

Ergonomische Auslegung einer Lichtleiste zur Kollisionsvermeidung

Dipl.-Ing. Martin Zademach¹, Dr.-Ing. Bettina Abendroth²

Architektur und Technologien Ingolstadt, Carmeq GmbH¹
Institut für Arbeitswissenschaft, TU Darmstadt²

Zusammenfassung

Zur Vermeidung von Frontalkollisionen bieten prädiktive Fahrerassistenzsysteme die Möglichkeit den Fahrer in kritischen Situationen zu warnen und zu einer Gegenmaßnahme zu bewegen. In diesem Zusammenhang wird das Fahrerwarnelement Lichtleiste untersucht, das den Fahrer durch optische Warnungen im Bereich der Scheibenwurzel unterstützt. Das Ziel dieses Beitrags ist die Darlegung von Erkenntnissen zur ergonomischen Auslegung eines derartigen Warnelements. Anhand von physikalischen Grundlagen, ergonomischen Auslegungsprinzipien und Ergebnissen einer Probandenuntersuchung werden Gestaltungsgrundlagen geschaffen. Berücksichtigt werden hierbei geometrische Eigenschaften des Signals sowie geeignete Signalverläufe im Warnkontext.

1 Motivation und Grundlagen

Die Effizienz warnender Assistenzsysteme wird neben der Leistungsfähigkeit der Sensorik besonders durch den gezielten Einsatz von Fahrerwarnelementen bestimmt. Durch die Auswahl geeigneter Warnmodalitäten ist der menschliche Informationsverarbeitungsprozess zu begünstigen, um kurze Reaktionszeiten und ein gewünschtes Fahrerverhalten zu erzielen (Hofmann, J. & Gayko, J. 2009).

Das Warnelement Lichtleiste bietet die Möglichkeit, den Fahrer vor kritischen Situationen zu warnen und zu Gegenmaßnahmen zur Entschärfung solcher Situationen zu bewegen (vgl. Maier 2011; Lind 2007). Nach Maier (2011) wirkt sich hierbei positiv aus, dass ein Lichtsignal peripher wahrgenommen werden kann und intuitiv als Bremsaufforderung fungiert, da es eine Analogie zu den Bremslichtern eines Vorderfahrzeugs bildet. Ein derartiges Signal einer Lichtleiste, welches in die Frontscheibe eingespiegelt wird, ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

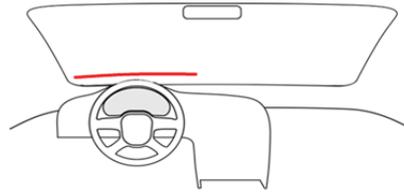


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer roten Signalleiste zur Vermeidung von Frontalkollisionen.

Es ist davon auszugehen, dass die geometrische Gestaltung sowie die Gestaltung des Signalverlaufs einen entscheidenden Einfluss auf die Effektivität einer Lichtleiste haben. Somit stellt sich die Frage, wie das Lichtsignal einer Lichtleiste idealerweise zu konzipieren ist, um eine adäquate Wahrnehmung und Akzeptanz durch den Fahrer sicherzustellen.

Nachfolgend werden zunächst die wichtigsten Gestaltungsparameter systematisiert, die eine Beeinflussung des Lichtsignals erlauben. Im Anschluss erfolgt die Darstellung einer Probandenuntersuchung, mit dem Ziel verschiedene Prinzipien der Erzeugung sowie unterschiedliche Signalverläufe des Lichtsignals hinsichtlich ihrer Eignung miteinander zu vergleichen.

1.1 Definition des Warnszenarios

Nach Hofmann und Gayko (2009) lassen sich Warnelemente anhand der Kriterien *Verzeihlichkeit*, *Abdeckungsrate* und *Informationsgehalt* klassifizieren. Diese Klassifizierung erlaubt eine an den Einsatzzeitpunkt und die Fahrsituation angepasste Gestaltung des Warnelements. In Abhängigkeit vom Warnkontext ergeben sich somit unterschiedliche Anforderungen an die Gestaltung einer Warnung.

So sind frühzeitiger einsetzende Warnungen verzeihlicher zu gestalten, da sie in der Regel, z.B. aufgrund unzuverlässigerer Sensordaten, mit einer höheren Anzahl an Fehlwarnungen belastet sind.

Bei zeitlich später einsetzenden Warnungen hingegen ist eine hohe Abdeckungsrate zu realisieren. Dies bedeutet, das Signal muss auffällig genug sein, um sicherzustellen, dass die Warnung den Fahrer erreicht.

Der Faktor Informationsgehalt beschreibt den Grad der Informationsaufbereitung bzw. wie viele Schritte der Informationsverarbeitung dem Fahrer abgenommen werden. Hoffmann und Gayko (2009) unterscheiden zwischen den Stufen aufmerksamkeitsregend, hinweisend auf die Situation und hinweisend auf die Aktion.

Um den unterschiedlichen Anforderungen an die Gestaltung von Warnelementen bei verschiedenen Einsatzzeitpunkten Rechnung zu tragen, werden im Weiteren exemplarisch die Warnstufen Akutwarnung und Vorwarnung behandelt. Diese Warnstufen werden wie folgt definiert:

Vorwarnung – Die Ausgabe eines Lichtsignals erfolgt zeitlich früher, als bei einer Akutwarnung. Tritt nach der Vorwarnung keine Fahrerreaktion auf, so steigt die Kritikalität und es wird eine Akutwarnung ausgegeben.

Akutwarnung – Die Ausgabe eines Lichtsignals erfolgt in einer sehr kritischen Situation. Es ist ein unmittelbarer Eingriff des Fahrers erforderlich, um einen Unfall zu vermeiden.

1.2 Gestaltungsgrößen

Durch unterschiedliche Parametrierung der Gestaltungsgrößen *Prinzip der Signalerzeugung*, *geometrische Gestaltung* und *Signalverlauf* lassen sich eine Vielzahl an Ausprägungen von Lichtsignalen erzeugen, die zu unterschiedlichen Klassifizierungen anhand der Kriterien Verzeihlichkeit, Abdeckungsrate und Informationsgehalt führen. Im Folgenden werden diese Gestaltungsgrößen beschrieben.

1.2.1 Prinzip der Signalerzeugung

Zur Erzeugung eines optischen Signals im Bereich der Scheibenwurzel bestehen folgende Möglichkeiten:

Direkt sichtbares Signal – Das Licht wird direkt in Richtung des Fahrers emittiert. Das Signal erscheint für den Fahrer unterhalb der Frontscheibe auf der Schalttafel. Abbildung 2 stellt das Prinzip eines direkt sichtbaren Signals dar.

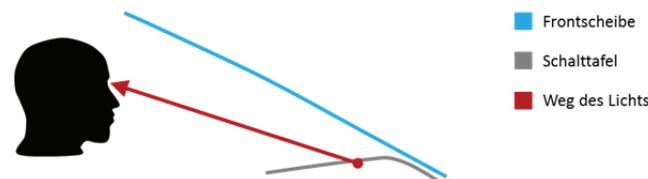


Abbildung 2: Prinzip eines direkt sichtbaren Signals

Eingespiegeltes Signal – Das Lichtsignal wird im durchsichtigen Bereich der Frontscheibe eingespiegelt. Dementsprechend erscheint das Signal für den Fahrer oberhalb der Schalttafel. Das emittierte Licht erreicht in diesem Fall das Auge des Fahrers über eine spiegelnde Reflexion an der Frontscheibe. Die Reflexion verhält sich entsprechend dem Reflexionsgesetz auf spiegelnden Oberflächen (Einfallswinkel=Ausfallswinkel). Die Reflexion führt weiterhin zu einem virtuellen Bild. Dies bedeutet, dass das für den Fahrer sichtbare Signal nicht direkt auf der Frontscheibe liegt, sondern in geringem Abstand vor der Frontscheibe über der Motorhaube schwebt. Hierbei entspricht der Abstand zwischen Signal und Frontscheibe dem Abstand zwischen Lichtquelle und Reflexionspunkt auf der Frontscheibe. Abbildung 3 veranschaulicht die Funktionsweise eines eingespiegelten Signals.

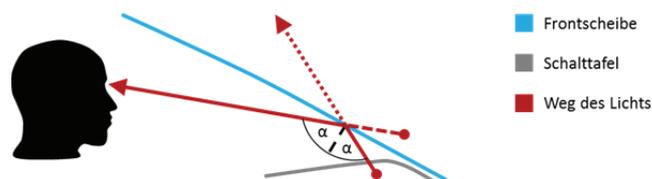


Abbildung 3: Prinzip eines in die Frontscheibe eingespiegelten Signals.

1.2.2 Geometrische Gestaltung

Mit den dargelegten Prinzipien der Signalerzeugung ist eine Vielzahl an geometrischen Ausprägungen des Signals umsetzbar. Die entscheidenden Parameter zur Generierung unterschiedlicher geometrischer Ausprägungen werden nachfolgend beschrieben.

Höhe der Signalposition – Die Höhe eines direkt sichtbaren Signals wird im Wesentlichen durch die Höhe und Form der Schalttafel festgelegt. Die Höhe der Signalposition eines eingespiegelten Signals ist weitestgehend frei. Die Höhe wird hauptsächlich durch das Reflexionsgesetz und dem für das Element zur Lichterzeugung zur Verfügung stehenden Bauraum eingeschränkt. Je höher das Signal in der Frontscheibe eingeblendet wird, desto weiter ist die Austrittsfläche des Signals auf der Schalttafel in Richtung des Fahrers positioniert.

Signalausdehnung in Querrichtung des Fahrzeugs – Prinzipiell ist eine Vielzahl verschiedener Ausdehnungen denkbar. Die Extreme bilden hierbei ein Signal, das sich über die gesamte Breite der Schalttafel erstreckt sowie ein punktförmiges Lichtsignal vor dem Fahrer. Im vorliegenden Artikel wird sich auf die Untersuchung eines Signals beschränkt, das sich über die gesamte Breite der Schalttafel erstreckt.

1.2.3 Signalverlauf

Zusätzlich zur Wahl des Erzeugungsprinzips und zur geometrischen Gestaltung, ergeben sich Möglichkeiten der Parametrierung durch die Ansteuerung bzw. Auswahl der Lichtelemente:

Signalhelligkeit – Das Ziel ist die Festlegung einer geeignet Leuchtdichte des Signals, die die Wahrnehmung durch den Fahrer sicherstellt und gleichzeitig eine Blendung vermeidet. Die Signalhelligkeit kann gezielt genutzt werden, um unterschiedliche Wirkungen zu erzielen. So besteht z.B. die Möglichkeit ein glimmendes Signal, das über eine niedrige Helligkeit verfügt und somit sehr verzeihlich wirkt, zu erzeugen. Im Gegensatz dazu verfügt ein Signal mit einer sehr hohen Helligkeit über eine geringe Verzeihlichkeit und eine hohe Abdeckungsrate. Darüber hinaus ist der Einfluss von Tageszeiten zu berücksichtigen. So muss die Signalleuchtdichte bei Tag ein Vielfaches der Leuchtdichte bei Nacht betragen, um eine ausreichende Wahrnehmbarkeit zu erreichen. Umgekehrt ist eine zu hohe Leuchtdichte bei Nacht zu vermeiden, um eine Blendung des Fahrers auszuschließen (DIN EN ISO 15008, 2009). Die große Bandbreite der erforderlichen Helligkeiten zeigt, dass eine Regelung der Signalleuchtdichte in Abhängigkeit von der Umgebungshelligkeit zwingend erforderlich ist.

Signalfrequenz – Die Möglichkeiten erstrecken sich von konstant leuchtenden Signalen bis hin zu blinkenden Signalen. Entsprechend DIN EN ISO 15008 sollte die Frequenz für ein blinkendes Signal zwischen 1 Hz und 5 Hz liegen.

Signalfarbe – Nach DIN EN 981 (2009) sind für die Darbietung von Informationen in Abhängigkeit von der erwünschten Bedeutung die Farben Rot, Gelb, Blau und Grün zu nutzen. Entsprechend des Einsatzes des Lichtsignals im Gefahrenkontext wird die Farbe Rot gewählt. Die vorliegende Untersuchung behandelt daher ausschließlich rote Signale.

2 Probandenuntersuchung zur Bewertung von Erzeugungsprinzipien und von Signalverläufen

Im Rahmen von Standversuchen mit Probanden wurden geeignete Parameter der Gestaltungsgrößen *Prinzip der Signalerzeugung*, *Geometrie* und *Signalverlauf* ermittelt. Hierbei befanden sich die Probanden während der Untersuchung im Versuchsfahrzeug und erlebten unterschiedliche Signalvarianten. Die Versuche fanden unter konstanten Umgebungsbedingungen mit einer künstlichen Beleuchtung statt. Von den Versuchspersonen wurden unter-

schiedliche Signale hinsichtlich der Kriterien Verzeihlichkeit und Abdeckungsrate subjektiv beurteilt. Bevor den Probanden ein Signal präsentiert wurde, wurden sie gebeten die Fahrbahn auf einem Bild vor dem Fahrzeug zu fixieren. Einer tatsächlichen Fahraufgabe waren die Probanden nicht ausgesetzt.

2.1 Versuchsaufbau und Stichprobe

Als Versuchsfahrzeug diente beispielhaft ein Audi S5 Coupé. In dieses Fahrzeug wurden mehrere Einrichtungen zur Signalerzeugung verbaut, die es erlaubten eine Vielzahl unterschiedlicher Lichtsignale zu erzeugen.

Zur Darstellung der Signale wurden drei Lichtleisten in das Fahrzeug integriert. Hierbei erzeugte eine der Leisten ein direkt sichtbares Lichtsignal, die anderen beiden Leisten erzeugten ein in die Frontscheibe eingespiegeltes Signal. Die eingespiegelten Signale verfügten über eine unterschiedliche Höhe der Signalposition. Hierbei war ein Signal unmittelbar oberhalb des Schwarzarandes an der Scheibenwurzel sichtbar (niedriges eingespiegeltes Signal). Ein weiteres Signal lag ca. 50 mm oberhalb des niedrig eingespiegelten Signals (hoch eingespiegeltes Signal). Alle drei Leisten erlaubten eine freie Parametrierung der Größen Signalhelligkeit und Signalfrequenz. Abbildung 4 zeigt schematisch die Lichtsignale der verbauten Lichtleisten. Die Helligkeit wurde vor Beginn der Untersuchung durch Experten der Fachrichtungen Ergonomie und Lichttechnik an die Umgebungsbedingungen der Versuchsumgebung angepasst.

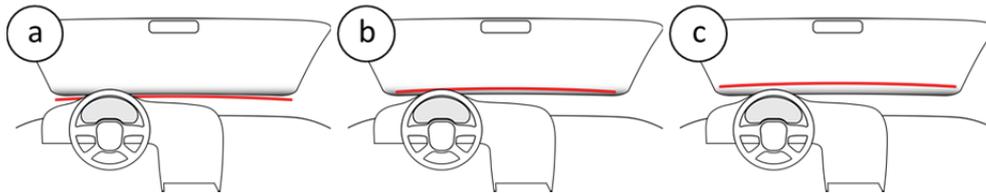


Abbildung 4: Untersuchte Erzeugungsprinzipien der Lichtleiste. (a) direkt sichtbares Signal, (b) niedrig eingespiegeltes Signal, (c) hoch eingespiegeltes Signal.

Zu jedem Prinzip der Signalerzeugung wurden den Probanden jeweils ein konstant leuchtendes (hohe Helligkeit), ein blinkendes (hohe Helligkeit) und ein glimmendes Signal (niedrige Helligkeit) präsentiert. Die Frequenz des blinkenden Signals betrug 2,5 Hz.

Die einzelnen Signale wurden den Probanden jeweils für 4 s gezeigt. Um Reihenfolgeeffekte auszuschließen, wurden die Signale in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Um ein möglichst natürliches Blickverhalten zu erzeugen, wurden die Probanden gebeten einen Punkt vor dem Fahrzeug zu fixieren, bevor ein Signal präsentiert wurde. Hierzu wurde als Kulisse das Bild einer Straße im Posterformat vor dem Versuchsfahrzeug positioniert.

Die einzelnen Signale wurden in strukturierten Probandeninterviews hinsichtlich der Kriterien Verzeihlichkeit und Abdeckungsrate von den Probanden bewertet (Um eine gute Verständlichkeit der Versuche gegenüber den Probanden zu erzielen wurden die Kriterien Verzeihlichkeit und Abdeckungsrate durch die komplementären Items Störungsmaß und Aufmerksamkeitserregung abgefragt). Hierbei wurde eine sechsstufige Skala von „---“ bis „+++“

genutzt. Zur Erzeugung von Mittelwerten wurden den Skalenstufen bei der Auswertung die Zahlen von 1 bis 6 zugeordnet („--“ = 1; „+++“ = 6).

Das Probandenkollektiv bestand aus 48 Probanden mit einem Durchschnittsalter von 30 Jahren. Hiervon waren 11 Personen weiblich und 37 männlich. Die Körpergröße lag zwischen 1,51 und 1,95 mit einem Mittel von 1,78. Alle Probanden verfügten über Erfahrungen mit Fahrerassistenzsystem wie z.B. ACC oder Totwinkelassistent. Häufig oder regelmäßig werden diese jedoch nur von den wenigsten Probanden genutzt.

2.2 Ergebnisse

Die Auswertung erfolgte mittels zweifaktorieller Varianzanalysen mit den dreistufigen Faktoren *Prinzip der Signalerzeugung* und *Signalverlauf*. Vergleicht man den Einfluss vom Prinzip der Signalerzeugung, so zeigt sich, dass besonders ein hoch eingespiegeltes Signal die Aufmerksamkeit des Fahrers erregt ($MW_{\text{Frontscheibe}}=5,2$). Hoch signifikant weniger aufmerksamkeitserregend wirken das niedrig eingespiegelte Signal ($MW_{\text{Schwarzrand}}=4,5$) sowie das direkt sichtbare Signal ($MW_{\text{Direkt}}=4,7$), welche auf einem ähnlich Niveau liegen.

Der Haupteffekt des Faktors Signalverlauf zeigt sich darin, dass ein blinkendes Signal ($MW_{\text{blinkend}}=5,5$) die höchste und ein glimmendes Signal ($MW_{\text{glimmend}}=3,9$) die geringste Aufmerksamkeit erregen. Zwischen diesen Signalverläufen befinden sich das konstant leuchtende Signal ($MW_{\text{konstant}}=4,9$). Bonferroni korrigierte Post-Hoc-Analysen belegen, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Signalverläufen jeweils hoch signifikant sind.

Die Ergebnisse zu den Kriterien Aufmerksamkeitserregung und Störungsmaß sind in Abbildung 6 dargestellt.

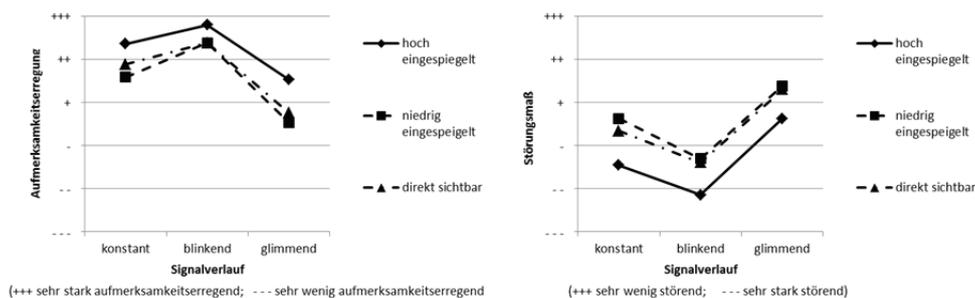


Abbildung 5: Ergebnisse der Items Aufmerksamkeitserregung und Störungsmaß für die untersuchten Grunderscheinungsformen und Signalverläufe.

2.3 Erkenntnisse zur Signalgestaltung

Bezüglich der Aufmerksamkeitserregung zeigt sich, dass mit einem hoch eingespiegelten Signal die größte Wirkung erzielt werden kann. Offenbar fördert die Position nahe der Sehachse die Wahrnehmung des Signals durch den Fahrer. Die bessere Wahrnehmung geht einher mit einer geringeren Verzeihlichkeit. Entsprechend der Empfehlungen von Hoffmann und Gayko zum Einsatz von Warnelementen eignet sich daher das hoch eingespiegelte Signal besonders bei späten und kritischen Einsatzzeitpunkten, bei denen eine hohe Aufmerksamkeitserregung notwendig und eine geringe Verzeihlichkeit zulässig ist. Im Gegenzug sind ein

niedrige eingespiegeltes Signal sowie ein direkt sichtbares Signal für frühzeitigere Einsatzzeitpunkte geeigneter.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass durch Modulation des Signalverlaufs eine starke Beeinflussung der Aufmerksamkeitserregung und der Verzeihlichkeit möglich ist. Mittels eines blinkenden Signals wird allgemein die höchste Aufmerksamkeitserregung und die niedrigste Verzeihlichkeit erreicht. Die niedrigste Aufmerksamkeit erzeugt erwartungsgemäß ein glimmendes Signal. Zwischen diesen Extremen befindet sich das konstant leuchtende Signal, wobei die Aufmerksamkeitserregung eines konstant leuchtenden Signals signifikant höher ist, als beim gestuften Signal.

2.3.1 Erkenntnisse zur Gestaltung einer Akutwarnung

Um eine hohe Abdeckungsrate des Signals zu gewährleisten ist ein Signalverlauf mit hoher Aufmerksamkeitserregung zu wählen. Die Ergebnisse der Studien zeigen, dass hierfür ein glimmendes Signal nicht auffällig genug ist. Ein blinkendes Signal führt zur höchsten Aufmerksamkeitserregung. Dennoch führt auch ein konstant leuchtendes Signal in Verbindung mit einem hohen Anzeigeort zu einer hohen Bewertung der Aufmerksamkeitserregung. Das konstant leuchtende Signal könnte daher als Alternative genutzt werden, wenn eine zu geringe Verlässlichkeit der Warnung, z.B. aufgrund beschränkter Sensorleistung, zu erwarten ist. Auf dieser Weise wird eine höhere Verzeihlichkeit des Signals ermöglicht.

2.3.2 Erkenntnisse zur Gestaltung einer Vorwarnung

Für eine Vorwarnung ist ein Signalverlauf notwendig, der über ein moderates Störungsmaß verfügt. Dementsprechend ist ein konstant leuchtendes oder ein glimmendes Signal zu verwenden. Auch bei einem glimmenden Signal ist mit einer noch ausreichenden Aufmerksamkeitserregung zu rechnen. Dies wird verdeutlicht durch die Probandenbewertungen für das glimmende Signal, welche für alle Erzeugungsprinzipien im positiven Bereich liegen.

3 Diskussion und Ausblick

Durch die Systematisierung von relevanten Grundlagen wurden Rahmenbedingungen für den Einsatz einer Lichtleiste als Warnelement definiert. Durch Probandenversuche wurde weiterhin die Wirkung von Prinzipien der Signalerzeugung auf die Wahrnehmung des Fahrers untersucht. Somit konnten Empfehlungen für die Gestaltung von Vor- und Akutwarnung einer Lichtleiste ermittelt werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse liefern einen Ausgangspunkt für weitere Untersuchungen einer Lichtleiste als Warnelement. Hierbei müssen die vorliegenden Ergebnisse besonders im Rahmen von Fahrversuchen validiert werden. Fahrversuche sollten ebenfalls genutzt werden um den möglichen Einsatzzeitbereich des Warnelements zu präzisieren. Hierbei ist auch die Akzeptanz des Fahrers gegenüber frühen Einsatzzeitpunkten und damit einhergehenden Fehlauflösungen zu bewerten. Nicht zuletzt bedarf die Anpassung der Signalleuchtdichte an die Umgebungshelligkeit umfassende Versuche bei verschiedensten Umweltbedingungen.

Literaturverzeichnis

- Bartenbach, C. & Witting, W. (2009). *Handbuch für Lichttechnik: Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen. 1. Auflage.* Wien: Springer-Verlag.
- DIN EN 981 (2009). *Sicherheit von Maschinen – System akustischer und optischer Gefahrensignale und Informationssignale.* Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 15008 (2008). *Straßenfahrzeuge – Ergonomische Aspekte von Fahrerinformations- und Assistenzsystemen – Anforderungen und Bewertungsmethoden der visuellen Informationsdarstellung im Fahrzeug.* Berlin: Beuth.
- Hoffmann, J. & Gayko, J. (2009). *Fahrerwarnelemente.* In Winner, H., Hakuli, S. & Wolf, G. (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. 1. Auflage.* Wiesbaden: Vieweg + Teubner, S. 343 – 354.
- Lind, H. (2007). *An Efficient Visual Forward Collision Warning Display for Vehicles.* In *IVI Technology and Intelligent Transportation Systems. 2007 World Congress Detroit, Michigan.* Warrendale: SAE International.
- Maier, K. et al. (2011). „Multimodaler Warnbaukasten“: *eine neue Warnphilosophie für Fahrerassistenzsysteme.* In *VDI-Tagung Der Fahrer im 21. Jahrhundert: Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit.* Düsseldorf: VDI-Verlag.

Kontaktinformationen

Dipl.-Ing. Martin Zademach
Carneq GmbH
Architektur und Technologien Ingolstadt
Friedrichshofenerstraße 1
85049 Ingolstadt

Dr.-Ing. Bettina Abendroth
Technische Universität Darmstadt
Institut für Arbeitswissenschaft
Petersenstraße 30
64287 Darmstadt