *Vorfahrt gewähren* konnten zudem die Reaktionszeitdaten eines Versuchsteilnehmers bezüglich des Schildes *Vorfahrt gewähren* nicht berücksichtigt werden, da er der Meinung war, dass man an dem Schild weder bremsbereit sein noch anhalten müsse und daher keine Eingabe vornahm.

Der Unterschied der Mittelwerte der Wahlreaktionszeit auf das Andreaskreuz mit 1083,5 ms ($SD = 377,9$ ms) und auf das Stoppschild mit 785,9 ms ($SD = 243,4$ ms) erreichte bei einem großen Effekt statistische Signifikanz, $t(49) = -5,59$, $p < ,001$, $d = ,79$. Hypothese 5 wird in Versuchsbedingung 3 angenommen.

Der Unterschied der Wahlreaktionszeit auf das Andreaskreuz mit durchschnittlich 1083,5 ms ($SD = 377,9$ ms) und auf das Kombinationsschild mit durchschnittlich 745,3 ms ($SD = 182,1$ ms) erreichte ebenfalls statistische Signifikanz, $t(49) = -6,04$, $p < ,001$, $d = ,85$. Auch hier konnte ein großer Effekt des Verkehrszeichens auf die Reaktionszeit festgestellt werden. Hypothese 6 wird in Versuchsbedingung 3 angenommen.

Der Vergleich der mittleren Wahlreaktionszeit auf das Andreaskreuz mit 1083,5 ms ($SD = 377,9$ ms) und auf das Schild *Vorfahrt gewähren* mit 1193,9 ms ($SD = 401,7$ ms) wies keine statistische Signifikanz auf, $t(48) = 1,44$, $p = ,921$, $d = -,21$. Entgegen der Hypothese 7 war die mittlere Wahlreaktionszeit der Versuchsteilnehmer auf das Schild *Vorfahrt gewähren* tendenziell länger als die mittlere Reaktionszeit auf das Andreaskreuz. Hier konnte ein kleiner Effekt festgestellt werden. Die Hypothese 7 wird daher in Versuchsbedingung 3 abgelehnt.

Der Mittelwertvergleich der Wahlreaktionszeit auf die Straßenverkehrs-LSA ($M = 669,5$ ms; $SD = 138,5$ ms) und die Bahnübergangs-LSA ($M = 754,8$ ms; $SD = 141$ ms) erreichte statistische Signifikanz bei einem mittleren Effekt, $t(56) = -4,44$, $p < ,001$, $d = -,59$. Hypothese 8 wird in Versuchsbedingung 3 daher angenommen.

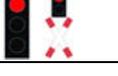
7.4.4 Zusammenfassung

Zusammenfassend sind die Ergebnisse der statistischen Auswertungen der Fehlerhäufigkeiten und der Wahlreaktionszeiten der drei Teilversuche in Tabelle 10 dargestellt. Darin sind sowohl die Einzelvergleiche in Bezug auf die richtigen und systematisch falschen Antworten dargestellt als auch die Einzelvergleiche der Wahlreaktionszeiten. In allen Versuchsbedingungen fiel es einem deutlichen Anteil an Versuchsteilnehmern schwerer, die richtige Antwortentscheidung zum Andreaskreuz zu treffen als in der Reaktion auf die Verkehrszeichen, mit denen verglichen wurde. Eine Ausnahme stellte hier nur das Schild *Vorfahrt gewähren* dar, auf das in der dritten Bedingung auch von einigen Teilnehmern falsch reagiert wurde. Was die Wahlreaktionszeit angeht fiel auf, dass gerade auf das Stoppschild und das Kombinationsschild tendenziell schneller reagiert wurde als auf das Andreaskreuz. Der Unterschied in der Reaktionszeit erreichte jedoch nur in der dritten Versuchsbedingung statisti-

sche Signifikanz, in der entschieden werden musste, ob das Verkehrszeichen ein Anhalten oder eine Bremsbereitschaft erfordert oder neutral ist.

Tabelle 10

Ergebnisübersicht der statistischen Vergleiche der relevanten Verkehrszeichen

Bedingung	Verkehrszeichen	Vergleich der Anzahl korrekter und inkorrekt er Antworten			Vergleich der Reaktionszeiten			
		<i>df</i>	<i>McNemar's</i> χ^2	<i>p</i>	<i>df</i>	<i>t</i>	<i>p</i>	<i>Cohen's</i> <i>d</i>
1 - Vorfahrtbedeutung oder nicht?		1	18,050	< ,001	55	2,24	,015	,30
		1	15,059	< ,001	55	0,74	,233	,10
		1	15,429	< ,001	55	1,05	,149	,14
		1	0	1	55	-1,41	,083	-,19
2 - Vorfahrt haben, Vorfahrt gewähren oder neutrales Verkehrszeichen?		1	19,048	< ,001	35	0,38	,353	,06
		1	16,409	< ,001	35	1,80	,041	,30
		1	14,087	< ,001	34	-0,53	,299	-,09
		1	0	1	55	0,57	,286	,08
3 - Anhalten, Bremsbereitschaft oder neutrales Verkehrszeichen?		1	7,111	,008	49	5,59	< ,001	,79
		1	7,111	,008	49	6,04	< ,001	,85
		1	0,364	,547	48	-1,44	,079	-,21
		-	-	-	56	-4,44	< ,001	-,59

Hinsichtlich der Vergleiche der Straßenverkehrs-LSA und der Bahnübergangs-LSA wurde in keiner Bedingung ein signifikanter Unterschied der Häufigkeiten richtiger und falscher Einschätzungen festgestellt. Im Falle beider Lichtsignalanlagen vermochten in den drei

Versuchsbedingungen nahezu alle Versuchsteilnehmer die richtige Wahlentscheidung zu treffen. Ein Unterschied war jedoch hinsichtlich der Wahlreaktionszeit festzustellen. Insbesondere in der dritten Versuchsbedingung wussten die Teilnehmer das richtige Verhalten in Bezug auf die Straßenverkehrs-LSA schneller abzurufen als auf die Bahnübergangs-LSA.

7.5 Diskussion

Die Ergebnisse der Untersuchungen, die in den Kapiteln 4 und 5 beschrieben wurden, lieferten Hinweise darauf, dass das Wissen in Bezug auf Bahnübergangssymbolik bei Verkehrsteilnehmern mangelhaft ist beziehungsweise die damit assoziierten erforderlichen Verhaltensweisen häufig nicht problemlos abgerufen werden können. Dieser Versuch diente der kontrollierten Untersuchung dieser Indizien sowie der Überprüfung der Annahme, dass das Wissen zur Bedeutung von Vorfahrtssymbolik aus dem Bereich von Straßenkreuzungen weiter verbreitet ist und schneller abgerufen werden kann.

In drei Versuchsbedingungen wurden in diesem Laborversuch das Verständnis und die Geschwindigkeit des Wissensabrufs zu Bahnübergangssymbolik mit Verkehrszeichen zur Vorfahrtregulierung aus dem Bereich von Straßenkreuzungen verglichen. Zusätzlich wurde das Kombinationsschild aus Andreaskreuz und Stoppschild mit in den Versuch aufgenommen, da es potentiell eine kostengünstige Maßnahme zur Erhöhung der Kreuzungssicherheit nicht technisch gesicherter Bahnübergänge darstellt.

Die Ergebnisse belegen, dass das Wissen zur Bedeutung von Verkehrsschildern, die an Straßenkreuzungen eingesetzt werden bei mehr Teilnehmern vorhanden ist als das Wissen in Bezug auf die Bedeutung des Andreaskreuzes. Zudem sind die Schemata und Skripte zu Straßenverkehrsschildern tendenziell schneller abrufbar, verglichen mit dem Andreaskreuz.

Viele Versuchsteilnehmer stellten in ihren Einschätzungen offenbar keinen Zusammenhang zwischen dem Andreaskreuz und seiner Bedeutung als vorfahrtregulierendes Verkehrsschild her. Es ist anzunehmen, dass das Andreaskreuz bei vielen Menschen als Hinweis auf den Kreuzungsbereich Bahnübergang nicht mit der gleichen Bedeutung besetzt ist wie Vorfahrtsschilder an einer Straßenkreuzung, an der man dem kreuzenden Verkehr die Vorfahrt gewähren muss. Es ist anzunehmen, dass dies unter anderem am höheren Abstraktionsgrad des Andreaskreuzes liegt, zum Beispiel in Vergleich mit dem Stoppschild: Der Schriftzug *STOP* auf dem Stoppschild stellt eine eindeutige schriftliche Botschaft dar, über die das Andreaskreuz nicht verfügt.

Bezüglich des Abstraktionsgrades ist allerdings festzustellen, dass auch das Schild *Vorfahrt gewähren* in seiner Erscheinung eher als abstrakt zu beurteilen ist und über keine schriftliche Aufforderung verfügt. Eine Kreuzform erscheint im Alltag vermutlich sogar häufiger als Warnsymbol (z. B. als Gefahrensymbol bei chemischen Stoffen) als ein auf der Spitze stehendes Dreieck. Dennoch wurden in Bezug auf das Andreaskreuz in allen Bedingungen auch im Vergleich mit dem Schild *Vorfahrt gewähren* mehr systematische Fehlentscheidungen getroffen. Diesbezüglich ist anzunehmen, dass Repräsentationen der Vorfahrtssymbolik an Straßenkreuzungen und die angemessenen Verhaltensweisen stärker verfestigt und leichter abrufbar sind als Bedeutung und Verhalten in Zusammenhang mit Bahnübergangssymbolik. Das kann daran liegen, dass von vielen Menschen vermutlich häufiger Straßenkreuzungen befahren werden als Bahnübergänge und die Verkehrssymbole an Straßenkreuzungen den Teilnehmern daher vertrauter sind. Zudem tritt an Straßenkreuzungen in der Regel häufiger als an Bahnübergängen der Fall ein, dass ein anderer Verkehrsteilnehmer kreuzt und damit die spezifische Verkehrssituation, die durch die entsprechenden vorfahrtrelevanten Verkehrszeichen reguliert wird. Die Wiederholung sicherheitsrelevanten Anhaltens oder Verlangsamens als Reaktion auf ein vorfahrtrelevantes Verkehrszeichen (z. B. dem Stoppschild oder dem Schild *Vorfahrt gewähren*) wird in der Gegenwart eines kreuzenden Verkehrsteilnehmers potentiell verstärkt und verfestigt somit das Wissen und angemessene Verhalten in Bezug auf diese Verkehrszeichen.

Da insbesondere an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen Verkehrsteilnehmer den Bahnübergang meist in der Abwesenheit eines kreuzenden Zuges überqueren ist es denkbar, dass das Andreaskreuz in der subjektiven Beurteilung der Verkehrsteilnehmer bezüglich seiner Vorfahrtrelevanz nach einer Weile an Bedeutung verliert. Dies wird möglicherweise noch dadurch verstärkt, dass an den Bahnübergängen, an denen viel Eisenbahnverkehr kreuzt Lichtsignalanlagen oder Schrankenanlagen installiert sind, welche die Hauptaufmerksamkeit der Verkehrsteilnehmer auf sich ziehen (vgl. Abschnitt 5.4.1). An technisch gesicherten Bahnübergängen hat das Andreaskreuz für Verkehrsteilnehmer als Anhaltspunkt zur gegenwärtigen Vorfahrtssituation und der Anpassung ihres Verhaltens daher kaum Relevanz, verglichen mit Lichtsignalanlagen und Schranken.

Bezogen auf die Anforderung, am Andreaskreuz bremsbereit zu sein, wurden im Rahmen der dritten Bedingung des Versuchs nicht so viele systematische Fehlentscheidungen getroffen wie in den ersten beiden Bedingungen. Dennoch war die Anzahl systematischer Fehlentscheidungen in der Reaktion auf das Andreaskreuz auch in der dritten Versuchsbedin-

gung signifikant höher, sowohl im Vergleich mit dem Stoppschild als auch mit dem Kombinationsschild. Der Einzelvergleich zwischen Andreaskreuz und dem Schild *Vorfahrt gewähren* wurde in der dritten Versuchsbedingung nicht signifikant, weil auch in der Reaktion auf das Schild *Vorfahrt gewähren* einige Teilnehmer systematisch falsch entschieden. Diese Teilnehmer urteilten jedes Mal, wenn das Schild *Vorfahrt gewähren* auf dem Monitor in der dritten Bedingung erschien man müsse anhalten anstatt anzugeben, dass es genügt bremsbereit zu sein. Auch wenn das Anhalten per Definition im dritten Versuchsdurchgang eine falsche Antwort war, da ein Anhalten nur dann erforderlich ist, wenn ein anderer Verkehrsteilnehmer den Weg kreuzt, stellt das Anhalten nichtsdestotrotz ein sicheres Verhalten dar. Verglichen dazu resultierten in der Beurteilung des Andreaskreuzes in dieser Bedingung alle Fehlurteile aus der systematischen Fehlentscheidung, dass keine Anpassung des Fahrverhaltens erforderlich ist. Im Vergleich zur möglichen Fehlannahme, dass man anhalten müsse stellt die Annahme, dass das Andreaskreuz keinerlei Relevanz in Bezug auf die Anpassung des eigenen Fahrverhaltens hat in der konkreten Situation am Bahnübergang die gefährlichere Fehleinschätzung dar.

Betrachtet man die Antworten der Versuchsteilnehmer auf das Kombinationsschild aus Andreaskreuz und Stoppschild, fällt auf, dass in allen drei Versuchsbedingungen kaum systematische Fehlentscheidungen getroffen wurden. In Bedingung 1 urteilten 53 der 56 Teilnehmer richtig, dass dieses Schild Vorfahrtbezug habe. In Bedingung 2 urteilten 55 der 56 Teilnehmer, dass man an diesem Schild anderen Verkehrsteilnehmern die Vorfahrt gewähren müsse. In Bedingung 3 entschieden alle Teilnehmer richtig, dass man als Reaktion auf das Kombinationsschild anhalten müsse. Als Vergleich dazu wurden in Bezug auf das Andreaskreuz alleine in der ersten Versuchsbedingung durch 20, in der zweiten Versuchsbedingung durch 21 und in der dritten Versuchsbedingung durch neun Versuchsteilnehmer systematische Fehlentscheidungen getroffen.

Auch im Vergleich der Wahlreaktionszeiten wurde in allen drei Versuchsbedingungen in der Tendenz schneller auf das Kombinationsschild reagiert als auf das Andreaskreuz. Allerdings erreichte dieser Unterschied zugunsten des Kombinationsschildes nur in der dritten Bedingung statistische Signifikanz. In der zweiten Bedingung erreichte der Unterschied trotz eines p -Werts von ,03 aufgrund des angepassten Signifikanzniveaus knapp keine statistische Signifikanz. Auf das Stoppschild wurde in den Bedingungen 1 und 3 schneller reagiert als auf das Andreaskreuz. In der dritten Bedingung erreichte dieser Unterschied statistische Signifikanz, in der ersten Versuchsbedingung erreichte der Unterschied nur knapp keine statistische

Signifikanz ($p = ,015$). In Bedingung 2 wurde auf das Andreaskreuz leicht schneller reagiert als auf das Stoppschild.

Der Unterschied in den Wahlreaktionszeiten zwischen Andreaskreuz und Stoppschild beziehungsweise zwischen Andreaskreuz und Kombinationsschild wäre noch deutlicher ausgefallen, wenn man die Daten von Ausreißern bereinigt hätte. In der ersten Bedingung gab es drei Ausreißer in der Reaktion auf das Stoppschild, vier Ausreißer in der Reaktion auf das Kombinationsschild und nur einen Ausreißer in der Reaktion auf das Andreaskreuz. Auch in der dritten Versuchsbedingung gab es mehr Ausreißer in der Reaktion auf Stoppschild und Kombinationsschild als auf das Andreaskreuz. Allerdings gab es keine inhaltliche Rechtfertigung für einen Ausschluss der in den Ergebnissen vorkommenden Ausreißer, daher wurde darauf verzichtet. Der Unterschied der Wahlreaktionszeiten zwischen Andreaskreuz und dem Schild *Vorfahrt gewähren* erreichte in keiner der Bedingungen statistische Signifikanz. Auf das Vorfahrtsschild wurde nur in Bedingung 1 schneller reagiert als auf das Andreaskreuz. In den Bedingungen 2 und 3 war die Reaktionszeit auf das Andreaskreuz kürzer als auf das Andreaskreuz. Das Schild *Vorfahrt gewähren* hat sich im Versuch nicht im gleichen Maß als vorteilhaft erwiesen wie das Stoppschild und das Kombinationsschild. Zwar wurden auch in der Reaktion auf das Schild *Vorfahrt gewähren* deutlich weniger Fehler gemacht als in Bezug auf das Andreaskreuz, aber es erschien insbesondere unter Berücksichtigung der Beurteilungen in der dritten Versuchsbedingung nicht so eindeutig wie das Stoppschild und das Kombinationsschild. Zudem wiesen die Wahlreaktionszeiten als Kenngröße der Geschwindigkeit des Abrufs von Schemata und Skripten zu den Verkehrszeichen keine klaren Vorteile im Vergleich zwischen den Schild *Vorfahrt gewähren* und dem Andreaskreuz aus.

Das Kombinationsschild könnte eine für die Verkehrsteilnehmer leicht verständliche und darüber hinaus kostengünstige Alternative zum Andreaskreuz darstellen, um die Sicherheit nicht technisch gesicherter Bahnübergänge zu erhöhen. Dies geht vor allem aus den Daten der richtigen und falschen Entscheidungen hervor, aber auch die Tendenz in den Wahlreaktionszeitdaten legt diesen Schluss nahe. Zu berücksichtigen ist, dass das erforderliche Verhalten in der Reaktion auf das Kombinationsschild am Bahnübergang ein anderes wäre als auf das Andreaskreuz. Die Verkehrsteilnehmer müssten anhalten und nicht nur die Geschwindigkeit verringern. Gleichwohl scheint der Einsatz des Kombinationsschildes vor allem aufgrund seiner verständlicheren Handlungsaufforderung im Vergleich zum Andreaskreuz angebracht. Die Daten dieses Versuches stützen dabei die Befunde der im Rahmen dieser Dissertation durchgeführten Befragungen, in denen die Bedeutung des Andreaskreuzes häufig nicht kor-

rekt benannt werden konnte (Kapitel 4) und der Untersuchung zum Blick- und Fahrverhalten (Kapitel 5), in der das Verhalten in der Anfahrt an den Bahnübergang von vielen Teilnehmern nicht in angemessener Weise angepasst wurde.

Argumente gegen den Einsatz des Stoppschildes als Ergänzung des Andreaskreuzes die dahin gehen, dass der Verkehrsfluss stocken würde, wenn man ein Stoppschild als Ergänzung des Andreaskreuzes anbringen würde (Wittenberg, Heinrichs, Mittmann & Mallikat, 2006), scheinen im Kontext nicht technisch gesicherter Bahnübergänge angesichts des potentiellen Sicherheitszugewinns unangebracht. Nicht technisch gesicherte Bahnübergänge kommen ohnehin eher an Stellen vor, die vom Straßenverkehr nicht besonders stark frequentiert werden. Auch das Argument, dass durch ein Anhalten vor dem Bahnübergang die Gefahr des sogenannten *Abwürgens* des Motors erhöht wird spricht nicht zwangsläufig gegen den Einsatz des Kombinationsschildes. Wenn ein Verkehrsteilnehmer anhält und wie an anderen Kreuzungen mit Stoppschild prüft, ob ein Eisenbahnfahrzeug herannaht, ist anzunehmen, dass er das Wiederanfahrmanöver nur dann einleitet, wenn kein Eisenbahnfahrzeug herannaht. Somit bestünde im Falle eines Abwürgens theoretisch ausreichend Zeit, um den Motor wieder zu starten und den Gefahrenraum sicher zu verlassen. Zur Untermauerung dieser Gegenthese wäre es aufschlussreich, zukünftig eine Untersuchung zum Blickverhalten von Verkehrsteilnehmern an Kreuzungen und Bahnübergängen mit Stoppschildern durchzuführen.

Im Vergleich zwischen der an Bahnübergängen vorkommende Lichtsignalanlage mit zwei Signalpositionen und der Lichtsignalanlage aus dem Straßenverkehr mit drei Signalpositionen, konnte in Bezug auf das Wissen der Versuchsteilnehmer in keiner Versuchsbedingung ein statistisch signifikanter Unterschied festgestellt werden. Sowohl die Kenntnis der Bedeutung der Bahnübergangs-LSA als auch der Straßenverkehrs-LSA war unter den Untersuchungsteilnehmern weitestgehend verbreitet und es wurden kaum systematische Fehlerurteile getroffen. Der Unterschied in der Wahlreaktionszeit erreichte in der dritten Versuchsbedingung statistische Signifikanz, da durch die Versuchsteilnehmer schneller mit der richtigen Einschätzung reagiert wurde, dass man anhalten muss, wenn auf dem Bildschirm eine Rot zeigende Straßenverkehrs-LSA erschien als wenn eine Bahnübergangs-LSA erschien. Es ist zu vermuten, dass bei einem Ausschluss der Ausreißer auch der Mittelwertvergleich der Wahlreaktionszeit auf die Lichtsignalanlagen in der ersten Bedingung einen stärkeren Effekt ausgewiesen hätte. In dieser Bedingung gab es keine Ausreißer in der Reaktion auf die Bahnübergangs-LSA, dafür drei Ausreißer auf die Straßenverkehrs-LSA, von denen zwei Ausreißer als extrem zu beurteilen waren. Allerdings besteht wie bei den zuvor diskutierten Einzel-

vergleichen der Schilder auch in Bezug auf den Vergleich der Lichtsignalanlagen kein angemessener Grund zum Ausschluss der Ausreißer.

Auf Grundlage der in diesem Versuch erhobenen Daten besteht kein konkreter Anlass, den Einsatz von Lichtsignalanlagen mit zwei Signalpositionen an Bahnübergängen in Frage zu stellen. Zwar wurden als Reaktion auf die Straßenverkehrs-LSA tendenziell etwas schneller die richtigen Entscheidungen abgerufen und eingegeben als in der Reaktion auf die Bahnübergangs-LSA (in den Bedingungen 1 und 3), es kam jedoch bei beiden Lichtsignalanlagen kaum zu systematischen Fehlurteilen bezüglich ihrer Bedeutung. Es wäre interessant gewesen, die rot leuchtende Blinklichtanlage, die an Bahnübergängen ebenfalls zum Einsatz kommt mit in die Datenauswertung aufzunehmen, da in den durchgeführten Befragungen (Kapitel 4) deutlich wurde, dass die Blinklichtanlage häufig fehlinterpretiert wird und für ein Warnsignal gehalten wird, das kein Anhalten erfordert. In dieser Untersuchung konnte das Blinken allerdings nicht realitätsgetreu dargestellt werden. Die Abbildung der Blinklichtanlage mit einem aktiven roten Lichtsignal, das nicht blinkt hätte von den Versuchsteilnehmern als Dauerlicht missverstanden werden können. Daher wurde in diesem Versuch auf die Berücksichtigung der Blinklichtanlage verzichtet. Nichtsdestotrotz sollten das Nutzerverständnis und ihr Verhalten an Bahnübergängen mit Blinklichtanlage als technische Sicherung in künftigen Untersuchungen kritisch betrachtet werden.

Einige Aspekte der in diesem Kapitel beschriebenen Studie sind kritisch zu diskutieren. Zunächst ist nochmals auf die Stichprobe der Untersuchung hinzuweisen, die hauptsächlich junge Erwachsene umfasste und hinsichtlich ihrer Altersstruktur damit recht homogen war. Daher sind Rückschlüsse aus den Ergebnissen dieses Versuchs in erster Linie auf die Population der Verkehrsteilnehmer in der Altersklasse der Zwanzig- bis Dreißigjährigen zulässig.

Darüber hinaus sind bestimmte Aspekte der Versuchsdurchführung zu überdenken. Das Vorgehen zur Beurteilung des Wissens, die Anzahlen der Teilnehmer zu vergleichen, die pro Durchgang in den drei Wiederholungen je Schild mindestens einmal richtig reagierten gegenüber den Teilnehmern, die systematisch falsch reagierten ist prinzipiell nicht alternativlos. Es wäre ebenso möglich gewesen, die durchschnittliche Fehleranzahl in Bezug auf die einzelnen Verkehrszeichen miteinander zu vergleichen. Der Ansatz, die Teilnehmeranzahl zu betrachten, die drei Fehlantworten in einer Bedingung in Bezug auf ein Verkehrszeichen gaben, erschien jedoch aufschlussreicher. Auf diese Weise kann ein klarerer Rückschluss auf den Anteil der Versuchsteilnehmer gezogen werden, die fehlerhafte Schemata und Skripte in Bezug auf ein Verkehrszeichen haben. Zudem sind die Anteile der Teilnehmer, die systematisch

falsch antworteten besser in Bezug zu den Erkenntnissen aus der Befragung (vgl. Kapitel 4) und der Studie zum Blick- und Fahrverhalten zu setzen (vgl. Kapitel 5).

Weiterhin ist das Vorgehen zu diskutieren, im Vergleich der Wahlreaktionszeiten auch die Reaktionszeiten der falschen Entscheidungen mit aufzunehmen. Alternativ wäre es möglich gewesen, nur den Anteil der richtigen Reaktionszeiten zwischen zwei Schildern miteinander zu vergleichen. Der Ansatz des Vorgehens, auch die Wahlreaktionszeiten der falschen Entscheidungen mit in den Vergleich aufzunehmen bestand darin, dass die Reaktionszeit in diesem Versuch als Maß der Verfügbarkeit des Wissens beziehungsweise der Schemata und Skripte in Bezug auf die Verkehrszeichen diene. Eine langsamere oder schnellere Reaktionszeit im Falle einer falschen Entscheidung stellt auch einen Wissensabruf dar. Langsame Reaktionszeiten bei falschen Antworten sind eher ein Indiz dafür, dass das Wissen zu einem Verkehrszeichen schwieriger abzurufen ist. Schnelle Reaktionszeiten bei falschen Antworten können für eine hohe subjektive Sicherheit trotz fehlerhaftem Wissen sprechen. Damit lassen sowohl die Reaktionszeiten bei richtigen als auch falschen Antworten Rückschlüsse zur Geschwindigkeit der Aktivierung von Schemata und Skripten bezüglich der einzelnen Verkehrszeichen zu. Zudem erlaubt die Auswertung der Anzahl der Teilnehmer, die bezüglich einzelner Schilder systematisch falsche Antworten trafen gute Rückschlüsse auf die Angemessenheit der Schemata und Skripte.

Als ungünstiges methodisches Vorgehen in diesem Versuch erwies sich allerdings, in der zweiten und dritten Versuchsbedingung ein gezieltes Nichtreagieren auf ein erscheinendes Schild als Antwortmöglichkeit zur Auswahl zu stellen. In der zweiten Bedingung konnten die Versuchsteilnehmer durch eine ausbleibende Reaktion zum Ausdruck bringen, dass sie der Ansicht sind, dass ein Verkehrszeichen keine Bedeutung in Bezug auf die Vorfahrt hat. In der dritten Bedingung konnte durch dieses Verhalten angegeben werden, dass man das Fahrverhalten als Reaktion auf ein Verkehrszeichen nicht anpassen muss. Der Gedanke, diese Eingabe in dieser Weise zu wählen bestand darin, eine Kongruenz dahingehend zu schaffen, dass wenn ein Verkehrszeichen *keine* Bedeutung in Bezug auf die Vorfahrt oder das erforderliche Verhalten hat, auch *keine* Eingabe erforderlich ist. So wurden die Alternativen der aktiven Eingaben per Tastendruck in den Bedingungen 2 und 3 auf zwei reduziert, äquivalent zur ersten Bedingung. Dies hatte allerdings die negative Auswirkung, dass die Reaktionszeiten, wenn Teilnehmer der Meinung waren, ein Verkehrszeichen habe keine Bedeutung in Bezug auf die Vorfahrtregulierung (Bedingung 2) oder keine Relevanz bezüglich der Anpassung des Fahrverhaltens (Bedingung 3), nicht zu interpretieren sind. Durch fehlende Werte entstanden

in den Mittelwertvergleichen der Wahlreaktionszeiten in der zweiten und dritten Versuchsbedingung verkleinerte Vergleichsstichproben, insbesondere in den Vergleichen, in denen die Reaktionszeiten auf das Andreaskreuz relevant waren, da viele Teilnehmer in der Reaktion auf das Andreaskreuz fälschlicherweise systematisch keine Eingabe vornahmen.

Auch die feste Reihenfolge der drei Versuchsbedingungen ist diskutabel und entspricht nicht einem üblichen experimentellen Vorgehen, in dem randomisiert wird, um zum Beispiel Reihenfolgeeffekte zu vermeiden. Die feste Reihenfolge der Bedingungen im Versuch kann potentiell zu Lerneffekten oder zu Ermüdungseffekten geführt haben. Die feste Reihenfolge wurde dennoch gewählt, da in der dritten Versuchsbedingung der Anteil der bahnübergangsbezogenen Verkehrszeichen an der Gesamtheit der Verkehrszeichen in dieser Bedingung sehr hoch war. Dies hätte wiederum zu ungewollten Priming-Effekten in den anderen zwei Bedingungen in Bezug auf bahnübergangsbezogene Verkehrszeichen führen können, wenn Bedingung 3 als erste bearbeitet worden wäre. Die feste Bearbeitungsreihenfolge führte dazu, dass der Bahnübergangsfokus der Untersuchung in den ersten beiden Versuchsbedingungen noch nicht deutlich wurde. Dies erschien für den Versuch wichtiger als die Vermeidung von Effekten, die sich aus einer festen Bedingungsreihenfolge ergeben können.

Bezüglich des Kombinationsschildes, das in dieser Untersuchung als Alternative zur Erhöhung der Sicherheit nicht technisch gesicherter Bahnübergänge betrachtet wurde ist anzumerken, dass es in seiner Darstellung nicht der Anbringung in den Ländern entspricht, die diese Kombination bereits einsetzen. In diesem Versuch wurde das Stoppschild im Zentrum des Andreaskreuzes dargestellt. In Ländern, in denen die Kombination aus beiden Schildern Anwendung findet, werden meist zwei separate Schilder verwendet und das Stoppschild oberhalb des Andreaskreuzes angebracht.

Eine Verhaltensweise, die für die sichere Überquerung von Bahnübergängen von Bedeutung ist, ist die Sichtprüfung nach links und rechts. Dieses Verhalten zeigten zahlreiche Teilnehmer der vorherigen Untersuchung zum Blick- und Fahrverhalten nicht (Kapitel 5). Es wäre denkbar, in einer weiteren Untersuchung die Frage nach der Notwendigkeit eines Blickes nach links und rechts als Bedingung mit aufzunehmen. Eine weitere Möglichkeit bestünde darin, in einer zukünftigen Reproduktion des Versuchs anstelle von Grafiken der Verkehrszeichen Fotos zu verwenden. So könnten die Verkehrszeichen konkreter in Kontext eines Bahnübergangs oder einer Straßenkreuzung gerückt werden und die externale Validität potentiell erhöht werden. In diesem Versuch wurde davon abgesehen, da mit einem solchen

Vorgehen kein eindeutiger Rückschluss auf den Wissensabruf rein in Bezug auf das Verkehrszeichen möglich ist.

Zusammenfassend bestätigt dieser Versuch Rückschlüsse, die in ähnlicher Weise auch aus der zuvor beschriebenen Befragung und der Untersuchung zum Blick- und Fahrverhalten hervorgingen. Das Wissen in Bezug auf das Andreaskreuz war bei einem deutlichen Anteil der Versuchsteilnehmer mangelhaft. Die richtige Bedeutung des Andreaskreuzes in Bezug auf die Regulierung der Vorfahrt und das erforderliche Verhalten in Bezug auf die Anpassung der Geschwindigkeit konnte von Teilen der Versuchsteilnehmer nicht wiedergegeben werden. Der Ansatz, Schilder der Vorfahrtregulierung aus dem Bereich von Straßenverkehrskreuzungen als Ergänzung des Andreaskreuzes an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen einzusetzen erscheint auch unter Abwägung der Gegenargumente sinnvoll. Insbesondere der Einsatz der Kombination aus Stoppschild und Andreaskreuz erscheint sinnvoll. Diese Kombination umfasst einerseits das Andreaskreuz als universelles Bahnübergangsschild und andererseits das Stoppschild, das in seiner Bedeutung leicht verständlich ist. Im Sinne der Zielsetzung dieser Dissertation, auf Grundlage des Erlebens und Verhaltens des Straßenverkehrsteilnehmers nutzerzentrierte Gestaltungsmaßnahmen zu identifizieren, mit der die Kreuzungssicherheit an Bahnübergängen auf kosteneffiziente Weise erhöht werden kann wird empfohlen, den Einsatz des Kombinationsschildes an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen auch in Deutschland zu erwägen.

Zur detaillierten Betrachtung der tatsächlichen Wirkung des Kombinationsschildes auf das Blick- und Fahrverhalten von motorisierten Verkehrsteilnehmern in der Annäherung an den Bahnübergang wird die Durchführung eines Versuchs angeraten, der bezüglich der Durchführung dem Vorgehen der in Kapitel 5 beschriebenen Untersuchung ähnelt. Anhand von Blick- und Fahrverhalten einer Stichprobe von Fahrern sollte vergleichend untersucht werden, ob im realen Einsatz mehr Fahrer nach Einsatz des Stoppschildes ihre Geschwindigkeit in der Zufahrt auf den Bahnübergang verringern und ob mehr Fahrer eine Sichtprüfung der peripheren Bahnübergangsregionen vornehmen.

8 PeriLight – Eine Erfindung zur Blicklenkung an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen

Die Ergebnisse der im vorherigen Kapitel 7 beschriebenen Untersuchung stützen die Annahme, dass ein Großteil der Verkehrsteilnehmer Schwierigkeiten damit hat, in Gegenwart eines Andreaskreuzes die angemessenen Verhaltensweisen abzurufen. In Zusammenhang mit den in Kapitel 5 dokumentierten Ergebnissen der Untersuchung zum Blick- und Fahrverhalten stärken diese Ergebnisse die Annahme, dass viele Verkehrsteilnehmer einen Bahnübergang nicht etwa übersehen, sondern keine Sichtprüfung durchführen, weil dies in ihren Skripten zum Verhalten in der Zufahrt auf nicht technisch gesicherte Bahnübergänge nicht verankert ist. Der im vorherigen Kapitel untersuchte Ansatz, das Stoppschild an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen als Ergänzung zum Andreaskreuz einzusetzen, um auf besser gelernte und stärker verfestigte Skripte zurückzugreifen zu können stellt eine denkbare Möglichkeit dar, um Verkehrsteilnehmer potentiell auch im Verkehrskontext zu einem sichereren Verhalten und der Sichtprüfung zu veranlassen.

Ein weiterer, in Abschnitt 6.4 eingeführter Ansatz besteht in der gezielten Lenkung der Blicke von Straßenverkehrsteilnehmern in die Peripherie des Bahnübergangs mithilfe von Lichtreizen. Die Idee, ortsfeste Lichtquellen unabhängig von Installationen auf Schienenfahrzeugen in der Bahnübergangsumgebung zu installieren, um eine Sichtprüfung zu provozieren führte zu einer Erfindung mit dem Namen *PeriLight*, der sich aus den sichtbaren Bestandteilen des Systems ableitet, peripheren Lichtquellen am Bahnübergang (Abbildung 23). Vor der Dokumentation der Evaluation von PeriLight wird die eigentliche Erfindung in diesem Kapitel beschrieben.



Abbildung 23. Rechte Leuchteinheit des Systems PeriLight

8.1 Technischer Aufbau und Positionierung am Bahnübergang

PeriLight wirkt mit Lichtreizen auf die visuelle Aufmerksamkeit des Straßenverkehrsteilnehmers in der Annäherung an einen Bahnübergang ein. Die Lichtreize sollen die visuelle Aufmerksamkeit des Straßenverkehrsteilnehmers auf sich ziehen und ihn dazu animieren, nach links und rechts entlang der Schienen zu schauen.

Die wesentlichen Bestandteile von PeriLight sind zwei LED-Blitzlichtquellen und ein Auslösesensor, der entlang der Straße positioniert wird, die auf den Bahnübergang zuführt (Abbildung 24). In einem ersten Aufbau am Schauplatz der im nachfolgenden Kapitel beschriebenen Versuche wurde zur Auslösung ein Ultraschallsensor 80 m vor dem Bahnübergang eingesetzt. In dieser Distanz befindet sich die letzte Entfernungsbake vor dem Bahnübergang und es besteht ausreichend Zeit für eine Sichtprüfung und das Anhalten vor dem

Bahnübergang, sollte ein herannahendes Schienenfahrzeug erblickt werden.

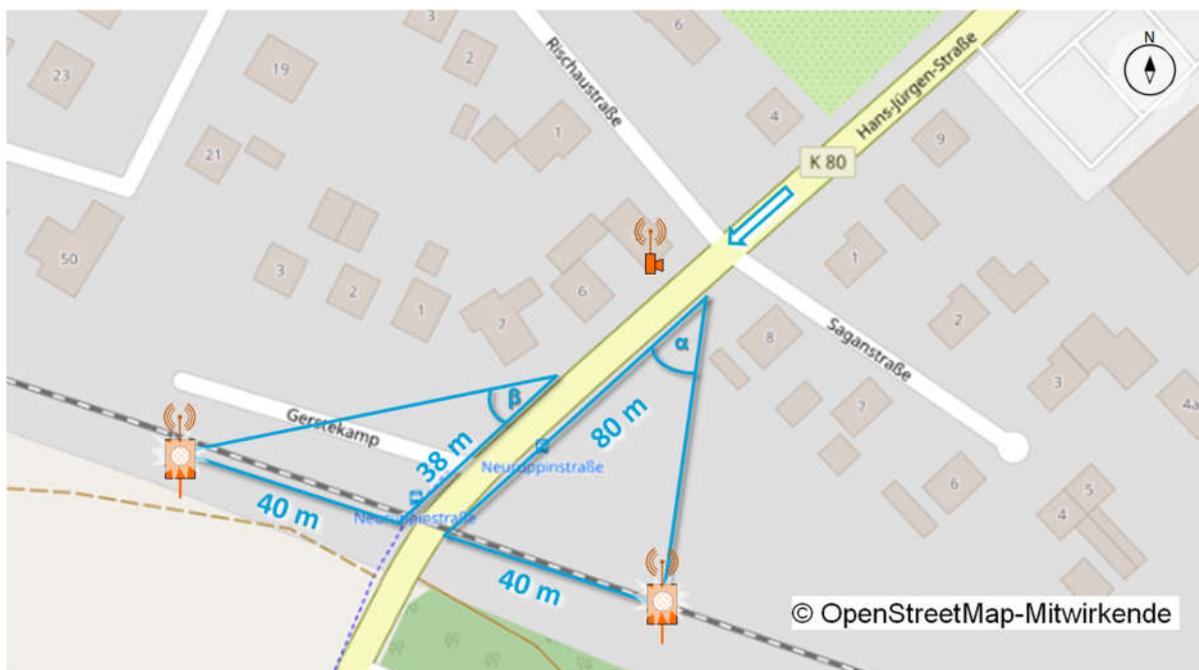


Abbildung 24. Aufbau von PeriLight am Bahnübergang zwischen Hans-Jürgen-Straße und Bundesallee in Braunschweig (eigene Abbildung basierend auf einem Kartenausschnitt aus © [OpenStreetMap](#)).

Wenn der Ultraschallsensor einen Straßenverkehrsteilnehmer detektiert, wird ein Funksignal an die linke und rechte Leuchteinheit von PeriLight gesendet. Die LED-Leuchten standen im Versuchsaufbau je 40 m links und rechts der Straße in Gleisnähe. Werden sie durch das Funksignal des Sensors ausgelöst, leuchten beide Leuchten jeweils zehn Mal zeitlich versetzt für 200 ms abwechselnd weiß und rosa auf. Die genaue Lichtreizabfolge pro Leuchte wird in Abbildung 25 illustriert. Im System PeriLight sind pro Leuchteinheit 19 CREE™-LED-Einheiten eingebaut, die beispielsweise auch im Veranstaltungsbereich zum Einsatz kommen. Sie sind kreisförmig in einem Durchmesser von 30 cm in einem Hartplastikkorpus angeordnet und werden von einer Plexiglasscheibe gegen äußere Einwirkungen geschützt. Jede einzelne der 19 LED-Einheiten sorgt für einen Lichtstrom von bis zu 200 Lumen. Insbesondere mit ihrer hohen Robustheit und ihrer Toleranz gegenüber Kälte (Baer, Seifert & Barfuß, 2016) eignen sich moderne LED auch für unterschiedliche Anwendungen unter den erhöhten Belastungen des Schienenverkehrs.



Abbildung 25. Lichtreizabfolge von PeriLight in den Versuchen: Die dargestellte Sequenz wird pro Leuchteinheit fünfmal durchlaufen.

In der Systemgestaltung wurde bewusst auf jeglichen technischen Zusammenhang mit der Infrastruktur des Schienenverkehrs verzichtet. PeriLight wird ausgelöst, wann immer der Ultraschallsensor einen Straßenverkehrsteilnehmer detektiert. Dies geschieht unabhängig davon, ob ein Zug herannaht oder nicht. In dieser Eigenart unterscheidet sich PeriLight von den klassischen technischen Bahnübergangssicherungsarten wie Lichtsignal- oder Schrankenanlagen, die in der Regel nur im Falle eines herannahenden Schienenfahrzeugs aktiviert werden. Der Vorteil des Verzichts auf eine Interaktion mit der Bahnübergangstechnik besteht unter anderem darin, dass PeriLight auf diese Weise eher zu einem Teil der straßenverkehrsseitigen Infrastruktur wird. Daher müssen keine derart aufwändigen und kostspieligen Sicherheitsnachweise geführt werden, wie sie bei Leit- und Sicherungstechnik im Schienenverkehr üblich sind.

Für erste Funktionstests und die Untersuchung der Wirkung von PeriLight auf Autofahrer unter realistischen Bedingungen wurde das System an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang in Watenbüttel aufgebaut, einem Vorort Braunschweigs. Am Bahnübergang zwischen der Hans-Jürgen-Straße und der Bundesallee kreuzt die aus Nordosten zuführende Straße die eingleisige Bahnstrecke in einem Winkel von annähernd 90°. In den im folgenden Kapitel beschriebenen Versuchen wurde der Bahnübergang aus nordöstlicher Richtung befahren. Die Sichtdreiecke auf der linken beziehungsweise rechten Seite des Bahnübergangs unterscheiden sich voneinander. Die linke Bahnübergangsseite in Richtung der Zufahrt, die in den Versuchen gewählt wurde, war zum Zeitpunkt der Untersuchungen ab einer Distanz von 80 m frei einsehbar. Die rechte Seite des Bahnübergangs war in der Zufahrt aufgrund von Bebauung erst ab einer Distanz von 38 m gut einsehbar. Die linke Leuchte des Systems Peri-

Light befindet sich demnach am Auslösepunkt der Leuchten 80 m vor dem Bahnübergang in einem initialen Winkel von 27° links zur Straße, die auf den Bahnübergang zuführt (Winkel α in Abbildung 24). Die rechte Leuchte befindet sich am Punkt 38 m vor dem Bahnübergang, an dem sie zum ersten Mal wahrzunehmen ist, in einem initialen Winkel von 46° rechts der Fahrspur (Winkel β in Abbildung 24). Nähert sich ein Fahrer dem Bahnübergang fahrenderweise an, so vergrößern sich die Sichtwinkel auf die Lichtquellen von PeriLight. Je weiter man sich dem Bahnübergang annähert, desto weiter rücken die Leuchten ins periphere Sichtfeld. Die Anbringungshöhe der Leuchten wurde in der Versuchsinstallation so gewählt, dass das Zentrum der Lichtaustrittsfläche sich ungefähr auf Höhe des oberen Drittels der Windschutzscheibe eines PKW befand.

8.2 Psychophysiologische Wirkweise und Hintergrund der Systemgestaltung von PeriLight

Der wesentliche Gedanke hinter PeriLight besteht darin, psychophysiologische Gesetzmäßigkeiten der visuellen menschlichen Informationsverarbeitung zu nutzen, um das richtige und sichere Verhalten in der Bahnübergangsannäherung bei Straßenverkehrsteilnehmern auszulösen: Die Sichtprüfung der linken und rechten Peripherie am Bahnübergang, um feststellen zu können, ob ein Schienenfahrzeug den eigenen Fahrweg am Bahnübergang kreuzt. Der wesentliche Aspekt der visuellen Aufmerksamkeit, der auch für das System PeriLight von zentraler Bedeutung ist, wird durch Wickens und Hollands (1999) wie folgt beschrieben:

Visuelle Aufmerksamkeit wird zu Elementen gezogen, die groß, hell, bunt und veränderlich (Anmerkung: zum Beispiel blinkend) sind, ein Charakteristikum, das im Auffinden visueller Warnungen ausgenutzt werden kann, aber das Treffen von Entscheidungen beeinflussen kann. Solche salienten Elemente können genutzt werden, um visuelle Aufmerksamkeit zu leiten oder ihr eine Richtung zu geben (...). Ein abruptes Auftreten eines Stimulus (Anmerkung: zum Beispiel eine aufleuchtende Lichtquelle) dient auch dazu Aufmerksamkeit auf sich zu ziehen, im Speziellen im peripheren Sichtbereich (Remington, Johnston & Yantis, 1992; Yantis & Jonides, 1984). (S. 75)

Zusammenfassend können drei Hauptaspekte identifiziert werden, die dazu führen, dass ein Reiz im Sichtfeld die visuelle Aufmerksamkeit auf sich zieht: Die Salienz des Objektes beziehungsweise des Reizes, die Abruptheit seines Auftretens und seine Position im Sichtfeld. Auf alle drei Aspekte wird in den folgenden Absätzen näher eingegangen.

Salienz

Die Wahrnehmung eines Objektes hängt nicht nur von seiner eigenen Erscheinung ab, sondern insbesondere auch davon, wie gut es sich von seiner Umgebung unterscheidet. Unterscheidet sich ein Objekt in einem oder mehreren Aspekten stark von seiner Umgebung, wird es auch als besonders salient bezeichnet und hat ein erhöhtes Potential, die visuelle Aufmerksamkeit auf sich zu ziehen (Theeuwes, 1992). Beispiele für Objekteigenschaften, die zu einer hohen Salienz eines Objektes in seiner Umgebung führen können, wurden in der oben angeführten Beschreibung von Wickens und Hollands (1999) dargelegt. Besonders große, farbige, helle oder blinkende Objekte heben sich nicht in allen, jedoch in vielen Umgebungen auffällig von ihrer Umgebung ab. Weitere emergente Objekteigenschaften, die salienzerhöhend wirken können sind dessen räumliche Ausrichtung oder seine Bewegung (Wickens & Hollands, 1999). Je deutlicher sich ein Reiz in einem Aspekt seiner Erscheinung von seiner Umgebung unterscheidet, desto eher zieht er die visuelle Aufmerksamkeit auf sich (Theeuwes, 1992).

Abruptes Auftreten eines Stimulus

Das plötzliche Auftreten eines Reizes in der Umgebung beziehungsweise seine abrupte Veränderung ist ein weiterer Aspekt, der die Aufmerksamkeit in Richtung eines bestimmten Objektes oder Reizes im menschlichen Sichtfeld ziehen kann (Irwin, Colcombe, Kramer & Hahn, 2000; Lambert, Spencer & Mohindra, 1987; Remington, Johnston & Yantis, 1992; Yantis & Jonides, 1984). Wickens und Hollands (1999) führen im als Beispiel das Erleuchten eines Lichtes an. Diese Wirkung wird beispielsweise in der Installation von Warnleuchten in technischen Systemen genutzt, mit denen der Zweck verfolgt wird, über ihr Erleuchten die Aufmerksamkeit eines Bedieners auf sich zu ziehen.

Periphere Sicht

In der zu Beginn des Abschnitts angeführten Beschreibung von Wickens und Hollands (1999) wird betont, dass insbesondere Reize, die in der Peripherie auftauchen, ein erhöhtes Potential besitzen, die menschliche Aufmerksamkeit auf sich zu ziehen. Die physiologische Ursache dieses Phänomens ist in der speziellen Aufteilung der Photorezeptorzellen in der Netzhaut (Retina) des menschlichen Auges zu finden. Die Erläuterung der in diesem Zusammenhang relevanten Sachverhalte in den folgenden Absätzen wird auf die Aspekte beschränkt, die eine Bedeutung für die Funktion von PeriLight haben.

Objekte werden für das menschliche Auge sichtbar, wenn sie Licht emittieren oder Licht aus der Umgebung reflektieren, das durch die Linse des Auges gebrochen wird, so dass

ein Abbild der Umgebung auf der Retina des menschlichen Auges entsteht (Gibson, 1986). Dort wird das Licht durch zwei Arten von Photorezeptorzellen, sogenannten Stäbchen und Zapfen, in elektrische Energie umgewandelt, die über neuronale Verschaltungen im menschlichen Gehirn weiterverarbeitet wird (Goldstein, 2008). Die Stäbchen und Zapfen tragen ihre Namen vor allem aufgrund ihrer spezifischen Form. Sie unterscheiden sich jedoch auch hinsichtlich Ihren Eigenschaften und ihrer Verteilung auf der Retina.

Die spezifische räumliche Verteilung der Rezeptorzellen wird deutlich, wenn man den Wunsch hat, einen bestimmten Bereich im visuellen Feld scharf zu sehen. Wenn man beispielsweise ein neues Objekt im Sichtfeld anschauen möchte, fokussiert man dieses Objekt mit seinem Blick. Das heißt, man bewegt die Augen und/oder den Kopf so, dass das Objekt von Interesse genau im zentralen Sichtfeld liegt. Nur dann sieht man das Objekt scharf und in allen seinen Details. Dies liegt daran, dass das Abbild des Objektes, wenn man es fokussiert, in der sogenannten Sehgrube (Fovea Centralis) der Retina abgebildet wird. Die Fovea ist ein kleines Areal von ungefähr 0,33 mm Durchmesser im Zentrum der Retina, in der die Zapfen die einzigen vorkommenden Photorezeptorzellen sind (Pinel, 2007). Stäbchen sind in diesem Bereich nicht vorhanden.

Die Position von Objekten im Sichtfeld wird häufig über eine Winkelangabe kenntlich gemacht. Das Zentrum der Fovea entspricht dabei einem Winkel von 0° . Das sogenannte zentrale Sichtfeld, in dem das scharfe Sehen möglich ist, erstreckt sich dabei bis zu einer Exzentrizität von 3° des Fixationspunkts (Purves & Williams, 2004). Die 5.000.000 in der Retina vorkommenden Zapfen sind verallgemeinernd als Rezeptorzellen zu klassifizieren, die im menschlichen Sehapparat für die detaillierte Wahrnehmung von Formen und Farben zuständig sind (Goldstein, 2008).

Auch im peripheren Sichtbereich der Retina, dem Bereich jenseits einer Exzentrizität von 3° des visuellen Fokus, kommen Zapfen vor. Im peripheren Sichtfeld ist die Konzentration der Stäbchen, der zweiten Art der Photorezeptorzellen, im Vergleich jedoch weitaus höher (Goldstein, 2008). Die Tatsache, dass die Stäbchen nicht dem Scharfsehen dienen, kann man sich im aussichtslosen Selbstversuch verdeutlichen, ein Objekt im peripheren Sichtfeld zu fokussieren, ohne den Blick direkt darauf zu richten. Dies ist nicht möglich. Die 120.000.000 Stäbchen in der menschlichen Retina haben jedoch eine andere wichtige Funktion für die visuelle Wahrnehmung. Sie sind äußerst empfindlich für Bewegungen, Kontraste und Veränderungen im peripheren Sichtfeld und dienen damit der stimulusinduzierten Neuausrichtung der visuellen Aufmerksamkeit (Lambert et al., 1987; Remington, Johnston & Yantis, 1992). Tref-

fen Lichtreize aus dem peripheren Sichtfeld dementsprechend auf die peripheren Bereiche der menschlichen Retina ist von einer Neuausrichtung der visuellen Aufmerksamkeit in Richtung der Quelle der Lichtreize auszugehen.

Konsequenzen für die Blicklenkung am Bahnübergang

Die Gestaltung des Systems PeriLight ist im Bahnübergangskontext die technische Konsequenz der psychophysiologischen Grundlagen zur Lenkung der visuellen Aufmerksamkeit. Die Salienz des Systems PeriLight wird durch die großflächigen Lichtaustrittsflächen der Leuchteinheiten sichergestellt, die mit leistungsstarken LED bestückt sind. Somit erzeugt PeriLight helle Lichtreize in der linken und rechten Peripherie am Bahnübergang, um die Stäbchen der menschlichen Retina zu stimulieren. Zudem blinken die Leuchtvorrichtungen unterschiedlichfarbig weiß und rosa, um durch den Wechsel die Salienz zusätzlich zu erhöhen. Es ist anzunehmen, dass PeriLight sich in der Sichtumgebung der meisten nicht technisch gesicherten Bahnübergänge stark abhebt, die meist in Umgebungen vorkommen, die eher reizarm sind. Es wurden bewusst Lichtfarben gewählt, die weder im Straßen noch im Eisenbahnverkehr eine inhaltliche Bedeutung haben noch für bestimmte Zwecke oder Fahrzeuge reserviert sind.

Neben der Berücksichtigung des Kriteriums der Salienz, die eine Aufmerksamkeitslenkung begünstigt, erfüllt PeriLight durch seine abrupte Auslösung auch das zweite Kriterium, das eine Neuausrichtung der visuellen Aufmerksamkeit begünstigt. Die Leuchteinrichtungen links und rechts des Bahnübergangs sind nicht dauerhaft aktiv, sondern werden nur dann abrupt ausgelöst, wenn der Straßenverkehrsteilnehmer den straßenseitigen Auslösesensor in der Zufahrt auf den Bahnübergang passiert. Die periphere Positionierung der Leuchteinrichtungen am Bahnübergang begünstigt die Blicklenkung in Reaktion auf die Lichtreize, da in den peripheren Bereichen der Retina Stäbchen die vorherrschenden Photorezeptorzellen sind, die besonders empfindlich auf Bewegungen und Kontraste reagieren.

Bahnübergänge in Umgebungen, die Reize bieten, die hinsichtlich der Salienz mit PeriLight konkurrieren könnten, wie beispielsweise Leuchtreklamen, liegen meist an Orten, die von Straßenverkehrsteilnehmern stark frequentiert werden. Solche Bahnübergänge sind in der Regel mit klassischen technischen Sicherungseinrichtungen wie Schranken- und/oder Lichtsignalanlagen gesichert. Für den Einsatz an technisch gesicherten Bahnübergängen kommt PeriLight nicht in Frage. An solchen Bahnübergängen sollen die Straßenverkehrsteilnehmer ihre Aufmerksamkeit vor allem auf dem Zustand der technischen

Sicherungsanlagen richten, um aus deren Zustand abzuleiten, ob ein Anhalten erforderlich ist. An nicht technisch gesicherten Bahnübergängen hingegen ist der Straßenverkehrsteilnehmer verantwortlich für die sichere Überquerung des Bahnübergangs, die er mit einer aufmerksamen Sichtprüfung des linken und rechten Schienenbereichs gewährleisten kann. Da, wie in Abschnitt 5.4 dargestellt, die Sichtprüfung durch Straßenverkehrsteilnehmer an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen häufig vernachlässigt wird, soll PeriLight sie dazu animieren nach links und rechts zu schauen.

Zusammengefasst bestehen insbesondere in der hohen Salienz und der abrupten Einschaltung von PeriLight Eigenschaften, von denen anzunehmen ist, dass sie eine effektive Lenkung der visuellen Aufmerksamkeit bedingen. Die beschriebenen theoretischen Grundlagen stellen den Ausgangspunkt der Hypothesenbildung der beiden Teilversuche zur Evaluation des Systems PeriLight dar, die im folgenden Kapitel beschrieben werden.

9 Untersuchung 4: Wirksamkeit peripherer Lichtreize auf das Blickverhalten von Autofahrern an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang

9.1 Einleitung

Mit der im vorangehenden Kapitel beschriebenen Erfindung PeriLight wird eine Alternative zu Maßnahmen angeboten, die versuchen, Verkehrsteilnehmer über die Vermittlung von sicherheitsbezogenen Botschaften und deren Verständnis zu einem sicheren Verhalten zu bewegen. Durch den gezielten Einsatz von Lichtreizen, die aus den peripheren Bereichen eines nicht technisch gesicherten Bahnübergangs auf Straßenverkehrsteilnehmer einwirken, wird das Prinzip verfolgt, eine reizinduzierte, unwillkürliche Neuausrichtung der Aufmerksamkeit zu provozieren, die keiner tieferen mentalen Verarbeitung bedarf. Damit soll sicheres Verhalten in Form einer Sichtprüfung erzwungen werden, unabhängig davon, ob ein Straßenverkehrsteilnehmer angemessene Skripte zur Überquerung eines nicht technisch gesicherten Bahnübergangs aus dem Langzeitgedächtnis abrufen kann oder nicht. Es liegt die Annahme zugrunde, dass ein Straßenverkehrsteilnehmer die richtigen Konsequenzen zieht, falls er bei der Sichtprüfung am Bahnübergang ein Schienenfahrzeug erblickt.

Zur Untersuchung der Wirkung von PeriLight auf Autofahrer wurden zwei unabhängige Untersuchungen im realen Verkehrsraum der Stadt Braunschweig im Vorort Watenbüttel durchgeführt. Der genaue Ort, an dem die Versuchsanordnung aufgebaut wurde, wurde in Abschnitt 8.1 beschrieben. Die erste Untersuchung wurde bei Tageslicht durchgeführt, die zweite Untersuchung bei Dunkelheit. Während der Versuchsfahrten überfuhr jeder Versuchsteilnehmer zweimal einen nicht technisch gesicherten Bahnübergang. Bei der ersten Überquerung des Bahnübergangs war PeriLight inaktiv, sie diente als Kontrollmessung. Bei der zweiten Überquerung wurde PeriLight aktiviert und sendete Lichtpulsationen aus den Peripherien links und rechts des Bahnübergangs aus. Zur Evaluation der Wirksamkeit von PeriLight wurde das Blick- und Fahrverhalten der Versuchsteilnehmer zwischen den beiden Überfahrten des Bahnübergangs verglichen. Die Versuchsteilnehmer wussten im Vorfeld der Untersuchungen nicht, dass der Fokus auf dem Fahr- und Blickverhalten am Bahnübergang liegt. Aus den in Abschnitt 8.2 beschriebenen psychophysiologischen Grundlagen, die das Wirkprinzip von PeriLight bedingen können für die beiden Teilversuche zur Untersuchung

des Systems Hypothesen abgeleitet werden, die im folgenden Abschnitt als Grundlage der Versuchsdurchführung dargestellt werden.

9.2 Hypothesen

Die in diesem Abschnitt beschriebenen Hypothesen stellen den Ausgangspunkt beider Teilversuche zur Untersuchung von PeriLight dar. Dieselben Hypothesen gelten also für die Versuchsdurchführung bei Tageslicht und die Versuchsdurchführung bei Dunkelheit. Die in Abschnitt 8.2 beschriebenen Hintergründe zur psychophysiologischen Wirkweise von PeriLight rechtfertigen die Formulierung gerichteter Hypothesen.

Hypothese 1 – Blick nach links und rechts am Bahnübergang

Während der Zufahrten auf den Bahnübergang, bei denen PeriLight aktiv ist, schaut eine größere Anzahl der Versuchsteilnehmer mindestens einmal vor der Bahnübergangsüberfahrt nach links beziehungsweise rechts als während der Zufahrten, bei denen PeriLight inaktiv ist.

Hypothese 2 – Zeitpunkt des Blicks nach links und rechts

Während der Zufahrten auf den Bahnübergang, bei denen PeriLight aktiv ist, schauen die Versuchsteilnehmer frühzeitiger nach links beziehungsweise rechts als während der Zufahrten, bei denen PeriLight inaktiv ist.

Hypothese 3 – Geschwindigkeit

Während der Zufahrten auf den Bahnübergang, bei denen PeriLight aktiv ist, verlangsamen die Versuchsteilnehmer ihre Geschwindigkeit stärker als während der Zufahrten, bei denen PeriLight inaktiv ist.

Hypothese 4 – Bremsverhalten

Kein Versuchsteilnehmer führt während der Zufahrten auf den Bahnübergang, bei denen PeriLight aktiv ist, eine Vollbremsung aus. Als Grenzwert einer Vollbremsung wird in diesem Zusammenhang eine Bremsverzögerung mit einer negativen Beschleunigung von -5 m/s^2 festgelegt¹⁰.

¹⁰ Grundlage dieses Kriteriums ist die Festlegung in § 41, Absatz 4 der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO), nach der Bremsen von Kraftfahrzeugen mit einer Höchstgeschwindigkeit über 25 km/h mindestens eine Vollverzögerung von -5 m/s^2 ermöglichen müssen (Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz, 2012).

Blendung

Neben den vier formulierten Hypothesen wird anhand der De Boer-Skala (De Boer, 1967) das Ausmaß der subjektiven Blendung erhoben, die durch PeriLight erzeugt wird. Die ermittelten Blendwerte werden deskriptiv dargestellt. Die verwendete Skala wird in Anlage D abgebildet.

9.3 Versuch 1 – Evaluation der Wirkung von PeriLight bei Tageslicht

Im ersten Teilversuch wurde die Wirkung des Systems PeriLight auf Autofahrer unter Tageslichtbedingungen untersucht. Da Autofahrer unter den Straßenverkehrsteilnehmern den größten Anteil der Verursacher von Bahnübergangsunfällen ausmachen, stehen sie im Zentrum der Betrachtung. In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Hypothesen des Versuchs beschrieben. Im Folgenden werden die methodische Herangehensweise und die Ergebnisse des Versuchs dargestellt. Die Einordnung der Ergebnisse im Rahmen einer Diskussion erfolgt abschließend nach der Darstellung der Ergebnisse des zweiten Teilversuchs, in dem PeriLight bei Dunkelheit untersucht wurde.

9.4 Methoden

9.4.1 Versuchsteilnehmer

Im Versuch unter Tageslichtbedingungen gingen die gültigen Daten von $n = 30$ Versuchsteilnehmern in die Auswertung mit ein. Unter den Teilnehmern waren siebzehn Versuchsteilnehmer weiblichen und dreizehn männlichen Geschlechts. Die Versuchsteilnehmer waren zum Zeitpunkt der Versuchsteilnahme zwischen 19 und 50 Jahren alt. Der Mittelwert des Alters der Teilnehmer der Versuchsstichprobe betrug 28,83 Jahre, bei einer Standardabweichung von 8,45 Jahren. Die jüngste Teilnehmerin des Versuchs war zum Versuchszeitpunkt 19 Jahre alt, der älteste Teilnehmer 50 Jahre. Der durchschnittliche Führerscheinbesitz in der Stichprobe betrug zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung 10,57 Jahre, bei einer Standardabweichung von 8,14 Jahren (Minimum: 2 Jahre; Maximum: 32 Jahre).

Die Versuchsteilnehmer wurden über einen DLR-eigenen Probandenpool, soziale Netzwerke und einen studentischen E-Mailverteiler akquiriert. Es wurden nur Teilnehmer zur Teilnahme eingeladen, die zum Zeitpunkt der Untersuchung im Besitz eines gültigen Führerscheins waren und keine Brille trugen, da Brillenträger mit dem verwendeten Eye-Tracking-

System nicht problemlos zu erfassen sind. Die Versuchsteilnehmer wurden für ihre Teilnahme mit einem Betrag von 10 € pro Stunde vergütet.

9.4.2 Design

Der Untersuchung lag ein Innersubjekt-Design mit Messwiederholung auf einer unabhängigen Variablen zugrunde. Die zwei Stufen der unabhängigen Variablen *Zustand des Systems PeriLight* ergaben sich aus dem Einsatz des Systems PeriLight: Bei der ersten Bahnübergangszufahrt wurde PeriLight inaktiv geschaltet, bei der zweiten Bahnübergangszufahrt war PeriLight aktiv.

Abhängige Variablen

Als abhängige Variablen wurden Eye-Tracking-Parameter und fahrdynamische Daten erhoben. Um die Blickbewegungsdaten in Form abhängiger Variablen auswertbar zu machen, wurden bei allen Versuchsteilnehmern bestimmte Areale im visuellen Feld definiert, sogenannte *Areas of Interest (AOI)*. Mithilfe dieser Areale konnten die Blickzuwendungen über alle Versuchsteilnehmer vergleichbar ausgewertet werden. Die im Versuch verwendeten AOI sind in zwei Perspektiven des Innenraums eines Fahrzeugs in Abbildung 26 dargestellt.



Abbildung 26. Für den Versuch definierte *Areas of Interest* zur Auswertung von Blickparametern.

Um Blickzuwendungen in die peripheren Bereich des Sichtfeldes des Fahrers zu erfassen, wurden die AOI *links außen* und *rechts außen* definiert. Um Blickzuwendungen jenseits der eigenen Fahrspur zu erfassen, wurden die AOI *halb links* und *halb rechts* definiert. Um Blickzuwendungen im zentralen Sichtfeld zu erfassen, wurde die AOI *Mitte* definiert. Um Blickzuwendungen auf die zentralen Displayanzeigen im Fahrzeuginnenraum zu erfassen, wurde die AOI *Display* definiert.

Als abhängige Variablen wurden im Versuch folgende Blickparameter in den Zufahrten auf den Bahnübergang betrachtet:

- Anzahl der Versuchsteilnehmer, die in der Zufahrt auf den Bahnübergang mindestens eine Fixation innerhalb der AOI links außen beziehungsweise rechts außen zeigten
- Zeit bis zur ersten Blickzuwendung auf die AOI links außen, halb links, halb rechts und rechts außen (*Time to First Glance*) ab dem definierten Beginn der Bahnübergangszufahrt bei einer Distanz von 160 m vor dem Bahnübergang

Ein Blick wurde im vorliegenden Versuch gemäß der Norm DIN EN ISO 15007-1 zur Messung des Blickverhaltens in Straßenfahrzeugen als visuelle Fixation einer von mindestens 120 ms in einen räumlichen Bereich unter 1° Schwinkel innerhalb einer der in Abbildung 26 dargestellten AOI definiert (Deutsches Institut für Normung, 2003).

Neben den Blickparametern wurde im Versuch auch das Fahrverhalten betrachtet. Dazu konnten GPS-basierte Daten genutzt werden, die vom Versuchsfahrzeug kontinuierlich aufgezeichnet wurden. Als abhängige Variable des Fahrverhaltens wurde im vorliegenden Versuch die Geschwindigkeit herangezogen. Als Kontrollwert für das Bremsverhalten wurden zudem negative Beschleunigungswerte betrachtet.

Kontrollvariablen

Neben den Variablen, die zur Untersuchung der Hypothesen dienen, wurden im Rahmen der Versuchsdurchführung weitere Variablen zur Kontrolle erhoben. Um einen Eindruck des Ausmaßes der subjektiven Blendwirkung zu bekommen, der unter Tageslichtbedingungen vom System PeriLight ausgeht, wurde die neunstufige De Boer-Skala eingesetzt (De Boer, 1967). Diese Skala wurde für die Verwendung im Versuch auf Deutsch übersetzt und in zwei weiteren Aspekten angepasst: Es wurden nur die Anker der Extrema zur Einschätzung der Blendwirkung beibehalten (1 – gerade bemerkbar / 9 – unerträglich). Die Bezeichnungen der Zwischenstufen aus dem Originalfragebogen wurden entfernt, da darin teilweise verwirrende Begrifflichkeiten Verwendung fanden. Zudem wurden die Pole der Skala getauscht. Der Wert 9 wurde nicht wie in der Originalskala als Ausprägungsstufe der geringsten subjektiven Blendung verwendet, sondern um die maximale subjektive Blendung anzugeben. Dementsprechend wurde der Wert 1 als Maß für die geringste subjektive Blendung verwendet. Diese Wertung erscheint natürlicher, da eine stärkeres Blendempfinden mit einem höheren Wert beurteilt werden kann.

Auf dieser Skala kreuzten die Versuchsteilnehmer nach der zweiten Überquerung des Bahnübergangs, bei der PeriLight aktiv war, ihre Einschätzung bezüglich der wahrgenommenen Intensität der Blendung an. Die psychologische Blendung ist definiert als subjektive Störimpfindung in Folge zu hoher Leuchtdichten oder Leuchtdichteunterschiede

im menschlichen Sichtfeld. Diese Störfmpfindung muss nicht zwangsläufig mit einer Verringerung der Sehleistung einhergehen, die durch eine physiologische Blendung entsteht (Schober, 1970).

Unter der Annahme, dass Fahrer, die einen Bahnübergang gut kennen, sich in der Überquerung dieses Bahnübergangs anders verhalten wurden für den Versuch nur Teilnehmer akquiriert, die nicht in Watenbüttel wohnen. Zur weiteren Kontrolle wurden die Versuchsteilnehmer nach der Versuchsfahrt gefragt, wie häufig sie den Bahnübergang zwischen der Hans-Jürgen-Straße und der Bundesallee in Watenbüttel in ihrem Alltag überqueren. Hierfür gab es kein festes Antwortformat. Die Antworten der Versuchsteilnehmer wurden durch den Versuchsleiter vermerkt.

Für die Verwendung des Eye-Tracking - Systems war es erforderlich, im Fahrzeuginnenraum an verschiedenen Stellen Pappmarker einer Größe von 10 cm x 10 cm zu installieren. Diese Marker wurden so angebracht, dass sie die Versuchsteilnehmer nicht bei der Ausübung der Fahraufgabe stören. Um zu kontrollieren, ob die Versuchsteilnehmer die Marker als störend empfinden wurden sie nach dem Ende der Versuchsfahrt gebeten, auf einer neunstufigen Skala anzukreuzen, wie störend sie die Marker während der Fahrt empfunden haben. Die Extrema der Skala wurden mit den Ankeren 1 (gar nicht störend) und 9 (sehr störend) versehen. Es handelte sich dabei um eine selbst erstellte Skala¹¹.

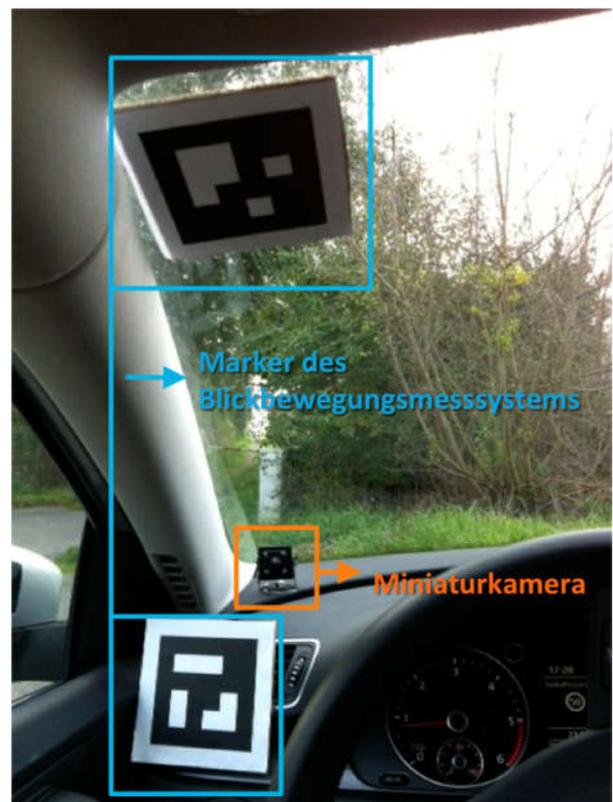


Abbildung 27. Beispiele zweier Marker des Blickbewegungsmesssystems und eine Miniaturkamera im Fahrzeuginnenraum

9.4.3 Materialien und Versuchsumgebung

Im Versuch wurde die Wirkung des Systems PeriLight auf Autofahrer untersucht. Das System PeriLight wurde gemäß der Beschreibung in Abschnitt 8.1 aufgebaut und eingesetzt.

¹¹ Die eingesetzte Skala ist in Anlage E dargestellt.

Es wurde eine funkbasierte Ein- und Ausschaltvorrichtung vorgesehen. Diese Vorrichtung wurde vom Versuchsleiter per Laptop aus dem Versuchsfahrzeug bedient. Der PeriLight-Versuchsaufbau wurde damit bei jedem Versuchsteilnehmer vor der zweiten Bahnübergangsüberquerung des Versuchs ungefähr 300 m vor dem Bahnübergang aktiv geschaltet, so dass die Leuchten bei Überfahrt des Auslösesensors aktiviert wurden. Nach der Auslösung schaltete sich das System automatisch inaktiv. Somit wurde zu keinem Zeitpunkt ein am Versuch unbeteiligter Straßenverkehrsteilnehmer vom Versuchsaufbau beeinflusst.

Die Versuche wurden mit einem Versuchsfahrzeug des DLR durchgeführt. Dabei handelte es sich um einen Volkswagen Passat Variant (Baujahr 2014) mit Automatikgetriebe. Das Fahrzeug wurde für die Versuchsfahrten mit einem Zusatzsystem für sogenannte *Naturalistic Driving Studies*, Untersuchungen des natürlichen Fahrverhaltens, ausgestattet. Dieses System erlaubt unter anderem eine GPS-basierte kontinuierliche Aufzeichnung der Fahrzeugposition und der Geschwindigkeit. Zu Auswertungszwecken der mit dem Eye-Tracking-Systems aufgezeichneten Daten wurden zudem an unterschiedlichen Positionen im Fahrzeuginnenraum quadratische, schwarz-weiße Marker aus Pappe positioniert¹².

Zur Messung der Blickbewegungen der Versuchsteilnehmer wurde ein kopfbasiertes Eye-Tracking-System inklusive der zugehörigen Software der Firma Ergoneers GmbH verwendet. Die Versuchsteilnehmer trugen einen leichten Brillenaufbau der Art *Dikablis Essential*, an dem zwei Kameras installiert sind. Eine der Kameras ist von unten auf das linke Auge des Trägers gerichtet. Die zweite im zentralen Stirnbereich arretierte Kamera zeichnet die Sichtungsumgebung des Trägers auf. Die Abtastrate der Kameras beträgt 50 Hz. Die Aufzeichnung und Kalibrierung erfolgte mithilfe eines Laptops und der *Dikablis Recording Software 2.5*. Der Laptop wurde auf der Rückbank des Versuchsfahrzeugs neben dem Versuchsleiter positioniert. Das Eye-Tracking-System erlaubte die Bestimmung der Blickposition und deren Auswertung im Nachgang des Versuchs. Für die Auswertung wurde die Software *D-Lab Eye-Tracking 2.5* verwendet.

Versuchsstrecke

Alle Teilnehmer des Versuchs befuhren die gleiche, fest vorgegebene Strecke im Stadtbereich von Braunschweig¹³. Der Versuchsleiter auf der Rückbank des Fahrzeugs gab dem Versuchsteilnehmer in der Rolle des Fahrers die notwendigen Weganweisungen. Startpunkt

¹² Eine genaue Darstellung der Markerpositionen ist in Anlage F dargestellt.

¹³ Die Strecke ist in Anlage G dargestellt.

des Versuchs war das Gelände des DLR in Braunschweig. Nach einem Autobahnabschnitt über die A2, die A391 und die A392 führte die Route nach Watenbüttel, einer Gemeinde im suburbanen Raum der Stadt Braunschweig. Dort fand die erste Überquerung des nicht technisch gesicherten Bahnübergangs statt, der im Zentrum der Betrachtung des Versuchs stand. Auf dem Parkplatz eines Supermarktes etwa 200 m vor dem Bahnübergang führten die Versuchsteilnehmer ein kurzes Parkmanöver durch. Auf Ansage des Versuchsleiters parkten die Versuchsteilnehmer aus und fuhren weiter. Dieses Parkmanöver diente dazu sicherzustellen, dass sich in der unmittelbaren Zufahrt auf den Bahnübergang keine weiteren Straßenverkehrsteilnehmer vor oder hinter den Versuchsteilnehmern befanden. Es wurde aufgrund der Erfahrungen im ersten Realfahrtversuch, in dem einige Teilnehmer wegen Verkehrsteilnehmern in der unmittelbaren Fahrumgebung von der Auswertung ausgeschlossen werden mussten, in den Ablauf integriert (vgl. Abschnitt 5.3.1). Erst wenn auf der Straße, die auf den Bahnübergang zuführte kein Verkehr herrschte, wurde der Versuchsteilnehmer durch den Versuchsleiter dazu aufgefordert weiterzufahren.

Nach der ersten Bahnübergangsüberquerung wurde ein ungefähr 11 km langer Streckenabschnitt über den Braunschweiger Ortsteil Lehdorf, die Autobahn A392 und erneut durch Watenbüttel befahren, bevor die Versuchsteilnehmer noch einmal den Bahnübergang überfuhren. Diese Strecke konnte bei normaler Verkehrslage in ca. 15 Minuten zurückgelegt werden. Auch vor der zweiten Bahnübergangsüberfahrt wurde das zuvor beschriebene Parkmanöver durchgeführt. Bei der zweiten Überfahrt des Bahnübergangs war PeriLight aktiv. Bei einer Distanz von 400 m hinter dem Bahnübergang wurde nur nach der zweiten Bahnübergangsüberfahrt auf einem Parkplatz angehalten. Auf diesem Parkplatz fand eine abschließende Befragung statt. Den Versuchsteilnehmern wurde der Eye Tracker abgenommen. Von dort aus führte die Strecke zurück zum Gelände des DLR Braunschweig. Die gesamte Fahrt dauerte je nach Verkehrslage 45–60 Minuten.

9.4.4 Durchführung

Die Versuchsteilnehmer wurden durch den Versuchsleiter an der Pforte des DLR in Braunschweig empfangen und begrüßt. Sie wurden zum Versuchsfahrzeug geführt und gebeten, auf dem Fahrersitz Platz zu nehmen und die Einstellungen des Sitzes und der Spiegel des Fahrzeugs so vorzunehmen, dass sie ihnen eine sichere und komfortable Fahrt gestatten. Danach erhielten die Versuchsteilnehmer generelle Informationen zum Versuch (siehe Anhang H). Anschließend daran wurde den Versuchsteilnehmern eine schriftliche Instruktion zum

Versuch gegeben (siehe Anhang I). Darin wurde ihnen mitgeteilt, dass sie während der Fahrt keine spezielle Aufgabe haben und ihr natürliches Fahrverhalten unter Berücksichtigung der Straßenverkehrsordnung zeigen sollen. Auf jegliche Hinweise in Zusammenhang mit der Überfahrt von Bahnübergängen wurde im Vorfeld des Versuchs gezielt verzichtet, um das natürliche Fahrverhalten der Versuchsteilnehmer nicht zu beeinflussen.

Nachdem sie die Instruktion gelesen hatten, wurde den Versuchsteilnehmern die Funktion des Eye-Tracking-Systems erläutert. Im Folgenden wurde ihnen die zugehörige Brille zur Erfassung der Blickbewegungen angepasst und das System kalibriert. Nach erfolgter Kalibrierung wurde den Versuchsteilnehmern das Fahrzeug erklärt. Jeder Versuchsteilnehmer fuhr eine Testrunde auf dem Gelände des DLR, um sich an Fahrdynamik, Automatikschaltung und Bremsverhalten des Fahrzeugs zu gewöhnen. Den Versuchsteilnehmern wurde erläutert, dass der Versuchsleiter während der Fahrt keine Gespräche mit ihnen führen wird, sondern nur Weganweisungen und versuchsbezogene Instruktionen gibt. Danach begann die Versuchsfahrt im öffentlichen Verkehrsraum und die im vorherigen Abschnitt beschriebene Versuchsrouten wurde abgefahren.

Nach der zweiten Bahnübergangsüberfahrt wurden die Versuchsteilnehmer aufgefordert auf einem Parkplatz anzuhalten, der ca. 300 m hinter dem Bahnübergang lag. Sie wurden zunächst gefragt, ob ihnen in den vergangenen Minuten der Fahrt etwas besonderes aufgefallen sei. Diejenigen Versuchsteilnehmer, denen die peripheren Lichtreize des Systems PeriLight aufgefallen waren wurden in der Folge gebeten, anhand der modifizierten DeBoer-Skala (De Boer, 1967) ihre subjektiv empfundene Blendung einzuschätzen. Es wurden danach einige abschließende Fragen gestellt um festzustellen, ob die Versuchsteilnehmer den im Versuch überquerten nicht technisch gesicherten Bahnübergang kannten.

Im Folgenden legten die Versuchsteilnehmer die Brille des Eye Trackers ab. Danach führen die Versuchsteilnehmer zum Gelände des DLR zurück. Abschließend erhielten alle Versuchsteilnehmer eine schriftliche Aufklärung zum zentralen Gegenstand der Untersuchung (Anlage J). Abschließend wurde ihnen eine Teilnahmevergütung in Höhe von 20 € ausgezahlt.

Der Versuch dauerte insgesamt zwischen 105 und 120 Minuten. Davon nahm die Versuchsfahrt zwischen 45 und 60 Minuten ein. Unterschiede in der Dauer der Versuchsdurchführung resultierten vor allem durch unterschiedliche Verkehrslagen und Unterschiede in der benötigten Dauer für die Kalibrierung des Eye-Tracking-Systems

zwischen einzelnen Versuchsteilnehmern. Die Versuchsdurchläufe wurden außerhalb der Hauptberufsverkehrszeiten durchgeführt. Sie begannen um 10:00 Uhr und um 13:00 Uhr.

Die Versuchsbedingungen wurden so weit wie möglich standardisiert. Es konnten jedoch nicht alle Bedingungen zwischen allen Versuchsteilnehmern konstant gehalten werden. Es wurden keine Versuchsfahrten in der Dämmerung durchgeführt, dennoch bestanden zwischen den einzelnen Versuchsteilnehmern teils unterschiedliche Umgebungslichtbedingungen. Es fanden beispielsweise sowohl Versuchsfahrten bei bewölktem Wetter als auch bei klarem Himmel und Sonnenschein statt. Weiterhin waren die Verkehrsbedingungen zum Zeitpunkt der Versuchsfahrten teilweise unterschiedlich. Am Bahnübergang konnte durch den Zwischenhalt auf dem Supermarktparkplatz gewährleistet werden, dass keine weiteren Versuchsteilnehmer sich in unmittelbarer Nähe des Versuchsteilnehmers befanden.

9.5 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des ersten Teilversuchs zur Evaluation der Wirkung des Systems PeriLight auf Autofahrer bei Tageslicht dargestellt. Dabei werden zunächst die deskriptiven Statistiken in Bezug auf die Kontrollvariablen *Bekanntheit des Bahnübergangs*, *Blendung* und *Störung durch die Marker des Eye-Tracking-Systems* dargestellt. Danach folgt die statistische Auswertung zu den vier in Abschnitt 9.2 formulierten Hypothesen zum Blick- und Fahrverhalten der Versuchsteilnehmer in der Überquerung des nicht technisch gesicherten Bahnübergangs, an dem die Datenerhebung stattfand.

Bekanntheit des Bahnübergangs

Nach beendeter Versuchsfahrt wurden alle Versuchsteilnehmer gefragt, wie regelmäßig sie den Bahnübergang zwischen Bundesallee und Hans-Jürgen-Straße in Watenbüttel in ihrem Alltag überqueren. Es wurde zur Beantwortung kein festes Antwortformat vorgegeben. Die Mehrheit, 22 der 30 Versuchsteilnehmer, gab an, diesen Bahnübergang nie zu überqueren. Die genaue Verteilung der Überquerungshäufigkeiten des nicht technisch gesicherten Bahnübergangs der Untersuchung ist in Tabelle 11 dargestellt. Zusammenfassend war dem Großteil der Teilnehmer der Bahnübergang weitestgehend unbekannt.

Tabelle 11

Nutzungshäufigkeit des Bahnübergangs in Watenbüttel unter den Versuchsteilnehmern der Untersuchung der Wirksamkeit von PeriLight bei Tageslicht

Nennung zur Häufigkeit der Bahnübergangsüberquerung	Anzahl der Versuchsteilnehmer
Täglich	1
Dreimal in der Woche	1
Einmal im Monat	4
Viermal im Jahr	1
Zweimal im Jahr	1
Nie	22

Blendung

Nach der zweiten Überquerung des Bahnübergangs, bei der PeriLight aktiv war, gaben die Versuchsteilnehmer anhand der angepassten neunstufigen De Boer-Skala (De Boer, 1967) Auskunft darüber, wie intensiv sie die Blendung durch PeriLight erlebt haben. Dabei wurden nur diejenigen 23 Versuchsteilnehmer aufgefordert ihre Einschätzung abzugeben, die zuvor die Lichtreize in der Peripherie des Bahnübergangs wahrgenommen hatten. Sieben der Teilnehmer machten daher keine Angabe, weil sie die Lichtreize zuvor nicht wahrgenommen hatten. Der Mittelwert der psychologischen Blendung unter Tageslichtbedingungen in der untersuchten Teilstichprobe von $n = 23$ Versuchsteilnehmern betrug 5,09 ($SA = 1,78$; Min. = 2; Max. = 8), was einer mittleren Blendempfindung entspricht.

Störung durch Marker

Nach Abschluss der Versuchsfahrt gaben die Versuchsteilnehmer anhand der für diesen Zweck erstellten neunstufigen Skala Auskunft darüber, wie sehr sie sich durch die im Fahrzeuginnenraum installierten Marker des Eye-Tracking-Systems während der Versuchsfahrt gestört gefühlt haben. Der Wert 1 auf der Skala war anzugeben, wenn die Marker als *gar nicht störend* empfunden wurden, der Wert 9 wenn die Marker als *sehr störend* empfunden wurden. Der Mittelwert des Störeffindens durch die Marker in der untersuchten Stichprobe betrug 2,2 ($SA = 1,73$; Min. = 1; Max. = 9) was einem geringen Störeffinden entspricht.

Hypothese 1 – Blick nach links und rechts bei Tageslicht

Der folgende Abschnitt ist nach den einzelnen AOI gegliedert, anhand deren eine Sichtprüfung in der Bahnübergangszufahrt festgestellt werden kann. Zunächst wird die Anzahl der

Versuchsteilnehmer analysiert, die mindestens eine Fixation in den Bereichen der AOI *links außen* und *rechts außen* gezeigt haben. Anschließend wird auf die AOI *halb links* und *halb rechts* eingegangen.

Während der ersten der zwei Zufahrten auf den nicht technisch gesicherten Bahnübergang war das System PeriLight bei allen Versuchsteilnehmern inaktiv. Während dieser Zufahrt war bei sechs der 30 Versuchsteilnehmer mindestens eine Fixation in die AOI links außen festzustellen, die den peripheren linken Bereich kennzeichnet. Bei 24 der 30 Versuchsteilnehmer entfiel keine Fixation auf die AOI links außen. Während der zweiten Zufahrt auf den Bahnübergang war PeriLight bei allen Versuchsteilnehmern aktiv und gab Lichtreize ab. Bei aktivem PeriLight zeigte eine erhöhte Anzahl von 20 der 30 Versuchsteilnehmer mindestens eine Fixation in die AOI links außen. Bei 10 der 30 Versuchsteilnehmer wurde keine Fixation im Bereich der AOI links außen festgestellt. Die Anzahl der Versuchsteilnehmer, die vor der ersten Bahnübergangsüberquerung (PeriLight inaktiv) und vor der zweiten Bahnübergangsüberquerung (PeriLight aktiv) mindestens eine beziehungsweise keine Fixation im Bereich der AOI links außen gezeigt haben sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12

Kreuztabelle zu Fixationen in der AOI links außen

AOI links außen		Überquerung 2: PeriLight aktiv		
		Nicht geschaut	Mindestens einmal geschaut	Gesamt
Überquerung 1: PeriLight inaktiv	Nicht geschaut	9	15	24
	Mindestens einmal geschaut	1	5	6
Gesamt		10	20	30

Zur statistischen Analyse der Daten wurde der McNemar-Test verwendet. Mit dem McNemar-Test wird der Unterschied der Anzahl der Versuchsteilnehmer, die während der Bahnübergangszufahrt mindestens einmal beziehungsweise keinmal nach links außen schaute zwischen den Stufen der unabhängigen Variablen (ohne PeriLight und mit PeriLight) auf statistische Signifikanz überprüft. Da für die Stichprobe insgesamt vier McNemar-Tests durchgeführt wurden, wurde das statistische Signifikanzniveau von $p < ,05$ über eine Bonferroni-Korrektur auf $p < ,0125$ herabgesetzt. Anhand des McNemar-Tests konnte festgestellt werden, dass eine signifikant höhere Anzahl der Versuchsteilnehmer mindestens eine Fixation im Be-

reich der AOI links außen zeigte, wenn PeriLight aktiv war, als wenn es inaktiv war (McNemar's $\chi^2 = 1,563$, $df = 1$, $p = ,001$).

In die AOI rechts außen entfiel bei sieben der 30 Versuchsteilnehmer während der ersten Zufahrt auf den Bahnübergang bei Inaktivität des Systems PeriLight mindestens eine Fixation. 23 der 30 Versuchsteilnehmer zeigten keine Fixation in die AOI rechts außen. Während der zweiten Überquerung des Bahnübergangs zeigten 17 der 30 Versuchsteilnehmer mindestens eine Fixation im Bereich rechts außen. Dreizehn Versuchsteilnehmer zeigten keine Fixation. Die Anzahl der Versuchsteilnehmer, die vor der ersten Bahnübergangsüberquerung (PeriLight inaktiv) und vor der zweiten Bahnübergangsüberquerung (PeriLight aktiv) mindestens eine beziehungsweise keine Fixation im Bereich der AOI rechts außen gezeigt haben sind in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13

Kreuztabelle zu Fixationen in der AOI rechts außen

AOI rechts außen		Überquerung 2: PeriLight aktiv		
		Nicht geschaut	Mindestens einmal geschaut	Gesamt
Überquerung 1: PeriLight inaktiv	Nicht geschaut	12	11	23
	Mindestens einmal geschaut	1	6	7
Gesamt		13	17	30

Anhand des McNemar-Tests ($\alpha = ,0125$) konnte festgestellt werden, dass im Bereich der AOI rechts außen eine signifikant höhere Anzahl der Versuchsteilnehmer mindestens eine Fixation zeigte, wenn PeriLight aktiv war, als wenn es inaktiv war (McNemar's $\chi^2 = 6,750$, $df = 1$, $p = ,009$).

Auf die AOI halb links entfiel bei inaktivem PeriLight bei vier der 30 Versuchsteilnehmer mindestens eine Fixation. 26 der 30 Versuchsteilnehmer zeigten keine Fixation halb links. Bei aktivem PeriLight in der zweiten Überfahrt zeigte mit 21 der 30 Versuchsteilnehmer die Mehrheit mindestens eine Fixation in die AOI halb links. Neun Versuchsteilnehmer zeigten auch in der zweiten Überfahrt keine Fixation im Bereich dieser AOI. Die Anzahl der Versuchsteilnehmer, die vor der ersten Bahnübergangsüberquerung (PeriLight inaktiv) und vor der zweiten Bahnübergangsüberquerung (PeriLight aktiv) mindestens eine beziehungs-

weise keine Fixation im Bereich der AOI halb links gezeigt haben sind in Tabelle 14 dargestellt.

Tabelle 14

Kreuztabelle zu Fixationen in der AOI halb links

AOI halb links		Überquerung 2: PeriLight aktiv		
		Nicht geschaut	Mindestens einmal geschaut	Gesamt
Überquerung 1: PeriLight inaktiv	Nicht geschaut	9	17	26
	Mindestens einmal geschaut	0	4	4
Gesamt		9	21	30

Anhand des McNemar-Tests ($\alpha = ,0125$) konnte festgestellt werden, dass im Bereich der AOI halb links eine signifikant höhere Anzahl der Versuchsteilnehmer mindestens eine Fixation zeigte, wenn PeriLight aktiv war, als wenn es inaktiv war (McNemar's $\chi^2 = 15,059$, $df = 1$, $p < ,001$).

Die AOI halb rechts wurde bei inaktivem System von 15 der 30 Versuchsteilnehmer mindestens einmal fixiert. Die anderen 15 Versuchsteilnehmer zeigten während der Zufahrt keine Fixation in die AOI halb rechts. Bei aktivem PeriLight zeigte eine leicht erhöhte Anzahl von 21 der 30 Versuchsteilnehmer mindestens eine Fixation im Bereich der AOI halb rechts. Neun Versuchsteilnehmer zeigten während der Zufahrt auf den Bahnübergang halb rechts keine Fixation. Die Anzahl der Versuchsteilnehmer, die vor der ersten Bahnübergangsüberquerung (PeriLight inaktiv) und vor der zweiten Bahnübergangsüberquerung (PeriLight aktiv) mindestens eine beziehungsweise keine Fixation im Bereich der AOI halb rechts gezeigt haben sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15

Kreuztabelle zu Fixationen in der AOI halb rechts

AOI halb rechts		Überquerung 2: PeriLight aktiv		
		Nicht geschaut	Mindestens einmal geschaut	Gesamt
Überquerung 1: PeriLight inaktiv	Nicht geschaut	6	9	15
	Mindestens einmal geschaut	3	12	15
Gesamt		9	21	30

Der McNemar-Test ($\alpha = ,0125$) für den Bereich halb rechts zum Vergleich der Anzahl der Versuchsteilnehmer, die mindestens eine Fixation zeigten zwischen der Zufahrt mit aktivem und inaktivem PeriLight erreicht keine statistische Signifikanz (McNemar's $\chi^2 = 2,083$, $df = 1$, $p = ,149$).

Aufgrund der signifikanten Erhöhung der Anzahl der Versuchsteilnehmer, die in der Zufahrt auf den Bahnübergang mindestens eine Fixation in die AOI links außen und in die AOI rechts außen zeigten wird Hypothese 1 im Teilversuch bei Tageslicht für beide Sichtbereiche angenommen. Eine grafische Zusammenfassung der Ergebnisse findet sich in Abbildung 28.

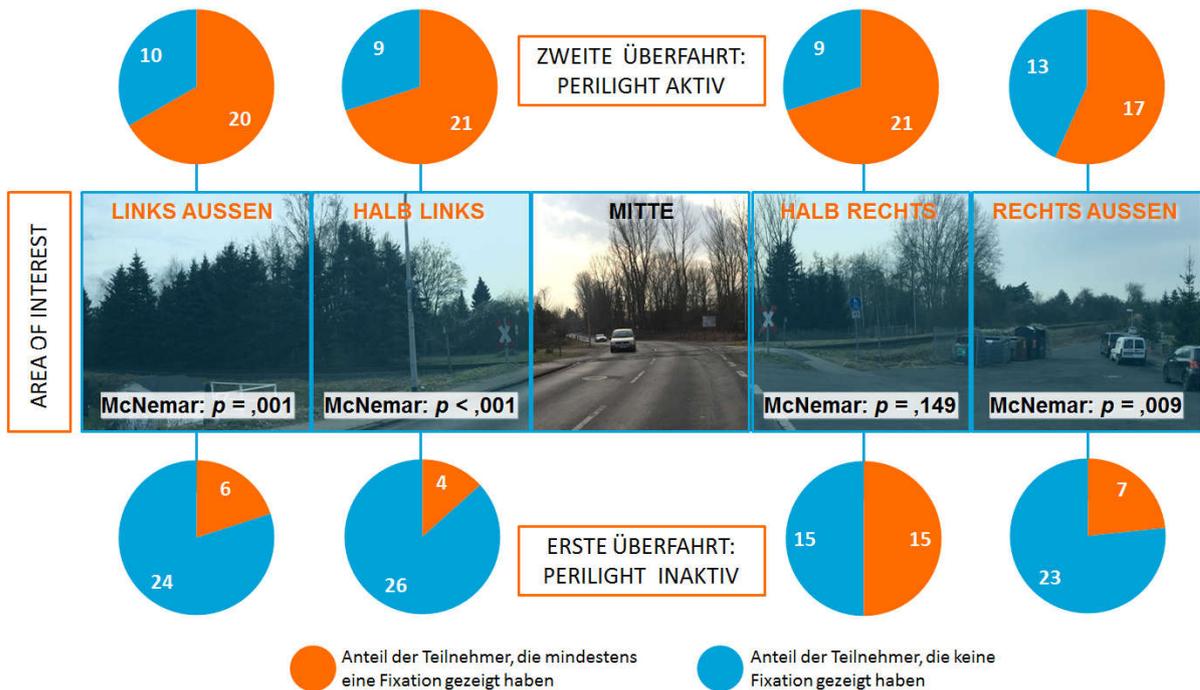


Abbildung 28. Grafische Darstellung der Ergebnisse zur Untersuchung von Hypothese 1 in der Untersuchung zur Wirksamkeit von PeriLight bei Tageslicht

Ergänzend zu den in diesem Abschnitt beschriebenen Ergebnissen wurde betrachtet, ob diejenigen Versuchsteilnehmer, die in den beiden Überfahrten eine Fixation im Bereich der AOI links außen zeigten ebenfalls eine Fixation im Bereich der AOI rechts außen zeigten. Die Ergebnisse sind den Tabelle 16 und Tabelle 17 zu entnehmen.

Tabelle 16

Anzahl der Versuchsteilnehmer, die bei inaktivem PeriLight zu beiden Seiten / zu keiner Seite / nur zu einer Seite geschaut haben

Überquerung 1: PeriLight inaktiv		AOI rechts außen		
		Nicht geschaut	Mindestens einmal geschaut	Gesamt
AOI links außen	Nicht geschaut	21	3	24
	Mindestens einmal geschaut	2	4	6
Gesamt		23	7	30

Bei inaktivem PeriLight schauten 21 der 30 Versuchsteilnehmer in der Zufahrt auf den Bahnübergang weder nach links außen noch nach rechts außen (Tabelle 16). Vier der 30 Ver-

suchsteilnehmer schauten vor der Bahnübergangsüberquerung bei inaktivem PeriLight zu beiden Seiten. Fünf der Teilnehmer schaute vor der Überquerung nur in einen äußeren Bereich. Drei der fünf zeigten mindestens eine Fixation ausschließlich rechts außen, zwei zeigten nur links außen mindestens eine Fixation.

Tabelle 17

Anzahl der Versuchsteilnehmer, die bei aktivem PeriLight zu beiden Seiten / zu keiner Seite / nur zu einer Seite geschaut haben

Überquerung 2: PeriLight aktiv		AOI rechts außen		
		Nicht geschaut	Mindestens einmal geschaut	Gesamt
AOI links außen	Nicht geschaut	8	2	10
	Mindestens einmal geschaut	5	15	20
Gesamt		13	17	30

Bei aktivem PeriLight während der zweiten Bahnübergangszufahrt konnte bei 15 der 30 Versuchsteilnehmer eine Fixation sowohl links außen als auch rechts außen festgestellt werden. Acht Versuchsteilnehmer schauten weder nach links außen noch nach rechts außen. Zwei der 30 Versuchsteilnehmer zeigten bei aktivem PeriLight mindestens eine Fixation nur im Bereich der AOI rechts außen, aber nicht im Bereich der AOI links außen. Fünf Versuchsteilnehmer zeigten ausschließlich eine Fixation im Bereich der AOI links außen, aber keine Fixation rechts außen.

Hypothese 2 – Zeitpunkt der ersten Fixation bei Tageslicht

In diesem Abschnitt wird dargestellt, wie frühzeitig die Versuchsteilnehmer vor der Überquerung des Bahnübergangs in die AOI links und rechts außen geschaut haben. Zur einfacheren Nachvollziehbarkeit wird zunächst beschrieben, welche der erhobenen Messwerte dafür genutzt wurden. Da keine Kopplung zwischen der GPS-basierten Positionsbestimmung und dem Eye-Tracking-System möglich war, konnte nicht unmittelbar bestimmt werden, in welchem Abstand zum Bahnübergang die erste Fixation der peripheren Bereiche stattfand. Als alternativer Indikator für den Zeitpunkt der ersten Fixation im Bereich der AOI links außen und rechts außen in der Zufahrt auf den Bahnübergang wurde der Parameter *früheste Blickzuwendung* definiert. Die früheste Blickzuwendung ergibt sich aus dem Quotienten der

Eye-Tracking-Parameter *Time to First Glance* (Zeit bis zur ersten Blickzuwendung) und der sogenannten *Use Case Duration* (Dauer des Untersuchungsszenarios), die im Folgenden erläutert werden.

$$\text{früheste Blickzuwendung} = \frac{\text{Time to First Glance}}{\text{Use Case Duration}}$$

Die *Use Case Duration* ergibt sich aus der Dauer der Zufahrt auf den Bahnübergang: Je Versuchsteilnehmer wurde die Dauer registriert, die benötigt wird, um die Strecke von der zweistreifigen Bake 160 m vor dem Bahnübergang bis zum Bahnübergang zurückzulegen. Der *Use Case* endete mit der Überquerung der Schienen durch die Hinterachse des Versuchsfahrzeugs. Die *Use Case Duration* variiert bei jedem Versuchsteilnehmer leicht, da die benötigte Dauer zum Zurücklegen des beschriebenen Streckenabschnitts von der jeweils gefahrenen Geschwindigkeit abhängt.

Die *Time to First Glance* beschreibt die Dauer in der Zufahrt auf den Bahnübergang, die ab Beginn des *Use Case* vergeht, bis die erste Fixation im Bereich einer AOI links beziehungsweise rechts außen durch einen Versuchsteilnehmer gezeigt wird.

Die früheste Blickzuwendung als Indikator kann somit theoretisch einen Wertebereich zwischen 0 und 1 annehmen. Je kleiner der Wert der frühesten Blickzuwendung, desto früher in der Zufahrt hat ein Versuchsteilnehmer das erste Mal in die AOI links außen beziehungsweise rechts außen geblickt. Zeigte ein Versuchsteilnehmer während seiner Zufahrt auf den Bahnübergang keine Fixation im peripheren Bereich rechts oder links, so konnte auch keine früheste Blickzuwendung berechnet werden. Aus der frühesten Blickzuwendung kann kein Rückschluss auf die genaue Distanz zum Bahnübergang zum Zeitpunkt der ersten Fixation gezogen werden.

Die deskriptiven Daten zur Untersuchung der zweiten Hypothese sind in Tabelle 18 dargestellt. Der Mittelwert der *Use Case Duration*, also der Fahrdauer von der Bake bei 160 m bis zur Überquerung des Bahnübergangs betrug für die 30 Versuchsteilnehmer bei der ersten Überfahrt des Bahnübergangs mit inaktivem PeriLight 6,71 s ($SA = 0,66$ s; $Min. = 5,24$ s; $Max. = 8,80$ s). Bei der zweiten Überfahrt des Bahnübergangs mit aktivem PeriLight betrug der Mittelwert der *Use Case Duration* der 30 Versuchsteilnehmer 7,62 s ($SA = 2,64$ s; $Min. = 5,16$ s; $Max. = 17,56$ s).

Tabelle 18

Deskriptive Daten zur Untersuchung von Hypothese 2 bei Tageslicht

	Anzahl gültiger Beobachtungen	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Dauer des <i>Use Case</i> bei inaktivem PeriLight in s	30	5,24	8,80	6,71	0,66
Dauer des <i>Use Case</i> bei aktivem PeriLight in s	30	5,16	17,56	7,62	2,64
<i>Time to First Glance</i> bei inaktivem PeriLight in s	6	2,08	4,88	3,96	1,07
<i>Time to First Glance</i> bei aktivem PeriLight in s	20	0,60	9,40	3,61	2,08
AOI links außen <i>Früheste Blickzuwendung</i> bei inaktivem PeriLight	6	0,33	0,71	0,60	0,14
<i>Früheste Blickzuwendung</i> bei aktivem PeriLight	20	0,06	0,91	0,46	0,22
<i>Time to First Glance</i> bei inaktivem PeriLight in s	7	0,16	7,64	4,65	2,31
<i>Time to First Glance</i> bei aktivem PeriLight in s	17	3,56	7,48	5,52	1,05
AOI rechts außen <i>Früheste Blickzuwendung</i> bei inaktivem PeriLight	7	0,02	0,87	0,66	0,29
<i>Früheste Blickzuwendung</i> bei aktivem PeriLight	17	0,37	0,90	0,69	0,16

Die *Time to First Glance* und die *früheste Blickzuwendung* können in den Bedingungen mit inaktivem und aktivem PeriLight nur für die Versuchsteilnehmer betrachtet werden, die in der Zufahrt auf den Bahnübergang mindestens eine Fixation in die AOI gezeigt haben. Das bedeutet für die vorliegende Untersuchung, dass nur ein Teil der Stichprobe berücksichtigt werden kann. In Bezug auf die AOI links außen beträgt der Mittelwert der *Time to First Glance* bei inaktivem PeriLight 3,96 s ($SA = 1,07$ s; $Min. = 2,08$ s; $Max. = 4,88$ s) für die kleine Teilgruppe der Stichprobe von sechs Versuchsteilnehmern, von denen mindestens eine

Fixation im Bereich der AOI links außen gezeigt wurde. Bei aktivem PeriLight zeigten 20 der 30 Versuchsteilnehmer eine Fixation der AOI links außen. Der leicht verringerte Mittelwert der *Time to First Glance* bei aktivem PeriLight betrug für diese Teilstichprobe 3,61 s ($SA = 2,08$ s; $Min. = 0,60$ s; $Max. = 3,61$ s).

Für die AOI rechts außen beträgt der Mittelwert der *Time to First Glance* bei inaktivem PeriLight 4,65 s ($SA = 2,31$ s; $Min. = 0,16$ s; $Max. = 7,64$ s). Sieben der 30 Versuchsteilnehmer zeigten bei inaktivem PeriLight mindestens eine Fixation im Bereich der AOI rechts außen. Bei aktivem PeriLight fixierten 17 Teilnehmer die AOI rechts außen. Der Mittelwert der *Time to First Glance* betrug für diese Teilnehmer 5,52 s ($SA = 1,05$ s; $Min. = 3,56$ s; $Max. = 7,48$ s).

Der Mittelwert der frühesten Blickzuwendung lag für die AOI links außen bei inaktivem PeriLight bei einem Wert von 0,60 ($n = 6$; $SA = 0,14$; $Min. = 0,33$; $Max. = 0,71$) und bei aktivem PeriLight bei 0,46 ($n = 20$; $SA = 0,22$; $Min. = 0,06$; $Max. = 0,91$). Hierbei ist zu beachten, dass es sich nicht um einen Sekundenwert handelt, sondern um einen Kennwert, der mit der zu Beginn dieses Abschnitts beschriebenen Formel berechnet wurde.

Für die AOI rechts außen lag der Mittelwert der frühesten Blickzuwendung bei inaktivem PeriLight bei einem Wert von 0,66 ($n = 7$; $SA = 0,29$; $Min. = 0,02$; $Max. = 0,87$) und bei aktivem PeriLight bei 0,68 ($n = 17$; $SA = 0,16$; $Min. = 0,37$; $Max. = 0,90$).

Auf Ebene der Betrachtung der deskriptiven Daten ist festzustellen, dass im Bereich der AOI links außen sowohl der Wert der *Time to First Glance* als auch der Wert der frühesten Blickzuwendung in der Bedingung mit aktivem PeriLight geringer war als in der Bedingung mit inaktivem PeriLight. In Bezug auf die AOI rechts außen war dies nicht gleichermaßen der Fall. Hier ist festzustellen, dass die *Time to First Glance* bei inaktivem PeriLight geringfügig kürzer ausfiel als bei aktivem PeriLight. Der Mittelwert der frühesten Blickzuwendung variierte zwischen beiden Bedingungen im Bereich der AOI rechts außen jedoch kaum (früheste Blickzuwendung bei inaktivem PeriLight = 0,66; früheste Blickzuwendung bei aktivem PeriLight = 0,69).

Auf eine tiefergehende statistische Analyse zur Beantwortung von Hypothese 2 wird verzichtet. Die Teilstichproben derjenigen Versuchsteilnehmer, die in die AOI links und rechts außen geschaut haben, unterscheiden sich bei inaktivem und aktivem PeriLight stark. Bei inaktivem PeriLight hat nur eine geringe Anzahl der Versuchsteilnehmer eine Fixation in die peripheren Bereiche des Bahnübergangs gezeigt ($n_{AOI \text{ links außen}} = 6$; $n_{AOI \text{ rechts außen}} = 7$). Die Durchführung eines statistischen Mittelwertvergleichs erscheint nicht zielführend. Ein Erset-

zen der fehlenden Werte, um einen Mittelwertvergleich anhand einer größeren Stichprobe durchführen zu können, beispielsweise per multipler Imputation, ist angesichts der großen Anzahl von Teilnehmern, die am Bahnübergang nicht nach links und rechts geschaut haben und somit keine Daten geliefert haben ebenfalls nicht angemessen. Aufgrund der Datenlage wird zu Hypothese 2 keine weitere Aussage getroffen.

Hypothese 3 – Fahrgeschwindigkeit bei Tageslicht

Zur Analyse des Fahrverhaltens im Zusammenhang mit Hypothese 3 wird als abhängige Variable die Fahrgeschwindigkeit der 30 Versuchsteilnehmer zwischen den beiden Zufahrten auf den Bahnübergang verglichen. Es wird der Einfluss der beiden unabhängigen Variablen *Aktivität PeriLight* und *Distanz zum Bahnübergang* statistisch untersucht. Die erste unabhängige Variable, die sich aus der Aktivität von PeriLight ergibt hat zwei Stufen, die sich aus den beiden Zufahrten auf den Bahnübergang ergeben, bei denen PeriLight zunächst inaktiv war und während der zweiten Zufahrt aktiv Lichtreize abgab. Die zweite unabhängige Variable, die sich aus der Distanz zum Bahnübergang ergibt hat neun Stufen. Die durch die Versuchsteilnehmer gefahrenen Geschwindigkeiten an den Messdistanzen 80 m, 70 m, 60 m, 50 m, 40 m, 30 m, 20 m und 10 m vor dem Bahnübergang fließen in die Auswertung ebenso ein wie die Geschwindigkeit im Moment der Bahnübergangsüberfahrt an der Messdistanz 0 m. Zunächst wird in diesem Abschnitt eine Zusammenfassung der Fahrgeschwindigkeiten der beiden Zufahrten auf den Bahnübergang der Untersuchung deskriptiv dargestellt. Anschließend erfolgt eine vertiefte Auswertung über eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung.

Eine grafische Zusammenfassung der mittleren Fahrgeschwindigkeiten der beiden Bahnübergangszufahrten bei inaktivem beziehungsweise aktivem PeriLight ist in Abbildung 29 dargestellt. In der Abbildung ist zu erkennen, dass der Mittelwert der Geschwindigkeit in der betrachteten Stichprobe sowohl bei der Zufahrt mit inaktivem als auch mit aktivem PeriLight abnahm, je weiter die Versuchsteilnehmer sich dem Bahnübergang annäherten. In der Zufahrt auf den Bahnübergang bei aktivem PeriLight lag die durchschnittliche Geschwindigkeit im Bereich der Messdistanzen von 80 m – 40 m vor dem Bahnübergang oberhalb des Mittelwerts der Geschwindigkeit, die bei inaktivem PeriLight gemessen wurde. Im Bereich der Messdistanzen von 30 m bis zur Bahnübergangsüberfahrt (0 m) war festzustellen, dass der Mittelwert der Geschwindigkeit in der Zufahrt auf den Bahnübergang bei aktivem PeriLight unterhalb des Mittelwerts der Geschwindigkeit bei inaktivem PeriLight lag. Die Verbindungs-

linien zwischen den konkreten Geschwindigkeitswerten an den Messdistanzen basieren auf Interpolationen.

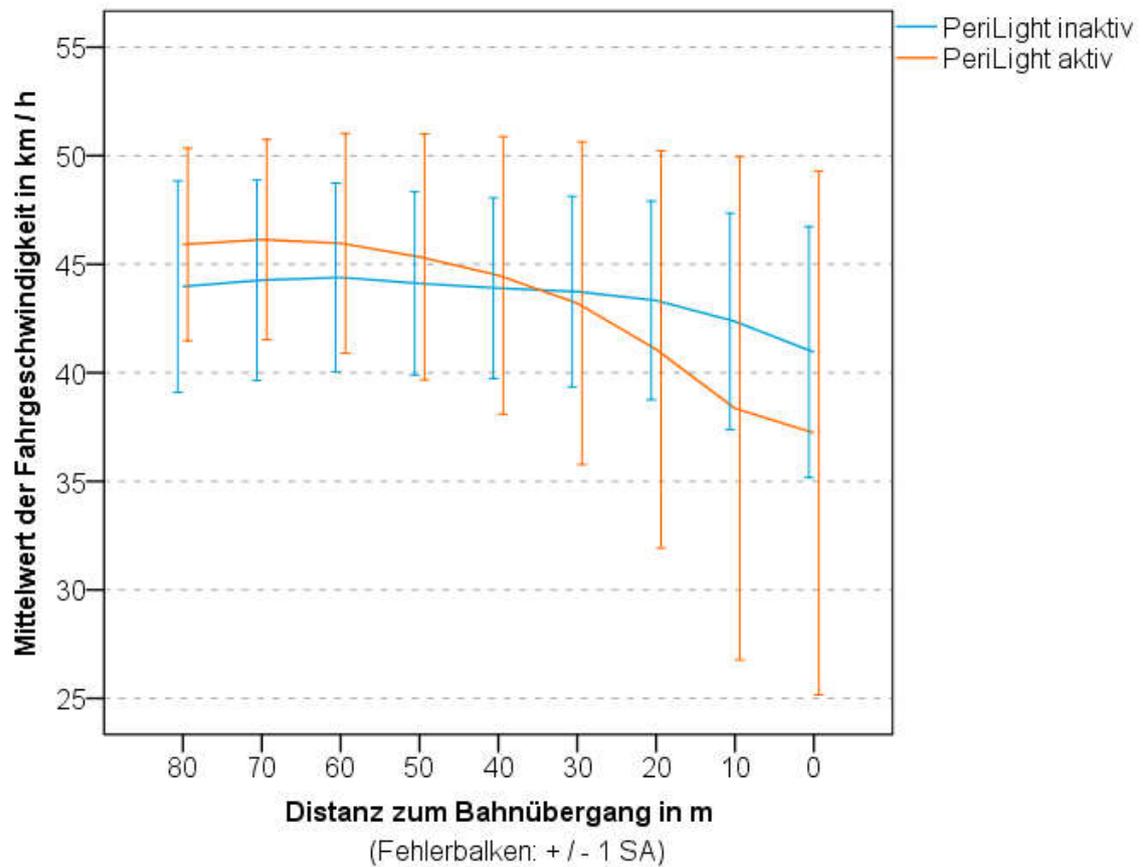


Abbildung 29. Fahrgeschwindigkeit in der Zufahrt auf den Bahnübergang bei inaktivem und aktivem PeriLight.

Zur detaillierten Übersicht der Zahlenwerte der in Abbildung 29 dargestellten Geschwindigkeitsverläufe dient Tabelle 19.

Tabelle 19

Fahrdatenvergleich bei inaktivem und aktivem PeriLight bei Tageslicht

PeriLight – Zustand und Distanz zum Bahnübergang	Minimum in km/h	Maximum in km/h	Mittelwert der Fahrgeschwindigkeit in km/h	Standardabweichung in km/h
PeriLight inaktiv 80 m	31,17	60,31	43,97	4,87
PeriLight aktiv 80 m	37,57	56,48	45,91	4,44
PeriLight inaktiv 70 m	31,72	59,56	44,27	4,62
PeriLight aktiv 70 m	36,29	57,26	46,13	4,62
PeriLight inaktiv 60 m	32,48	58,26	44,39	4,35
PeriLight aktiv 60 m	34,07	57,89	45,96	5,06
PeriLight inaktiv 50 m	32,55	57,08	44,11	4,22
PeriLight aktiv 50 m	32,34	58,21	45,34	5,66
PeriLight inaktiv 40 m	32,58	55,77	43,90	4,16
PeriLight aktiv 40 m	28,76	57,76	44,49	6,39
PeriLight inaktiv 30 m	32,40	54,36	43,74	4,39
PeriLight aktiv 30 m	25,06	57,19	43,21	7,43
PeriLight inaktiv 20 m	32,40	52,89	43,33	4,58
PeriLight aktiv 20 m	20,01	56,37	41,08	9,15
PeriLight inaktiv 10 m	32,02	51,95	42,36	4,99
PeriLight aktiv 10 m	13,21	55,11	38,36	11,59
PeriLight inaktiv 0 m	28,82	51,06	40,95	5,78
PeriLight aktiv 0 m	7,52	53,97	37,23	12,07

In der folgenden zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung wurde das Signifikanzniveau auf $p = ,05$ festgelegt. Zunächst wurde die Voraussetzung der Sphärizität mit Mauchly's Test ermittelt. Die Ergebnisse des Mauchly's Test wiesen darauf hin, dass die Sphärizität in Bezug auf den Haupteffekt des Faktors Distanz zum Bahnübergang, $\chi^2(35) = 578,27$, $p < ,001$, und der Interaktion aus den Faktoren Distanz zum Bahnübergang und Aktivität PeriLight, $\chi^2(35) = 566,02$, $p < ,001$, verletzt ist. Daher wurden die Freiheitsgrade anhand der Greenhouse-Geisser-Korrektur der Sphärizität angepasst ($\epsilon = ,187$ für den Hauptef-

fekt der Distanz zum Bahnübergang und $\varepsilon = ,182$ für die Interaktion aus den Faktoren Distanz zum Bahnübergang und Aktivität PeriLight).

Der Effekt des Faktors Aktivität PeriLight auf die Fahrgeschwindigkeit erreichte auf dem festgelegten Signifikanzniveau von $p = ,05$ keine statistische Signifikanz, $F(1, 29) = ,199, p = ,659$. Es gibt einen signifikanten Haupteffekt der Distanz zum Bahnübergang auf die Fahrgeschwindigkeit, $F(1,497, 43,407) = 22,001, p < ,001$. Neben dem Haupteffekt auf den Faktor Distanz zum Bahnübergang besteht ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen den Faktoren Distanz zum Bahnübergang und Aktivität PeriLight, $F(1,452, 42,118) = 22,001, p = 001$. Aufgrund des Interaktionseffektes wurden keine Post-Hoc-Tests für den Haupteffekt durchgeführt.

Der Interaktionseffekt weist darauf hin, dass der Faktor Aktivität PeriLight einen unterschiedlichen Effekt auf die Wahl der Geschwindigkeit der Versuchsteilnehmer hatte, je nachdem, in welcher Distanz zum Bahnübergang sie sich in der Zufahrt befanden. Einen ersten Eindruck der Art der Interaktion liefert die zuvor in diesem Abschnitt dargestellte Abbildung 29. Um einen detaillierten Eindruck der Interaktion zu bekommen, wurden Kontraste berechnet, mit denen die Aktivitätsunterschiede von PeriLight (inaktiv/aktiv) im Verhältnis zu den Differenzen der Geschwindigkeiten zwischen allen Messdistanzen in der Bahnübergangszufahrt und der Messdistanz 0 m analysiert werden. Aufgrund der für die Kontrastberechnungen verwendeten konservativen Adjustierung des Signifikanzniveaus auf $p = 0,0056$, kamen die berechneten Kontraste der Interaktion für die Unterschiede in der Aktivität von PeriLight und der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Messdistanzen 80 m, 70 m, 60 m, 50 m und 40 m zur Messdistanz 0 m zwar in die Nähe der statistischen Signifikanz, aber nicht in den signifikanten Wertebereich $p < ,0056$. Aufgrund der Übersichtlichkeit werden die Kennwerte der berechneten Kontraste für den Interaktionseffekt stichpunktartig dargestellt:

- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 80 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 29) = 8,706, p = ,006, r = ,48$
- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 70 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 29) = 8,711, p = ,006, r = ,48$
- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 60 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 29) = 8,323, p = ,007, r = ,47$
- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 50 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 29) = 8,267, p = ,007, r = ,47$

- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 40 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 29) = 7,477, p = ,011, r = ,45$
- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 30 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 29) = 4,772, p = ,037, r = ,38$
- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 20 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 29) = 1,447, p = ,239, r = ,22$
- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 10 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 29) = ,116, p = ,736, r = ,06$

Zwar wiesen die berechneten Kontraste für die Interaktion angesichts des Bonferroni-korrigierten Signifikanzniveaus keine statistische Signifikanz auf, jedoch sind in den Kontrasten der Interaktion für die Unterschiede in der Aktivität von PeriLight und der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Messdistanzen 80 m, 70 m, 60 m, 50 m und 40 m zur Messdistanz 0 m gemäß der Konventionen zur Klassifizierung von Effektstärken (Field, 2009) starke Effekte in einem Wertebereich von $r = ,45$ bis $r = ,48$ festzustellen. Auch die Kontraste der Interaktion für die Unterschiede in der Aktivität von PeriLight und den Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Messdistanzen 30 m beziehungsweise 20 m zur Messdistanz 0 m weisen mit $r = ,38$ und $r = ,22$ Effektstärken um den mittleren Bereich von $r = ,30$ auf.

Zusammengefasst weist der signifikante Interaktionseffekt darauf hin, dass die Versuchsteilnehmer im Nahbereich des Bahnübergangs (im Bereich zwischen den Messzeitpunkten 30 m bis 0 m) tendenziell etwas langsamer fahren, wenn PeriLight aktiv war, als wenn es inaktiv war. In größerer Distanz zum Bahnübergang, zwischen den Messzeitpunkten 80 m und 40 m, fahren die Versuchsteilnehmer hingegen etwas schneller, wenn PeriLight aktiv war. Da kein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Aktivität PeriLight gefunden wurde, kann jedoch nicht einwandfrei belegt werden, dass Fahrer bei aktivem PeriLight insgesamt langsamer auf einen nicht technisch gesicherten Bahnübergang zufahren als bei inaktivem PeriLight. Angesichts dieser Datenlage wird Hypothese 3 abgelehnt.

Hypothese 4 – Bremsverhalten bei Tageslicht

Um zu prüfen, ob als Reaktion auf PeriLight keine Vollbremsung eingeleitet wird, werden die maximalen negativen Beschleunigungen als Indikatoren des Bremsverhaltens der Versuchsteilnehmer im Rahmen der Hypothese 4 geprüft. Dafür wurde für jeden Versuchsteilnehmer bei der zweiten Bahnübergangsüberfahrt, bei der PeriLight aktiv war, die stärkste Bremsverzögerung auf der Annäherungsstrecke von 80 m vor dem Bahnübergang bis zum Bahnübergang ermittelt. Als Grenzwert für eine Vollbremsung wurde ein negativer Beschleu-

nigungswert $\leq -5,0 \text{ m/s}^2$ festgelegt (vgl. Abschnitt 9.2). Die Häufigkeiten der ermittelten maximalen Bremsverzögerungen in der Stichprobe bei den Überfahrten mit aktivem PeriLight sind im Histogramm in Abbildung 30 dargestellt.

Es wurde für keinen der 30 Versuchsteilnehmer eine Bremsbeschleunigung $\leq -5 \text{ m/s}^2$ aufgezeichnet. Die maximale Bremsverzögerung in der Zufahrt auf den Bahnübergang bei aktivem PeriLight lag in der untersuchten Stichprobe bei $-0,99 \text{ m/s}^2$. Der Mittelwert der Bremsverzögerung in der Stichprobe lag bei $-0,30 \text{ m/s}^2$, bei einer Standardabweichung von $0,23 \text{ m/s}^2$. Da bei keinem der 30 Teilnehmer eine Vollbremsung festgestellt wurde, wird Hypothese 4 angenommen.

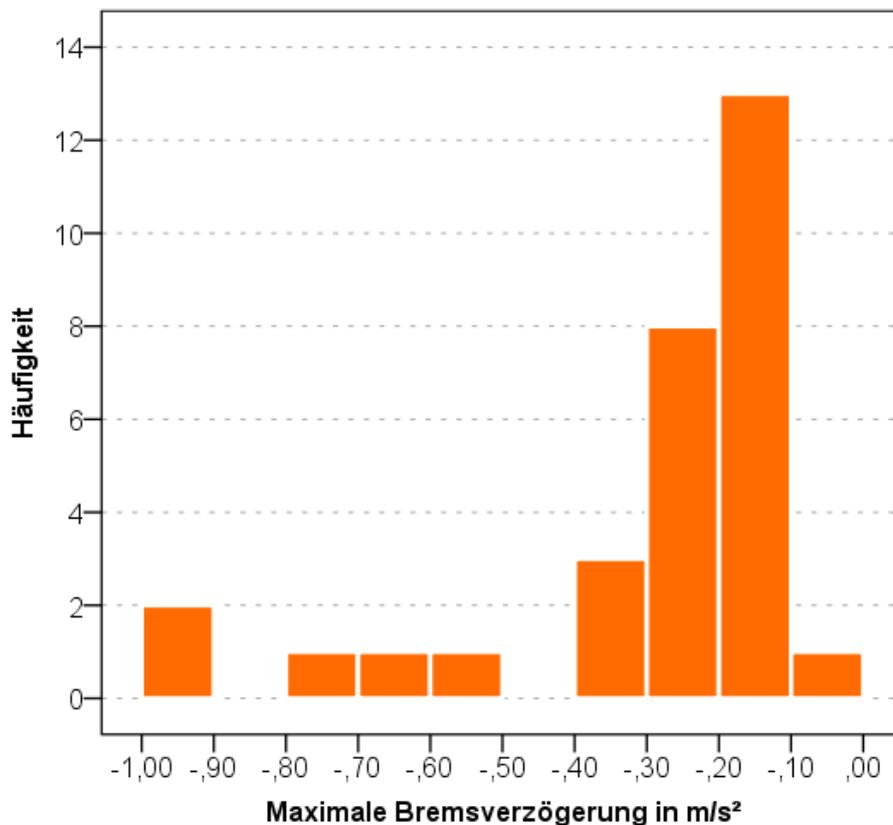


Abbildung 30. Histogramm der maximalen Bremsverzögerungswerte in der Zufahrt auf den Bahnübergang bei Tageslicht.

9.6 Versuch 2 – Evaluation von PeriLight bei Dunkelheit¹⁴

Der zweite Teilversuch zur Untersuchung von PeriLight auf das Blick- und Fahrverhalten von Autofahrern stellt im Wesentlichen eine Replikation des ersten Versuchs dar, mit dem Unterschied, dass alle Versuchsfahrten bei Dunkelheit durchgeführt wurden. So soll ein Eindruck der Wirkung der Lichtreize von PeriLight gewonnen werden unter der Bedingung, dass die Augen von Autofahrern dunkeladaptiert sind. Im Rahmen der Versuchsdurchführung des Teilversuchs bei Dunkelheit kam es zu einer weiteren Veränderung der Untersuchungsbedingungen, die nicht eingeplant war. Während einer mehrwöchigen Unterbrechung der Versuchsdurchführungen wurde auf der linken Seite der auf den Bahnübergang zuführenden Straße ein Wohnhaus gebaut. Dies führte ab diesem Zeitpunkt unweigerlich zu einem eingeschränkten Sichtfeld auf die Bahnstrecke, was eine weitere Versuchsdurchführung unter den gleichen Bedingungen unmöglich machte. Daher ist die analysierte Stichprobe im zweiten Teilversuch kleiner als im ersten Teilversuch. Die Hypothesen für den bei Dunkelheit durchgeführten Teilversuch sind identisch zu den für den ersten Teilversuch in Abschnitt 9.2 formulierten Hypothesen und werden daher hier nicht erneut aufgeführt. Auch die Methoden im zweiten Teilversuch entsprechen den Methoden des ersten Teilversuchs, daher wird lediglich auf die Stichprobenzusammensetzung nochmals genauer eingegangen.

9.7 Methoden

9.7.1 Versuchsteilnehmer

Am Versuch bei Dunkelheit nahmen $n = 17$ Versuchsteilnehmer teil. Ursprünglich war auch für diesen Teilversuch zur Evaluation der Wirkung von PeriLight eine größere Stichprobe vorgesehen. Die einleitend erwähnten baulichen Veränderungen der Versuchsumgebung führten jedoch dazu, dass die Sichtbedingungen nach der siebzehnten Versuchsfahrt derart verändert waren, dass bei jedem weiteren Versuchsteilnehmer keine vergleichbaren Bedingungen in der Versuchsdurchführung mehr bestanden hätten.

Unter den siebzehn Versuchsteilnehmern befanden sich sieben Frauen und zehn Männer. Die Versuchsteilnehmer waren zum Zeitpunkt der Teilnahme zwischen 18 und 56

¹⁴ Die Datenerhebung der Untersuchung von PeriLight bei Dunkelheit wurde im Rahmen einer von Jan Gripkoven betreuten Masterarbeit von Birte Thomas-Friedrich unterstützt.

Jahren alt. Der Mittelwert des Alters der Teilnehmer der Versuchsstichprobe betrug 29,47 Jahre, bei einer Standardabweichung von 9,53 Jahren. Der durchschnittliche Führerscheinbesitz in der Stichprobe betrug zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung 11,88 Jahre, bei einer Standardabweichung von 8,51 Jahren (Minimum: 2 Jahre; Maximum 36 Jahre).

Wie im ersten Teilversuch wurden die Versuchsteilnehmer über einen DLR-eigenen Probandenpool, soziale Netzwerke und einen studentischen E-Mailverteiler akquiriert. Es wurden nur Personen zur Teilnahme aufgefordert, die im Besitz eines gültigen Führerscheins waren und keine Brille trugen, da Brillenträger mit dem verwendeten Blickerfassungssystem nicht problemlos zu erfassen sind. Die Versuchsteilnehmer wurden für ihre Teilnahme mit einem Betrag von 10 € pro Stunde vergütet.

9.7.2 Design

Im Teilversuch bei Dunkelheit wurde dasselbe Versuchsdesign mit denselben abhängigen und unabhängigen Variablen angewendet wie im zuvor beschriebenen Teilversuch, der bei Tageslicht durchgeführt wurde (vgl. 9.4.2). Auch die Kontrollvariablen der psychologischen Blendwirkung durch die Lichtreize und der Störung durch die Marker des Eye-Tracking-Systems wurden wie im Versuch bei Tageslicht erhoben.

9.7.3 Materialien und Versuchsumgebung

Es wurde das identische Versuchsmaterial wie im Teilversuch bei Tageslicht eingesetzt. Zudem wurde im Teilversuch bei Dunkelheit dieselbe Versuchsstrecke gefahren wie im Teilversuch bei Tageslicht (vgl. 9.4.3).

9.7.4 Durchführung

Der Ablauf in der Durchführung des Teilversuchs bei Dunkelheit entsprach im Wesentlichen der Durchführung des Versuchs bei Tageslicht. Mit dem Versuchsbeginn wurde stets gewartet, bis es dunkel war. Da die meisten Versuchsfahrten ebenfalls außerhalb der Hauptverkehrszeit durchgeführt wurden, dauerte die Gesamtdurchführung ebenfalls zwischen 105 und 120 Minuten, von denen die Versuchsfahrt zwischen 45 und 60 Minuten dauerte. Die Versuche begannen zwischen 17:00 Uhr und 20:00 Uhr. Auch im zweiten Teilversuch war PeriLight während der ersten Bahnübergangszufahrt inaktiv und bei der zweiten Bahnübergangszufahrt aktiv.

9.8 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse des Teilversuchs zur Evaluation der Wirkung des Systems PeriLight auf Autofahrer bei Dunkelheit dargestellt. Zunächst werden die deskriptiven Statistiken zu den Kontrollvariablen *Bekanntheit des Bahnübergangs*, *Blendung* und *Störung durch die Marker des Eye-Tracking-Systems* dargestellt. Danach folgt die statistische Auswertung zu den vier Hypothesen, die für den Versuch bei Dunkelheit äquivalent zu den in Abschnitt 9.2 formulierten Hypothesen zum Blickverhalten und Fahrverhalten der Versuchsteilnehmer unter Tageslichtbedingungen gelten.

Bekanntheit des Bahnübergangs

Nachdem die Versuchsfahrten beendet waren, wurden auch im Teilversuch bei Dunkelheit alle Versuchsteilnehmer gefragt, wie regelmäßig sie den Bahnübergang zwischen Bundesallee und Hans-Jürgen-Straße in Watenbüttel in ihrem Alltag überqueren. Von den 17 Versuchsteilnehmern gaben 10 an, den Bahnübergang in ihrem Alltag nie zu überqueren. Die detaillierte Verteilung der Nutzungshäufigkeit des nicht technisch gesicherten Bahnübergangs in der Untersuchung ist in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20

Nutzungshäufigkeit des Bahnübergangs in Watenbüttel unter den Versuchsteilnehmern der Untersuchung der Wirksamkeit von PeriLight bei Dunkelheit

Nennung zur Häufigkeit der Bahnübergangsüberquerung	Anzahl der Versuchsteilnehmer
Mehrmals in der Woche	1
Einmal in der Woche	1
Zweimal im Monat	1
Einmal im Monat	2
Viermal im Jahr	1
Zweimal im Jahr	1
Nie	10

Blendung

Nach der zweiten Überquerung des Bahnübergangs, bei der PeriLight aktiv war, wurden die Versuchsteilnehmer gebeten, anhand der angepassten neunstufigen De Boer-Skala (De Boer, 1967) Auskunft darüber zu geben, wie intensiv sie die Blendung durch PeriLight erlebt haben. Dabei wurde von den 15 der 17 Versuchsteilnehmer eine Einschätzung vorgenommen, die angab, die Lichtreize zuvor wahrgenommen zu haben. Von den zwei Teilnehmern, die sagten, sie haben die Lichtreize nicht wahrgenommen wurde auch keine Angabe der subjektiven Blendung erfragt. Der Mittelwert der subjektiven Blendung im Teilversuch bei Dunkelheit der Teilstichprobe von $n = 15$ Versuchsteilnehmern betrug 5,87 ($SA = 1,55$; Min. = 2; Max. = 8), was angesichts des mittleren Skalenwertes von 5 eine leichte Tendenz in Richtung einer als stark wahrgenommenen Blendung darstellt.

Störung durch Marker

Nach Abschluss der Versuchsfahrt gaben die Versuchsteilnehmer anhand der gleichen neunstufigen Skala wie im ersten Teilversuch an, wie sehr sie sich während der Fahrt durch die Marker des Eye-Tracking-Systems im Fahrzeuginnenraum gestört gefühlt haben. Der Wert 1 auf der Skala war anzugeben, wenn die Marker als *gar nicht störend* empfunden wurden, der Wert 9, wenn die Marker als *sehr störend* empfunden wurden. Der Mittelwert des Störeffindens durch die Marker in der untersuchten Stichprobe betrug 1,71 ($SA = 0,849$; Min. = 1; Max = 3), was eine geringe Störeffindung darstellt.

Hypothese 1 – Blick nach links und rechts bei Dunkelheit

Wie im Teilversuch bei Tageslicht, so war auch im Teilversuch bei Dunkelheit bei allen Versuchsteilnehmern PeriLight während der ersten Zufahrt auf den nicht technisch gesicherten Bahnübergang inaktiv und bei der zweiten Zufahrt aktiv. Während der Zufahrt bei inaktivem PeriLight entfiel bei vier der 17 Versuchsteilnehmer mindestens eine Fixation in die periphere AOI links außen. Dreizehn Versuchsteilnehmer zeigten keine Fixation im Bereich der AOI links außen. Bei aktivem PeriLight, während der zweiten Zufahrt auf den Bahnübergang, entfiel bei einer größeren Anzahl von zwölf der 17 Versuchsteilnehmer mindestens eine Fixation auf die AOI links außen. Fünf der 17 Versuchsteilnehmer zeigten auch bei aktivem PeriLight keine Fixation dieses Bereichs ihres Sichtfeldes. Eine Übersicht der Anzahl der Versuchsteilnehmer, die während der ersten Bahnübergangszufahrt (PeriLight inaktiv) und während der zweiten Bahnübergangszufahrt (PeriLight aktiv) mindestens eine beziehungsweise keine Fixation im Bereich der AOI links außen gezeigt haben wird in der Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 21

Kreuztabelle zu Fixationen in der AOI links außen bei Dunkelheit

AOI links außen		Überquerung 2: PeriLight aktiv		
		Nicht geschaut	Mindestens einmal geschaut	Gesamt
Überquerung 1: PeriLight inaktiv	Nicht geschaut	5	8	13
	Mindestens einmal geschaut	0	4	4
Gesamt		5	12	17

Die statistische Analyse der Daten fand anhand des McNemar-Tests statt. Da neben der AOI links außen auch für die AOI rechts außen, halb links und halb rechts McNemar-Tests berechnet wurden, wurde das Signifikanzniveau von $p < ,05$ mittels Bonferroni-Korrektur auf $p < ,0125$ herabgesetzt. Das Ergebnis des McNemar-Tests zeigte, dass eine höhere Anzahl der Versuchsteilnehmer mindestens eine Fixation im Bereich der AOI links außen zeigte, wenn PeriLight aktiv war, als wenn es inaktiv war, dieser Trend die statistische Signifikanz angesichts des Bonferroni-korrigierten Signifikanzniveaus knapp verfehlt (McNemar's $\chi^2 = 6,125$, $df = 1$, $p = ,0133$).

Im Bereich der AOI rechts außen zeigten nur fünf der 17 Versuchsteilnehmer während der ersten Zufahrt bei inaktivem PeriLight mindestens eine Fixation. Bei den Zufahrten von zwölf Versuchsteilnehmern wurde keine Fixation in die AOI rechts außen aufgezeichnet. Während der zweiten Zufahrt auf den Bahnübergang bei aktivem PeriLight konnte bei dreizehn der 17 Versuchsteilnehmer mindestens eine Fixation im Bereich der AOI rechts außen festgestellt werden. Vier Versuchsteilnehmer zeigten auch in der zweiten Zufahrt keine Fixation. Eine Übersicht der Blickzuwendungsdaten der Versuchsteilnehmer im Bereich der AOI rechts außen für die beiden Überfahrten, bei inaktivem und aktivem PeriLight, ist in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22

Kreuztabelle zu Fixationen in der AOI rechts außen bei Dunkelheit

AOI rechts außen		Überquerung 2: PeriLight aktiv		
		Nicht geschaut	Mindestens einmal geschaut	Gesamt
Überquerung 1: PeriLight inaktiv	Nicht geschaut	4	8	12
	Mindestens einmal geschaut	0	5	5
Gesamt		4	13	17

Die Ergebnisse des McNemar-Tests ($\alpha = ,0125$) weisen darauf hin, dass eine höhere Anzahl der Teilnehmer der Stichprobe im Teilversuch bei Dunkelheit mindestens eine Fixation der AOI rechts außen zeigte, wenn PeriLight aktiv war, als wenn es inaktiv war. Wie auch im Fall der AOI links außen verfehlt dieser Trend knapp die statistische Signifikanz angesichts des Bonferroni-korrigierten Signifikanzniveaus (McNemar's $\chi^2 = 6,125$, $df = 1$, $p = ,0133$).

Auf die AOI halb links entfielen während der Zufahrt auf den Bahnübergang bei Dunkelheit und inaktivem PeriLight Fixationen von vier der 17 Versuchsteilnehmer. Dreizehn Versuchsteilnehmer zeigten keine Fixation der AOI halb links. In der zweiten Zufahrt, bei aktivem PeriLight, fixierte eine deutlich erhöhte Anzahl von 15 der 17 Versuchsteilnehmer mindestens einmal einen Punkt in der AOI halb links. Zwei Versuchsteilnehmer zeigten bei aktivem PeriLight keine Fixation halb links. In Tabelle 23 ist die Anzahl der Versuchsteilnehmer dargestellt, die vor der ersten Bahnübergangsüberquerung (PeriLight inaktiv) und vor der zweiten Bahnübergangsüberquerung (PeriLight aktiv) mindestens eine beziehungsweise keine Fixation im Bereich der AOI halb links zeigten.

Tabelle 23

Kreuztabelle zu Fixationen der AOI halb links bei Dunkelheit

AOI halb links		Überquerung 2: PeriLight aktiv		
		Nicht geschaut	Mindestens einmal geschaut	Gesamt
Überquerung 1: PeriLight inaktiv	Nicht geschaut	2	11	13
	Mindestens einmal geschaut	0	4	4
Gesamt		2	15	17

Der McNemar-Test ($\alpha = ,05$) weist eine signifikant höherer Anzahl der Versuchsteilnehmer auf, die mindestens eine Fixation in der AOI halb links zeigten, wenn PeriLight aktiv war, als wenn es inaktiv war (McNemar's $\chi^2 = 9,091$, $df = 1$, $p = ,003$).

Die AOI halb rechts wurde bei Dunkelheit von fünf der 17 Versuchsteilnehmer mindestens einmal fixiert, wenn PeriLight inaktiv war. Zwölf der 17 Versuchsteilnehmer zeigten während der Zufahrt keine Fixation im Bereich der AOI halb rechts. War PeriLight aktiv, zeigten 15 der 17 Versuchsteilnehmer mindestens eine Fixation im Bereich der AOI halb rechts. Zwei Versuchsteilnehmer zeigten bei aktivem PeriLight keine Fixation halb rechts. Die Anzahl der Versuchsteilnehmer, die bei inaktivem und aktivem PeriLight mindestens eine beziehungsweise keine Fixation im Bereich der AOI halb rechts zeigten sind in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24

Kreuztabelle zu Fixationen in der AOI halb rechts

AOI halb rechts		Überquerung 2: PeriLight aktiv		
		Nicht geschaut	Mindestens einmal geschaut	Gesamt
Überquerung 1: PeriLight inaktiv	Nicht geschaut	2	10	12
	Mindestens einmal geschaut	0	5	5
Gesamt		2	15	17

Der McNemar-Test ($\alpha = ,05$) für den Vergleich der Anzahl der Versuchsteilnehmer, die während der beiden Zufahrten eine Fixation der AOI halb rechts zeigten erreicht statistische Signifikanz (McNemar's $\chi^2 = 8,100$, $df = 1$, $p = ,004$). War PeriLight bei Dunkelheit aktiv, zeigte eine signifikant größere Anzahl der Versuchsteilnehmer eine Fixation im halb rechten Sichtbereich.

Da in zwei der vier relevanten Sichtbereiche, den AOI halb links und halb rechts eine signifikant erhöhte Anzahl der Versuchsteilnehmer mindestens eine Fixation zeigte, wenn PeriLight aktiv war und die fast signifikanten Effekte in den AOI links außen und rechts außen den gleichen Trend beschreiben, wird die Hypothese 1 auch im Teilversuch bei Dunkelheit für den linken und den rechten Sichtbereich in der Zufahrt auf den Bahnübergang angenommen. Eine Übersicht der Ergebnisse findet sich in Abbildung 31.

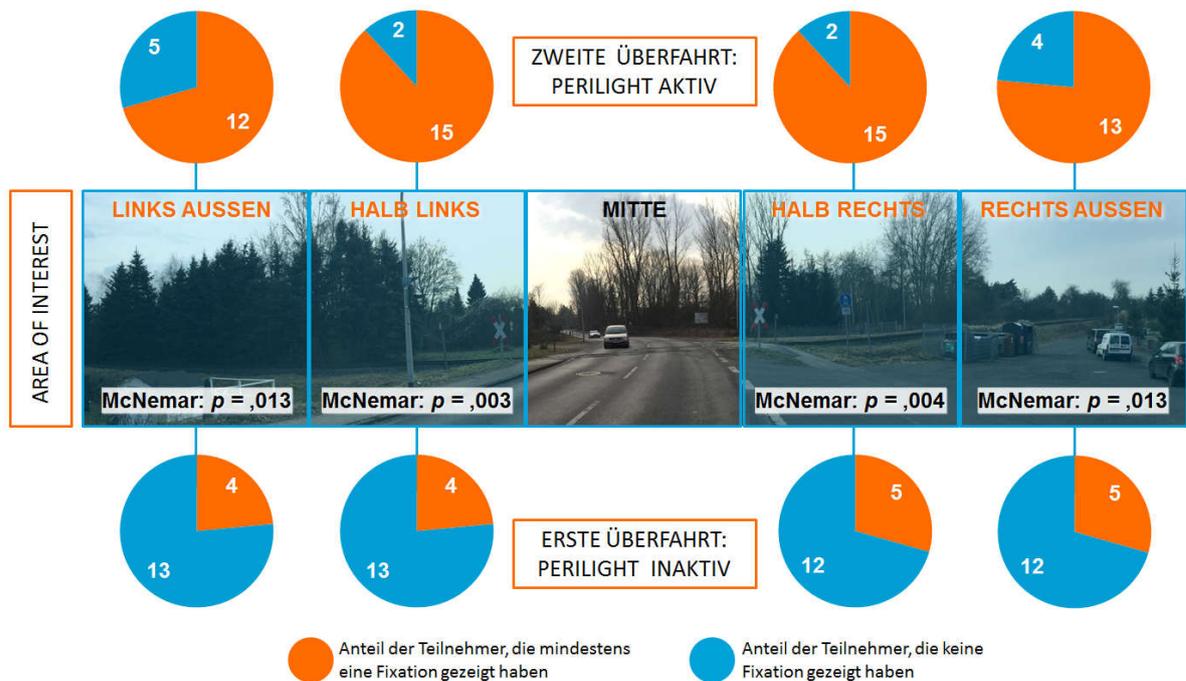


Abbildung 31. Grafische Darstellung der Ergebnisse zur Untersuchung von Hypothese 1 in der Untersuchung zur Wirksamkeit von PeriLight bei Dunkelheit.

Als Ergänzung der Signifikanztests wurde betrachtet, ob die Versuchsteilnehmer, die während beider Zufahrten auf den Bahnübergang eine Fixation im Bereich der AOI links außen zeigten ebenfalls eine Fixation im Bereich der AOI rechts außen zeigten. Die Ergebnisse sind den Tabelle 25 und Tabelle 26 zu entnehmen.

Tabelle 25

Anzahl der Versuchsteilnehmer, die im Teilversuch bei Dunkelheit bei inaktivem PeriLight zu beiden Seiten / zu keiner Seite / nur zu einer Seite geschaut haben

Überquerung 1: PeriLight inaktiv		AOI rechts außen		
		Nicht geschaut	Mindestens einmal geschaut	Gesamt
AOI links außen	Nicht geschaut	11	2	13
	Mindestens einmal geschaut	1	3	4
Gesamt		12	5	17

Bei der ersten Bahnübergangszufahrt bei Dunkelheit, in der PeriLight inaktiv war, zeigten elf der 17 Versuchsteilnehmer weder im Bereich der AOI links außen noch im Bereich der AOI rechts außen eine Fixation (Tabelle 25). Lediglich drei der 17 Versuchsteilnehmer schauten in der Zufahrt auf den Bahnübergang sowohl in die linke als auch in die rechte Peripherie. Ein Teilnehmer zeigte vor der Überquerung des Bahnübergangs ausschließlich mindestens eine Fixation der AOI links außen, schaute aber nicht nach rechts. Zwei der Versuchsteilnehmer schauten zwar mindestens einmal in der Bahnübergangszufahrt in die rechte Peripherie, nicht jedoch nach links.

Tabelle 26

Anzahl der Versuchsteilnehmer, die im Teilversuch bei Dunkelheit bei aktivem PeriLight zu beiden Seiten / zu keiner Seite / nur zu einer Seite geschaut haben

Überquerung 2: PeriLight aktiv		AOI rechts außen		
		Nicht geschaut	Mindestens einmal geschaut	Gesamt
AOI links außen	Nicht geschaut	3	2	5
	Mindestens einmal geschaut	1	11	12
Gesamt		4	13	17

Bei der zweiten Zufahrt auf den Bahnübergang bei Dunkelheit mit aktivem PeriLight konnte bei elf der 17 Versuchsteilnehmer eine Fixation sowohl der AOI links außen als auch

der AOI rechts außen festgestellt werden (Tabelle 26). Drei der Versuchsteilnehmer schauten weder nach links außen noch nach rechts außen. Zwei der 17 Versuchsteilnehmer zeigten bei aktivem PeriLight mindestens eine Fixation im Bereich der AOI rechts außen, zeigten aber keine Fixation im Bereich der AOI links außen. Ein Versuchsteilnehmer zeigte mindestens eine Fixation im Bereich der AOI links außen, aber keine Fixation rechts außen.

Hypothese 2 – Zeitpunkt der ersten Fixation bei Dunkelheit

Um zu ermitteln, wie frühzeitig die Versuchsteilnehmer im Teilversuch bei Dunkelheit vor der Überquerung des Bahnübergangs in die AOI links und rechts außen geschaut haben, wurde wie im ersten Teilversuch die früheste Blickzuwendung ermittelt. Eine detaillierte Erläuterung, wie sich der Wert der frühesten Blickzuwendung zusammensetzt und warum er zur Untersuchung von Hypothese 2 gewählt wurde, wurde in Unterkapitel 9.5 im Abschnitt zu den Ergebnissen zum Zeitpunkt der ersten Fixation unter Tageslichtbedingungen gegeben. Das Vorgehen im Teilversuch bei dunklen Umgebungslichtbedingungen entspricht dem bei Tageslicht. An dieser Stelle sei daran erinnert, dass der Wert der frühesten Blickzuwendung als Indikator der Frühzeitigkeit der Blicke in die peripheren Bereiche des Bahnübergangs theoretisch einen Wertebereich zwischen 0 und 1 annehmen kann. Je kleiner der Wert der frühesten Blickzuwendung, desto früher in der Zufahrt hat ein Versuchsteilnehmer die erste Fixation auf die AOI links beziehungsweise rechts außen gerichtet. Zeigte ein Versuchsteilnehmer während der Bahnübergangszufahrt keine Fixation im peripheren Bereich links oder rechts, kann keine aussagekräftige früheste Blickzuwendung bestimmt werden. Die deskriptiven Daten zur Untersuchung der zweiten Hypothese sind in Tabelle 27 dargestellt.

Tabelle 27

Deskriptive Daten zur Untersuchung von Hypothese 2 bei Dunkelheit

	Anzahl gültiger Beobachtungen	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Dauer des <i>Use Case</i> bei inaktivem PeriLight in s	17	5,92	8,52	7,11	0,74
Dauer des <i>Use Case</i> bei aktivem PeriLight in s	17	5,68	20,08	9,96	4,3
<i>Time to First Glance</i> bei inaktivem PeriLight in s	4	4,72	5,64	5,05	0,41
<i>Time to First Glance</i> bei aktivem PeriLight in s	12	1,28	3,96	2,14	0,77
AOI links außen <i>Früheste Blickzuwendung</i> bei inaktivem PeriLight	4	0,66	0,71	0,69	0,02
<i>Früheste Blickzuwendung</i> bei aktivem PeriLight	12	0,08	0,30	0,21	0,08
<i>Time to First Glance</i> bei inaktivem PeriLight in s	5	4,28	7,04	6,00	1,09
<i>Time to First Glance</i> bei aktivem PeriLight in s	13	4,28	7,12	5,46	1,02
AOI rechts außen <i>Früheste Blickzuwendung</i> bei inaktivem PeriLight	5	0,61	0,89	0,80	0,11
<i>Früheste Blickzuwendung</i> bei aktivem PeriLight	13	0,23	0,82	0,57	0,21

Die durchschnittliche Fahrtdauer aus der Distanz von 160 m bis zur Überquerung des Bahnübergangs, die sogenannte *Use Case Duration*, betrug unter den 17 Versuchsteilnehmern des Teilversuchs bei Dunkelheit mit inaktivem PeriLight 7,11 s ($SA = 0,74$ s; $Min. = 5,92$ s; $Max. = 8,52$ s). War PeriLight bei der zweiten Überfahrt des Bahnübergangs aktiv, erhöhte sich der Mittelwert der *Use Case Duration* auf 9,96 s ($SA = 4,3$ s; $Min. = 5,68$ s; $Max. = 20,08$ s). In der Verteilung der Daten der *Use Case Duration* bei aktivem PeriLight konnten bei sieben Teilnehmern *Use Case Durations* ermittelt werden, die oberhalb des Maximalwertes der

Zufahrt bei inaktivem PeriLight von 8,52 s lagen. In der Verteilung der *Use Case Duration* bei aktivem PeriLight befanden sich zwei Werte, die als Ausreißer nach oben zu klassifizieren sind. In diesen Fällen betrug die *Use Case Duration* 19,44 s beziehungsweise 20,08 s. Diese Werte stammen von zwei Versuchsteilnehmern, die ihre Geschwindigkeit in der Zufahrt auf den Bahnübergang sehr viel stärker verringerten als die übrigen Teilnehmer.

Die Berechnung der *Time to First Glance* und der frühesten Blickzuwendung war im Gegensatz zur *Use Case Duration* ausschließlich für die Versuchsteilnehmer möglich, die in der Zufahrt auf den Bahnübergang mindestens eine Fixation im Bereich der AOI links und rechts außen gezeigt haben. Wie im Teilversuch unter Tageslichtbedingungen bedeutet dies auch im Versuch bei Dunkelheit, dass nur Teile der Stichprobe in der Berechnung der *Time to First Glance* und der frühesten Blickzuwendung berücksichtigt werden können. Insbesondere in der ersten Überfahrt bei inaktivem PeriLight ist der auswertbare Teil der Stichprobe daher deutlich reduziert, da von den 17 Teilnehmern lediglich vier überhaupt eine Fixation im Bereich der AOI links außen zeigten und nur fünf eine Fixation im Bereich der AOI rechts außen. Die folgenden deskriptiven Daten sind unter dem Vorbehalt dieses eingeschränkten Datenumfangs zu betrachten.

Der Mittelwert der *Time to First Glance* bei inaktivem PeriLight beträgt für die AOI links außen 5,05 s ($SA = 0,41$ s; $Min. = 4,72$ s; $Max. = 5,64$ s). In der Mittelwertberechnung wurden vier der 17 Versuchsteilnehmer berücksichtigt, die in der Bahnübergangszufahrt mindestens eine Fixation im Bereich der AOI links außen zeigten. Bei aktivem PeriLight zeigten zwölf der 17 Versuchsteilnehmer eine Fixation der AOI links außen, bei einem geringeren Mittelwert der *Time to First Glance* von 2,14 s ($SA = 0,77$ s; $Min. = 1,28$ s; $Max. = 3,96$ s). Die zwölf Versuchsteilnehmer, die in der Zufahrt auf den Bahnübergang bei aktivem PeriLight eine Fixation im Bereich der AOI links außen zeigten, taten dies also durchschnittlich früher als die vier Versuchsteilnehmer, die bei inaktivem PeriLight eine Fixation der AOI links außen zeigten.

Die *Time to First Glance* der AOI rechts außen beträgt bei inaktivem PeriLight im Durchschnitt 6,00 s ($SA = 1,09$ s; $Min. = 4,28$ s; $Max. = 7,04$ s), berechnet für die fünf der 17 Versuchsteilnehmer, die in der Bahnübergangszufahrt mindestens eine Fixation in der rechten Peripherie zeigten. Bei aktivem PeriLight beträgt der etwas geringere Mittelwert der *Time to First Glance* für die AOI rechts außen 5,46 s ($SA = 1,02$ s; $Min. = 4,28$ s; $Max. = 7,12$ s) für die 13 Teilnehmer, die mindestens eine Fixation dieser AOI zeigten.

Die früheste Blickzuwendung, ein Kennwert gebildet aus dem Quotienten der *Time to First Glance* und der *Use Case Duration* (vgl. Abschnitt 9.5 Ergebnisse zu Hypothese 2), liegt für die AOI links außen im Durchschnitt bei einem Wert von ,69 ($n = 4$; $SA = ,02$; $Min. = ,66$; $Max. = ,71$) für die Bahnübergangszufahrten bei inaktivem PeriLight. Bei aktivem PeriLight liegt der Mittelwert der frühesten Blickzuwendung bei ,21 ($n = 12$; $SA = ,08$; $Min. = ,08$; $Max. = ,30$). Der geringe Wert der frühesten Blickzuwendung spricht ebenfalls dafür, dass die zwölf Versuchsteilnehmer, die bei Dunkelheit und aktivem PeriLight in die linke Peripherie geschaut haben dies bereits frühzeitig nach Beginn des *Use Case* taten. Für die AOI rechts außen liegt der Mittelwert der frühesten Blickzuwendung in der Zufahrt auf den Bahnübergang bei inaktivem PeriLight bei ,80 ($n = 5$; $SA = ,11$; $Min. = ,61$; $Max. = ,89$). Bei aktivem PeriLight liegt der Mittelwert mit ,57 ($n = 13$; $SA = ,21$; $Min. = ,23$; $Max. = ,82$) unter dem Wert, der für die erste Überfahrt mit aktivem PeriLight ermittelt wurde.

Auf weitere inferenzstatistische Auswertungsverfahren der Daten zur der frühesten Blickzuwendung oder zur *Time to First Glance* zur Untersuchung von Hypothese 2 wird auch im Teilversuch bei Dunkelheit verzichtet. Vor allem bei den Bahnübergangszufahrten, in denen PeriLight inaktiv war hat ein äußerst geringer Teil der Stichprobe eine Fixation im Bereich der AOI links außen und rechts außen gezeigt ($n_{\text{AOI links außen}} = 4$; $n_{\text{AOI rechts außen}} = 5$). Ein Mittelwertvergleich anhand von Teilstichproben mit einem solch geringen Umfang erscheint nicht sinnvoll. Wie im Teilversuch bei Tageslicht sind Imputationsverfahren zur Ergänzung der fehlenden Werte nicht angebracht, da bei zu vielen Versuchsteilnehmern keine *Time to First Glance* aufgezeichnet werden konnte, da sie vor allem bei inaktivem PeriLight am Bahnübergang nicht nach links und rechts geschaut haben.

Die Mittelwerte der der frühesten Blickzuwendung und der *Time to First Glance* weisen darauf hin, dass bei aktivem PeriLight in dunkler Umgebung früher während der Bahnübergangszufahrt nach links und rechts geschaut wird. Da jedoch bei inaktivem PeriLight in der Dunkelheit nur eine so geringe Anzahl der Teilnehmer nach links und rechts geschaut hat, dass belastbare Mittelwertvergleiche nicht möglich sind, kann auch im Teilversuch bei Dunkelheit zu Hypothese 2 keine finale Aussage getroffen werden.

Hypothese 3 – Fahrgeschwindigkeit bei Dunkelheit

Zur Analyse der Anfahrgeschwindigkeit der Versuchsteilnehmer an den Bahnübergang bei Dunkelheit im Rahmen von Hypothese 3 wurde als abhängige Variable die Fahrgeschwindigkeit von 16 der 17 Versuchsteilnehmer zwischen den beiden Zufahrten auf den Bahnübergang verglichen. Die Daten eines Teilnehmers können aufgrund von technischen

Problemen mit der Aufzeichnung der Fahrgeschwindigkeit nicht in die Auswertung mit einfließen. Für die Analyse wird der Einfluss der beiden unabhängigen Variablen *Aktivität PeriLight* und *Distanz zum Bahnübergang* auf die Fahrgeschwindigkeit untersucht.

Wie im ersten Teilversuch bei Tageslicht hat die unabhängige Variable in Bezug auf die Aktivität des Systems PeriLight zwei Stufen, da PeriLight bei der ersten Zufahrt inaktiv und bei der zweiten Zufahrt aktiv war und in der Annäherung ab einer Distanz von 80 m Lichtreize abgab. Die unabhängige Variable, die sich aus der Distanz zum Bahnübergang ergibt hat neun Stufen, die sich aus den Messdistanzen 80 m, 70 m, 60 m, 50 m, 40 m, 30 m, 20 m, 10 m und 0 m in der Zufahrt auf dem Bahnübergang ergeben. Im ersten Teil dieses Ergebnisabschnitts werden die Fahrgeschwindigkeiten während der beiden Zufahrten auf den Bahnübergang deskriptiv dargestellt. Anschließend erfolgt eine vertiefte Auswertung der Daten anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung.

In Abbildung 32 ist in einer grafischen Übersicht die mittlere Fahrgeschwindigkeit an den einzelnen Messdistanzen bei Dunkelheit dargestellt. In der Darstellung wird zwischen der Überfahrt bei inaktivem und aktivem PeriLight differenziert. Es ist zu erkennen, dass der Mittelwert der Geschwindigkeit in der Stichprobe bei inaktivem PeriLight über die Messdistanzen weitestgehend gleichbleibend ist und erst auf den letzten 30 m der Bahnübergangszufahrt leicht abfällt. Wie schon in der Untersuchung bei Tageslicht liegt der Mittelwert der Geschwindigkeit in der Zufahrt mit aktivem PeriLight im Bereich der Messdistanzen zu Beginn der Bahnübergangsannäherung geringfügig über dem Mittelwert der Geschwindigkeit, die bei inaktivem PeriLight ermittelt wurde. Ab einer Messdistanz von 40 m vor dem Bahnübergang unterschreitet der Mittelwert der Fahrgeschwindigkeit bei aktivem PeriLight mit zunehmender Differenz bis zur Messdistanz von 10 m vor der Bahnübergangsüberquerung den Mittelwert der Fahrgeschwindigkeit bei inaktivem PeriLight. Bei aktivem PeriLight ist nach der Messdistanz 10 m eine leichte Geschwindigkeitszunahme festzustellen, die sich in einer erhöhten mittleren Geschwindigkeit im Moment der Bahnübergangsüberquerung in der Messdistanz 0 m ausdrückt. Die Verbindungslinien zwischen den konkreten Geschwindigkeitswerten an den Messdistanzen in Abbildung 32 basieren auf Interpolationen.

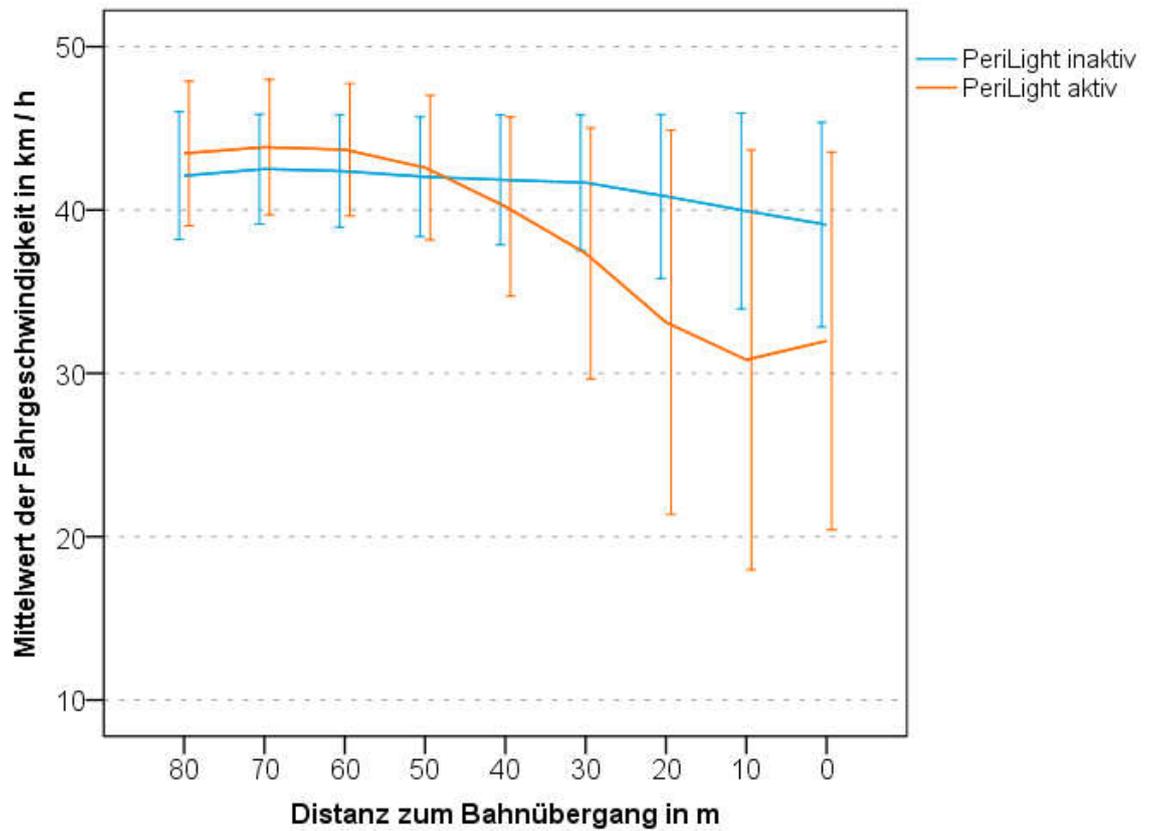


Abbildung 32. Fahrgeschwindigkeit in der Zufahrt auf den Bahnübergang bei inaktivem und aktivem PeriLight im Teilversuch bei Dunkelheit.

Eine detaillierte Übersicht der einzelnen Werte der in Abbildung 32 dargestellten Geschwindigkeitsverläufe findet sich in Tabelle 28.

Tabelle 28

Fahrdatenvergleich bei inaktivem und aktivem PeriLight im Teilversuch bei Dunkelheit

PeriLight – Zustand und Distanz zum Bahnübergang	Minimum in km/h	Maximum in km/h	Mittelwert der Fahrgeschwindigkeit in km/h	Standardabweichung in km/h
PeriLight inaktiv 80 m	37,01	50,34	42,10	3,92
PeriLight aktiv 80 m	37,20	54,40	43,47	4,43
PeriLight inaktiv 70 m	37,05	49,35	42,51	3,36
PeriLight aktiv 70 m	38,25	53,69	43,85	4,15
PeriLight inaktiv 60 m	35,18	48,45	42,37	3,43
PeriLight aktiv 60 m	38,41	53,50	43,69	4,05
PeriLight inaktiv 50 m	33,32	48,24	42,03	3,66
PeriLight aktiv 50 m	34,45	52,61	42,60	4,44
PeriLight inaktiv 40 m	32,42	48,21	41,84	3,98
PeriLight aktiv 40 m	27,80	52,06	40,21	5,49
PeriLight inaktiv 30 m	32,49	48,21	41,67	4,14
PeriLight aktiv 30 m	23,79	51,21	37,34	7,68
PeriLight inaktiv 20 m	28,77	47,95	40,83	5,02
PeriLight aktiv 20 m	11,71	50,57	33,12	11,77
PeriLight inaktiv 10 m	25,18	48,27	39,94	5,99
PeriLight aktiv 10 m	10,96	48,98	30,83	12,86
PeriLight inaktiv 0 m	26,61	47,65	39,10	6,27
PeriLight aktiv 0 m	8,95	47,56	31,98	11,56

In der folgenden zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung wurde das Signifikanzniveau auf $p = ,05$ festgelegt. Zunächst wurde die Voraussetzung der Sphärizität mit dem Mauchly's Test ermittelt. Die Ergebnisse des Mauchly's Test weisen darauf hin, dass die Sphärizität verletzt ist, sowohl in Bezug auf den Haupteffekt des Faktors Distanz zum Bahnübergang, $\chi^2(35) = 284,13$, $p < ,001$ als auch auf die Interaktion aus den Faktoren Distanz zum Bahnübergang und Aktivität PeriLight, $\chi^2(35) = 283,25$, $p < ,001$. Daher werden die Freiheitsgrade anhand der Greenhouse-Geisser-Korrektur der Sphärizität angepasst ($\epsilon = ,180$ für den Haupteffekt der Distanz zum Bahnübergang und $\epsilon = ,184$ für die Interaktion aus den Faktoren Distanz zum Bahnübergang und Aktivität PeriLight).

Es konnte für die untersuchte Stichprobe ein signifikanter Haupteffekt des Faktors Aktivität PeriLight auf die Fahrgeschwindigkeit festgestellt werden, $F(1, 15) = 4,70, p = ,047, \varepsilon^2 = ,239$. Es gab zudem einen signifikanten Haupteffekt des Faktors Distanz zum Bahnübergang auf die Fahrgeschwindigkeit, $F(1,443, 21,642) = 14,183, p < ,001, \varepsilon^2 = ,486$. Neben den Haupteffekten auf den Faktoren Aktivität PeriLight und Distanz zum Bahnübergang wurde ein signifikanter Interaktionseffekt zwischen den beiden Faktoren ermittelt, $F(1,470, 22,057) = 8,295, p = 004$. Aufgrund des Interaktionseffektes wurden keine Post-Hoc-Tests für die Haupteffekte durchgeführt. Die Interaktion zwischen den Faktoren Aktivität PeriLight und Distanz zum Bahnübergang weist darauf hin, dass der Faktor Aktivität PeriLight einen unterschiedlichen Effekt auf die Wahl der Geschwindigkeit der Versuchsteilnehmer hatte, je nachdem in welcher Distanz zum Bahnübergang sie sich in der Zufahrt befanden. Abbildung 32 gibt einen visuellen Eindruck der Art dieser Interaktion.

Als vertiefende Untersuchungen der Interaktion wurden Kontraste berechnet, anhand derer die Stufen der unabhängigen Variable PeriLight (inaktiv/aktiv) im Verhältnis zu den Differenzen der Geschwindigkeiten zwischen allen Messdistanzen in der Bahnübergangszufahrt und der Messdistanz 0 m analysiert werden. Aufgrund der für die neun Kontrastberechnungen verwendeten Bonferroni-Korrektur des Signifikanzniveaus auf $p = 0,0056$, erreicht keiner der Kontraste der Interaktion statistische Signifikanz. Die statistischen Kennwerte der berechneten Kontraste für den Interaktionseffekt sind im Folgenden stichpunktartig dargestellt:

- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 80 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 15) = 6,050, p = ,027, r = ,54$
- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 70 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 15) = 6,517, p = ,022, r = ,55$
- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 60 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 15) = 7,075, p = ,018, r = ,57$
- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 50 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 15) = 6,595, p = ,021, r = ,55$
- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 40 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 15) = 3,798, p = ,070, r = ,45$
- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 30 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 15) = 1,209, p = ,289, r = ,27$

- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 20 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 15) = ,074, p = ,789, r = ,07$
- PeriLight inaktiv vs. PeriLight aktiv / Geschwindigkeit bei 10 m vs. Geschwindigkeit bei 0 m: $F(1, 15) = 2,994, p = ,104, r = ,41$

Zwar wiesen die berechneten Kontraste für die Interaktion angesichts des Bonferroni-korrigierten Signifikanzniveaus von $p = ,0056$ keine statistische Signifikanz auf, jedoch waren in den Kontrasten der Interaktion für die Unterschiede in der Aktivität von PeriLight und der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den Messdistanzen 80 m, 70 m, 60 m, 50 m und 40 m zur Messdistanz 0 m starke Effekte in einem Wertebereich von $r = ,45$ bis $r = ,57$ festzustellen. Der Effekt des Kontrasts der Interaktion für den Unterschied in der Aktivität von PeriLight und den Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Messdistanzen 30 m zur Messdistanz 0 m ist mit $r = ,27$ als mittelstark zu bezeichnen.

Der Interaktionseffekt weist darauf hin, dass die Versuchsteilnehmer in der Annäherung an den Bahnübergang zwischen den Messdistanzen 80 m und 50 m leicht schneller fahren, wenn PeriLight aktiv war, als wenn es inaktiv war, sich dieser Trend zwischen den Messzeitpunkten 40 m und 0 m aber signifikant umkehrt. In diesen Distanzen fahren die Versuchsteilnehmer langsamer, wenn PeriLight aktiv war, als wenn es inaktiv war. Die größte mittlere Geschwindigkeitsdifferenz kann für die Messdistanz 10 m vor dem Bahnübergang festgestellt werden, in der die Versuchsteilnehmer durchschnittlich 9,11 km/h langsamer fahren, wenn PeriLight aktiv war (3994 km/h), als wenn es inaktiv war (30,83 km/h).

Es wurde zwar ein signifikanter Haupteffekt für den Faktor Aktivität PeriLight gefunden, dieser kann angesichts der signifikanten Interaktion mit dem Faktor Distanz zum Bahnübergang aber nicht einwandfrei interpretiert werden. Zwar entspricht die Art der Interaktion mit der durchschnittlich langsameren Geschwindigkeit im Nahbereich des Bahnübergangs bei aktivem PeriLight im Wesentlichen der postulierten Annahme in Hypothese 3, jedoch wird die Hypothese aufgrund des signifikanten Interaktionseffekts abgelehnt.

Hypothese 4 – Bremsverhalten bei Dunkelheit

Um auch im Teilversuch bei Dunkelheit zu prüfen, ob die Versuchsteilnehmer als Reaktion auf die Lichtreize von PeriLight eine Vollbremsung durchführen, wurden zur Überprüfung der Hypothese 4 die maximalen negativen Beschleunigungen als Indikatoren des Bremsverhaltens analysiert. Für jeden Versuchsteilnehmer wurde bei der zweiten Bahnübergangsüberfahrt, bei der PeriLight aktiv war, die stärkste Bremsverzögerung auf der Annäherungsstrecke von 80 m vor dem Bahnübergang bis zum Bahnübergang ermittelt. In die Auswertung

gingen wie zuvor bei der Analyse der Fahrgeschwindigkeiten ebenfalls nur 16 Datensätze ein, da bei einer Versuchsdurchführung technische Probleme bei der Datenaufzeichnung der fahrdynamischen Parameter bestanden. Als Grenzwert für eine Vollbremsung wurde ein negativer Beschleunigungswert $\leq -5,0 \text{ m/s}^2$ festgelegt (vgl. Abschnitt 5.5). Die Häufigkeiten der ermittelten maximalen Bremsverzögerungen in der Stichprobe bei den Überfahrten mit aktivem PeriLight bei Dunkelheit sind im Histogramm in Abbildung 33 dargestellt.

Es wurde bei keinem der 16 Versuchsteilnehmer, von denen fahrdynamische Daten ausgewertet werden konnten eine Bremsbeschleunigung $\leq -5 \text{ m/s}^2$ aufgezeichnet. Die maximale Bremsverzögerung bei aktivem PeriLight lag in der untersuchten Stichprobe bei $-0,74 \text{ m/s}^2$. Der Mittelwert der Bremsverzögerung in der Stichprobe lag bei $-0,31 \text{ m/s}^2$, bei einer Standardabweichung von $0,21 \text{ m/s}^2$. Da bei keinem der 30 Teilnehmer eine Vollbremsung festgestellt wurde, wird Hypothese 4 angenommen.

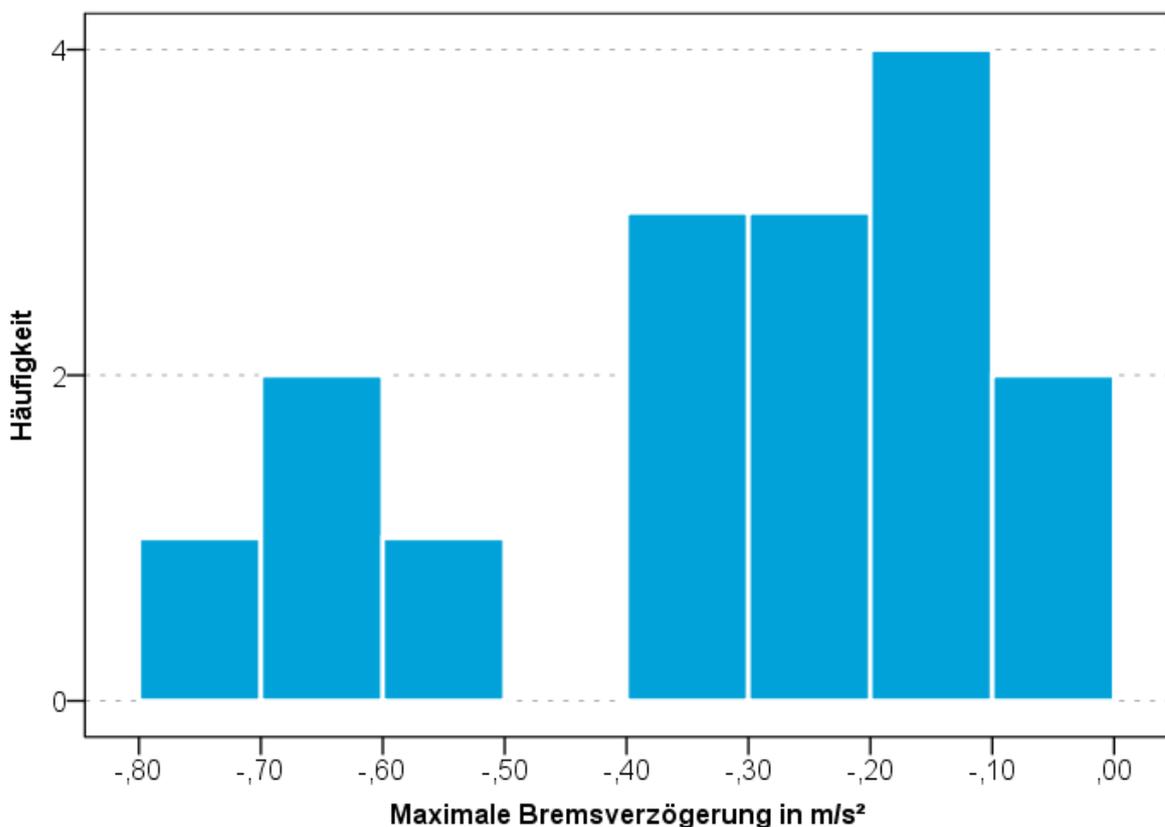


Abbildung 33. Histogramm der maximalen Bremsverzögerungswerte in der Zufahrt auf den Bahnübergang bei Dunkelheit.

9.9 Diskussion

Bezugnahme auf die Ausgangsfragestellung und die Hypothesen

Das Gesamtziel der vorliegenden Dissertation besteht in der Identifikation einer nutzerzentrierten Gestaltungsmaßnahme, mit der die Kreuzungssicherheit an Bahnübergängen erhöht werden kann. In diesem Kapitel wurde das System PeriLight eingeführt, eine Erfindung, die durch Lichtreize den Blick von Straßenverkehrsteilnehmern in die peripheren Bereiche von nicht technisch gesicherten Bahnübergängen ziehen soll (vgl. Abschnitt 8.2). Mit diesem System soll die frühzeitige Wahrnehmung eines herannahenden Schienenfahrzeugs unterstützt und somit die Sicherheit nicht technisch gesicherter Bahnübergänge erhöht werden. Um die Wirksamkeit von PeriLight beurteilen zu können, wurden Kriterien definiert, die als Hypothesen die Grundlage der in diesem Kapitel dargestellten Teiluntersuchungen darstellen.

Das wichtigste Kriterium zur Beurteilung der Wirksamkeit von PeriLight ist, dass eine größere Anzahl der Straßenverkehrsteilnehmer mindestens einmal in der Bahnübergangszufahrt nach links und rechts schaut, wenn PeriLight Lichtreize abgibt, da die Blicklenkung in die peripheren Schienenbereiche die grundlegende Idee der Erfindung darstellt. Dieses Schlüsselkriterium wurde anhand der Hypothese 1 untersucht. Des Weiteren sollten Straßenverkehrsteilnehmer, insbesondere motorisierte Straßenverkehrsteilnehmer, in der Zufahrt auf den Bahnübergang nicht nur nach links und rechts schauen, die Sichtprüfung sollte nach Möglichkeit auch frühzeitig in der Zufahrt erfolgen. Eine frühzeitige Sichtprüfung ermöglicht es dem Verkehrsteilnehmer, sein Fahrverhalten anzupassen, wenn ein Schienenfahrzeug herannahen, um eine Kollision sicher vermeiden zu können. Das Kriterium der Frühzeitigkeit der Sichtprüfung wurde mit Hypothese 2 untersucht. Neben dem Blickverhalten der Versuchsteilnehmer wurde das Fahrverhalten in den beiden Teilversuchen zur Evaluation von PeriLight betrachtet. Es ist grundsätzlich als vorteilhaftes Verhalten zu beurteilen, wenn Autofahrer ihre Geschwindigkeit in der Zufahrt auf den Bahnübergang verringern, um ausreichend Zeit zu haben zu reagieren, falls sich ein Schienenfahrzeug dem Bahnübergang annähert. Zwar wurden die beschriebenen Untersuchungen ausschließlich zu Zeiten durchgeführt, zu denen kein Schienenverkehr stattfand, dennoch konnte geprüft werden, ob die peripheren Lichtreize auch zu einer Verlangsamung der Fahrgeschwindigkeit vor dem Bahnübergang beitragen. Dies erfolgte anhand der Analyse der Geschwindigkeitsverläufe in der Zufahrt auf den Bahnübergang im Rahmen der Untersuchung von Hypothese 3. Zu beachten ist, dass eine gleichmäßige Verlangsamung der Straßenverkehrsteilnehmer in der Zufahrt auf Bahnübergänge wünschenswert ist, eine abrupte Vollbremsung hingegen nicht, da dies bei Folgefahrtsituationen

das Risiko von Auffahrunfällen begünstigen kann. Die Untersuchung, ob es in der Reaktion auf die abrupt auftretenden Lichtreize bei der Verwendung von PeriLight zu Vollbremsungen kommt, wurde für die Stichproben der Teilversuche bei Tageslicht und Dunkelheit im Rahmen von Hypothese 4 untersucht. Jenseits der hypothesenbasierten Untersuchungen wurde geprüft, wie stark sich die Versuchsteilnehmer durch die Lichtreize geblendet fühlen. Dabei handelte es sich um eine Selbsteinschätzung der Versuchsteilnehmer, um einen ersten Eindruck der wahrgenommenen Intensität der Lichtreize zu bekommen.

Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts werden zunächst die Ergebnisse der hypothesengeleiteten Untersuchungen diskutiert. Anschließend werden die Ergebnisse im Kontext des Standes der Forschung und der Technik reflektiert. Darüber hinaus erfolgt eine kritische Betrachtung von Aspekten der Versuchsdurchführung, welche die Generalisierbarkeit der Ergebnisse einschränken. Abschließend wird eine generelle Schlussfolgerung zur Wirksamkeit des Systems PeriLight gezogen und Empfehlungen zu weiteren Forschungsarbeiten formuliert, die auf dem Weg der Überführung des Systems PeriLight in ein serienreifes Produkt erfolgen sollten.

Bezugnahme auf die Ergebnisse in den Teiluntersuchungen bei Tag und Nacht

In Bezug auf das Hauptkriterium zur Beurteilung des Systems PeriLight, der Erhöhung der Anzahl der Versuchsteilnehmer, die bei aktivem System in der Bahnübergangszufahrt nach links und rechts schauen kann ein positives Fazit gezogen werden. Hypothese 1 konnte durch die vorliegenden Teilversuche, sowohl unter Tageslichtbedingungen als auch bei Dunkelheit, gestützt werden. Es schaute in beiden Teilversuchen eine signifikant größere Anzahl der Versuchsteilnehmer mindestens einmal in die linke und in die rechte Peripherie des Bahnübergangs, wenn das System aktiv war, verglichen mit der Kontrollbedingung.

Als abhängige Variable zur Untersuchung dieser Hypothese wurde die Anzahl der Versuchsteilnehmer gewählt, die mindestens eine Fixation im Bereich der AOI links beziehungsweise rechts außen gezeigt hat. Dies ist zu erläutern, da in anderen Eye-Tracking-Untersuchungen im Verkehrskontext, insbesondere im Zusammenhang mit Bahnübergängen, andere Eye-Tracking-Parameter gebräuchlich sind, beispielsweise die durchschnittliche Fixationsdauer in bestimmten AOI oder die Anzahl der Fixationen in einer oder mehreren AOI. Mit einer längeren Fixationsdauer oder einer größeren Anzahl von Fixationen in den peripheren Bereichen eines Bahnübergangs steigt jedoch nicht zwangsläufig die Sicherheit der Überquerung des Bahnübergangs. Die wesentliche Grundlage der Beurteilung der Sicherheit des Verhaltens besteht darin festzustellen, ob ein Straßenverkehrsteilnehmer in der Zufahrt über-

haupt mindestens einmal in die Peripherie entlang der Schienenarme blickt oder nicht. Die Frage, ob ein Straßenverkehrsteilnehmer eine Sichtprüfung durchführt oder nicht ist relevanter als die Frage, wie lange oder oft er dies tut.

Bei den Versuchsfahrten bei Tag schaute in der Kontrollbedingung ein Großteil der Teilnehmer nicht nach links außen und rechts außen. Mit PeriLight wurde die Anzahl der Versuchsteilnehmer, die nach links und rechts schauten deutlich erhöht. Zwei Drittel der Teilnehmer (20 von 30) schauten nach links außen und 17 von 30 Teilnehmern nach rechts außen. Im Teilversuch bei Dunkelheit wurden trotz kleinerer Stichprobe sowohl in der Experimentalbedingung als auch in der Kontrollbedingung verglichen mit der Fahrt bei Tageslicht ähnliche Anteile unter den Teilnehmern festgestellt, die in der Bahnübergangszufahrt eine Sichtprüfung durchführen. Ohne PeriLight schaute die Mehrzahl der Teilnehmer nicht nach links und rechts außen. Bei aktivem PeriLight schaute auch bei Dunkelheit die Mehrzahl der Teilnehmer nach links und rechts, bevor sie den Bahnübergang überquerten. Zwölf von 17 Teilnehmern schauten nach links außen, 13 von 17 Teilnehmern schauten nach rechts außen.

In der Auswertung der Eye-Tracking-Daten wurden neben den AOI links und rechts außen auch noch die AOI halb links und halb rechts definiert, die sich näher am zentralen Sichtfeld befinden (vgl. Abbildung 26). Die Bereiche halb links und halb rechts kennzeichneten in den Versuchen den Sichtbereich nahe der Straße, in dem sich unter anderem Bürgersteig und Verkehrsschilder befinden. Die auf den Bahnübergang zuführenden Schienenbereiche fallen nur in größerer Distanz in diese AOI. Auch in Bezug auf den halb linken und halb rechten Sichtbereichen konnten ähnlich positive Effekte durch PeriLight festgestellt werden wie in Bezug auf die peripheren Sichtbereiche. Signifikant mehr Versuchsteilnehmer zeigten Fixationen in den halb linken und halb rechten Sichtbereichen, wenn PeriLight aktiv war, als wenn es inaktiv war. Eine Ausnahme bestand im Teilversuch bei Tageslicht für den halb rechten Sichtbereich: Zwar schauten mehr Versuchsteilnehmer in den halb rechten Bereich, wenn PeriLight aktiv war als in der Kontrollbedingung, allerdings schauten auch in der Kontrollbedingung bereits die Hälfte der Teilnehmer in den halb rechten Bereich. Ein möglicher Grund für den hohen Teil der Versuchsteilnehmer, die in der Kontrollbedingung der Untersuchung bei Tageslicht in den Sichtbereich halb rechts schauten, ist eine einmündende Straße rechtsseitig vor dem überfahrenen Bahnübergang (vgl. Abbildung 24). Zwar ist die Straße, auf der die Versuchsteilnehmer fahren gegenüber der einmündenden Straße vorfahrtberechtigt, dennoch bietet sie einen plausiblen Anlass einer Sichtprüfung, da ein anderer Verkehrsteilnehmer möglicherweise aus dieser Straße herausfahren könnte. Im Teilversuch bei Dunkelheit schaute

eine deutlich geringere Anzahl der Teilnehmer in den halb rechten Sichtbereich als bei Tageslicht, was damit zusammenhängen kann, dass die einmündende Straße in der Dunkelheit nicht so gut zu erkennen war. Auffällig war auch, dass im Teilversuch bei Dunkelheit der Unterschied der Blickzuwendung zwischen den beiden Überfahrten für die AOI halb links und rechts statistische Signifikanz erreichte, aber für die AOI links und rechts außen die statistische Signifikanz knapp verfehlte. Dies ist damit zu erklären, dass die Salienz der Lichtreize bei Dunkelheit noch höher war als bei Tageslicht. Dies hat dazu geführt, dass die Teilnehmer bei Dunkelheit bereits in einem größeren Abstand zum Bahnübergang ihre erste Sichtprüfung durchgeführt haben und die Lichtreize von PeriLight in diesem Abstand eher im den Bereich der AOI halb links und rechts wahrnehmbar waren.

Zwar hat sich die Anzahl der Versuchsteilnehmer, die in den Teilversuchen in den linken und rechten Bereich des Bahnübergangs geblickt haben unter Verwendung von PeriLight erhöht, dennoch haben nicht alle Versuchsteilnehmer ihren Blick in der Reaktion auf die Lichtreize nach links und rechts außen gerichtet. Sowohl im Versuch bei Tageslichtbedingungen als auch bei Dunkelheit schaute ein Teil der Stichprobe in der Zufahrt ausschließlich geradeaus entlang der Straße und nahm die Lichtreize nicht zur Kenntnis. In Bezug auf die Versuchsfahrten bei Tageslicht liegt ein möglicher Grund dafür in den Adaptationszuständen der Sinneszellen in den Augen der Versuchsteilnehmer. Die Umgebungslichtbedingungen konnten bei den Tagfahrten nicht konstant gehalten werden. Je nach Sonnenstand entstanden in den Versuchsfahrten teils Gegenlichtbedingungen. Der Bahnübergang wurde im Versuch in Richtung Südwesten überfahren, so dass die tiefstehende Sonne in den Versuchsfahrten während der Nachmittagszeit teilweise blendend wirkte. Es erscheint plausibel, dass eine durch Sonneneinstrahlung helladaptierte Netzhaut nicht gleichermaßen empfindlich auf die Lichtreize von PeriLight reagiert wie in Bedingungen ohne Gegenlicht. Bei den Teilnehmern, die in der Experimentalbedingung bei Tageslicht keine Sichtprüfung zeigten war es meist sonnig oder hell bewölkt.

Die Feststellung, dass auch im Teilversuch bei Dunkelheit von fünf der 17 Teilnehmer nicht nach links und von vier Teilnehmern nicht nach rechts geschaut wurde, ist schwieriger zu erklären. Insbesondere bei Dunkelheit war der Kontrast der Lichtreize im Verhältnis zur Umgebung äußerst hoch und besonders salient. Die subjektiv empfundene Blendwirkung durch PeriLight bei Dunkelheit lag bei einem Mittelwert von 5,87 auf der verwendeten Skala und damit im höheren mittleren Bereich. Bei genauerer Betrachtung des Blickverhaltens der Versuchsteilnehmer fällt auf, dass nur drei Teilnehmer weder nach links noch nach rechts

geschaut haben. Zwei Versuchsteilnehmer haben ausschließlich nach rechts außen geschaut, aber nicht nach links außen, ein Teilnehmer hat ausschließlich nach rechts außen geschaut, aber nicht nach links außen. Diese Teilnehmer verharrten also potentiell mit ihrem Blick in der Bahnübergangszufahrt auf der einen Seite, auf der sie zuerst einen Lichtreiz wahrgenommen haben, was eine plausible Erklärung für das Blickverhalten eines Teils der Versuchsteilnehmer bietet, die nicht zu beiden Seiten geschaut haben.

Dennoch bleiben drei Teilnehmer des Teilversuchs bei Dunkelheit, die weder nach links noch nach rechts geschaut haben. Es ist theoretisch denkbar, dass diese Teilnehmer eine eingeschränkte Sehfähigkeit im peripheren Gesichtsfeld hatten, dies wurde jedoch im Rahmen der Versuchsdurchführung nicht untersucht und kann daher nicht belegt werden. Abgesehen von den Spekulationen zu der geringen Anzahl der Versuchsteilnehmer, die unter Verwendung von PeriLight nicht nach links und rechts geschaut haben, sollte der generell positive Effekt des Systems jedoch nicht in den Hintergrund treten. Die erfolgreiche Blicklenkung als Hauptkriterium zur Beurteilung des Systems PeriLight kann als gegeben betrachtet werden, da eine teils signifikant größere Anzahl der Versuchsteilnehmer unter Verwendung des Systems in der Bahnübergangszufahrt nach links und rechts schaute, sowohl unter Tageslichtbedingungen als auch in der Dunkelheit.

Frühzeitigkeit des Blickverhaltens

Um eine sichere Überquerung eines nicht technisch gesicherten Bahnübergangs sicherzustellen, muss der Straßenverkehrsteilnehmer frühzeitig durch eine Sichtprüfung kontrollieren, ob ein Schienenfahrzeug herannaht, um ausreichend Zeit für ein Bremsmanöver vor dem Bahnübergang zu haben. Das Kriterium der Frühzeitigkeit wurde im Rahmen der Hypothese 2 geprüft. Die Frühzeitigkeit der Sichtprüfung des linken und rechten äußeren Sichtbereichs am Bahnübergang wurde sowohl im Versuch unter Tageslichtbedingungen als auch bei Dunkelheit nur auf deskriptiver Ebene betrachtet. Für einen inferenzstatistischen Vergleich der durchschnittlichen Dauern in der Kontroll- und Experimentalbedingung, nach denen in der Zufahrt das erste Mal nach links und rechts geschaut wurde, war der Umfang der gültigen Beobachtungen in der Kontrollbedingung zu gering. Dies war in beiden Teilversuchen gleichermaßen der Fall. Insbesondere bei inaktivem PeriLight zeigte sowohl im Teilversuch bei Tag als auch im Teilversuch bei Dunkelheit nur ein kleiner Anteil der Versuchsteilnehmer der Stichproben überhaupt eine Fixation im Bereich links und rechts außen.

Hinsichtlich der Berechnung der frühesten Blickzuwendung wäre es auch denkbar gewesen, bei allen Versuchsteilnehmern, die keine Sichtprüfung durchgeführt haben in der Be-

rechnung der frühesten Blickzuwendung die maximale Dauer der *Use Case Duration* anzusetzen. Dieses Vorgehen würde dem Gedanken folgen, dass jede durchgeführte Sichtprüfung auch eine *frühere* Sichtprüfung darstellt, als es bei einer nicht durchgeführten Sichtprüfung der Fall ist. Bei einer Ersetzung der fehlenden Werte ließe sich auch ein statistischer Mittelwertsvergleich über vollständige Datensätze durchführen. Dieser Mittelwertsvergleich hätte sowohl im Teilversuch bei Tageslicht als auch im Teilversuch bei Dunkelheit zweifelsohne eine signifikant frühere Blickzuwendung unter Verwendung von PeriLight im Vergleich mit der Kontrollbedingung ausgewiesen. Da allerdings von den Teilnehmern, die keine Sichtprüfung durchgeführt haben auch keine Werte für die *Time to First Glance* erzeugt wurden, erschien es eher folgerichtig, auch keinen theoretischen Maximalwert anzunehmen und dafür in Kauf zu nehmen, die Auswertung rein auf der Grundlage der deskriptiven Daten durchzuführen.

Die deskriptiven Kennwerte der ersten Blickzuwendung, insbesondere bei aktivem PeriLight, sind dennoch aufschlussreich. Bei einer mittleren Dauer von 7,6 s, die benötigt wurde, um die Distanz von 80 m vor dem Bahnübergang bis zum Bahnübergang zurückzulegen, lag die durchschnittliche *Time to First Glance* für die AOI links außen unter den Teilnehmern, die mindestens eine Fixation gezeigt haben bei 3,6 s und für die AOI rechts außen bei 5,5 s. Im Teilversuch bei Dunkelheit führen die Versuchsteilnehmer durchschnittlich etwas langsamer auf den letzten 80 m der Bahnübergangszufahrt, die *Use Case Duration* betrug im Mittel bei aktivem PeriLight 9,96 s. Die durchschnittliche *Time to First Glance* lag unter den Teilnehmern, die mindestens eine Fixation gezeigt haben bei 2,1 s für die AOI links außen und wie unter Tageslichtbedingungen bei 5,5 s für die AOI rechts außen.

In diesen Werten spiegeln sich zunächst die Sichtbedingungen in der Zufahrt auf den Bahnübergang wider, an dem beide Teilversuche durchgeführt wurden (vgl. Lageplan in Unterkapitel 8.1). Während die linke Leuchteinheit des Systems PeriLight bereits in der Distanz ihrer Auslösung bei 80 m zum Bahnübergang sichtbar war, wurde die rechte Leuchteinheit erst bei einer Distanz von 38 m vor dem Bahnübergang für die Versuchsteilnehmer sichtbar. Dies erklärt, warum in beiden Teilversuchen der Mittelwert der *Time to First Glance* für die linke Peripherie unter dem Mittelwert der *Time to First Glance* für die rechte Peripherie liegt.

Es zeigt sich, dass der erste Blick in die linke Peripherie bei Dunkelheit noch früher stattfand als im Teilversuch bei Tag, da die Salienz der Lichtreize von PeriLight bei Dunkelheit deutlich höher war als bei Tageslicht. Dies zeigt sich auch in der signifikant höheren Anzahl der Teilnehmer, die bei aktivem PeriLight eine Fixation im Bereich der halb linken AOI

gezeigt haben. Die Werte für die Dauer bis zum ersten Blick in die AOI rechts außen bei aktivem PeriLight ist im Vergleich der Teilversuche bei Tag und Nacht annähernd gleich. Dies hängt vermutlich zum einen damit zusammen, dass die Leuchteinheit in der rechten Peripherie erst später sichtbar wurde als die Leuchteinheit auf der linken Seite. Zum anderen waren die Versuchsteilnehmer möglicherweise bereits auf den Lichtreiz in der rechten Peripherie vorbereitet, da sie in beiden Teilversuchen bereits zuvor die Lichtreize links außen gesehen hatten. So ist zu erklären, dass sie in beiden Teilversuchen gleichermaßen einen Kontrollblick nach rechts vornahmten, sobald dies möglich war, jedoch später als zur linken Seite des Bahnübergangs.

Generell spiegelt sich in den Werten der *Time to First Glance* und der frühesten Blickzuwendung bei aktivem PeriLight die Tatsache wider, dass die Lichtreize von den meisten Teilnehmern frühzeitig genug in der Zufahrt auf den Bahnübergang wahrgenommen wurden, um noch einen positiven Einfluss auf die sichere Bahnübergangsüberquerung zu haben. Insbesondere der Kennwert der frühesten Blickzuwendung für die AOI links außen, der im Teilversuch bei Tageslicht einen Wert von ,46 hat und bei Dunkelheit einen Wert von ,21 zeigt, dass der erste Blick in die Peripherie links bereits in der ersten Hälfte der *Use Case Duration* stattfand.

Zusammen mit den Daten der Fahrgeschwindigkeitsverläufe, die im Rahmen der Untersuchung von Hypothese 3 betrachtet wurden, ergibt sich ein schlüssiges Gesamtbild: Bei Tageslicht begann der Verlangsamungsvorgang bei aktivem PeriLight im Durchschnitt über alle Versuchsteilnehmer etwa bei einer Distanz von 50 m vor dem Bahnübergang (vgl. Geschwindigkeitsverlauf, Abbildung 29). Im Teilversuch bei Dunkelheit begann der Verlangsamungsvorgang bei aktivem PeriLight durchschnittlich bereits etwas früher, ungefähr ab einer Distanz von 60 m (vgl. Geschwindigkeitsverlauf, Abbildung 32). Aus den Daten der *Time to First Glance* und der frühesten Blickzuwendung geht hervor, dass der erste Blick in die Peripherie bereits in der ersten Hälfte der *Use Case Duration* stattfand. Es ist daher zu vermuten, dass von den Versuchsteilnehmern, von denen die Lichtreize in der linken Peripherie des Bahnübergangs wahrgenommen wurden, kurzfristig danach auch die Fahrgeschwindigkeit verringert wurde.

Auch wenn Hypothese 2 aus dem formalen Grund des nicht sinnvoll durchführbaren Mittelwertvergleichs nicht angenommen wurde, ist das Ergebnis in Bezug auf die Wirksamkeit von PeriLight als positiv zu bewerten. Bei aktivem PeriLight fixierten die Teilnehmer, die mindestens einen Blick in den peripheren Bereich des Bahnübergangs richteten, diesen

Bereich auch ausreichend frühzeitig, so dass sie die Möglichkeit gehabt hätten ihr Fahrverhalten anzupassen, wenn ein Schienenfahrzeug gekommen wäre. Selbst in Abwesenheit eines herannahenden Schienenfahrzeugs zeigte sich in der Folge des ersten Blicks in die Peripherie des Bahnübergangs bei aktivem PeriLight auch eine moderate Verlangsamung der Fahrgeschwindigkeit.

Fahrgeschwindigkeit

Bezüglich der Geschwindigkeitsverläufe in der Zufahrt auf den Bahnübergang konnte in beiden Teilversuchen ein signifikanter Interaktionseffekt festgestellt werden. Sowohl im Teilversuch bei Tageslicht als auch im Teilversuch bei Dunkelheit fuhren die Versuchsteilnehmer auf den 80 m der Zufahrt auf den Bahnübergang zunächst geringfügig schneller, wenn PeriLight aktiv war, verlangsamten dann aber auf den letzten 30 m – 40 m auf eine niedrigere Endgeschwindigkeit, wenn PeriLight aktiv war, als wenn es inaktiv war.

Bei Tageslicht wurde die Geschwindigkeit bei aktivem PeriLight durchschnittlich von 45,9 km/h bei einer Distanz von 80 m auf 38,4 km/h bei einer Distanz von 10 m vor der Überfahrt des Bahnübergangs verringert. Bei Dunkelheit wurde die Geschwindigkeit bei aktivem PeriLight von durchschnittlich 43,5 km/h bei einer Distanz von 80 m auf 30,8 km/h bei einer Distanz von 10 m vor dem Bahnübergang verringert. Bei inaktivem PeriLight wurde die Geschwindigkeit zwischen den Messdistanzen in der Zufahrt durchschnittlich in deutlich geringerem Umfang verringert als bei aktivem PeriLight. Im Teilversuch bei Tageslicht verringerten die Teilnehmer ihre Geschwindigkeit bei inaktivem PeriLight von durchschnittlich 44 km/h in der Messdistanz von 80 m auf 42,4 km/h in der Messdistanz von 10 m. Bei Dunkelheit und inaktivem PeriLight war auf dieser Strecke eine mittlere Geschwindigkeitsverringerng von 42,1 km/h (80 m) auf 39,9 km/h (10 m) festzustellen.

In der Interpretation der Fahrgeschwindigkeiten ist zu berücksichtigen, dass bei keinem Versuchsdurchgang ein Schienenfahrzeug den Bahnübergang kreuzte. Ein Anhalten oder eine stärkere Verlangsamung war damit in keinem Versuchsdurchlauf zwingend erforderlich. Auffällig ist, dass sowohl im durchschnittlichen Geschwindigkeitsverlauf des Teilversuchs bei Tageslicht als auch im Teilversuch bei Dunkelheit in der ersten Hälfte der Strecke der Bahnübergangszufahrt schneller gefahren wurde, wenn PeriLight aktiv war, als wenn es inaktiv war. Zwar liegt die Geschwindigkeitsdifferenz nur in einem geringfügigen Bereich von durchschnittlich 1–2 km/h, nichtsdestotrotz konnte sie in beiden Teilversuchen festgestellt werden, bevor in der zweiten Hälfte der Bahnübergangszufahrt die Geschwindigkeit bei aktivem PeriLight deutlich verringert wurde. Die Annahme, dass die Gegenwart der Lichtreize

dazu beigetragen hat, dass bei aktivem PeriLight zunächst schneller gefahren wurde, scheint nicht plausibel. Es ist zu vermuten, dass in diesem Zusammenhang die Reihenfolge der Versuchsbedingungen einen Effekt auf die Geschwindigkeitsunterschiede in der ersten Hälfte der Bahnübergangszufahrt hatte. In beiden Teilversuchen, sowohl bei Tageslicht als auch bei Dunkelheit, wurde bewusst keine Randomisierung in der Aktivierung von PeriLight zwischen der ersten und zweiten Bahnübergangszufahrt vorgenommen. In der ersten Zufahrt war PeriLight bei allen Teilnehmern der beiden Teilversuche inaktiv, bei der zweiten Zufahrt wurde es immer aktiviert. Wäre in einem Teil der Stichprobe PeriLight schon in der ersten Zufahrt aktiviert worden, hätte dies das natürliche Blickverhalten in der darauffolgenden Zufahrt potenziell stark beeinflusst. Dies sollte mit dem Verzicht auf Randomisierung vermieden werden. Dies hatte allerdings zur Folge, dass die Versuchsteilnehmer die Fahrstrecke bei der zweiten Zufahrt schon aus der ersten Zufahrt bei inaktivem PeriLight kannten. Es ist denkbar, dass die Bekanntheit der Strecke unabhängig von der Aktivität des Systems PeriLight dazu geführt haben könnte, dass das Fahrverhalten der Versuchsteilnehmer in der zweiten Zufahrt etwas selbstbewusster war und sie daher im Durchschnitt leicht schneller fuhren. Da in der zweiten Überfahrt die Strecke zwar schon bekannt war, jedoch die Besonderheit der Lichtreize in der Peripherie auftraten, ist zu erklären, warum die initiale Geschwindigkeit in der Anfahrt an den Bahnübergang in der zweiten Bahnübergangszufahrt höher war, dann jedoch stärker verringert wurde als bei der ersten Überfahrt mit inaktivem PeriLight.

Betrachtet man die Standardabweichungen der Fahrgeschwindigkeiten der Versuchsteilnehmer in der Bahnübergangszufahrt fällt auf, dass sie über die Messdistanzen kontinuierlich zunehmen, je näher die Fahrer dem Bahnübergang kamen. Auch dieser Trend konnte gleichermaßen in den beiden Teilversuchen bei Tageslicht und Dunkelheit festgestellt werden. Die zunehmenden Standardabweichungen der mittleren Geschwindigkeit sind damit zu erklären, dass eine kleine Anzahl unter den Versuchsteilnehmern in beiden Teilversuchen die Lichtreize von PeriLight nicht wahrnahm und den Bahnübergang mit nahezu unveränderter Geschwindigkeit überquerte. Auch diese Teilnehmer gingen in die Berechnung des Mittelwerts der Fahrgeschwindigkeit mit ein. Unter den Versuchsteilnehmern, von denen die Lichtreize wahrgenommen wurden, verlangsamten zudem einige Teilnehmer im Nahbereich des Bahnübergangs stärker als andere auf Geschwindigkeiten, die deutlich unter dem Mittelwert der Durchschnittsgeschwindigkeit im jeweiligen Messzeitpunkt lagen. Bei inaktivem PeriLight nahm die Standardabweichung der Geschwindigkeit mit abnehmender Entfernung zum Bahnübergang in beiden Teilversuchen ebenfalls zu, allerdings in einem geringeren Umfang

als bei aktivem PeriLight, da das Fahrverhalten der Versuchsteilnehmer insgesamt homogener war. Dies lag daran, dass bei inaktivem PeriLight nur von einer geringen Anzahl unter den Versuchsteilnehmern eine Verlangsamung eingeleitet wurde.

Zusammenfassend konnte die Hypothese 3 aufgrund der festgestellten Interaktionen in beiden Teilversuchen nicht angenommen werden. Zwar wurde im Teilversuch bei Dunkelheit ein signifikanter Haupteffekt der Aktivität von PeriLight gefunden, jedoch war auch der Interaktionseffekt zwischen der Aktivität von PeriLight und der Distanz zum Bahnübergang statistisch signifikant. Das lag daran, dass die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit bei aktivem PeriLight erst auf der zweiten Hälfte der Annäherung an den Bahnübergang die durchschnittliche Fahrgeschwindigkeit bei inaktivem PeriLight unterschritt. Die Richtung der Interaktion lässt dennoch ein positives Urteil der Wirksamkeit von PeriLight auf die Fahrgeschwindigkeit zu, da bei aktivem PeriLight die Geschwindigkeit auf den letzten 40 m der Zufahrt sowohl im Teilversuch bei Tageslicht als auch bei Dunkelheit deutlicher unter der Geschwindigkeit bei inaktivem PeriLight lag.

Bremsverhalten

Neben den Geschwindigkeitsverläufen wurde in beiden Teilversuchen im Rahmen von Hypothese 4 untersucht, ob es zu Vollbremsungen in der Reaktion auf die plötzlich auftretenden Lichtreize kommt. Es bestand im Vorfeld der Versuchsdurchführung die Befürchtung, dass Versuchsteilnehmer sich erschrecken könnten, wenn sie plötzlich von links und rechts stroboskopartige Lichtreize wahrnehmen. Eine weitere Vermutung war, dass Versuchsteilnehmer die Lichtreize für die Blitzlichter einer Verkehrskontrolle halten könnten und als Reaktion darauf abrupt abbremsen könnten. Da ein abruptes Bremsverhalten die Gefahr eines Auffahrens nachfolgender Verkehrsteilnehmer erhöhen kann, ist es nicht wünschenswert, dass ein System, das gestaltet ist, um die Sicherheit zu erhöhen, dieses Verhalten begünstigt. Um die Sicherheit der Versuchsteilnehmer zu gewährleisten, wurde unter anderem auch aus diesem Grund das Parkmanöver vor der Bahnübergangszufahrt in die Versuchsabläufe der beiden Teilversuche integriert. So konnte sichergestellt werden, dass bei erneutem Einfahren in den fließenden Verkehr kein anderes Fahrzeug dem Versuchsfahrzeug folgt.

Die Befürchtungen bestätigten sich in der Versuchsdurchführung allerdings nicht. Keiner der Versuchsteilnehmer beider Teilversuche führte eine Vollbremsung aus. Bei allen Versuchsteilnehmern, die ihre Geschwindigkeit in der Zufahrt auf den Bahnübergang verlangsamten, fiel das Bremsverhalten sehr moderat aus, wenngleich die Geschwindigkeit von einzelnen Teilnehmern stark reduziert wurde. Im Teilversuch bei Tageslicht betrug die größte

festgestellte Bremsverzögerung unter allen Versuchsteilnehmern $-0,99 \text{ m/s}^2$, im Teilversuch bei Dunkelheit $-0,74 \text{ m/s}^2$. Angesichts des zuvor angesetzten Kriteriums für eine Vollbremsung, einer negativen Beschleunigung, deren Betrag 5 m/s^2 übersteigt, sind die maximalen Bremsintensitäten in der Reaktion auf PeriLight als sehr gering zu beurteilen. Hypothese 4 wurde daher angenommen.

Dennoch ist zu berücksichtigen, dass zwar in den Stichproben der beiden Teilversuche keine Vollbremsung festgestellt wurde, dies jedoch keine Garantie darstellt, dass auch im potentiellen Regelbetrieb von PeriLight nie eine Vollbremsung in der Reaktion auf das System stattfinden würde. Selbst wenn es in Ausnahmefällen dazu kommen sollte, dass ein Verkehrsteilnehmer eine Vollbremsung durchführt, ist die Wahrscheinlichkeit eines Auffahrunfalls jedoch vermutlich gering, da Bahnübergänge ohne technische Sicherung nach EBO § 11 nur für Nebenbahnstrecken vorgesehen sind, die nur selten von Kraftfahrzeugen frequentiert werden.

Betrachtet man das System PeriLight und die vorliegenden Untersuchungen in Relation zum Stand der Forschung und Technik, finden sich einerseits vergleichbare Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit nicht technisch gesicherter Bahnübergänge und andererseits verkehrspsychologische Studien, die sich ähnlicher methodische Vorgehensweisen bedienen. In den folgenden Abschnitten soll sowohl das System PeriLight an sich als auch die gewählte Vorgehensweise zur Evaluation im Kontext des Standes der Forschung und Technik diskutiert werden.

Beurteilung von PeriLight im Vergleich zu anderen Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen

Das Konzept PeriLight zur Lenkung der Aufmerksamkeit an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen stellt im Bereich menschenzentrierter, kostengünstiger und innovativer Konzepte, die bislang vorgeschlagen wurden, um die Sicherheit an Bahnübergängen zu erhöhen, ein einzigartiges Konzept dar. Der Hauptunterschied im Vergleich zu den meisten in der Literatur vorgestellten Ansätzen besteht im wahrnehmungspsychologisch motivierten Wirkprinzip des Systems PeriLight, das der Lenkung der visuellen Aufmerksamkeit in die peripheren Bereiche des Bahnübergangs zugrunde liegt. PeriLight macht sich mit seinen peripheren Lichtreizen das Prinzip der exogenen Kontrolle der visuellen Aufmerksamkeit (Theeuwes, 1992) zunutze. Die Lichtreize des Systems führen zu einer automatischen, unwillkürlichen Verlagerung des visuellen Fokus in Richtung der Lichtquelle.

Die meisten in der Fachliteratur bislang vorgestellten und untersuchten Ansätze zur Erhöhung der Sicherheit an Bahnübergängen basieren auf Hinweisreizen, die den Straßenverkehrsteilnehmer warnen oder informieren sollen und damit auf einer endogenen Kontrolle der visuellen Aufmerksamkeit (Theeuwes, 1992). Ergänzende Vorankündigungsschilder sind häufig vorgeschlagene und untersuchte Konzepte, die anhand von Piktogrammen und/oder Text auf einen Bahnübergang hinweisen. Die Wirksamkeit unterschiedlicher Arten von Vorankündigungsschildern wird in der internationalen Forschung beispielsweise von Basacik et al., (2014), Ward und Wilde (1995) oder Aigner-Breuss et al. (2013) untersucht. Gezielte textuelle Warnungen als Erklärungsunterstützung von Schildern oder Lichtzeichenanlagen werden von Cynk, Flint & McMorrow (2014) vorgeschlagen. Diese Ansätze setzen die bewusste Informationsverarbeitung im Sinne einer Auseinandersetzung mit Hinweisreizen voraus. Im Sinne der Selektivität der visuellen Aufmerksamkeit muss ein Fahrer zum Beispiel durch Hinweisschilder erst motiviert werden, seinen Aufmerksamkeitsfokus bewusst auf einen neuen, zuvor nicht fokussierten Bereich in der Peripherie des visuellen Feldes zu richten. Dies erfordert komplexere kognitive Vorgänge als die exogene Stimulation zur Verlagerung der Aufmerksamkeit durch Lichtreize.

Die Anbringung eines Blinklichtes über einem Verkehrsschild kann sowohl Auswirkungen auf die exogene als auch auf die endogene Kontrolle der visuellen Aufmerksamkeit haben. Durch das Blinklicht wird die visuelle Aufmerksamkeit auf das Gefahrenzeichen gelenkt. Die Bedeutung des Schildes muss in der Folge durch den Straßenverkehrsteilnehmer allerdings noch immer kognitiv verarbeitet werden, damit er dann über die endogene Kontrolle seiner visuellen Aufmerksamkeit in die peripheren Regionen des Bahnübergangs schaut, ob ein Schienenfahrzeug herannaht. Einen derartigen Ansatz präsentierten Noyce und Fambro (1998), die im Kontext eines US-amerikanischen Projektes zur Erhöhung der Sicherheit nicht technisch gesicherter Bahnübergänge die Anbringung eines gelben Blinklichts oberhalb eines Vorankündigungsschildes eines Bahnübergangs empfahlen. Auch das Stoppschild, das in der Fachliteratur (Schöne & Buder, 2011) und den vorherigen Kapiteln mehrfach als denkbare Ergänzung von Andreaskreuzen an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen präsentiert wurde, stellt einen Ansatz dar, mit dem die Verlagerung der Aufmerksamkeit von Straßenverkehrsteilnehmern in die peripheren Sichtbereiche am Bahnübergang unterstützt werden könnte, der allerdings eine bewusste Auseinandersetzung erfordert.

Jenseits von Schildern zur Warnung oder Vorankündigung schlagen Aigner-Breuss et al. (2011) weitere Maßnahmen zur Gestaltung der Straßeninfrastruktur nicht technisch gesi-

cherter Bahnübergänge vor. Mit Lane Lights oder einem farbig gestalteten Fahrbahnuntergrund soll zunächst die Aufmerksamkeit des Fahrers auf den Bahnübergang als besonderen Verkehrsbereich gerichtet werden, um in der Folge zu einer bewussten Sichtprüfung und einem angepassten Fahrstil zu motivieren. Auch Fahrerassistenzsysteme in Anzeigemedien im Fahrzeuginneren, die über Piktogramme oder Textinhalte auf die Annäherung an einen Bahnübergang hinweisen (vgl. Larue et al. 2015) basieren auf dem Prinzip der endogenen Lenkung der visuellen Aufmerksamkeit, da der Inhalt eines Hinweisreizes zunächst verarbeitet werden muss.

Im Vergleich zu diesen endogenen Ansätzen zur Kontrolle der visuellen Aufmerksamkeit hat eine Strategie zur exogenen Lenkung der visuellen Aufmerksamkeit, wie sie PeriLight darstellt, einen wesentlichen Vorteil: Die exogene, reizinduzierte Lenkung der Aufmerksamkeit funktioniert automatisch und unwillkürlich und ist dadurch nicht so anfällig für Interferenzen in der kognitiven Verarbeitung, die bei der bewussten Verarbeitung von Hinweisreizen zum Tragen kommen können. Des Weiteren kann durch eine exogene Lenkung durch Lichtreize das Problem umgangen werden, dass viele Verkehrsteilnehmer über keinerlei adäquate mentale Modelle und Skripte für das angemessene Verhalten in der Überquerung eines nicht technisch gesicherten Bahnübergangs verfügen (vgl. Kapitel 4 und 7).

Ein Problem der exogenen Lenkung der Aufmerksamkeit durch Lichtreize im Verhältnis zu endogenen Strategien kann im Falle interferierender Umweltbedingungen entstehen, die eine Wahrnehmung der Lichtreize verhindern oder erschweren. Gegenlichtbedingungen haben in der vorliegenden Untersuchung bei Tageslicht möglicherweise die periphere Wahrnehmung der Lichtreize bei einem Teil der Versuchsteilnehmer beeinträchtigt.

Ein Ansatz, der dem Wirkprinzip von PeriLight sehr nahekommt und ebenfalls auf eine exogene Kontrolle der visuellen Aufmerksamkeit der Straßenverkehrsteilnehmer setzt ist die Anbringung hochsalienter Leuchteinrichtungen an Schienenfahrzeugen. In amerikanischen und australischen Veröffentlichungen wurden bereits in den Siebzigerjahren unterschiedliche Arten von ergänzenden Stroboskoplichtern, rotierenden Blinklichtern oder seitlich am Triebfahrzeug angebrachten Fernlichtern diskutiert, mit denen die Erkennung von Schienenfahrzeugen an Bahnübergängen für Straßenverkehrsteilnehmer verbessert werden sollte (vgl. Aurelius & Korobow, 1971; Meares, 1972; Meares, 1975; MacDonald, 1974; Carroll et al., 1995; Cairney, 2005). Diese Systeme sind aus ähnlichen Gründen wie PeriLight grundsätzlich als geeignet im Sinne der Sicherheitserhöhung zu beurteilen. Sie können die visuelle Aufmerksamkeit auf das Schienenfahrzeug lenken, ohne eine bewusstseinspflichtige Verarbeitung ei-

ner symbolischen Informationsquelle vorauszusetzen. Zudem haben Lichtreize direkt an Schienenfahrzeugen gegenüber PeriLight den Vorteil, dass sie unmittelbar an den zu detektierenden Zielreiz, das Schienenfahrzeug, gebunden sind und damit dessen Wahrnehmung bedingen.

PeriLight ist nicht direkt am Schienenfahrzeug installiert und damit zielreizunabhängig. Es wird im peripheren Sichtfeld der Straßenverkehrsteilnehmer ausgelöst, unabhängig davon, ob ein Zug kommt oder nicht. Es ist in diesem Zusammenhang anzumerken, dass Straßenverkehrsteilnehmer vor jeder Bahnübergangsüberquerung eine Sichtprüfung durchführen sollten, unabhängig davon, ob ein Schienenfahrzeug herannaht oder nicht. Dementsprechend ist das System PeriLight aus lerntheoretischer Perspektive gegenüber zusätzlichen Leuchteinrichtungen an Schienenfahrzeugen möglicherweise sogar als vorteilhaft zu beurteilen. Da PeriLight immer Lichtreize emittiert, unabhängig von der Annäherung eines Zuges, gewöhnt der Fahrer sich nicht daran, dass er nur im Falle eines herannahenden Zuges einem peripheren Lichtreiz ausgesetzt ist. Macht ein Fahrer die Lernerfahrung, dass ein peripherer Lichtreiz regelmäßig mit einer Zugankunft einhergeht, könnte er im ungünstigen Fall der Fehlannahme erliegen, ein ausbleibender peripherer Lichtreiz bedeute, dass kein Zug herannaht. Diese Annahme wäre jedoch nur in dem theoretischen Fall angebracht, dass alle existierenden Schienenfahrzeuge mit ergänzender Warnbeleuchtung ausgestattet sind.

Dies wiederum leitet zu einem Vorteil von PeriLight gegenüber der Ausstattung von Schienenfahrzeugen mit zusätzlichen Leuchteinrichtungen über: Es ist potenziell kostengünstiger, an einigen unfallträchtigen nicht technisch gesicherten Bahnübergängen ein System wie PeriLight nachzurüsten und instand zu halten, als alle Triebfahrzeuge, die nicht technisch gesicherte Bahnübergänge befahren, mit zusätzlichen Leuchteinrichtungen auszustatten.

Die in den letzten Abschnitten mit PeriLight verglichenen Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit nicht technisch gesicherter Bahnübergänge wurden in den meisten Fällen leider nicht in einer Art und Weise evaluiert, die einen unmittelbaren Vergleich der Wirksamkeiten zulässt. Entweder beschränkte sich die Beurteilung der Wirksamkeit auf eine Expertenbeurteilung oder ähnliche qualitative Vorgehensweisen oder die Ergebnisse der empirischen Untersuchungen weisen methodische Mängel auf, die eine angemessene Beurteilung unmöglich machen. Eine Evaluation in einer systematisch dokumentierten und belastbaren empirischen Fahrstudie, die einen Vergleich zur Wirksamkeit von PeriLight zulassen würde, existiert für keine der zuvor im Zusammenhang mit PeriLight diskutierten Maßnahmen.

Beurteilung des methodischen Vorgehens

Neben der in den vorherigen Absätzen erfolgten Einordnung von PeriLight in den Kontext anderer Maßnahmen zur Steigerung der Aufmerksamkeit in der Zufahrt auf nicht technisch gesicherte Bahnübergänge gibt es nationale und internationale Untersuchungen, die einen vergleichbaren methodischen Ansatz zur Beurteilung einer Maßnahme zur Erhöhung der Sicherheit von Bahnübergängen genutzt haben. Das methodische Vorgehen der vorliegenden Untersuchungen zur Wirksamkeit von PeriLight wird in diesem Abschnitt in Zusammenhang mit vergleichbaren Vorgehensweisen diskutiert.

Ein klassischer Ansatz zur Prüfung der Blickrichtung in der Zufahrt auf Bahnübergänge findet sich unter anderem in den Studien von Heilmann (1984), Wigglesworth (1978, 1990) und Åberg (1988), die in der Umgebung des Bahnübergangs per Augenschein alleine oder mit Unterstützung eines zweiten Beurteilers geprüft haben, ob Kraftfahrer nach links und rechts geschaut haben. Dies ist im Vergleich zum verwendeten Vorgehen weniger invasiv, da sich kein Versuchsleiter im Fahrzeug der beobachteten Personen befindet. Zudem ermöglicht dieses Vorgehen die Beobachtung einer größeren Stichprobe. In Bezug auf das Blicklenkungssystem PeriLight wäre es aus ethischen Gesichtspunkten jedoch schwierig gewesen, ein zuvor nicht erprobtes System zur Blicklenkung im öffentlichen Verkehrsraum an neutralen Verkehrsteilnehmern auszuprobieren. Daher wurden in den Untersuchungen zu PeriLight gezielt Versuchsteilnehmer zu Untersuchungsfahrten eingeladen. Dies hatte den Vorteil der größeren Kontrollierbarkeit des Ablaufs sowie der Bekanntheit der demografischen Randbedingungen der Stichprobe. Zudem ermöglichte dieses Vorgehen den Einsatz eines Eye-Tracking-Systems, das in Vergleich zur Augenscheinbeurteilung von außerhalb des Fahrzeuges eine weitaus genauere Analyse des Blickverhaltens zulässt.

Eine Analyse des Blickverhaltens mittels Eye Tracker in einem nahezu identischen Vorgehen wie in den vorgestellten Untersuchungen von PeriLight findet sich in der ersten Studie zum Blick- und Fahrverhalten, die im Rahmen des vorliegenden Dissertationsvorhabens durchgeführt wurde (vgl. Kapitel 5). Die Kontrollbedingung der Untersuchung von PeriLight bei Tageslicht, in der das System inaktiv war, entspricht im Wesentlichen dem Vorgehen in dieser ersten Untersuchung. Im Vergleich der Blickdaten der beiden Untersuchungen fällt auf, dass der Anteil der Versuchsteilnehmer, die in der Kontrollbedingung der Untersuchung zu PeriLight bei Tageslicht in der Bahnübergangszufahrt (nicht) nach links und rechts geschaut hat nahezu identisch ist mit dem Anteil der Versuchsteilnehmer, der in der ersten Untersuchung zum Blick- und Fahrverhalten eine Sichtprüfung durchführte beziehungsweise

dies unterlies (vgl. Kapitel 5). In beiden Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass in der Zufahrt auf den nicht technisch gesicherten Bahnübergang ein vergleichbarer Anteil der Teilnehmer nicht nach links und rechts schaute. Die Ergebnisse der ersten Untersuchung hinsichtlich der Sichtprüfung der peripheren Bereiche am nicht technisch gesicherten Bahnübergang konnten durch die Kontrollbedingung der Untersuchung von PeriLight also bestätigt werden.

Eine weitere vergleichbare Fahrstudie wurde von Lenné et al. (2013) durchgeführt. Lenné et al. (2013) untersuchten mittels Eye Tracking die Anzahl von Sichtprüfungen, unter anderem bei der Überfahrt unterschiedlicher nicht technisch gesicherter Bahnübergänge. Die Bahnübergänge waren in der Untersuchung, wie in Australien üblich, mit Stoppschild oder Vorfahrtsschild gesichert. Lenné et al. (2013) untersuchten als zentrales Kriterium ebenfalls die visuelle Aufmerksamkeitszuwendung in die peripheren Regionen des Bahnübergangs. Als abhängige Variable wählten Lenné et al. (2013) hingegen die durchschnittliche Anzahl von visuellen Fixationen in die peripheren Regionen des Bahnübergangs. Die ermittelte durchschnittliche Anzahl von fünf visuellen Fixationen in der Zufahrt auf einen nicht technisch gesicherten Bahnübergang erscheint angesichts der Ergebnisse der Kontrollgruppe der vorliegenden Untersuchung bei Tageslicht überraschend hoch, in der wenige Teilnehmer der Peripherie des Bahnübergangs überhaupt Beachtung schenkten. Generell ist in Bezug zur durchschnittlichen Anzahl der visuellen Fixationen als abhängige Variable anzumerken, dass daraus nicht hervorgeht, welcher Anteil der Versuchsteilnehmer überhaupt eine Sichtprüfung in die periphere Region der zuführenden Gleise gezeigt hat oder nicht. Des Weiteren findet keine Differenzierung der linken und rechten Peripherie in der Ergebnisdarstellung von Lenné et al. (2013) statt, was die Einordnung der Ergebnisse weiter erschwert. Das im Rahmen der Untersuchung von PeriLight gewählte methodische Vorgehen erscheint zur Beantwortung einer Fragestellung zur Sicherheit der Überquerung eines nicht technisch gesicherten Bahnübergangs geeigneter. Das wesentliche Kriterium in der Überfahrt eines Bahnübergangs besteht nicht darin, möglichst häufig nach links und rechts zu schauen (was die Verwendung der durchschnittlichen Anzahl visueller Fixationen als abhängige Variable legitimieren würde). Ein einziger Blick jeweils nach links und rechts in der Zufahrt auf den Bahnübergang kann ausreichend sein, um einen herannahenden Zug zu detektieren. Auch wenn es zur Durchführbarkeit inferenzstatistischer Testverfahren verlockend erscheint, die Anzahl der Blickzuwendungen als abhängige Variable zu erheben ist es in Bezug auf Forschungsfragen im Kontext nicht technisch gesicherter Bahnübergänge angemessener, die Anzahl der Fahrer zu verglei-

chen, die mindestens eine Sichtprüfung in der Zufahrt auf den Bahnübergang durchgeführt haben. Bei diesem Vergleich sollte zudem zwischen der linken und der rechten Peripherie unterschieden werden.

Neben dem Vorgehen von Realfahrtversuchen ist die Durchführung von Untersuchungen im Fahrsimulator in vielen Fällen eine sinnvolle Alternative, vor allem, weil Fahrsimulatoren eine bessere Reproduzierbarkeit der Fahrszenarien bei akzeptabler Realitätsnähe auch im Bahnübergangskontext ermöglichen (Schöne et al. 2014; Larue et al., 2015). Ein nennenswerter Vorteil einer Untersuchung im Simulator besteht neben der Reproduzierbarkeit auch darin, dass man im Kontext eines Bahnübergangs auch problemlos ein Schienenfahrzeug erscheinen lassen kann, ohne dass davon eine Gefahr für den Versuchsteilnehmer ausgeht. Für die Untersuchung von PeriLight war der Fahrsimulator als Anwendungsfall nicht geeignet, da für eine belastbare Beurteilung der Wirksamkeit des Systems eine Nachempfindung von Lichtverhältnissen beziehungsweise die Wiedergabe hoher Leuchtstärken bedeutsam war, die sich im Simulator über eine Projektion nicht abbilden lassen. Zudem sollte neben der Untersuchung der Wirksamkeit von PeriLight aus wahrnehmungspsychologischer Sicht auch die Einfachheit der technischen Umsetzung von PeriLight in einem realen Kontext demonstriert werden.

Im methodischen Vorgehen sind die Untersuchungen von Schöne et al. (2014) und Larue et al (2015) gleichermaßen als ungünstig zu beurteilen. In beiden Untersuchungen wurden in Fahrzeiten von unter 30 Minuten sechs Bahnübergänge (Schöne et al. 2014) beziehungsweise in 20 Minuten acht Bahnübergänge überfahren (Larue et al 2015). In beiden Untersuchungen kreuzten bei einigen Überfahrten Züge den Bahnübergang. In kurzen zeitlichen Abständen wurden also mehrere Bahnübergänge befahren, teilweise mit Zugbegegnung, wobei bei einem Teil der Zufahrten innovative Infrastrukturmaßnahmen (Schöne et al., 2014) oder Assistenzsysteme (Larue et al., 2015) den Fahrer auf den Bahnübergang aufmerksam machten. Es kann angenommen werden, dass die Versuchsteilnehmer bei jeder folgenden Bahnübergangsüberfahrt besonders achtsam sind, nachdem ihnen das erste Mal ein Schienenfahrzeug oder eine zuvor unbekannte bahnübergangsbezogene Warnung dargeboten wurde. Es ist anzunehmen, dass sie ab diesem Moment im Versuch stärker auf Bahnübergänge und besonders auf ihr Fahr- und Blickverhalten achten würden, was ihr Verhalten in unnatürlicher Weise verzeichnen würde.

Ein Messwiederholungsdesign mit mehreren Interventionswiederholungen erscheint zur Beantwortung von Forschungsfragen zu Maßnahmen zur Erhöhung der Bahnübergangssi-

cherheit ungeeignet. Daher wurde die Untersuchung von PeriLight so gestaltet, dass es lediglich zwei Bahnübergangsüberfahrten in einigem zeitlichen Abstand voneinander gab, bei denen nur bei der zweiten Überfahrt PeriLight aktiv war. Eine Randomisierung, in der ein Teil der Fahrer den Bahnübergang zunächst bei aktivem PeriLight überfahren hätte, hätte potentiell zur Folge gehabt, dass in der theoretisch folgenden Kontrollbedingung eine besondere Erwartungshaltung in Bezug auf den Bahnübergang gebildet worden wäre, die ein unnatürliches Verhalten zur Folge gehabt hätte. Daher wurde auf eine Randomisierung verzichtet, im Bewusstsein, dass die experimentalpsychologische Methodenlehre generell eine Randomisierung der Kontroll- und Experimentalbedingung über die Stichprobe vorsieht, um Reihenfolgeeffekten zu vermeiden.

Eine methodische Alternative zu gezielten Realfahrtexperimenten oder Fahr Simulatorversuchen stellen auch im Kontext der Bahnübergangsforschung *Naturalistic Driving Studies* dar, bei denen eine große Anzahl von Privat-PKW mit Kamerasystemen und Systemen zur Erfassung von Positions- und Fahrdaten ausgestattet werden. Ngamdung und daSilva (2013), stellten in ihrer *Naturalistic Driving Study* zum Verhalten an Bahnübergängen unter anderem fest, dass sich Fahrer während der aufgezeichneten 4215 Bahnübergangsüberfahrten in 46,7 % der Fälle mit Nebentätigkeiten beschäftigten. Angesichts der gegenwärtig flächendeckend verbreiteten Smartphonennutzung wäre es für weiterführende Untersuchungen von PeriLight zu erwägen, Ablenkungsquellen oder Zweitaufgaben in die Untersuchung mit einzubeziehen. Es wäre interessant zu sehen, inwiefern exogene Ansätze zur Lenkung der visuellen Aufmerksamkeit wie Lichtreize auch dann effektiv sind, wenn sich ein Fahrer gerade beispielsweise mit seinem Smartphone beschäftigt. Generell ist die Untersuchungsmethode der *Naturalistic Driving Study* attraktiv, um das natürliche Fahrverhalten an Bahnübergängen noch ungefilterter untersuchen zu können, als dies in einem Realfahrtexperiment unter Anwesenheit eines Versuchsleiters möglich ist. Für die Untersuchung der Wirksamkeit einer einzelnen Sicherheitsmaßnahme an einem konkreten Bahnübergang sind *Naturalistic Driving Studies* jedoch ungeeignet, angesichts des dafür nicht gerechtfertigten Verhältnisses zwischen Aufwand und Nutzen. Ein spezieller Fokus auf das generelle Verhalten von Autofahrern an Bahnübergängen im Rahmen zukünftiger *Naturalistic Driving Studies* wäre allerdings eindeutig zu begrüßen, um den Stand der Forschung zur Vielfalt menschlicher Verhaltensweisen in diesem speziellen Verkehrsbereich zu erweitern.

PeriLight im Kontext weiterer verkehrsbezogener Untersuchungen peripherer Wahrnehmung

Der Ansatz, sich die besonderen Eigenschaften der peripheren menschlichen Wahrnehmung und der exogenen Kontrolle der visuellen Aufmerksamkeit zunutze zu machen, findet sich sowohl in Serienprodukten als auch verschiedenen Konzepten der gegenwärtigen automobilen Fahrzeugforschung wieder. Beispielsweise bietet mittlerweile ein Großteil der Fahrzeughersteller in neuen Fahrzeugmodellen sogenannte *Totwinkel-* beziehungsweise *Spurwechselassistenten* an (ADAC, 2012). Diese Systeme sind in der Regel so aufgebaut, dass sie die Aufmerksamkeit des Fahrers über einen peripheren Lichtreiz am Seitenspiegel auf sich ziehen, wenn eine Kamera erkennt, dass sich ein Fahrzeug im toten Winkel befindet, das den eigenen Spurwechsel gefährden könnte.

In der verkehrspsychologischen Forschung finden sich vielversprechende Ansätze zur Nutzung der peripheren Wahrnehmung beispielsweise in Untersuchungen von Utesch (2014) zu unscharfen Warnungen durch einen LED-Lichtbalken unter der Frontscheibe oder in dem Entwurf eines LED-Bandes im Fahrzeuginnenraum zur Lenkung der Aufmerksamkeit des Fahrers von Dziennus, Kelsch und Schieben (2016). Ein ähnlicher Ansatz gerichteter visueller Warnungen im Fahrzeug wird durch Dettmann et al. (2015) beschrieben. Während diese Arbeiten die Wirksamkeit peripherer visueller Warnungen im Innern des Fahrzeugs beschreiben, stellt PeriLight ein System dar, das infrastrukturbasiert ist und damit unabhängig vom Fahrzeug und dessen Ausstattung funktioniert. Die beschriebenen Untersuchungen und Konzepte zu lichtbasierten Systemen im Fahrzeug wie auch die vorliegende Untersuchung zu PeriLight zeigen, dass sich die Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung zur peripheren Wahrnehmung und der exogenen Kontrolle der visuellen Aufmerksamkeit (u. a. Theeuwes, 1992; Theeuwes, Kramer, Hahn & Irwin, 1998; Remington, Johnston & Yantis, 1992; Yantis & Yonides, 1984) gut aus dem Labor in die Realität des Straßenverkehrs übertragen lassen und zur Erhöhung der Verkehrssicherheit beitragen können.

Kritische Betrachtung des Systems PeriLight und der durchgeführten Untersuchungen

In den vorangegangenen Absätzen wurden PeriLight und das gewählte methodische Vorgehen zur Untersuchung der Wirksamkeit bereits an einigen Stellen kritisch beleuchtet. Im Folgenden sollen nochmals gezielt Aspekte dargelegt werden, welche die Generalisierbarkeit der Ergebnisse einschränken. Anschließend werden technische Aspekte und Verbesserungsvorschläge des Systems PeriLight angemerkt, die im Übergang vom Prototypstadium zur Serienreife des Systems berücksichtigt werden sollten.

Eine Einschränkung in Bezug auf die Generalisierbarkeit der Versuchsergebnisse besteht zunächst in der Zusammensetzung der Teilnehmerstichproben beider Teilversuche. Die Stichproben sind mit einem Altersdurchschnitt von 28,8 Jahren im Teilversuch bei Tag und 29,5 Jahren im Teilversuch bei Nacht eher als jung zu beurteilen. In Bezug auf die Wirksamkeit des Systems PeriLight auf ältere Bevölkerungsgruppen, insbesondere Senioren, kann anhand der Stichprobensammensetzung keine Aussage getroffen werden. Weiterhin wurde im Vorfeld der Untersuchungen die periphere Sehfähigkeit der Fahrer in der Stichprobe als potentielle Einflussgröße nicht erhoben. Es ist nicht auszuschließen, dass Teile der Versuchsteilnehmer Einschränkungen in ihrer peripheren Sehfähigkeit hatten. Eine derartige Einschränkung hätte potentiell Einfluss auf das Blickverhalten im vorliegenden Versuch gehabt.

Eine zentrale methodische Schwierigkeit der Versuchsdurchführung bestand in der Tatsache, dass das prototypisch gefertigte System PeriLight unter möglichst realitätsnahen Bedingungen im Rahmen von Realfahrtversuchen evaluiert werden sollte. Die hohe externe Validität gut gestalteter Feldversuche geht in der Regel einher mit einer erschwerten Standardisierbarkeit der Versuchsbedingungen. Dies war auch in den vorliegenden Untersuchungen der Fall. Am deutlichsten wurde dies, wie einleitend in Abschnitt 9.6 angemerkt, als im Teilversuch zur Evaluation der Wirksamkeit von PeriLight bei Dunkelheit in einer mehrwöchigen Unterbrechung der Versuche im Sichtbereich links des Bahnübergangs ein Wohnhaus gebaut wurde. Dies führte zu einer irreversiblen Veränderung der Sichtbedingungen, die dazu führte, dass der zweite Teilversuch nach Erhebung der Daten des siebzehnten Versuchsteilnehmers nicht mehr unter den gleichen Bedingungen durchgeführt werden konnte.

Weitere Einschränkungen in Bezug auf die Standardisierbarkeit der Versuchsdurchläufe bestanden in der Verkehrsstärke und den Verkehrsbedingungen im gesamten Versuchsablauf. Über die Versuchsfahrten hinweg war eine Vergleichbarkeit der generellen Verkehrslage während der Versuchsfahrt unmöglich zu garantieren. Um eine Standardisierung in Bezug auf die Verkehrslage in der unmittelbaren Zufahrt auf den Bahnübergang zu gewährleisten, wurden alle Versuchsteilnehmer in der Nähe des Bahnübergangs zu einem Parkmanöver aufgefordert (vgl. Abschnitt 9.4). Die Weiterfahrt wurde erst dann instruiert, wenn die auf den Bahnübergang zuführende Straße in beiden Fahrtrichtungen frei von anderen Verkehrsteilnehmern war. So konnten Folgefahrten in der Zufahrt auf den Bahnübergang ebenso vermieden werden wie eine Ablenkung durch entgegenkommende Fahrzeuge und auf diese Weise eine verbesserte Vergleichbarkeit der Daten sichergestellt werden. Natürlich geht mit diesem Vorgehen auch eine Einschränkung der Generalisierbarkeit einher. Zur Wirksamkeit von Pe-

riLight in Situationen, in denen ein Fahrzeug vorausfährt oder entgegenkommt kann anhand der untersuchten Daten keinerlei Aussage getroffen werden.

Neben der allgemeinen Verkehrslage waren auch die Umgebungslichtverhältnisse im ersten Teilversuch bei Tageslicht im Gegensatz zum Versuch bei Dunkelheit unmöglich konstant zu halten. Je nach Tageszeit und Witterung bestanden unter anderem Unterschiede im Stand der Sonne, dem Niederschlag sowie dem Bewölkungsgrad. Es ist anzunehmen, dass die tiefstehende Sonne und die daraus resultierenden Gegenlichtbedingungen in Teilen der Versuchsdurchläufe einen Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse des Teilversuchs bei Tageslicht hatten.

In Bezug auf die Sichtbedingungen sind neben den unterschiedlichen Witterungsbedingungen auch die unterschiedlichen Distanzen anzumerken, ab denen am Bahnübergang die Schienenarme links beziehungsweise rechts eingesehen werden konnten. Während die linke Seite des Bahnübergangs in Fahrtrichtung bereits aus einer Distanz von 80 m in der Annäherung weiträumig einsehbar war, konnte die rechte Seite des Bahnübergangs erst ab einer Distanz von 38 m ohne Einschränkung eingesehen werden. Nichtsdestotrotz zeigte ein Großteil der Versuchsteilnehmer bei aktivem PeriLight Sichtprüfungen im rechten Bahnübergangsbereich. Jedoch hatte die Sichtverdeckung zwangsläufig eine Auswirkung auf den frühestmöglichen Zeitpunkt, ab dem eine Fixation im Bereich der rechten Peripherie möglich war. Dies wäre an einem Bahnübergang mit gleichermaßen freien Sichtdreiecken links und rechts der Straße nicht der Fall gewesen. Ein nicht technisch gesicherter Bahnübergang, der dieses Kriterium erfüllt stand in vertretbarer Fahrdistanz zum Untersuchungsort allerdings nicht zur Verfügung.

Generell sollte die ermittelte Wirksamkeit des Systems PeriLight an einem Bahnübergang nicht pauschal als übertragbar auf alle nicht technisch gesicherten Bahnübergänge betrachtet werden. Die Ergebnisse sind ein gutes Indiz dafür, dass eine exogene Lenkung der visuellen Aufmerksamkeit von Straßenverkehrsteilnehmern an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen funktionieren kann. Sie sind jedoch keine Garantie dafür, dass dies an allen nicht technisch gesicherten Bahnübergängen der Fall sein würde, da kein Bahnübergang mit einem anderen exakt identisch ist. Unterschiede, die in Bezug auf die Blicklenkung durch Lichtreize einen wesentlichen Einfluss haben können, sind beispielsweise der Kreuzungswinkel zwischen Straße und Schiene oder auch die Vegetation in der Umgebung des Bahnübergangs.

Es ist hingegen anzunehmen, dass die exogene Lenkung der visuellen Aufmerksamkeit durch periphere Lichtreize auch an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen in anderen Ländern funktionieren würde. Zwar sind Regularien bezüglich der Beschilderung und Gestaltung nicht technisch gesicherter Bahnübergänge international leicht unterschiedlich, dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Reaktion des menschlichen Auges auf abrupt auftretende Lichtreize im peripheren Sichtfeld.

Eine Einschränkung in Bezug auf die Beurteilung der Wirksamkeit des Systems PeriLight besteht in dem Umstand, dass die Versuchspersonen am untersuchten Bahnübergang zu keinem Moment mit einem herannahenden Schienenfahrzeug konfrontiert waren. Um die Sicherheit der Versuchsteilnehmer bei der Überquerung des Bahnübergangs zu garantieren, wurden die Untersuchungen ausschließlich in Zeiträumen durchgeführt, in denen kein Schienenfahrzeug den Bahnübergang befuhr. Die Problematik dieser notwendigen Randbedingung im Versuch in Bezug auf die Beurteilung der Wirksamkeit von PeriLight zur Sicherheitserhöhung beschreibt die folgende, aus dem englischen übersetzte Beschreibung von James Gibson (1986, S. 55): „Stimulation mag eine notwendige Bedingung für das Sehen sein, sie ist jedoch nicht hinreichend. Dem perzeptuellen System muss Stimulusinformation zugänglich gemacht, nicht nur die Rezeptoren stimuliert werden.“ Die Sicherheit für Straßenverkehrsteilnehmer in der Bahnübergangszufahrt erhöht sich nicht alleine dadurch, dass die Photorezeptorzellen ihrer Augen durch Lichtreize stimuliert werden. Die Stimuli am Bahnübergang, die im Sinne der Sicherheit relevant sind und detektiert werden müssen, sind nicht die Leuchteinheiten des Systems PeriLight, sondern Schienenfahrzeuge, falls sie sich dem Bahnübergang annähern. Der Aufmerksamkeitsfokus müsste sich in Gegenwart eines Schienenfahrzeugs von den Leuchteinheiten als Quellen der Stimulation lösen und auf das Schienenfahrzeug übergehen.

Die in den beiden Versuchen erzielten Ergebnisse zeigen, dass mit dem System PeriLight die Anzahl unter den Versuchsteilnehmern erhöht werden konnte, die ihre visuelle Aufmerksamkeit in die peripheren Bereiche des Bahnübergangs richtet. Aus Gründen der Sicherheit und der Praktikabilität war es jedoch nicht möglich, in den Versuchen ein Schienenfahrzeug an den Bahnübergang heranfahren zu lassen. Es ist daher eine Annahme, dass mit PeriLight durch die Lenkung der Aufmerksamkeit in periphere Bereiche auch die Wahrscheinlichkeit erhöht wird, dass ein Zug detektiert wird, dies kann aus den vorliegenden Daten jedoch nicht geschlossen werden. Diese Hypothese sollte beispielsweise im Kontext einer Simulatorstudie oder einer abstrahierten Untersuchungsumgebung zukünftig untersucht werden.

Die Abwesenheit von Schienenfahrzeugen in der Durchführung beider Teilversuche hatte potentiell auch einen Einfluss auf die Wahl der Geschwindigkeit unter den Versuchsteilnehmern. In der Tendenz wurde die Geschwindigkeit durch die Versuchsteilnehmer mit abnehmender Distanz zum Bahnübergang stärker verringert, wenn PeriLight zum Einsatz kam als in der Kontrollbedingung, jedoch nicht weiter als auf eine durchschnittliche Minimalgeschwindigkeit von 37 km/h bei Tageslicht und 31 km/h bei Dunkelheit. Es ist anzunehmen, dass die durchschnittliche Geschwindigkeitsverringern im Falle eines herannahenden Zuges in den Untersuchungen deutlicher ausgefallen wäre. Da bei aktivem PeriLight zwar bei einem Großteil der Versuchsteilnehmer Fixationen der peripheren Bereiche festgestellt wurden, in diesen Sichtbereichen jedoch nie ein Schienenfahrzeug wahrzunehmen war, bestand für die Versuchsteilnehmer eigentlich auch kein konkreter Anlass ihre Geschwindigkeit zu verringern.

In Bezug auf die Intensität der Lichtreize konnte festgestellt werden, dass sie auf die Versuchsteilnehmer des Teilversuches bei Dunkelheit tendenziell leicht blendend wirkten. Die Beurteilung auf der verwendeten Skala zur Ermittlung der psychologischen Blendung weist mit einem durchschnittlichen Wert von 5,87 bei einem Maximalwert von 9 darauf hin, dass durch die Lichtreize von PeriLight ein gewisses Störimpfinden erzeugt wurde. Diesbezüglich ist anzumerken, dass in den Versuchen bei Dunkelheit und Tageslicht immer die gleichen, maximal möglichen Lichtstärkeinstellungen der verbauten LED gewählt wurden. Es wäre bei einer potentiellen zukünftigen Verwendung des Systems zu erwägen, für den Einsatz bei Dunkelheit eine Möglichkeit zur Dimmung vorzusehen, um eine ungewünschte Blendwirkung zu vermeiden.

In der Untersuchung von Hypothese 2 zur Feststellung des Zeitpunktes der ersten Fixation in die peripheren Sichtbereiche links und rechts des Bahnübergangs bestand ein Nachteil darin, dass der verwendete Eye Tracker mit dem im Fahrzeug integrierten GPS-System technisch nicht kompatibel war. Daher war es nicht möglich, die korrespondierende Distanz zum Bahnübergang im Moment der ersten Fixation links und rechts exakt zu ermitteln. Die früheste Blickzuwendung, die in beiden Teilversuchen als alternativer Indikator verwendet wurde, ist ein eher vager Indikator, da er von der Fahrgeschwindigkeit beeinflusst wird. Um einwandfrei zu bestimmen, ob mit PeriLight früher in die peripheren Bereiche am Bahnübergang geschaut wurde als ohne das System, wäre es in zukünftigen Versuchen erforderlich, eine Kopplung zwischen Eye Tracker und GPS-Position herzustellen, um zum Zeitpunkt der ersten Fixation in der Peripherie die genaue Position des Fahrzeuges ermitteln zu können.

Eine relevante Frage, die nur mit weiterführenden Versuchen beantwortet werden kann, stellt sich in Bezug auf die Langzeitwirksamkeit des Systems PeriLight. Im theoretischen Fall einer dauerhaften Ausstattung eines nicht technisch gesicherten Bahnübergangs wäre zu untersuchen, ob sich beispielsweise Anwohner, die den Bahnübergang täglich überqueren, an die Lichtreize gewöhnen und nach einer Weile nicht mehr in die Peripherie des Bahnübergangs schauen, wenn PeriLight aktiviert wird. Es ist eher anzunehmen, dass ein solcher Gewöhnungseffekt auch bei einer längerfristigen Verwendung von PeriLight nicht eintritt. Dies ist damit zu begründen, dass die exogene Lenkung der visuellen Aufmerksamkeit in Richtung der abrupt auftretenden und leuchtstarken peripheren Lichtreize keine willkürliche Handlung ist, die einer tieferen kognitiven Verarbeitung bedarf, sondern eher als unwillkürliche, automatische Handlung zu charakterisieren ist. Während bei Maßnahmen, die auf eine endogene Kontrolle der Aufmerksamkeit, beispielsweise in Folge von Warnungen setzen, nach einer Weile durchaus gewohnheitsbedingte Verschlechterungen in der Wirksamkeit zu erwarten sind, ist dies bei einem System wie PeriLight, dessen Wirkprinzip auf einer exogenen Lenkung der Aufmerksamkeit beruht, nicht gleichermaßen zu erwarten.

Ausblick

Für die weitere Verwertung des Systems PeriLight als kostengünstige Variante zur Erhöhung der Sicherheit an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen sollten neben weiteren Untersuchungen auch noch einige technische Verbesserungen auf dem Weg zur Serienreife des Systems vorgenommen werden. Der technische Prototyp, der in den zuvor beschriebenen Untersuchungen zum Einsatz kam, diente vor allem der Untersuchung des Wirkprinzips der exogenen Lenkung der visuellen Aufmerksamkeit von Autofahrern in der Zufahrt an den Bahnübergang. Zur Aufwertung des Systems sollte zunächst eine zuverlässige Stromversorgung für den Dauerbetrieb vorgesehen werden. Das in den Untersuchungen verwendete System wurde über wiederaufladbare Akkus mit Strom versorgt. Für einen dauerhaften Einsatz wäre ein Anschluss an das örtliche Stromnetz zu erwägen oder alternativ die Ergänzung einer Ladevorrichtung, beispielsweise auf Grundlage eines photovoltaischen Solarmoduls.

Neben der Stromversorgung sollte in einer zukünftigen Entwicklungsstufe von PeriLight auch die Vandalismussicherheit erhöht werden. Da leicht zugängliche Bahnanlagen hin und wieder mutwillig beschädigt werden, sollte sowohl die Zugänglichkeit der Leuchten als auch der Auslösesensorik für unbefugte Personen so weit wie möglich eingeschränkt werden. Kritische Stimmen in Bezug auf die Lichtreize des Systems könnten potentiell von Anwohnern kommen, die in der Nähe eines nicht technisch gesicherten Bahnübergangs wohnen. Ins-

besondere in Bezug auf den Nachteinsatz von PeriLight ist es denkbar, dass es Personen gibt, die sich durch die Lichtemission belästigt fühlen würden. Neben der zuvor beschriebenen Dimmung bei Nacht sollten daher zusätzliche Abschattungsvorrichtungen in zukünftigen Versionen des Systems PeriLight vorgesehen werden, die dazu führen, dass die Lichtreize zwar gezielt auf die Straße gerichtet werden, jedoch nicht die gesamte umliegende Umgebung erhellen. Zur Problematik der Störung von Anwohnern ist überdies anzumerken, dass sie nur in Fällen relevant wäre, in denen es Anwohner in der Umgebung des Bahnübergangs gibt. Da ein Großteil der nicht technisch gesicherten Bahnübergänge in Deutschland sich in schwach besiedelten Gebieten befindet, ergäbe sich das Problem der Störung von Anwohnern nicht überall.

Generell sind ergänzend zu PeriLight auch die zuvor diskutierten endogenen Strategien zur Beeinflussung des Verhaltens in der Zufahrt auf den Bahnübergang, wie verbesserte Beschilderungen und Vorwarnungen von Straßenverkehrsteilnehmern, denkbar. Eine Kombination aus verbesserten Vorwarnschildern und PeriLight könnte zusammen eventuell zu einem noch stärkeren Sicherheitsgewinn führen als jede Maßnahme für sich. Auch eine Kombination mit Rüttelstreifen zur Induzierung einer Geschwindigkeitsverringerung wäre gut vorstellbar.

In zukünftigen Versionen des Systems sollte die Funkverbindung zwischen dem Auslösesensor und den Leuchteinheiten beibehalten werden. Dies erspart aufwändige und teure Verkabelungsarbeiten. Eine technische Erweiterungsmöglichkeit von PeriLight bestünde in der Möglichkeit, das System nur auszulösen, wenn sich auch ein Schienenfahrzeug dem Bahnübergang annähert. Entsprechende Sensoren, die zur Erfassung eines Schienenfahrzeuges eingesetzt werden könnten, wie beispielsweise Achszählstromkreise, sind zertifizierter Gegenstand des aktuellen Standes der Bahntechnik. Durch einen solchen Umbau von PeriLight wäre es möglich, die Aufmerksamkeit des Straßenverkehrsteilnehmers nur in denjenigen Fällen in die Peripherie des Bahnübergangs zu lenken, in denen tatsächlich ein Schienenfahrzeug herannaht. Kritisch zu sehen ist diesbezüglich allerdings, dass ein weiterer Sensor in der Infrastruktur der Bahn nicht nur die Komplexität des Systems erhöhen würde, sondern damit auch die Kosten in Anschaffung, Aufbau und Wartung und vor allem den Abstimmungsbedarf hinsichtlich der Nachrüstung zwischen Kommunen und Bahnbetreiber. Vermeidet man die Ergänzung von Systemelementen, die in die bahnseitige Infrastruktur integriert werden müssen, würde das System lediglich ein ergänzendes System zur Erhöhung der Sicherheit eines Bahnübergangs darstellen, das auch durch eine Kommune unabhängig vom Netzbetreiber nachgerüstet werden könnte. Eine weitere Klassifizierung aus bahntechnischer

Sicht und eine übergeordnete Sicherheitsbetrachtung des Systems wären nur dann nicht erforderlich, wenn keine Interaktion mit der Schienenverkehrsinfrastruktur besteht, da der Bahnübergang nur dann noch immer als nicht technisch gesicherter Bahnübergang gelten könnte, der auch bei einem theoretischen Ausfall von PeriLight rechtlich als gesichert zu betrachten wäre. Selbst bei einem Ausfall des Systems PeriLight bestünde eine rechtlich gesehen ausreichende Sicherung, wenn der Bahnübergang über eine ordnungsgemäße Beschilderung verfügt (vgl. Kapitel 2).

Die Tatsache, dass ohne einen Detektor für Schienenfahrzeuge die peripheren Leuchteinrichtungen des Systems PeriLight jedes Mal ausgelöst würden, wenn ein Straßenverkehrsteilnehmer den Sensor passiert, ist nicht zwingend als ungünstig zu beurteilen. Der Lichtreiz in der Peripherie, der den Blick des Straßenverkehrsteilnehmers auch in Abwesenheit eines Schienenfahrzeugs in seine Richtung zieht, sollte nicht als falscher Alarm interpretiert werden, da die Sichtprüfung durch den Straßenverkehrsteilnehmer schließlich vor jeder Überfahrt eines Bahnübergangs erfolgen sollte. Wenn das System jedes Mal aktiviert würde, wenn ein Straßenverkehrsteilnehmer auf den Bahnübergang zufährt, würde zudem die Gefahr eines Fehlverhaltens durch falsche Angewohnheiten und übergeneralisierender Schlüsse („Da kommt nie ein Zug.“) verringert. Diese falschen Schlüsse könnten hingegen entstehen, wenn eine Auslösung nur im Fall der Annäherung eines Schienenfahrzeugs erfolgen würde. Würde ein Detektor für Schienenfahrzeug in das Gesamtsystem integriert, könnte die Wahrnehmung der Lichtreize auf Seiten der Straßenverkehrsteilnehmer als Evidenz für die Annäherung eines Schienenfahrzeuges verstanden werden. Die Gefahr wäre potentiell erhöht, dass die Nichtwahrnehmung von Lichtreizen durch Straßenverkehrsteilnehmer als Evidenz missverstanden würde, dass sicher kein Zug herannaht. Wollte man die Zuverlässigkeit des Systems im Sinne einer Ausfallsicherheit gewährleisten, müssten technische Redundanzen oder Überwachungsmöglichkeiten geschaffen werden sowie betriebliche Regelungen, wie bei einem Defekt des Systems zu verfahren ist. Auf diese Weise würde das System den Charme einer technisch einfach zu ergänzenden Zusatzmaßnahme verlieren, da es ähnlichen Sicherheitsansprüchen genügen müsste wie die reguläre Bahnübergangssicherungstechnik. Dies sollte nach Möglichkeit vermieden werden, insbesondere mit Blick auf die Anschaffungskosten von PeriLight.

Angesichts der positiven Einsatzmöglichkeiten einer exogenen Aufmerksamkeitslenkung durch Lichtquellen am Bahnübergang sollte konkreter in Betracht gezogen werden, die Sichtbarkeit von Schienenfahrzeugen durch die Anbringung zusätzlicher seitlicher Leuchtein-

richtungen und reflektierender Materialien zukünftig zu erhöhen. Durch die Kombination der Lichtquellen als Quelle der perzeptuellen Stimulation und dem Zug als wahrnehmbarem Zielreiz wären auch im Sinne Gibsons (1986) die notwendigen und hinreichenden Vorbedingungen des Sehens im Sinne einer Erhöhung der Bahnübergangssicherheit erfüllt. Mit Blick auf zukünftige Forschungsvorhaben wird empfohlen, Maßnahmen zur Verbesserung der Sichtbarkeit von Schienenfahrzeugen, wie die Anbringung zusätzlicher Stroboskoplichter mit seitlicher Abstrahlung, rotierender Blinklichter oder seitlich am Triebfahrzeug angebrachter Fernlichter (vgl. u. a. Aurelius & Korobow, 1971; Meares, 1972; Meares, 1975; MacDonald, 1974; Carroll et al., 1995; Cairney, 2005), gezielt im Rahmen einer empirischen Studie zu untersuchen. Bislang gibt es noch keine ausreichende empirische Evidenz zur Wirksamkeit ähnlicher Systeme.

In Bezug auf das System PeriLight sollen neben den benannten Aspekten der technischen Weiterentwicklung zwei Schwerpunkte im Rahmen weiterer Untersuchungen gelegt werden. Im Rahmen einer Felduntersuchung soll geprüft werden, inwiefern der positive Effekt des Systems in Bezug auf die Blicklenkung der Straßenverkehrsteilnehmer auch nach einer längerfristigen Verwendung Bestand hat. Neben der Langzeitüberprüfung im Feldversuch soll untersucht werden, inwiefern es für Verkehrsteilnehmer möglich ist, in der Folge einer exogenen Lenkung der visuellen Aufmerksamkeit durch Lichtreize in die Peripherie des Sichtfeldes die visuelle Aufmerksamkeit vom Ursprungsort der Lichtreize wiederum auf einen von den Lichtreizen unabhängigen Zielreiz auszurichten, zum Beispiel auf einen Zug. In diesem Zusammenhang wären unterschiedliche Parameter des Zuges zu variieren, beispielsweise die Distanz des Zuges im Sichtfeld zur Lichtquelle, die Salienz des Zuges oder auch seine Geschwindigkeit. Bei positiven Ergebnissen dieser geplanten Untersuchung könnten die positiven Indizien zur Wirksamkeit des Systems PeriLight aus den vorliegenden Untersuchungen weiter unterstützt werden und eine noch nachdrücklichere Empfehlung ausgesprochen werden, PeriLight als effektive und kostengünstige Maßnahme zum Schutz von Straßenverkehrsteilnehmern an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen einzusetzen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen sind hinsichtlich des Ziels der vorliegenden Dissertation, ein Konzept zu entwickeln, mit dem die Sicherheit an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen zukünftig auf kostengünstige Weise erhöht werden kann als vielversprechend zu beurteilen. Weiterführende Untersuchungen erscheinen angesichts der Ergebnisse eindeutig gerechtfertigt.

10 Fazit und Ausblick

10.1 Die sichere Überquerung des Bahnübergangs: Mehr als nur eine Frage der Technik

Als Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit stand die Zielsetzung, kostengünstige Human Factors-Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit von Bahnübergängen zu identifizieren. Zur Erreichung dieses Ziels wurden neben den verkehrlichen und technischen Grundlagen zum besonderen Kreuzungspunkt am Bahnübergang theoretische Erkenntnisse zum Erleben und Verhalten des Straßenverkehrsteilnehmers in der Phase der Annäherung an den Bahnübergang aufgearbeitet. Trotz der gängigen technischen und nicht technischen Sicherungen (vgl. Kapitel 2) verhalten sich Straßenverkehrsteilnehmer teilweise falsch und gefährlich. Die deutliche Mehrheit aller Unfälle an Bahnübergängen in der Vergangenheit resultierte aus Fehlern der Straßenverkehrsteilnehmer (DB Netz AG, 2016). Da ein Großteil dieser Unfälle durch Autofahrer verursacht wurde, stand diese Verkehrsteilnehmergruppe im Fokus dieser Arbeit.

Um die Bahnübergangszufahrt aus Sicht des Straßenverkehrsteilnehmers zu beschreiben, wurden fünf erforderliche Informationsverarbeitungsschritte definiert. Die Detektion, die Informationsverarbeitung, der Wissensabruf, die Bildung einer Handlungsintention und die Handlungsausführung boten für diese Arbeit einen geeigneten Beschreibungsrahmen der notwendigen Vorbedingungen für die sichere Überquerung eines Bahnübergangs. Diese Darstellung ist inspiriert durch das Modell der Informationsverarbeitung (Wickens & Hollands, 1999) und wurde durch Gripenkoven und Dietsch (2015) an den Vorgang der Bahnübergangsüberquerung angepasst. Dieser Beschreibungsrahmen mit seinen einzelnen Ebenen bietet eine gute Möglichkeit, um einerseits die Art der menschlichen Fehler, die sich in der Bahnübergangszufahrt ereignen können zu beschreiben (vgl. Kapitel 3) und andererseits die Wirkung von Sicherheitsmaßnahmen auf den Verkehrsteilnehmer einzuordnen (vgl. Kapitel 6).

Um einen ersten Eindruck zu gewinnen, auf welcher Ebene der Informationsverarbeitung während der Bahnübergangszufahrt möglicherweise Schwierigkeiten für Verkehrsteilnehmer auftreten können, wurden strukturierte Befragungen mit 100 Führerscheinsbesitzern geführt (vgl. Kapitel 4). Auffällig war, dass etwa die Hälfte der Befragten weder in der Lage war das Andreaskreuz zu benennen noch erwähnte, dass man nach links und rechts schauen sollte, um nach einem herannahenden Schienenfahrzeug Ausschau zu halten. Drei Viertel der

Befragten nahmen zudem nicht Bezug auf die Notwendigkeit zu verlangsamen und bremsbereit zu sein. Die Ergebnisse der Befragungen sind ein Indiz das dafür spricht, dass viele Verkehrsteilnehmer mangelhafte Schemata und Skripte zu Bahnübergängen haben, die zu einem fehlerhaften Verhalten führen können. Aus nationalen und internationalen Veröffentlichungen sind ähnliche Schlussfolgerungen bekannt, die bestätigt werden können (Ellinghaus & Steinbrecher, 2006; Schlag et al., 2004; Aigner-Breuss et al., 2013; Rudin-Brown et al., 2014).

Um festzustellen, ob sich die in der Interviewstudie festgestellten Mängel im Wissen auch im realen Kontext einer Autofahrt zeigen, wurde eine explorativ geprägte Untersuchung im Realfahrtkontext durchgeführt (vgl. Kapitel 5). Insbesondere die in dieser Untersuchung erhobenen Eye-Tracking-Daten waren aufschlussreich, da sie präzise Rückschlüsse auf Ebene einzelner Fixationen in der Bahnübergangszufahrt zuließen. Durch den Gehalt und die Genauigkeit der Blickdaten konnten auf Grundlage der Untersuchung von Grippenkoven und Dietrich (2016) verlässlichere Aussagen zum Blickverhalten während der Bahnübergangszufahrt gemacht werden als in vergleichbaren Untersuchungen in diesem Verkehrskontext. Frühere Untersuchungen bedienten sich ungenauerer Methoden zur Bestimmung des Blickverhaltens in der Bahnübergangszufahrt, wie der Beobachtung von Verkehrsteilnehmern durch Beobachter außerhalb des Fahrzeuges (Åberg, 1988; Wigglesworth, 1978; Heilmann, 1984). Die zentrale Erkenntnis des Versuchs bestand darin, dass sich die in den Interviews festgestellten Mängel im Wissen zu bahnübergangsbezogener Beschilderung und dem richtigen Verhalten in der Zufahrt auf einen nicht technisch gesicherten Bahnübergang auch im tatsächlichen Verhalten zeigen. Jeder einzelne Versuchsteilnehmer fixierte in der Bahnübergangszufahrt zwar Schilder, die auf den Bahnübergang hinweisen, allerdings führten mehr als zwei Drittel der Teilnehmer keine vollständige Sichtprüfung der linken und rechten Bahnübergangsperipherie durch. Dies bestärkt die Schlussfolgerung aus den Befragungen, dass Fehlverhalten an Bahnübergängen nicht vorrangig aus der mangelnden Detektion des Bahnübergangs beziehungsweise seiner Infrastrukturelemente resultiert. Es ist anzunehmen, dass das Fehlverhalten eher aus Mängeln im Abruf der richtigen Verhaltensweisen aus dem Langzeitgedächtnis resultiert beziehungsweise nicht vorhandenem Wissen zum richtigen Verhalten am Bahnübergang. Insbesondere in Bezug auf nicht technisch gesicherte Bahnübergänge ist dies als gefährlich zu bewerten. Die mangelhafte Sichtprüfung der Peripherie wurde auch am technisch gesicherten Bahnübergang mit Lichtsignalanlage festgestellt, der im Rahmen der Versuchsfahrt überfahren wurde. Am technisch gesicherten Bahnübergang ist sie jedoch nicht als gleicher-

maßen gefährlich zu beurteilen, da die technische Sicherung Straßenverkehrsteilnehmer aktiv davon in Kenntnis setzt, wenn ein Schienenfahrzeug herannaht.

Hinsichtlich der Zielsetzung der Arbeit, nutzerzentrierte Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit an Bahnübergängen zu identifizieren, wurde auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse aus den ersten beiden Untersuchungen der Schwerpunkt auf nicht technisch gesicherte Bahnübergänge gelegt, an denen Verkehrsteilnehmer nicht aktiv vor einem herannahenden Schienenfahrzeug gewarnt werden. Daher wurde die frühzeitige Sichtprüfung der peripheren Bahnübergangsbereiche als Schlüssel zur sicheren Überquerung identifiziert. Nur wenn der Zustand des Bahnübergangs frühzeitig vom Straßenverkehrsteilnehmer festgestellt wird, kann er die richtigen Verhaltensweisen ableiten. Da in den Befragungen viele Teilnehmer nicht angaben, dass man in der Bahnübergangszufahrt nach links und rechts schauen sollte und es in der Realfahrtuntersuchung die meisten Teilnehmer auch tatsächlich nicht taten, wurde als wesentliche Anforderung für Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit nicht technisch gesicherter Bahnübergänge abgeleitet, dass sie das Blickverhalten der Straßenverkehrsteilnehmer positiv beeinflussen müssen.

10.2 Abschließende Schlussfolgerungen zu den untersuchten Maßnahmen

Da ein Großteil der Straßenverkehrsteilnehmer nicht in der Lage ist, aus der Gegenwart eines Andreaskreuzes angemessene Verhaltensweisen abzuleiten erscheint es naheliegend, mit dem Stoppschild ein selbsterklärendes und wohlbekanntes Schild aus dem Straßenverkehr zu ergänzen. Der Einsatz des Stoppschildes als Ergänzung zum Andreaskreuz am Bahnübergang ist in Deutschland bislang nicht vorgesehen und wird, leider in weitgehender Abwesenheit empirischer Evidenz, kontrovers diskutiert. Die durchgeführte Untersuchung zum Wissensabruf bestärkt empirisch belegbar die Annahme, dass Verkehrsteilnehmer Schemata und Skripte im Zusammenhang mit dem Stoppschild deutlich leichter abrufen können als im Fall des Andreaskreuzes (vgl. Kapitel 7). Getroffene Urteile zur Bedeutung des Andreaskreuzes waren im Versuch deutlich häufiger falsch und wurden langsamer getroffen, als wenn ein Stoppschild als Zusatz dargestellt wurde. Das Stoppschild als Ergänzung zum Andreaskreuz erleichtert und beschleunigt im Informationsverarbeitungsschritt des Wissensabrufs die Aktivierung angemessener Skripte zur Vorfahrtregelung am Bahnübergang. Zudem erfüllt es das Kriterium der niedrigen Kosten, die mit Anschaffung und Installation verbunden sind.

In zahlreichen Ländern gehört das Stoppschild bereits zur normalen Beschilderung an Bahnübergängen. Vor dem Hintergrund der durchgeführten Untersuchung wird nahegelegt,

dass Stoppschild auch in Deutschland als Ergänzung des Andreaskreuzes einzuführen. Schöne und Buder (2011) empfehlen ebenfalls den Nutzen des Andreaskreuzes an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen, beschränken sich in ihrer Empfehlung jedoch auf Bahnübergänge, die durch Pfeifsignale der Schienenfahrzeuge gesichert werden, an denen wenig Straßenverkehr herrscht und auf Schienenseite mit geringer Geschwindigkeit verkehrt wird. Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Arbeit kann der Einsatz des Stoppschildes jedoch auch für nicht technisch gesicherte Bahnübergänge mit freiem Sichtdreieck empfohlen werden. Unter Berücksichtigung der festgestellten Mängel der Sichtprüfung des explorativen Fahrversuchs (vgl. Kapitel 5) besteht der Mehrwert des Stoppschildes im Bahnübergangskontext nicht in der Annahme, dass die Verkehrsteilnehmer nach dessen Installation tatsächlich alle vor dem Bahnübergang anhalten. Dies wäre vermutlich nicht der Fall. Der Mehrwert entstünde dadurch, dass es Verkehrsteilnehmern ein Leichtes ist, das richtige Verhalten zum Stoppschild schnell aus ihrem Langzeitgedächtnis abzurufen. Selbst im Fall, dass ein Verkehrsteilnehmer einen bewussten Verstoß begehen möchte und vorhat, am Stoppschild nicht anzuhalten, ist anzunehmen, dass er zunächst mit seinem Blick prüft, ob für ihn durch den Verstoß voraussichtlich eine Gefahr ausgeht. Bereits diese Sichtprüfung würde eine Verbesserung darstellen angesichts der geringen Anzahl der Verkehrsteilnehmer, die am nicht technisch gesicherten Bahnübergang vor dem Andreaskreuz im gegenwärtigen Zustand eine Sichtprüfung durchführen.

Während das Stoppschild als ergänzende Maßnahme auf der Ebene des Wissensabrufs wirksam ist und darüber zu einer endogenen Aufmerksamkeitslenkung beitragen soll, basiert die Erfindung PeriLight auf dem Wirkprinzip der exogenen Aufmerksamkeitslenkung. Der erfinderische Gedanke hinter PeriLight besteht darin, dass ein Verkehrsteilnehmer nicht erst alle Schritte der Informationsverarbeitungskette durchlaufen muss, bevor er als Konsequenz den Kopf nach links und rechts dreht um zu schauen, ob am nicht technisch gesicherten Bahnübergang ein Schienenfahrzeug herannaht. Durch die lichtreizinduzierte exogene Aufmerksamkeitsverlagerung wird der Informationsverarbeitungsprozess abgekürzt und unwillkürlich direkt das angemessene Verhalten in Form einer Sichtprüfung auf Seiten der Straßenverkehrsteilnehmer hervorgerufen. Die Ergebnisse der beiden Teilversuche bei Tag und Nacht zeigen positive Effekte von PeriLight auf das Blick- und Fahrverhalten der Versuchsteilnehmer (vgl. Kapitel 9). In dieser Wirkweise ist PeriLight unter den ortsfesten Maßnahmen, mit denen die Sicherheit erhöht werden kann einzigartig (vgl. Kapitel 6). Unter den beschriebenen Maßnahmen folgen nur zusätzliche Leuchteinrichtungen an Schienenfahrzeugen (Cairney,

2003; Carroll et al., 1995; U.S. Department of Transportation, 2008; Malzacher et al., 2017) durch die Erhöhung der Salienz einem ähnlichen Wirkprinzip. Die Ergebnisse zu PeriLight sind in Bezug auf die Zielsetzung dieser Arbeit als Erfolg zu bewerten, da sie die Effektivität dieses kostengünstigen Systems belegen und darüber hinaus unterstreichen, dass die Berücksichtigung der kognitiven und physiologischen Eigenschaften des Menschen ein geeigneter Ausgangspunkt für die Ableitung neuartiger Konzepte zur Erhöhung der Sicherheit an Bahnübergängen ist.

10.3 Anschließende Forschungsfragen und Empfehlungen

Sowohl PeriLight als auch das Stoppschild als Ergänzung des Andreaskreuzes sind Maßnahmen, mit denen die Sicherheit in der Querung eines nicht technisch gesicherten Bahnübergangs erhöht werden kann. Beide Maßnahmen sind dabei als zusätzliche Systeme zur Aufwertung nicht technisch gesicherter Bahnübergänge zu betrachten. PeriLight soll kein Ersatz für reguläre technische Bahnübergangssysteme wie Lichtsignalanlagen und Schranken sein. Angesichts der nach wie vor großen Anzahl der nicht technisch gesicherten Bahnübergänge in Deutschland aber auch weltweit stellt PeriLight eine denkbare Alternative dar, um diese Bahnübergänge aufzuwerten, ohne die immensen Kosten der vollumfänglichen Installation einer technischen Sicherungsanlage tragen zu müssen. Betrachtet man PeriLight als ergänzendes System, wäre der Bahnübergang selbst bei einem technischen Ausfall formal betrachtet aufgrund der Beschilderung und des freien Sichtdreiecks noch immer sicher. Es wird angeregt zu prüfen, wo man PeriLight und ähnliche *Overlay*-Systeme zur Ergänzung nicht technisch gesicherter Bahnübergänge zukünftig rechtlich im Geltungsbereich der StVO, des EBKrG und der EBO verorten und wie man ihren flächendeckenden Einsatz ermöglichen kann.

Neben den rechtlichen Fragestellungen ist es vorgesehen, zum System PeriLight weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen durchzuführen und technische Aufwertungen vorzunehmen. In einer längerfristigen Felduntersuchung sollte geprüft werden, inwiefern der in den durchgeführten Untersuchungen festgestellte positive Effekt von PeriLight auch längerfristig anhält. In einer weiteren Untersuchung soll geprüft werden, ob und unter welchen Umständen der Straßenverkehrsteilnehmer in der Lage ist, seine Aufmerksamkeit auf einen weiteren Zielreiz in der Peripherie zu verlagern, nachdem eine exogene Lenkung der visuellen Aufmerksamkeit durch einen Lichtreiz stattgefunden hat, der nicht vom eigentlichen Zielreiz emittiert wurde. Eine Untersuchung müsste vermutlich aus Sicherheitsgründen entweder im

Simulator durchgeführt werden oder könnte als abstrahiertes Computereperiment in einem erweiterten Aufbau von Posner's *Cueing*-Paradigma (Posner, Snyder & Davidson, 1980) untersucht werden. Unabhängig davon, ob dieser Sprung der visuellen Aufmerksamkeit in der Peripherie möglich ist oder nicht wird empfohlen, die Salienz von Schienenfahrzeugen durch eine Installation zusätzlicher seitlich abstrahlender Leuchteinrichtungen zu erhöhen, damit Straßenverkehrsteilnehmer sie an nicht technisch gesicherten Bahnübergängen noch frühzeitiger erkennen können. Auch hier sollten verschiedene Konfigurationen zusätzlicher Leuchteinrichtungen getestet werden, die idealerweise in Einklang mit geltenden Verordnungen zur Dreieckskonfiguration des Spitzenlichtes von Zügen zu bringen sein sollten.

Technisch gesehen stellt die Installation eines Stoppschildes als Ergänzung des Andreaskreuzes keine Herausforderung dar. Aus praktischen Gründen wäre es jedoch eine denkbare Alternative, das Stoppschild am gleichen Mast oberhalb oder unterhalb des Andreaskreuzes anzubringen und nicht wie im Versuchsmaterial verwendet als Miniaturschild in der Mitte des Andreaskreuzes. Das System PeriLight bedarf auf dem Weg von der Testanlage zum serienreifen System noch einiger technischer Aufwertungen. Hervorzuheben sind hier neben der zuverlässigen Stromversorgung für den Dauerbetrieb eine optimierte Auslösesensorik und der Vandalismusschutz.

Aufgrund der Vielfalt der Bahnübergänge konnte im Rahmen dieser Arbeit keine Maßnahme präsentiert werden, die universell für alle denkbaren Arten von Bahnübergängen einsetzbar ist, also auch für technisch gesicherte Bahnübergänge. Die beiden vorgeschlagenen und untersuchten Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit stellen Zusatzeinrichtungen für nicht technisch gesicherte Bahnübergänge dar, an denen die Zielsetzung zur Erhöhung der Sicherheit insbesondere darin besteht, die Verkehrsteilnehmer dazu zu bringen, frühzeitig nach herannahenden Schienenfahrzeugen Ausschau zu halten. Das Stoppschild wird in seinen Einsatzmöglichkeiten kaum vom Lageplan des Bahnübergangs beeinflusst, während die aufmerksamkeitslenkende Wirkung von PeriLight an Bahnübergängen mit besonders spitzem Kreuzungswinkel potentiell eingeschränkt ist oder eine andere Anordnung der Leuchten erfordert.

Beide Systeme sind jedoch nicht für den Einsatz an technisch gesicherten Bahnübergängen gedacht. Im Zusammenhang mit technisch gesicherten Bahnübergängen stellen sich aus verkehrspsychologischer Sicht andere Fragestellungen als in Bezug auf nicht technisch gesicherte Bahnübergänge, da Unfälle an technisch gesicherten Bahnübergängen häufiger aus bewussten Verstößen, wie beispielsweise dem absichtlichen Umfahren einer Halbschranke

resultieren. Im Prozess der Informationsverarbeitung wird in der Gegenwart einer Barriere also in der Absicht, einen Verstoß zu begehen eine unangebrachte Handlungsintention gebildet. Im Teilkapitel 6.3 wurden bereits einige Maßnahmenvorschläge aus Forschung und Praxis dargestellt, mit denen man derartigen Verstößen entgegenwirken könnte und die als Ansatzpunkte weiterer Untersuchungen dienen könnten (Aigner-Breuss et al., 2013; Bateson, Callow, Holmes, Redmond Roche & Nettle, 2013; Dinhobl, 2017; Naish & Blais, 2014; Rail Safety and Standards Board (RSSB), 2015). Aus psychologischer Perspektive sollten in Zusammenhang mit bewussten Verstößen an technisch gesicherten Bahnübergängen zukünftig zum Beispiel Faktoren untersucht werden, die einen Einfluss auf die Risikoeinschätzung der Verkehrsteilnehmer haben sowie die Bereitschaft, einen Verstoß zu begehen. Ansatzpunkte für weiterführende Forschung zu Hintergründen riskanter Entscheidungen und Verhaltensweisen im Bahnübergangskontext können sowohl in angewandter Forschung (Naish & Blais, 2014; Schlag et al., 2004; Schöne, 2013) als auch im Bereich der Grundlagenforschung (Kahnemann & Tversky, 1979; Kahnemann, 2011; Williams & Noyes, 2007) gefunden werden. Generell sollten auch bestehende Untersuchungen zur Psychologie der Wartevorgänge und der Zeitwahrnehmung (Maister, 1985) auf den Bahnübergangskontext übertragen werden, um zu verstehen, was das Warten neben der Wartedauer besonders unangenehm macht und um Ansätze abzuleiten, wie es angenehmer gestaltet werden könnte.

Weiterhin wird empfohlen, neben motorisierten Verkehrsteilnehmern auch andere Verkehrsteilnehmergruppen im Bahnübergangskontext näher zu betrachten. Die Gruppe der Fußgänger und Fahrradfahrer war im Rahmen dieser Arbeit nicht Teil des Betrachtungsschwerpunktes, ist aber nichtsdestotrotz relevant, gerade angesichts der gegenwärtigen Entwicklungen im Fahrradverkehr und der zunehmenden Verbreitung von Pedelecs. Aufgrund ihrer Beweglichkeit und Flexibilität im Verkehrskontext, die das Überwinden von Hindernissen leicht möglich machen, stellt es eine besondere Herausforderung dar, Bahnübergänge auch für Fußgänger und Fahrradfahrer sicher zu gestalten. Grundlegende Erkenntnisse zum Verhalten von Fußgängern und Fahrradfahrern an Bahnübergängen und Möglichkeiten zur Erhöhung der Sicherheit aus Perspektive dieser Verkehrsteilnehmer wurden in zwei australischen Untersuchungen aufgearbeitet (Read, Salmon, Lenné & Stanton, 2016; Read, Salmon, Lenné & Grey, 2014).

Während Fußgänger und Fahrradfahrer voraussichtlich in den nächsten Jahrzehnten noch eine Rolle als Verkehrsteilnehmer spielen werden, die Fehler am Bahnübergang begehen können bleibt abzuwarten, ob dies auf Autofahrer auch zutreffen wird. Dies hängt vor allem

davon ab, ob und wie schnell Bemühungen im Bereich der Forschung und Entwicklung digitalisierter und autonomer Fahrzeuge Früchte tragen werden. Ob es in einem hypothetischen hochautomatisierten Fahrszenario noch erforderlich sein wird, die Aufmerksamkeit der Fahrzeuginsassen in der Bahnübergangszufahrt zu erhöhen kann bezweifelt werden, da das Fahrzeug mit dem Bahnübergang oder den Schienenfahrzeugen in der Umgebung voraussichtlich ohne Einbezug der Insassen aushandeln wird, ob die Bahnübergangsüberfahrt sicher ist oder nicht. Da unklar ist, wie schnell diese Entwicklung vonstattengehen wird, ob alle Länder in der Lage sein werden, gleichermaßen daran partizipieren zu können und angesichts der Tatsache, dass es auch in absehbarer Zukunft Formen der Mobilität geben wird, in der ein Mensch eine steuernde Rolle einnimmt erscheint die Auseinandersetzung mit Human Factors-Fragestellungen im Bereich der Bahnübergangssicherheit dennoch weiterhin gerechtfertigt.

Mit Bezug auf den gegenwärtigen Stand der Technik im Bereich der Bahnübergangssicherheit scheint es angebracht, dem Thema Human Factors zukünftig eine gewichtigere Rolle einzuräumen. Angesichts der nach wie vor großen Anzahl nicht technisch gesicherter Bahnübergänge weltweit und der meist unfreiwilligen Rolle des Straßenverkehrsteilnehmers als Verursacher von Unfällen sollten Maßnahmen gesucht werden, um effizient die größtmögliche Anzahl an Unfällen zu vermeiden. Die Aufrüstung nicht technisch gesicherter Bahnübergänge ausschließlich mit gängiger Sicherheitstechnik wie Schranken und Lichtsignalanlagen ist dabei unter anderem aus Zeit- und Kostengründen als ineffizient zu beurteilen. Bahnübergangssicherheit sollte zukünftig nicht vorrangig aus Sicht des technisch machbaren und rechtlich verpflichtenden gedacht, sondern vor allem aus Perspektive des Straßenverkehrsteilnehmers reflektiert werden. Während die Verantwortung für die Bahnübergangssicherheit bislang vor allem den Bahnbetreibern überlassen wird, sollten zukünftig noch stärker Straßenbaulastträger in die Pflicht genommen werden, um auch das Umfeld von Bahnübergängen so zu gestalten, dass Fehler und Verstöße durch Straßenverkehrsteilnehmer frühzeitig und bestmöglich vermieden werden.

11 Literaturverzeichnis

- Öörni, R. (2014). Reliability of an in-vehicle warning system for railway level crossings - a user-oriented analysis. *IET Intelligent Transport Systems*, 8 (1), 9-20.
- Åberg, L. (1988). Driver Behavior At Flashing-Light, Rail-Highway Crossings. *Accident Analysis & Prevention*, 20 (1), 59-65.
- ADAC e. V. (2014). *Verkehrssicherheit an Bahnübergängen*. Ressort Verkehr, München.
- Aigner-Breuss, E., Aleksa, M., Braun, E., Machata, K., Knowles, D., Runda, K. et al. (2013). *MANEUVER - MASSnahmen zur Vermeidung von FehlverhalteN an Eisenbahnkreuzungen mit Hilfe der VERkehrsprsychologie*. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien. Wien, Österreich: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie / ÖBB-Infrastruktur AG.
- Augsburger Allgemeine. (01. Dezember 2015). *Die Gefahr am Bahnübergang*. Abgerufen am 04. Januar 2016 von <http://www.augsburger-allgemeine.de/mindelheim/Die-Gefahr-am-Bahnuebergang-id36234437.html>
- Aurelius, J. P. & Korobow, N. (1971). *The Visibility and Audibility of Trains Approaching Rail-Highway Grade Crossings: Report FRA-RP-71-1*. US Department of Transportation. Washington, DC, U.S.A.: Federal Railroad Administration.
- Baer, R., Seifert, D. & Barfuß, M. (2016). *Beleuchtungstechnik: Grundlagen (4. Auflage)*. (D. L. LiTG, Hrsg.) München: Huss-Medien.
- Basacik, D., Cynk, S., Flint, T. & McMorrow, J. (2014). Evaluating an Advance Warning Sign for Level Crossings. In T. Ahram, W. Karwowski & T. Marek (Hrsg.), *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics AHFE 2014*, (S. 2136-2146). Kraków, Poland.
- Bateson, M., Callow, L., Holmes, J. R., Redmond Roche, M. L. & Nettle, D. (2013). Do Images of 'Watching Eyes' Induce Behaviour That Is More Pro-Social or More Normative? A Field Experiment on Littering. *PLoS ONE*, 8 (12), 1-9.

- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. (26. 04 2012). Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO). *Gesetzestext* . Köln, Deutschland: Bundesanzeiger Verlag.
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. (1967). Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (BGBI. 1967 II S. 1563), zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 19. März 2008 (BGBI. I S. 467). Berlin.
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. (1963). Gesetz über Kreuzungen von Eisenbahnen und Straßen (Eisenbahnkreuzungsgesetz - EBKrG).
- Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz. (2013). Straßenverkehrs-Ordnung (StVO) vom 6. März 2013 (BGBI. I S. 367), geändert durch Artikel 2 der Verordnung vom 15. September 2015 (BGBI. I S. 1573). Berlin.
- Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz. (26. April 2012). Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO). *§41 - Bremsen und Unterlegkeile* . Berlin.
- Bund-Länder-Fachausschuss Straßenverkehrsordnung (BLFA StVO). (2002). Verkehrssicherheit an Bahnübergängen - Leitfaden zur Durchführung von Bahnübergangsschauen.
- Caird, J. K., Creaser, J. I., Edwards, C. J. & Dewar, R. E. (2002). *A human factors analysis of highway-railway grade crossing accidents in Canada*. University of Calgary. Montreal, Canada: Transport Canada Report.
- Cairney, P. (2003). Road Safety Research Report CR 217 - Prospects for improving the conspicuity of trains at passive railway crossings. Vermont South Victoria: Australian Transport Safety Bureau.
- Cale, M. H., Gellert, A., Katz, N. & Sommer, W. (2013). Can Minor Changes in the Environment Lower Accident Risk at Level Crossings? Results from a Driving Simulator-Based Paradigm. *Journal of Transportation Safety & Security*, 5 (4), 244-360.
- Caroll, A., Multer, J. & Markos, S. H. (1995). Safety of Highway-Railroad Grade Crossings: Use of Auxiliary External Alerting Devices to Improve Locomotive Conspicuity . U.S. Department of Transportation, Washington, D.C.

- Cynk, S., Flint, T. & McMorrow, J. (2014). How Well Do People Understand the Signs and Signals at User Worked Level Crossings?. In W. K. T. Ahram (Hrsg.), *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics AHFE 2014, Kraków, Poland 19-23 July 2014*, (S. 2156-2165). Kraków, Poland.
- DB Netz AG. (2011). *Bahnübergänge im Netz der Deutschen Bahn*. Frankfurt am Main.
- DB Netz AG. (2016). *Bahnübergänge im Spiegel der Statistik - Bahnübergangsstatistik 2016*. Berlin: DB Netz AG.
- DB Netz AG. (2017). *Bahnübergänge im Spiegel der Statistik - Bahnübergangsstatistik 2017*. Berlin: DB Netz AG.
- DB Netz AG. (2007). *Bahnübergänge im Spiegel der Statistik 2006*. Frankfurt am Main.
- DB Netz AG. (2008). *Richtlinie 815 Bahnübergänge planen und instand halten*. Frankfurt/Main.
- De Boer, J. B. (1967). Visual perception in road traffic and the field of vision of the motorist. In J. B. De Boer, *Public Lighting* (S. 11-96). Eindhoven, Netherlands: Phillips Technical Library.
- Dettmann, A., Felbel, K., Jentsch, M., Lindner, P., Bullinger, C. & Wanielik, G. (2015). Wirksamkeit räumlich gerichteter Warnungen – Ein Vergleich zwischen akustischen und visuellen Modi. *Der Fahrer im 21. Jahrhundert* (S. 241-251). Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- Deutsche Bahn AG. (2015). *Bahnübergänge im Netz der Deutschen Bahn – Sensible Schnittstellen zwischen Schiene und Straße*. Berlin: Deutsche Bahn AG.
- Deutsche Bahn AG. (2017). <http://www.deutschebahn.com>. Abgerufen am 06. 12 2017 von Geblickt? Sicher drüber!:
http://www.deutschebahn.com/de/nachhaltigkeit/verantwortung_gesellschaft/unfallpraevention/sicher_drueber.html
- Deutsche Bahn AG. (2012). *Sicher Drüber / Infografiken*. Frankfurt / Main.

- Deutsches Institut für Normung. (2003). DIN EN ISO 15007-1 Straßenfahrzeuge – Messung des Blickverhaltens von Fahrern bei Fahrzeugen mit Fahrerinformations- und -assistenzsystemen – Teil 1: Begriffe und Parameter. *Norm*. Berlin: Beuth Verlag.
- Die Welt. (08. November 2015). *Drei schwere Unfälle an Bahnübergängen in drei Tagen*. Abgerufen am 04. Januar 2016 von <http://www.welt.de/regionales/hamburg/article148581085/Drei-schwere-Unfaelle-an-Bahnuebergaengen-in-drei-Tagen.html>
- Dietsch, S., Grippenkov, J. & Schade, S. (2014). Unfallschauplatz Bahnübergang - Nicht Sehen oder nicht Verstehen? In P. Schill, Verband Deutscher Eisenbahn-Ingenieure e.V. (Hrsg.), *EIK - Eisenbahn Ingenieur Kalender 2014* (S. 289-300). Frankfurt a.M.: DVV Media Group GmbH / Eurailpress.
- DIN EN ISO 15007-1. (2003). Straßenfahrzeuge - Messung des Blickverhaltens von Fahrern bei Fahrzeugen mit Fahrerinformations- und -assistenzsystemen - Teil 1: Begriffe und Parameter. Berlin: Beuth Verlag.
- Dinhobl, G. (2017). Verhalten von Straßenbenutzern an Eisenbahnkreuzungen und Bahnübergängen. *Eisenbahntechnische Rundschau* (6), 87-91.
- Dziennus, M., Kelsch, J. & Schieben, A. (2016). Ambient light based interaction concept for an integrative driver assistance system – a driving simulator study. In K. B. D. de Waard (Hrsg.), *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Europe Chapter 2015 Annual Conference* (S. 1-12). Groningen, Niederlande: HFES-Europe.
- Eirmbter, W. H. & Jacob, R. (1996). Fragen zu Fragen: instrumentbedingte Antwortverzerrungen? *ZUMA Nachrichten*, 20 (38), 90-111.
- Ellinghaus, D. & Steinbrecher, J. (2006). Das Kreuz mit dem Andreaskreuz - Eine Untersuchung über Konflikte an Bahnübergängen. Hannover: Continental AG.
- European Union Agency for Railways (ERA). (2017). *Railway Safety in the European Union - Safety overview 2017*. Luxembourg: ERA.
- European Union Agency for Railways (ERA). (2014). *Railway Safety Performance in the European Union*. Valenciennes, Frankreich: European Railway Agency.

- Field, A. (2009). *Discovering Statistics Using SPSS*. London: SAGE Publications Ltd. .
- Focus online. (21. Dezember 2015). *Zwei Schwerverletzte bei Unfall an unbeschränktem Bahnübergang*. Abgerufen am 04. Januar 2016 von http://www.focus.de/regional/rheinland-pfalz/verkehr-zwei-schwerverletzte-bei-unfall-an-unbeschränktem-bahnuebergang_id_5169270.html
- Genschow, J. & Sturzbecher, D. (2015). Verkehrswahrnehmungstests als innovative Prüfungsform in der Fahranfängervorbereitung. In *Verkehrswahrnehmung und Gefahrenvermeidung – Grundlagen und Umsetzungsmöglichkeiten in der Fahranfängervorbereitung. Innovationsbericht zum Fahrerlaubnisprüfungssystem 2011 – 2014*. Dresden: TÜV / DEKRA arge tp 21.
- Gibson, J. J. (1986). *The Ecological Approach to Visual Perception* (First Edition Ausg.). New York: Psychology Press - Taylor & Francis Group.
- Goldstein, E. B. (2008). *Wahrnehmungspsychologie - Der Grundkurs* (7. Auflage Ausg.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Green, D. M. & Swets, J. A. (1966). *Signal detection theory and psychophysics*. New York: Wiley.
- Grippenkoven, J. (2016). *Patentnr. DE 10 2015 107 451 A1 2016.11.17*. München, Deutschland: Deutsches Patent- und Markenamt (DPMA).
- Grippenkoven, J. (2016). *Patentnr. EP 3 093 209 A1*. München, Deutschland: Europäisches Patentamt (EPA).
- Grippenkoven, J. (2017). Wahrnehmung und Verhalten am Bahnübergang. *Deine Bahn* (2), 10-15.
- Grippenkoven, J. & Dietsch, S. (2016). Gaze direction and driving behavior of drivers at level crossings. *Journal of Transportation Safety and Security*, 8, 4-18.
- Grippenkoven, J., Giesemann, S. & Dietsch, S. (2012a). Contributing Human Factors in German Level Crossing Accidents. *30th European Annual Conference on Human Decision-Making and Manual Control Proceedings* (S. 97-107). Braunschweig: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

- Grippenkoven, J., Gieseemann, S. & Dietsch, S. (2012b). The role of human error in accidents at German half-barrier level crossings. *Proceedings of the 2012 Global Level Crossing and Trespassing Symposium*. London: RSSB.
- Grippenkoven, J., Rawert, H. & Naumann, A. (2015). The potential of the stop sign to unravel the mystery named St. Andrew. *Fifth International Rail Human Factors Conference, 14-17 September 2015, Book of Proceedings* (S. 492-501). London: Rail Safety and Standards Board.
- Grippenkoven, J., Thomas, B. & Lemmer, K. (2016). PeriLight – effektive Blicklenkung am Bahnübergang. *EI - Eisenbahningenieur* (1), 48-51.
- Health and Safety Executive (HSE). (2005). *Level crossings - Summary of findings and key human factors issues - Research Report 359*. Davis Associates Limited. Hertfordshire / United Kingdom: HSE Books.
- Heilmann, W. (1984). *Grundlagen und Verfahren zur Abschätzung der Sicherheit an Bahnübergängen*. Darmstadt: Dissertationsschrift, Technische Hochschule Darmstadt.
- Hommel, B. & Nattekemper, D. (2011). *Handlungspsychologie: Planung und Kontrolle intentionalen Handelns*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag GmbH.
- Irwin, D. E., Colcombe, A. M., Kramer, A. F. & Hahn, S. (2000). Attentional and oculomotor capture by onset, luminance and color singletons. *Vision Research*, 40, 1443-1458.
- Kahnemann, D. (2011). *Thinking, fast and slow*. London: Lane.
- Kahnemann, D. & Tversky, A. (1979). Prospect theory: An analysis of decision under risk. *Econometrica*, 47 (2), 263-291.
- Kantamaa, V. M. (26. 04 2017). *liikennevirasto*. Von Vartioimattomien tasoristeysten huomiolaitteita uusittu Toijala-Valkeakoski sekä Olli-Porvoo -rataosilla: https://www.liikennevirasto.fi/-/vartioimattomien-tasoristeysten-huomiolaitteita-uusittu-toijala-valkeakoski-seka-olli-porvoo-rataosilla?utm_source=emaileri&utm_medium=email&utm_campaign=Liikenneviraston%20uutiskirje%204*2017&utm_term=Vartioimattomien%20t%20abgerufen

- Kluwe, R. & Spada, H. (1981). Wissen und seine Veränderung: Einige psychologische Beschreibungsansätze. In K. Foppa & R. Groner, *Kognitive Strukturen und ihre Entwicklung*. Stuttgart: Huber.
- Koschutnig, L. & Dinhobl, G. (2017). Rail safety measures at level crossings in Austria. *European railway review* (3), 72-75.
- KRAIBURG Elastik GmbH . (2010). *Strail - Das Prinzip perfekter Bahnübergänge - Straße trifft Schiene - Bahnübergangssysteme für höchste Ansprüche*. Abgerufen am 09.12.2017 von STRAIL:
http://www.strail.de/uploads/tx_agndownloads/1_2010_07_STRAIL_Image_Folder_Seiten_02.pdf
- Lambert, A., Spencer, E. & Mohindra, N. (1987). Automaticity and the capture of attention by a peripheral display change. *Current Psychology*, 6 (2), 136-147.
- Larue, G. S., Kim, I., Rakotonirainy, A., Haworth, N. L. & Ferreira, L. (2015). Driver's behavioural changes with new intelligent transport system interventions at railway level crossings — A driving simulator study. *Accident Analysis and Prevention*, 81, 74-85.
- Lenné, M. G., Rudin-Brown, C. M., Navarro, J., Edquist, J., Trotter, M. & Tomasevic, N. (2011). Driver behaviour at rail level crossings: Responses to flashing lights, traffic signals and stop signs in simulated rural driving. *Applied Ergonomics*, 42 (4), 548-554.
- Lenné, M. G., Salmon, M. G., Beanland, V., Stanton, N. A. & Filtness, A. (2013). On-road driving studies to understand why drivers behave as they do at regional rail level crossings. *Proceedings of the 2013 Australasian Road Safety Research, Policing & Education Conference* (S. 1-7). Brisbane, Australia: Australasian Road Safety Research, Policing & Education Conference .
- MacDonald, W. A. (1974). Summary of a workshop on road safety at railway level crossings. *Australian Road Research*, 5, 79-81.

- Maister, D. H. (1985). The Psychology of Waiting Lines. In J. A. Czepiel, M. R. Solomon & C. F. Surprenant, *The Service Encounter: Managing Employee/Consumer Interaction in Service Businesses* (S. 113-126). Lexington, MA, U.S.A.: Lexington Books.
- Malzacher, G., Krüger, D., Winter, J. & Wojtaszek, M. (2017). Design als Bestandteil der Fahrzeugentwicklung beim NGT Cargo. *EI - Der Eisenbahningenieur* (9), 6-11.
- Manz, H. & Slovak, R. (2008). SELCAT - Safer European Level Crossing Appraisal and Technology (Report TCA5-CT-2006-031487) . European Commission.
- Meares, C. L. (1972). The Road Accident Situation in Australia: report by the expert group on road safety. Canberra, Australia: AGPS .
- Meares, C. L. (1975). The Road Accident Situation in Australia: report by the expert group on road safety. Canberra, Australia: AGPS.
- Naish, I. & Blais, D. (2014). Mitigating Risky Behaviour of Delayed Road Users at Occupied Highway-Railway Crossings: Review of Research and Issues. *Proceedings of the 2014 Global Level Crossing Symposium*, (S. 1-12). Urbana, IL, USA.
- National Transportation Safety Board (NTSB). (1986). *Passenger/commuter train and motor vehicle collisions at grade crossings (1985). Safety Study NTSB/SS-86/04*. Washington, DC.: National Transportation Safety Board.
- National Transportation Safety Board (NTSB). (1998). *Safety Study - Safety at Passive Grade Crossings, Volume 1: Analysis*. Washington, D.C.: National Transportation Safety Board.
- Ngamdung, T. & daSilva, M. (2013). *Driver Behavior Analysis at Highway-Rail Grade Crossings using Field Operational Test Data—Light Vehicles*. U.S. Department of Transportation. Washington, DC: Federal Railroad Administration.
- Nickerson, R. S. (1998). Confirmation Bias: A Ubiquitous Phenomenon in Many Guises. *Review of General Psychology* , 2 (2), 175-220.
- Noyce, D. A. & Fambro, D. B. (1998). Enhanced traffic control devices at passive highway-railroad grade crossings. *78th Annual Meeting of the Transportation Research Board* (S. 1-16). Washington, D.C.: TRB.

- OpenStreetMap*. (29. November 2019). Abgerufen am 29. November 2019 von <https://www.openstreetmap.org/#map=5/51.330/10.453>
- Operation Lifesaver, Inc. (2017). *Operation Lifesaver - Rail Safety Education*. Abgerufen am 06. 12 2017 von <https://oli.org/>
- Pinel, J. P. (2007). *Biopsychologie* (6. Auflage Ausg.). (P. Pauli, Hrsg.) München: Pearson Studium.
- Posner, M. I., Snyder, C. R. & Davidson, B. J. (1980). Attention and the detection of signals. *Journal of Experimental Psychology*, 109 (2), 160-172.
- Psychology Software Tools, Inc. (2012). E-Prime 2.0. Retrieved from <http://www.pstnet.com>.
- Purves, D. & Williams, S. M. (2004). *Neuroscience* (Third Edition Ausg.). Sinauer: Sunderland and Mass.
- Radalj, T. & Kidd, B. (2005). A trial with rumble strips as a means of alerting drivers to hazards at approaches to passively protected railway level crossings on high speed western australian rural roads. *Proceedings of the Road Safety Research, Policing and Education Conference*, (S. 1-11). Wellington, New Zealand.
- Rail Safety and Standards Board (RSSB). (2015). *Level Crossing Risk Management Toolkit (LXRMTK)*. Von <http://www.lxrmtk.com/> abgerufen
- Read, G. J., Salmon, P. M., Lenné, M. G. & Grey, E. M. (2014). Evaluating Design Hypotheses for Rail Level Crossings: An Observational Study of Pedestrian and Cyclist Behavior. In T. Ahram, W. Karwowski & T. Marek (Hrsg.), *Proceedings of the 5th International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics AHFE 2014*, (S. 2177-2188). Kraków, Poland.
- Read, G. J., Salmon, P. M., Lenné, M. G. & Stanton, N. A. (2016). Walking the line: Understanding pedestrian behaviour and risk at rail level crossings with cognitive work analysis. *Applied Ergonomics*, 53, 209-227.
- Reason, J. (1994). *Menschliches Versagen*. Heidelberg: Spektrum.
- Remington, R. W., Johnston, J. C. & Yantis, S. (1992). Involuntary attentional capture by abrupt onsets. *Perception & Psychophysics*, 51 (3), 279-290.

- Roop, S. S. (2000). A Safety Evaluation of the RCL Automated Horn System - A Report from the Texas Transportation Institute . College Station, Texas, U.S.A.: Texas Transportation Institute .
- Rudin-Brown, C. M., French-St. George, M. & Stuart, J. J. (2014). Human factors issues at passively controlled, rural level crossings. *Compendium of the 2015 TRB annual meeting* (S. 96–103). Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Russell, E. R., Shah, H. D. & Rys, M. J. (2007). *Study of drivers' behavior at passive railroad-highway grade crossings*. Kansas Department of Transportation. Manhattan / KS: Kansas State University.
- Saccomanno, F. F., Young, P. Y. & Fu, L. (2007). Estimating countermeasure effects for reducing collisions at highway-railway grade crossings. *Accident Analysis and Prevention* , 39 (2), 406-416.
- Salmon, P. M., Lenné, M. G., Young, K. L., Tomesevic, N., Williamson, A. & Rudin-Brown, C. M. (2010). Driver behaviour and decision making at railway level crossings: an exploratory on-road case study. *2010 Australasian Road Safety Research, Policing and Education Conference*, (S. 1-11). Canberra / Australia.
- Salmon, P. M., Read, G. J., Lenné, M. G., Mulvihill, C. M., Stevens, N., Walker, G. H. et al. (2015). The Whole Kit and Caboodle: Applying a Systems Analysis and Design Framework Across the Rail Level Crossing Design Lifecycle. *Fifth International Rail Human Factors Conference 14-17 September 2015 Book of Proceedings* (S. 502-512). London: Rail Safety and Standards Board (RSSB).
- Sanders, A. F. & Wertheim, A. H. (1973). The relation between physical stimulus properties and the effect of foreperiod duration on reaction time. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 25 (2), 201-206.
- Schöne, E. (2013). Ein risikobasiertes Verfahren zur Sicherheitsbeurteilung von Bahnübergängen. Dresden: Dissertationsschrift - Universität Dresden.
- Schöne, E. & Bagola, R. (2013). Wahrnehmbarkeit akustischer Signale der Bahnfahrzeuge an Bahnübergängen. *EI - Eisenbahningenieur* (10), 38-43.

- Schöne, E., Schulze, C. & Wöllmann, M. F. (2014). Geschwindigkeit und Aufmerksamkeit an nichttechnisch gesicherten BÜ. *Eisenbahningenieur Spezial Bahnübergänge* (10), 20-26.
- Schöne, E. & Buder, J. (2011). Einsatz von Stoppschildern an nichttechnisch gesicherten Bahnübergängen. *Eisenbahningenieur* , 25-29.
- Schlag, B., Fischer, T. & Rößger, L. (2004). Fehlverhalten und Unfälle an unbeschränkten Bahnübergängen. Dresden.
- Schober, H. (1970). *Das Sehen*. Leipzig: Fachbuchverlag GmbH.
- Seehafer, W. (1997). Verkehrsgerechte Sicherung von Bahnübergängen. In V. e.V., *Eisenbahningenieurkalender '97* (S. 109-134). Hamburg: Tetzlaff Verlag.
- Singh, J., Desai, A., Acker, F., Ding, S., Prakasamul, S., Rachide, A. et al. (2012). Cooperative Intelligent Transport Systems to Improve Safety at Level Crossings. *Proceedings of the 2012 Global Level Crossing and Trespassing Symposium*. London: RSSB.
- Speck, B. (2011). Sicherung von Bahnübergängen durch hörbare Signale. *Eisenbahningenieur* (11), 39-43.
- SWARCO AG. (2017). *LANELIGHT LED-Markierungsleuchtknöpfe*. Von Schlankes & robustes Design, hervorragende Leuchtkraft - für mehr Sicherheit:
<https://www.swarco.com/de/Produkte-Services/Traffic-Management/Interurbanes-Verkehrsmanagement/Dynamische-Statistische-Beschilderung/LANELIGHT-LED-Markierungsleuchtkn%C3%B6pfe> abgerufen
- Tey, L. S., Ferreira, L. & Dia, H. (2009). Evaluating Cost-Effective Railway Level Crossing Protection Systems. *32nd Australasian Transport Research Forum*. Auckland: Ministry of Transport.
- Tey, L.-S., Wallis, G., Cloete, S. & Ferreira, L. (2013). Modelling driver behaviour towards innovative warning devices at railway level crossings. *Accident Analysis and Prevention* , 51, 104-111.

- Theeuwes, J. (1992). Perceptual selectivity for color and form. *Perception & Psychophysics* , 51, 599-606.
- Theeuwes, J., Kramer, A. F., Hahn, S. & Irwin, D. E. (1998). Our Eyes do Not Always Go Where we Want Them to Go: Capture of the Eyes by New Objects. *Psychological Science* , 9 (5), 379-385.
- Thomas, B. (2015). Evaluation des Warnsystems PeriLight. *Masterarbeit* . Braunschweig, Deutschland: Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig.
- Tomkins, S. (1987). Script Theory. In J. Arnoff, A. I. Rabin & R. A. Zucker, *The Emergence of Personality* (S. 147-216). New York: Springer Publishing Company.
- U.S. Department of Transportation. (2008). *Driver Behavior at Highway- Railroad Grade Crossings: A Literature Review from 1990–2006*. U.S. Department of Transportation. Springfield, VA: National Technical Information Service.
- UIC - International Union of Railways. (2017). *ILCAD*. Abgerufen am 10. 02 2017 von Act Safely at Level Crossings: www.ILCAD.org
- United Nations. (1968). *Convention on road signs and signals (E/CONF.56/17/Rev.1/Amend.1)* . Economic Commission for Europe - Inland Transport Committee, Vienna.
- United Nations. (2014). *Report of the Group of Experts on Safety at Level Crossing on its third session (ECE /TRANS/WP.1/GE.1/6)*. Economic Commission for Europe - Inland Transport Committee, Working Party on Road Traffic Safety, Geneva.
- Utesch, F. (2014). Unscharfe Warnungen im Kraftfahrzeug - Eignet sich eine LED - Leiste als Anzeige für Fahrerassistenzsysteme? Braunschweig: Dissertationsschrift.
- Vollrath, M., Rataj, J. & Lemmer, K. (2004). Unmögliches virtuell ermöglichen - Fahrerassistenzsysteme mit ViewCar und Virtual-Reality-Labor validieren. In GZVB, *Automatisierungs- und Assistenzsysteme für Transportmittel* (S. 398-408). Braunschweig: GZVB.

- Ward, N. J. & Wilde, G. J. (1995). Field observation of advance warning/advisory signage for passive railway crossings with restricted sightline visibility: An experimental investigation. *Accident Analysis and Prevention* , 27 (2), 185-197.
- Wickens, C. D. & Hollands, J. G. (1999). *Engineering Psychology and Human Performance* (Third Edition Ausg.). Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Wigglesworth, E. C. (1990). How can safety be improved at "Open" level crossings? *Australian Road Research*, 20 (4), 61.
- Wigglesworth, E. C. (2001). A human factors commentary on innovations at railroad–highway grade crossings in Australia. *Journal of Safety Research*, 32 (3), 309-321.
- Wigglesworth, E. C. (1978). Human Factors in Level Crossing Accidents. *Accident Analysis & Prevention*, 10 (3), 229 - 240.
- Williams, D. J. & Noyes, J. M. (2007). How does our perception of risk influence decision-making? Implications for the design of risk information. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 8 (1), 1-35.
- Wittenberg, K.-D., Heinrichs, H.-P., Mittmann, W. & Mallikat, J. (2006). *Kommentar zur Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO)* (5 Ausg.). Darmstadt: Eurailpress in DVV Media Group.
- Wogalter, M. S., Conzola, V. C. & Smith-Jackson, T. L. (2002). Research-based guidelines for warning design and evaluation. *Applied Ergonomics*, 33 (3), 219-230.
- Wullems, C. (2011). Towards the adoption of low-cost rail level crossing warning devices in regional areas of Australia : a review of current technologies and reliability issues. *Safety Science* , 49 (8-9), 1059-1073.
- Yantis, S. & Jonides, J. (1984). Abrupt visual onsets and selective attention: Evidence from visual search. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance* , 10 (5), 601-621.

Anlage A – Soziodemographische Daten der Stichprobe der Interviews zu bahnübergangsbezogenem Wissen von Straßenverkehrsteilnehmern

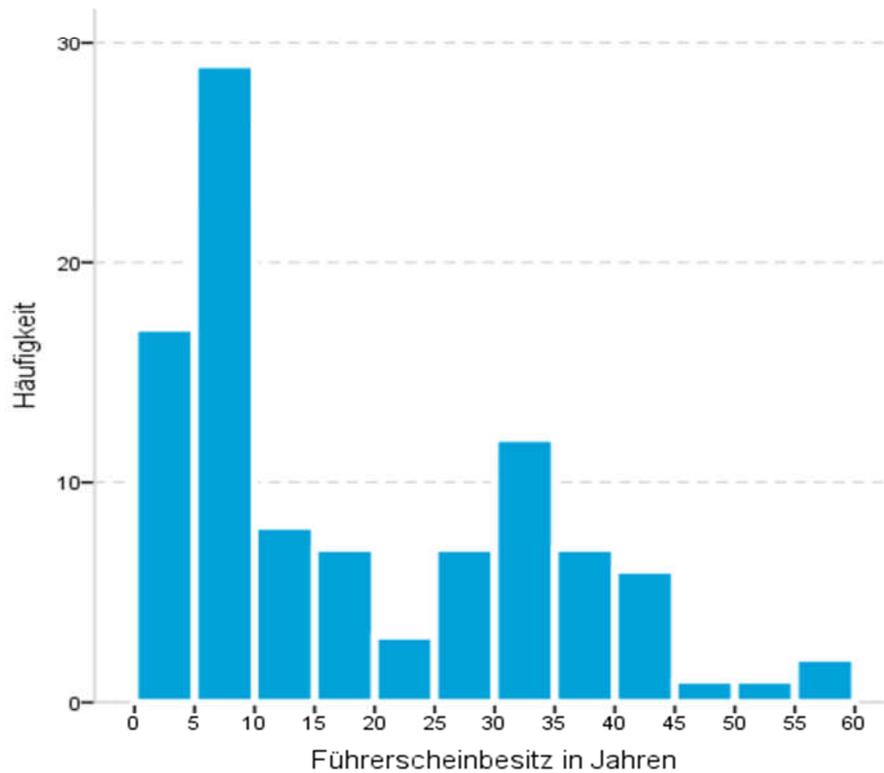


Abbildung 34. Dauer des Führerscheinbesitzes der Teilnehmer der Befragung

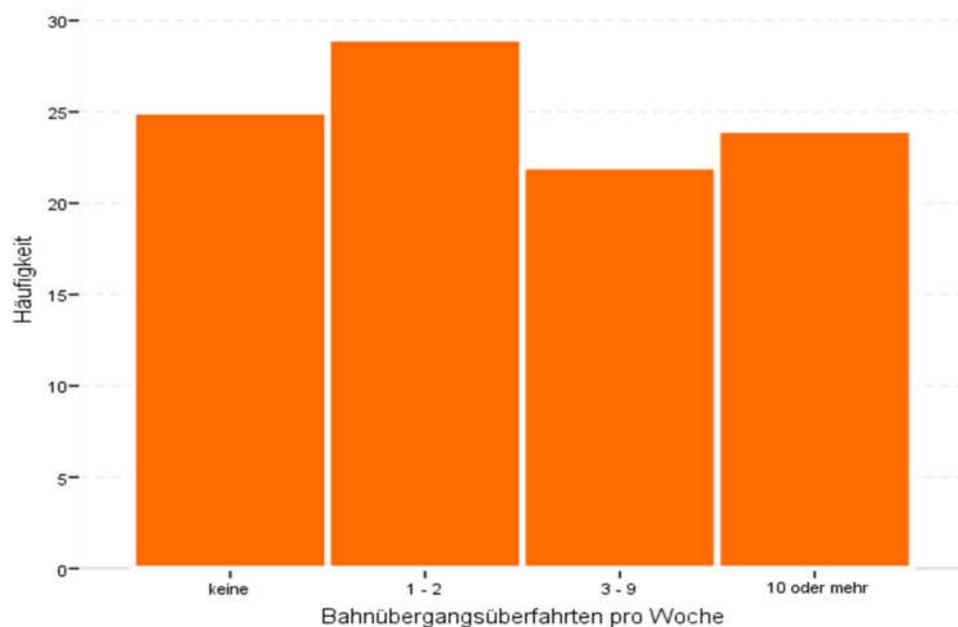


Abbildung 35. Anzahl der Bahnübergangsüberfahrten der Teilnehmer der Befragung pro Woche

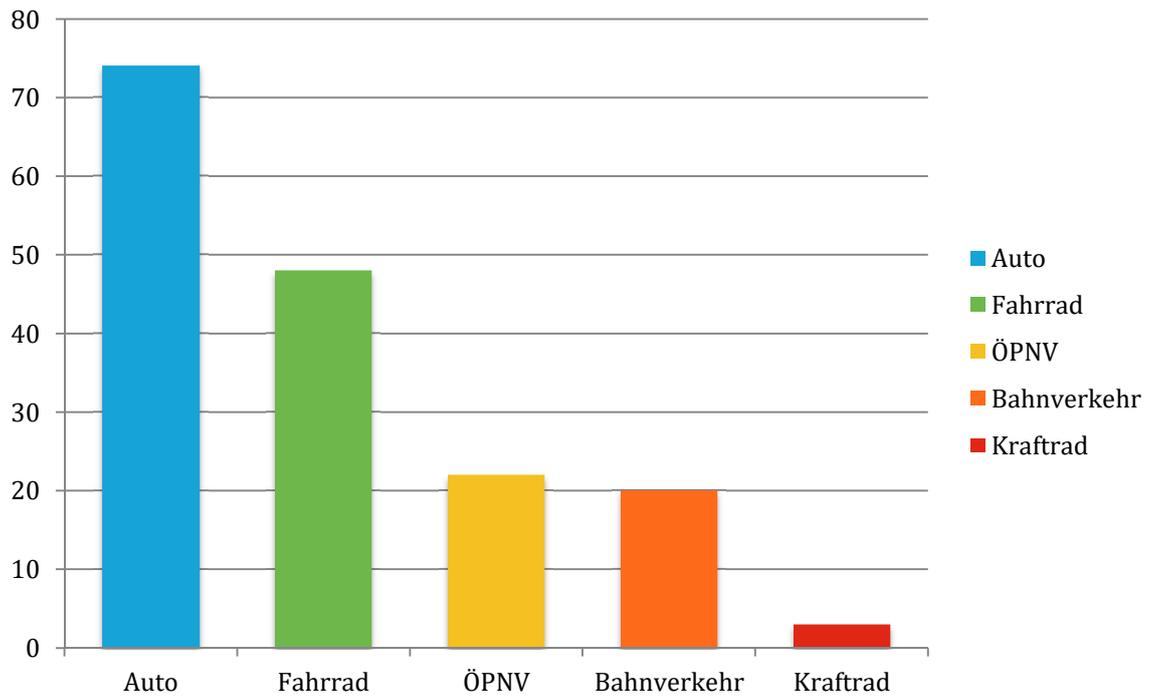


Abbildung 36. Anzahl der Nennungen regelmäßig genutzter Verkehrsmitteln der Befragungsteilnehmer (Mehrfachnennungen waren möglich)

Anlage B – Route der Untersuchung 2: Blick- und Fahrverhalten von Autofahrern an unbeschränkten Bahnübergängen

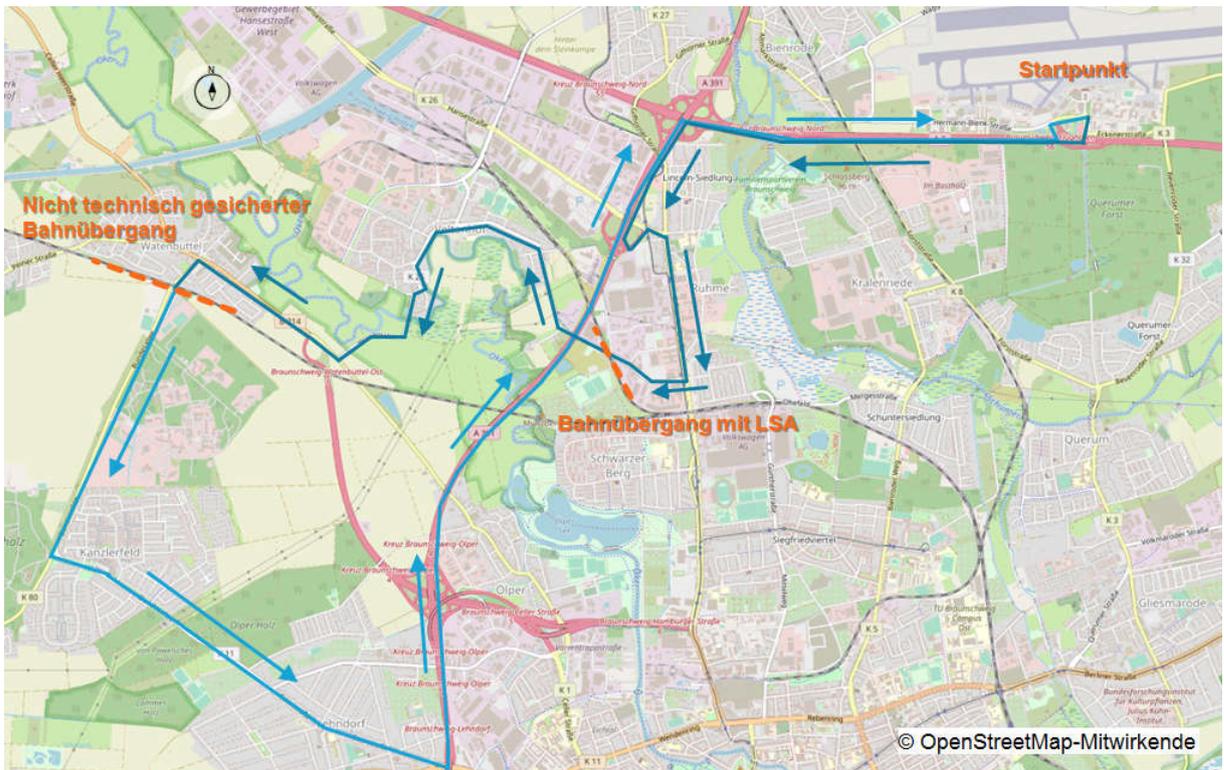


Abbildung 37. Route der Untersuchung 2 zum Blick- und Fahrverhalten von Autofahrern an unbeschränkten Bahnübergängen (eigene Abbildung basierend auf einem Kartenausschnitt aus © [OpenStreetMap](#)).

Anlage C – Schilder der Untersuchung zur Assoziationsstärke und dem Verständnis bahnübergangsbezogener Vorfahrtssymbolik

Tabelle 29

Verkehrszeichen der Teilaufgabe 1: Vorfahrt vs. Neutrale Schilder

Verkehrszeichen der Teilaufgabe 1: Vorfahrt vs. Neutrale Schilder

Vorfahrt

Neutrale Schilder



Quellen der Darstellungen: StVO (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013) und EBO (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1967)

Tabelle 30

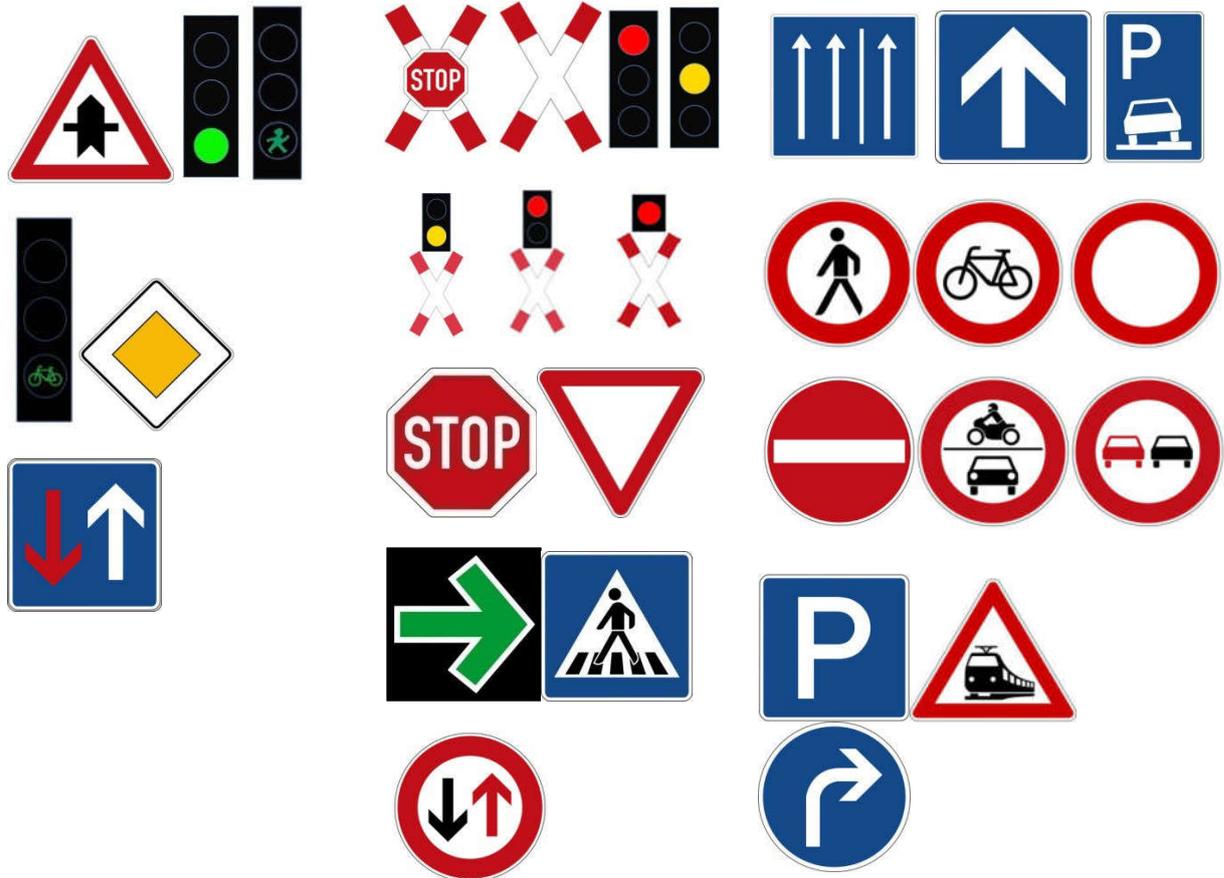
Verkehrszeichen der Teilaufgabe 2: Vorfahrt haben vs. Vorfahrt gewähren vs. Neutrale Schilder

Verkehrszeichen der Teilaufgabe 2: *Vorfahrt haben vs. Vorfahrt gewähren vs. Neutrale Schilder*

Vorfahrt haben

Vorfahrt gewähren

Neutrale Schilder

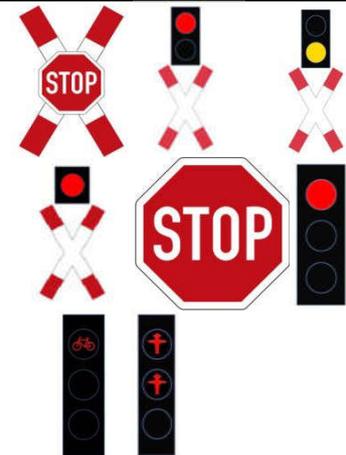
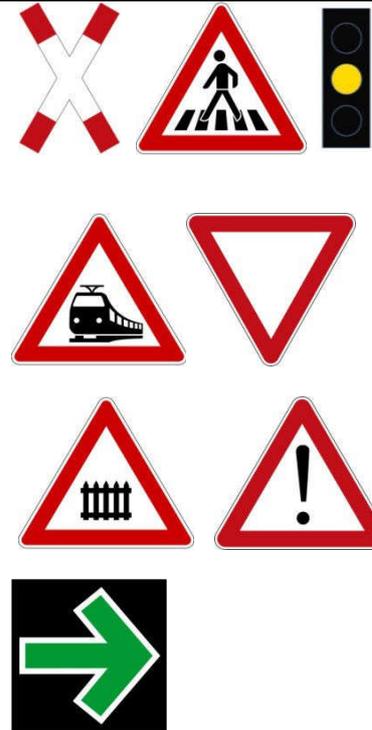


Quellen der Darstellungen: StVO (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013) und EBO (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1967)

Tabelle 31

Verkehrszeichen der Teilaufgabe 3: Halten vs. Erhöhte Bremsbereitschaft vs. Neutrale Schilder

Verkehrszeichen der Teilaufgabe 3: *Halten vs. Erhöhte Bremsbereitschaft vs. Neutrale Schilder*

Halten	Erhöhte Bremsbereitschaft	Neutrale Schilder
		

Quellen der Darstellungen: StVO (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 2013) und EBO (Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, 1967)

Anlage D – Adaptierte De Boer Skala zur Erfassung der subjektiv wahrgenommenen Blendung (Überarbeitung auf Grundlage von de Boer (1967))

Als wie blendend haben Sie die Lichtquellen soeben empfunden?

unerträglich

9

8

7

6

5

4

3

2

1

gerade bemerkbar

**Anlage E – Skala zur Erfassung des subjektiven Störeffindens
durch die Marker des Eye Tracking - Systems im Fahrzeug**

Wie störend fanden Sie die Marker im Fahrzeug während Ihrer Fahrt?

Sehr störend

9

8

7

6

5

4

3

2

1

Gar nicht störend

Anlage F – Positionen der Marker des Eye Tracking – Systems in der Untersuchungen zur Wirksamkeit peripherer Lichtreize auf das Blickverhalten von Autofahrern an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang



Abbildung 38. Eye Tracking - Marker im Versuchsfahrzeug

Anlage G – Route der Untersuchungen zur Wirksamkeit peripherer Lichtreize auf das Blickverhalten von Autofahrern an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang

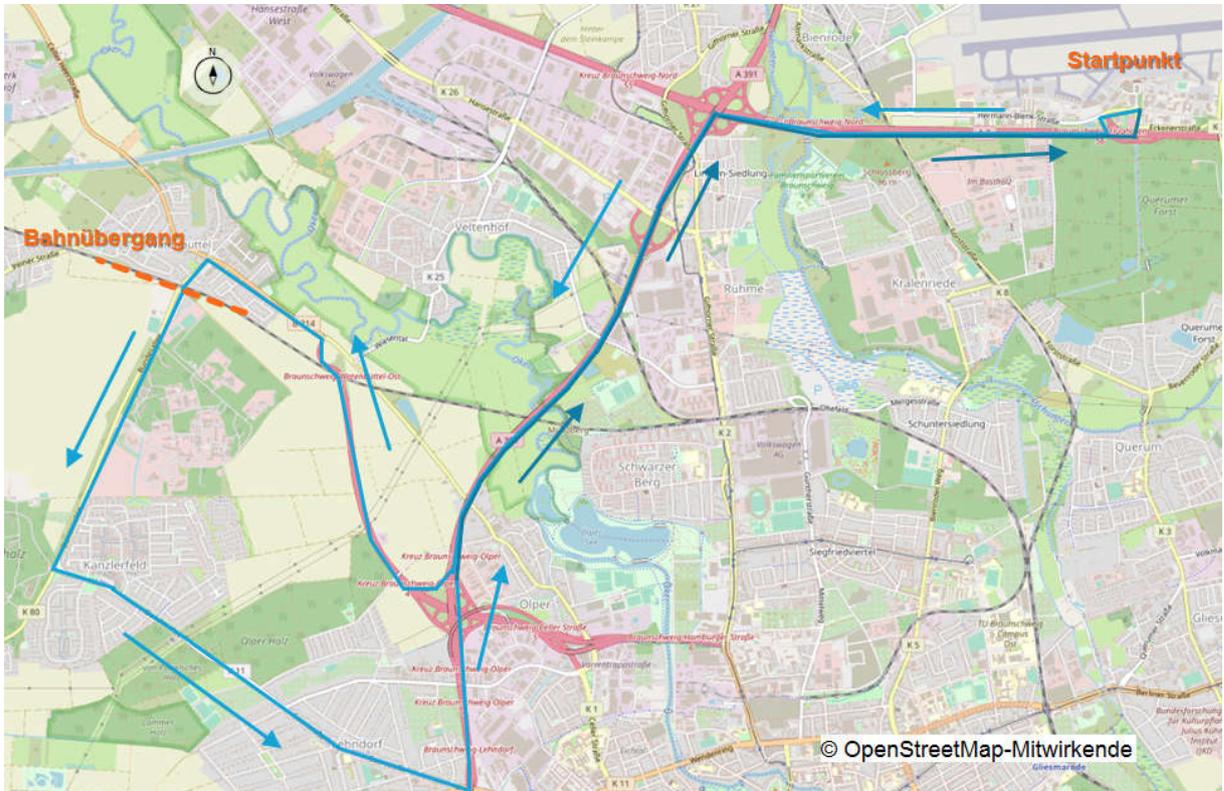


Abbildung 39. Versuchsstrecke für die Evaluation von PeriLight. Diese Strecke wurde sowohl für den Teilversuch bei Tageslichtbedingungen als auch im Teilversuch bei Dunkelheit genutzt (eigene Abbildung basierend auf einem Kartenausschnitt aus © [OpenStreetMap](#)).



Abbildung 40. Teilansicht der Versuchsstrecke für die Evaluation von PeriLight im Bereich des Bahnübergangs an der Hans-Jürgen-Straße / Bundesallee in Braunschweig (eigene Abbildung basierend auf einem Kartenausschnitt aus © [OpenStreetMap](https://www.openstreetmap.org/)).

Anlage H - Information für die Teilnehmer des Versuchs zur Wirksamkeit peripherer Lichtreize auf das Blickverhalten von Autofahrern an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang

Information für Versuchsteilnehmer

Herzlich willkommen und vielen Dank für Ihre Teilnahme!

Sie nehmen heute an einer Untersuchung zur Überprüfung der Wahrnehmung verschiedener Verkehrssituationen teil. Diese wird insgesamt ca. 2 Stunden dauern und mit 10€ pro angefangener Stunde vergütet.

Der Versuch beginnt mit einer kurzen Probefahrt. Danach folgt eine ca. 1 - stündige Versuchsfahrt. Dabei werden Sie mit dem Versuchsfahrzeug eine vorgegebene Strecke durch Braunschweig abfahren. Dabei werden die Fahrzeugumgebung und Sie als Fahrer per Video aufgezeichnet. Ebenso werden Geschwindigkeit und Position des Fahrzeugs aufgezeichnet. Zusätzlich dazu werden Ihre Blickbewegungen durch eine spezielle Brille aufgenommen, um Ihr Blickverhalten während in verschiedenen Verkehrssituationen nach dem Versuch analysieren zu können. Dabei sind Ihre individuellen Blickcharakteristika nicht von vorrangigem Interesse. Aus der Summe der Blickdaten aller Versuchsteilnehmer lassen sich in der Auswertung Schlüsse ziehen, welche Informationsquellen für das Fahren im alltäglichen Verkehrsgeschehen genutzt werden.

Nach Ende der Versuchsfahrt werden wir Sie bitten, noch einige Fragen zur Fahrt zu beantworten.

Die Teilnahme an dieser Untersuchung ist freiwillig. Sie können Ihre Teilnahme jederzeit ohne Probleme oder negative Folgen beenden. Ihre Daten werden selbstverständlich vertraulich behandelt. Sie werden in elektronischer Form gespeichert und so anonymisiert, dass später nicht zu erkennen ist, welche Versuchsperson welche Daten geliefert hat. Das bedeutet, dass Ihre persönlichen Angaben und die Messungen nur während der Studie über eine Kodierung zueinander zuzuordnen sind. Während der Auswertung sind Ihre Daten nur den Versuchsverantwortlichen zugänglich. Nach Beendigung der Auswertung werden Ihre persönlichen Angaben (inklusive Videomaterial) gelöscht und es bleiben nur noch die Messdaten verfügbar. Selbstverständlich können Sie auch jederzeit die weitere Verwendung Ihrer Daten untersagen.

Wenn Sie weitere Fragen haben, beantwortet der Versuchsleiter diese gerne!

Anlage I – Schriftliche Instruktion zum Versuch zur Wirksamkeit peripherer Lichtreize auf das Blickverhalten von Autofahrern an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang

Instruktion - Fahrversuch

Sie haben die Aufgabe, mit einem Auto einen vom Versuchsleiter angesagten Weg abzufahren. Bitte halten Sie sich an die Routenvorgaben, nur so kann eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sichergestellt werden. Die Bedienung sonstiger Instrumente im Fahrzeug (wie Radio, Navigationsgerät etc.) ist nicht erforderlich. Falls an einer Stelle Unklarheit über den weiteren Fahrtverlauf besteht, fragen Sie beim Versuchsleiter nach.

Während der Fahrt haben Sie keine spezielle Aufgabe, Sie sollen lediglich ihr natürliches Fahrverhalten zeigen. Halten Sie sich dabei bitte an die gültige StVO.

Bitte schalten Sie für den Zeitraum des Versuchs Ihr Mobiltelefon aus. Vermeiden Sie während der Fahrt Gespräche mit dem Versuchsleiter, es sei denn, Sie haben eine Frage zum Versuchsablauf. Ansonsten haben Sie bitte Verständnis dafür, dass der Versuchsleiter Ihnen nur knapp oder gar nicht antwortet.

Das Fahrzeug, mit dem Sie den Versuch absolvieren werden, ist ein Passat Variant. Bitte stellen Sie sich den Sitz so ein, dass Sie bequem sitzen, und passen Sie sich die Spiegel an. Bei dem Fahrzeug handelt es sich um einen Automatikwagen, beachten Sie also bitte, dass Sie während der Fahrt nicht schalten oder die Kupplung treten müssen.

Zuerst werden wir mit der Einstellung des Eye-Tracking Systems beginnen. Dies kann eine Weile dauern. Dazu werden Sie eine spezielle Brille aufsetzen, die während der Fahrt ihre Blickbewegungen aufzeichnet. Diese ist per Kabel mit einem Aufzeichnungsrechner verbunden. Während der Kalibrierung und der anschließenden Fahrt vermeiden Sie bitte das Anfassen der Brille, um eine korrekte Datenaufzeichnung zu gewährleisten. Es kann sein, dass Ihnen die Brille während der Fahrt etwas unangenehm wird oder sie etwas verrutscht. Sagen Sie in diesem Fall bitte dem Versuchsleiter Bescheid, sodass dieser eventuell die Einstellungen anpassen kann.

Falls Sie noch Fragen haben, können Sie sich jederzeit an den Versuchsleiter wenden!

Anlage J – Debriefing des Versuchs zur Wirksamkeit peripherer Lichtreize auf das Blickverhalten von Autofahrern an einem nicht technisch gesicherten Bahnübergang

Abschlussinformation

Zunächst vielen Dank, dass Sie an der Versuchsfahrt teilgenommen haben!

Wir möchten Ihnen nun zum Abschluss noch einige Informationen über den Hintergrund der Untersuchung geben. Hauptuntersuchungsgegenstand des Versuches ist das Blickverhalten von Autofahrern bei der Überfahrt von Bahnübergängen. Ursache für Unfälle an Bahnübergängen sind oft Autofahrer, die sich nicht entsprechend der Verkehrsregeln verhalten und aufgrund einer unzureichenden Prüfung des Gleisbereiches einen herannahenden Zug übersehen.

In einer früheren Studie zum Verhalten von Autofahrern an Bahnübergängen wurde festgestellt, dass lediglich ein Drittel aller Teilnehmer bei der Überfahrt die Fahrt verlangsamten und in beide Richtungen des Gleises schauten. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde am DLR ein infrastrukturseitiges Unterstützungssystem für nicht technisch gesicherte Bahnübergänge entwickelt, welches die Aufmerksamkeit des Fahrers in beide Richtungen des Gleises lenken soll.

Dieses Unterstützungssystem beruht auf blinkenden Lichtern, die auf beiden Seiten des Bahnübergangs 40m in Gleisrichtung positioniert waren. Sie haben bei der Überfahrt pulsierend geleuchtet. Anhand einer Stichprobe von Versuchsteilnehmern soll herausgefunden werden, ob es mit dem System gelingt, im Vergleich zu einer Kontrollbedingung ohne System, die Aufmerksamkeit stärker in Richtung des Gleises und damit eines potentiell herannahenden Zuges zu lenken.

Eidesstattliche Erklärung

„Ich versichere, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt, nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, alle benutzten Quellen und Hilfsmittel angegeben sowie wörtliche und sinngemäße Zitate gekennzeichnet habe.“

Ort, Datum

Unterschrift