

2 Theoretischer Hintergrund

Für die menschenzentrierte Entwicklung innovativer Fahrerassistenzsysteme werden zum besseren Verständnis der Mensch-Maschine-Interaktion die verschiedenen Schritte und Bedingungen der Informationsverarbeitung betrachtet (Abschnitt 2.1). Damit einhergehend werden die verschiedenen Prozesse der Fahrzeugführung erläutert. Um die Fahrmanöver mit Unterstützungsbedarf zu eruieren, wird eine Unfallanalyse durchgeführt (Abschnitt 2.2). Der Stand der Forschung wird durch die Vorstellung relevanter Studien zur Fahrerunterstützung in der Geschwindigkeitsbegrenzung, dem Spurwechsel und dem Einfädelmanöver dargelegt (Abschnitt 2.3). Anschließend wird der aktuelle Stand der Technik vorgestellt (Abschnitt 2.4). Abschnitt 2.5 fasst die Erkenntnisse dieses Kapitels zusammen.

2.1 Relevante Modelle zum Fahrverhalten

Die Fahrzeugführung erfordert eine kontinuierliche Informationsverarbeitung, welche durch viele Faktoren beeinflusst wird (Abendroth & Bruder, 2012). Die Fahraufgabe des Menschen kann weiterführend in mehrere Teilaufgaben gegliedert werden (Donges, 2012). In den folgenden Abschnitten werden ausgewählte Modelle zum Fahrverhalten vertiefend erläutert.

2.1.1 Informationsverarbeitungsmodell des Menschen

Wickens et al. (2012) stellen ein allgemeines Modell zur Informationsverarbeitung des Menschen vor, welches verschiedene Verarbeitungsstufen präsentiert (Abbildung 2.1). Charakteristisch sind der dynamische und teils parallele Ablauf der Verarbeitungsstufen, weil der Mensch während einer Handlungsausführung bereits weitere Informationen aufnehmen und verarbeiten kann. Ein konkreter Start- und Endpunkt existiert in diesem Modell nicht. Ein Gedanke, eine Inspiration oder eine Intention, welche durch Informationen im Langzeitgedächtnis bewirkt wird, kann die Informationsverarbeitung ebenfalls auslösen.

Die Verarbeitungsstufen werden nacheinander (Abbildung 2.1) erläutert. Das *Sensory Processing* beschreibt die **Verarbeitung von Informationen** in der Umgebung, welche mit all unseren Sinnen (v. a. visuell, akustisch und haptisch) aufgenommen werden. Die aufgenommenen Informationen verweilen maximal eine Sekunde im menschlichen Ultrakurzzeitspeicher (*short term sensory store* (STSS)). Ausgelöst durch einen sensorischen Input wird einem Bruchteil dieser Informationen eine Bedeutung zugeschrieben. Dieser Vorgang wird mit der Stufe der **Wahrnehmung** (*perception*) beschrieben. In einem weiteren Verarbeitungsschritt werden die Informationen tiefgehend und somit zeitaufwändiger verarbeitet. Während dieses **Kognitionsprozesses** (*cognition*) gelangen die Informationen in das Arbeitsgedächtnis (*working memory*). Dort werden diese interpretiert und mit vorhandenen

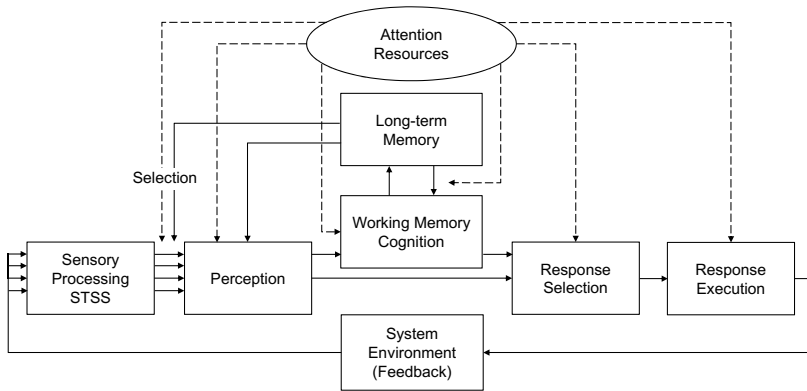


Abbildung 2.1: Informationsverarbeitungsmodell. Eigene Darstellung nach Wickens et al. (2012).

Informationen aus dem Langzeitgedächtnis (*long-term memory*) abgeglichen. Die Wahrnehmung und Kognition sollten nicht als einzelne Stufen, sondern als ein kontinuierlicher Prozess verstanden werden. Ist es möglich, die wahrgenommenen Informationen ohne tiefere mentale Verarbeitung zu interpretieren, wird die Kognitionsstufe übersprungen und die Information direkt zur **Handlungsauswahl** (*response selection*) verwendet.

Es kann somit zwischen vertrauten Handlungen ohne eine explizite Entscheidung und Handlungen, die auf einem Entscheidungsprozess basieren, unterschieden werden (Bubb, Bengler, Grünen & Vollrath, 2015). Letztere können durch die Kapazität des Kurzzeitgedächtnisses beschränkt werden und benötigen mehr Zeit für die Handlungsauswahl. Zur besseren Einordnung der möglichen Prozesse eignet sich die Kategorisierung von Rasmussen (1983). Er unterscheidet bei der Handlungsauswahl zwischen drei verschiedenen Verhaltensebenen, welche je nach Aufgabenart und den individuellen Erfahrungen den Menschen zu einer Entscheidung führen.

- Die **fertigkeitsbasierte Verhaltensebene** umfasst sensomotorische Handlungen, die ohne eine bewusste Regulation auftreten und als automatisierte, reibungslose und hochintegrierte Verhaltensmuster charakterisiert werden. Diese führen zu einer hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit und einer raschen Reaktion durch automatische Prozesse, die kaum Aufmerksamkeit benötigen.
- Die **regelbasierte Verhaltensebene** ist kognitiv anspruchsvoller und beschreibt einfache Entscheidungsvorgänge, welche auf Basis von gespeicherten Regeln ablaufen. Diese Regeln basieren sowohl auf empirischen Erfahrungen als auch auf gelesenen oder kommunizierten Verhaltensregeln.
- Die **wissensbasierte Verhaltensebene** wird bei unbekannten, neuen Situationen angewandt. Es liegen keine Regeln vor, auf die der Mensch sich beziehen kann. Die effektivste

Handlung wird aufgrund einer Situationsanalyse und persönlichen Präferenzen festgelegt. Die regel- und die wissensbasierte Ebenen stellen kontrollierte Prozesse dar, welche mehr Aufmerksamkeit als die fertigkeitbasierte Ebene fordern.

Basierend auf der Handlungsauswahl folgt anschließend die **Handlungsausführung** (*response execution*) (Wickens et al., 2012). Das Feedback, welches durch die Handlung ausgelöst wird, setzt den Informationsverarbeitungsprozess erneut in Gang. Wie in Abbildung 2.1 dargestellt, wirkt die Aufmerksamkeit (*attention resources*) als Filter der auf- und wahrgenommenen Informationen sowie als Ressource, welche in allen Stufen des Prozesses benötigt wird, auf die Informationsverarbeitung ein.

Vollrath (2015) überträgt das psychologische Grundmodell der Informationsverarbeitung des Menschen auf die Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Ausgehend von Informationen aus der Umwelt und Informationen von Displays und Anzeigeelementen folgen auch hier die typischen vier Verarbeitungsstufen **Wahrnehmung** von Informationen, Interpretation und **Verständnis** von deren Bedeutung, **Entscheidung** und Handlungsplanung mit der abschließenden **Ausführung** der ausgewählten Handlung mithilfe von Bedienelementen des technischen Systems. Dieses erteilt wiederum ein Feedback und stellt neue Informationen zur Verarbeitung bereit (Abbildung 2.2).

In Einklang mit Wickens et al. (2012) hebt auch Vollrath (2015) die Bedeutung der Aufmerksamkeit hervor. Je mehr Mensch und Maschine miteinander interagieren, desto wichtiger ist die Wahrnehmung der von der Maschine bereitgestellten Informationen für den Menschen. Vor diesem Hintergrund entwickelten Wickens und Horrey (2009) das SEEV-Modell zur

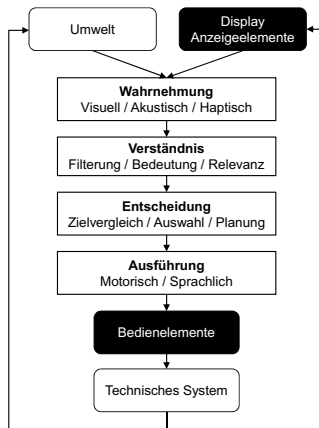


Abbildung 2.2: Informationsverarbeitungsmodell bei der Interaktion mit einer Maschine. Eigene Darstellung nach Vollrath (2015).

Vorhersage der visuellen Aufmerksamkeitsausrichtung des Menschen. Das Modell nimmt an, dass die Informationen in der Umwelt aufgrund eines Engpasses bei der Informationswahrnehmung gefiltert werden. Dabei wird zwischen der unwillkürlichen (bottom-up) und der gezielten (top-down) Aufmerksamkeitsausrichtung unterschieden. Die Betitelung „SEEV-Modell“ steht dabei für die vier relevanten Faktoren der Aufmerksamkeitslenkung: *Salience, Effort, Expectancy, Value* (Abbildung 2.3).

Der bottom-up-Faktor **Salienz** (*saliency*) stellt die intuitivste Komponente des Modells dar und beruht auf der Annahme, dass Aufmerksamkeit durch saliente Ereignisse im visuellen Feld erfasst wird. Dies beschreibt das plötzliche Erscheinen von Objekten, die Unterschiedlichkeit bezüglich einer bestimmten Eigenschaft (z. B. Farbe) oder eine schnelle Annäherung (Vollrath & Krems, 2011). Wichtig ist hierbei, dass die Salienz visueller Objekte oder Ereignisse von der Lage auf der Netzhaut abhängt (foveal oder peripher) (Wickens & Horrey, 2009). Der zweite Faktor zur unwillkürlichen Aufmerksamkeitsausrichtung ist die **Anstrengung** (*effort*), welche als eine hemmende Komponente anzusehen ist. Je weiter die Information von dem aktuellen Aufmerksamkeitsfokus entfernt liegt, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese wahrgenommen wird, da der Mensch gerne Anstrengung vermeidet.

Die kognitive, bewusste Kontrolle der Aufmerksamkeit (top-down) wird zum einen durch die **Erwartung** (*expectancy*) geleitet. Diese beschreibt die Tendenz des Menschen, dorthin zu schauen, wo er die aufgabenrelevantesten Informationen erwartet. Dieser Faktor ist als optimaler Treiber charakterisiert. Zum anderen wird die gezielte Aufmerksamkeitslenkung durch den **Wert** (*value*) der Information bestimmt. Informationen, die für eine Aufgabe nützlich sind (oder kostspielig, wenn man sie nicht beachtet) werden Ereignissen vorgezogen, welche für die Aufgabe nicht relevant sind.

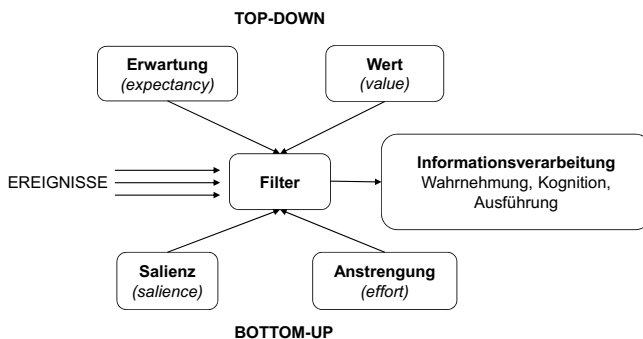


Abbildung 2.3: SEEV-Modell. Eigene Darstellung nach Vollrath und Krems (2011).

Neben der Wahrnehmung der bereitgestellten Information ist für das sichere Führen eines Fahrzeugs unumgänglich, dass der Fahrer diese Informationen korrekt interpretiert und in seiner Handlungsplanung berücksichtigt. Das Konzept des Verstehens und der Antizipation ist im Bereich der Luftfahrt seit mehreren Jahrzehnten unter dem Begriff **Situationsbewusstsein** (engl. *situation awareness*) bekannt und wird breit diskutiert (u. a. Endsley, 1995, 2000; Krems & Baumann, 2009; Rauch, 2009). Das ursprüngliche Modell stammt von Endsley (1988, 1995) und definiert Situationsbewusstsein als „*the perception of the elements in the environment within a volume of time and space, the comprehension of their meaning, and the projection of their status in the near future*“ (Endsley, 1995, S. 5). Somit können drei Stufen in dem Modell unterschieden werden:

- Level 1: Die **Wahrnehmung** von Elementen in einer dynamischen Umgebung. Diese Elemente können z. B. Straßenverläufe, andere Verkehrsteilnehmer, Straßenschilder oder Wetterverhältnisse sein.
- Level 2: Das **Verstehen** der Situation. Die Elemente müssen verstanden werden, um die Anforderungen der Situation einschätzen zu können und ein sicheres und effizientes Fahren zu gewährleisten. In Bezug auf das Beispiel der Straßenverläufe sollte eine wahrgenommene, scharfe Kurve als potentielle Gefahr verstanden werden.
- Level 3: Die **Vorhersage** der Weiterentwicklung der Situation (Zustände der Elemente in naher Zukunft), um daraus zu schließen, wie die Handlungen angepasst werden müssen. Hinsichtlich der aufkommenden, scharfen Kurve sollte das Fahrverhalten angepasst werden. Ist die Geschwindigkeit dem Straßenverlauf nicht angemessen gewählt, sollte z. B. eine Bremsung eingeleitet werden.

Eine Vielzahl von personenabhängigen Faktoren (Ziele, Erwartungen, individuelle Fähigkeit) und aufgabenabhängigen Faktoren (Stress, Komplexität, Systemgestaltung) wirken auf die kognitiven Prozesse der mentalen Repräsentation einer Fahrsituation ein (Abbildung 2.4).

Die kognitiven Prozesse, v. a. das Verstehen der wahrgenommenen Elemente und die daraus entstehende Vorhersage, werden in dem Modell von Endsley (1988, 1995) jedoch nur unzureichend erläutert (Krems & Baumann, 2009). Zudem gibt es keine Annahme, wie die verschiedenen Ebenen miteinander interagieren. Als Erweiterung des Modells schlugen Krems und Baumann (2009) daher die Berücksichtigung von Theorien zum Sprachverständnis und zur Aufmerksamkeitslenkung vor und integrieren das ergänzte Modell in den Fahrkontext. Sie gehen davon aus, dass das Verstehen der wahrgenommenen Elemente mithilfe kognitiver Prozesse geschieht, welche der *construction-integration-theory* von Kintsch (1998) zum Sprachverständnis ähneln. Sie identifizieren zwei Phasen zum Verstehen der Elemente: In der *construction phase* werden vorhandene Wissensstrukturen im Langzeitgedächtnis durch die wahrgenommenen Elemente aktiviert. Dieser Prozess läuft unstrukturiert und automatisch ab. In der *integration phase* wird eine Ordnung geschaffen: Kompatibles Wissen wird aktiviert gehalten, während irrelevante Wissensstrukturen gehemmt werden. Als Ergebnis entsteht eine episodische Gedächtnisrepräsentation (*episodic memory representation*), welche die Verbindungen zwischen den drei Ebenen des Modells

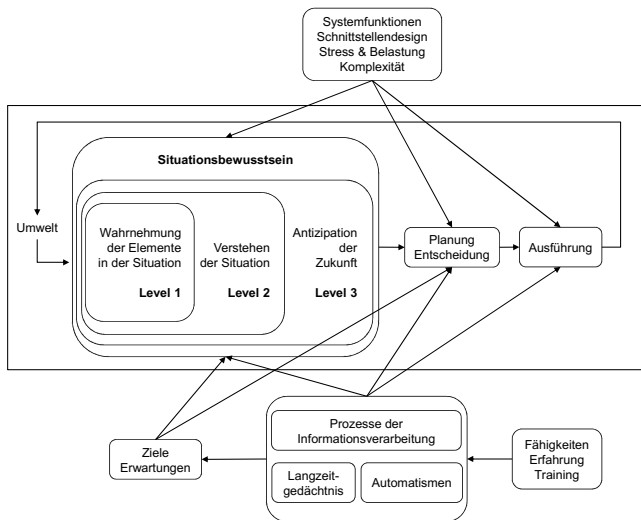


Abbildung 2.4: Das Modell von Endsley (1988, 1995) zum Situationsbewusstsein. Eigene Darstellung nach Endsley (1995) sowie Vollrath und Krems (2011).

von Endsley (1988, 1995) aufzeigt. Die spezifische Repräsentation der Situation spiegelt das Wahrnehmen der Elemente wider. Durch eine Verbindung dieser Repräsentation mit dem vorhandenen Wissen des Menschen wird ein sogenanntes Situationsmodell geschaffen, welches als Basis für das Verstehen und die Vorhersage der Situation genutzt wird (Krems & Baumann, 2009). Das Langzeitgedächtnis hält dabei vorhandene, passende Wissensstrukturen bereit, auf welche das Arbeitsgedächtnis bei Bedarf zugreift. Dieser Prozess erklärt den Vorteil von erfahrenen Fahrern gegenüber Novizen im Straßenverkehr, die auf noch keine ausgeprägte Wissensbasis zurückgreifen können.

Neben der Aktivierung von Wissen, werden auch gewohnte Handlungen aktiviert. Die Autoren beziehen sich dabei auf die *theory of action selection* von Norman und Shallice (1986), laut denen Aktionen als Schemata abgebildet werden, die in einer Hierarchie als kompatible und inkompatible Handlungen strukturiert sind. Das Schema mit dem höchsten Aktivierungslevel wird als passende Handlung ausgewählt.

Zusammengefasst wird das Situationsbewusstsein nun als das Ergebnis eines Verstehensprozesses abgebildet, bei dem wahrgenommene Elemente aus der Umgebung gespeichertes Wissen aus dem Langzeitgedächtnis aktivieren. Im Arbeitsgedächtnis werden neue Informationen integriert und ungültige Informationen entfernt. Aus dem Situationsbewusstsein heraus folgen die Handlungsauswahl und die Handlungsausführung.

Hinsichtlich der Handlungsauswahl erwähnen Abendroth und Bruder (2012) den Einflussfaktor **Risiko**. Demnach wird die Handlung ausgewählt, die „unter Variation der äußeren Umstände den größten Nutzen unter Beachtung des damit verbundenen Risikos verspricht“ (Abendroth & Bruder, 2012, S. 4). Hinsichtlich der Risikowahrnehmung von Autofahrern wurden viele Modelle entwickelt. Das Risiko-Homöostase-Modell von Wilde (1982) zählt zu den populärsten. Die Grundannahme ist die konsequente Verhaltensanpassung des Menschen bei einer Reduzierung des objektiven Risikos. Dabei gleicht der Mensch die Diskrepanz zwischen dem subjektiv wahrgenommenen Risiko und seinem akzeptierten Risiko stetig an (Abbildung 2.5).

Dabei wird das akzeptierte Risiko (a), das sogenannte *target level of risk*, von dem erwarteten Nutzen der Handlungsalternativen (1) abgeleitet. Vier Faktoren bestimmen das akzeptierte Risiko:

1. Wahrgenommene Vorteile des risikoreichen Verhaltens
2. Wahrgenommene Kosten des vorsichtigen Verhaltens
3. Wahrgenommene Vorteile des vorsichtigen Verhaltens
4. Wahrgenommene Kosten des risikoreichen Verhaltens

Wird ein Unterschied (c) zwischen dem wahrgenommenen Risiko (b), welches von der Wahrnehmung des Menschen (4, *perceptual skills*) abhängt, und dem akzeptierten Risiko (a) gefunden, erfolgt eine Handlungsausführung (d) zur Diskrepanzbeseitigung. Die Handlungsausführung wird dabei von der Handlungsauswahl (2, *decisional skills*) und der Qualität der Handlungsausführung (3, *vehicle handling skills*) beeinflusst. Die verschiedenen Stufen des Informationsverarbeitungsmodells von Wickens et al. (2012) und Vollrath (2015) finden sich in diesen Schritten wieder. Die gewählte Handlungsausführung bedingt die objektive

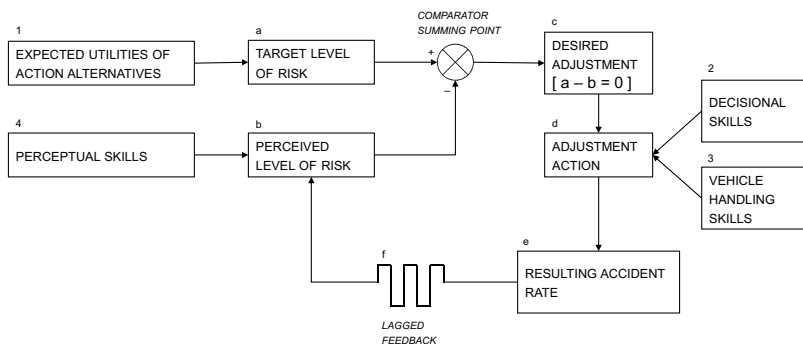


Abbildung 2.5: Risiko-Homöostase-Modell. Eigene Darstellung nach Wilde (1982).

Unfallrate, welche mit einigem Zeitversatz wiederum das wahrgenommene Risiko des Menschen beeinflusst (f, *lagged feedback*). So nimmt Wilde (1982) an, dass die Unfallrate von dem akzeptierten Risiko des Menschen abhängig sei. Strategien zur Unfallvermeidung sieht er darin, die Vorteile des risikoreichen Verhaltens und die Kosten des vorsichtigen Verhaltens zu senken sowie die Vorteile des vorsichtigen Verhaltens und die Kosten des risikoreichen Verhaltens zu steigern.

Fasst man die menschliche Informationsverarbeitung zusammen wird ersichtlich, dass die Entscheidungen und Handlungen des Menschen hauptsächlich von dessen Wahrnehmung der ihn umgebenden Faktoren abhängen. Dabei ist die Fehlerquelle dort immens, weil in vielen Fällen die tatsächliche Situation und deren Wahrnehmung durch den Fahrer auseinanderklaffen (Vollrath & Krems, 2011). Daraus resultieren falsche Entscheidungen und riskante Handlungen, die in Konsequenz zu Unfällen führen können. Den Menschen bei der Wahrnehmung der Situation sowie der darauf basierenden Entscheidung zu unterstützen stellt einen vielversprechenden Ansatz dar. Die Fahraufgabe des Menschen ist eine komplexe Tätigkeit mit mehreren Teilaufgaben, welche im folgenden Abschnitt erläutert werden.

2.1.2 Fahraufgabe des Menschen

Die Fahrzeugführungsaufgabe wird von Faktoren der Umwelt mitbestimmt, welche von der Komplexität der zu bewältigenden Situation abhängen (Abendroth & Bruder, 2012). Dabei wird die Komplexität durch die Charakteristik der Fahrstrecke und das dynamische Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer definiert. Die Bewältigung der aus der Fahraufgabe resultierenden Anforderungen an den Fahrer hängt wiederum von der individuellen Charakteristik des Menschen sowie der Unterstützung des Fahrers durch Assistenzsysteme ab.

Da die Belastungshöhe und -dauer des Fahrers begrenzt sind, können Engpässe in der Informationsverarbeitung des Menschen entstehen, welche zu Abweichungen im herkömmlichen Fahrverhalten und dadurch zu Unfällen führen können. Zur Identifikation der kritischen Faktoren wird die Fahraufgabe in verschiedene Teilbereiche unterteilt.

Neben der beschriebenen Unterteilung zielgerichteter Tätigkeiten in die fertigungs-, regel- und wissensbasierten Verhaltensebenen von Rasmussen (1983), kann die Fahraufgabe nach Bubb et al. (2015) in die primären, sekundären und tertiären Tätigkeiten separiert werden:

- Die **primären** Tätigkeiten stehen für die reine Fahraufgabe (Lenken, Gas geben etc.) und sind abhängig vom Straßenverlauf, anderen Verkehrsteilnehmern und der Umgebung. Fahrerassistenzsysteme zur Geschwindigkeits- und Abstandshaltung können diese Tätigkeit unterstützen.
- Die **sekundären** Tätigkeiten fallen in Abhängigkeit der primären Aufgabe an und umfassen sämtliche Aktionen der Informationsabgabe an die Umgebung (Setzen des Blinkers, Aktivierung der Hupe etc.) sowie die Reaktion auf äußere Bedingungen (Einschalten des

Fernlichts bei schlechter Sicht oder des Scheibenwischers bei Regen). Intelligente Lichtsysteme und Regensensoren bieten heutzutage eine Automatisierung dieser Reaktionen.

- Die **tertiären** Tätigkeiten sind von der eigentlichen Fahraufgabe losgelöst und dienen sowohl dem Fahrkomfort (Bedienung von Klimaanlage, Radio etc.) als auch der Kommunikation (mit den Mitfahrern oder am Telefon). Auch hier kann zwischen einer Aktion (Tätigen eines Anrufs) und Reaktion (Antworten auf eine Frage, Annehmen eines Anrufs) unterschieden werden.

Die primären und sekundären Tätigkeiten stellen dabei Handlungen der fertigkeitsbasierten Verhaltensebene dar, während die tertiäre Aufgabe zu einer Überforderung des Fahrers führen kann, wenn die dazugehörigen Bedienkonzepte zu komplex gestaltet sind (Bubb et al., 2015).

Die reine Fahraufgabe ist komplexer als bisher vorgestellt. Donges (2012) nimmt eine Hierarchie innerhalb der primären Fahraufgabe an und entwickelte ein Drei-Ebenen-Modell mit den Ebenen der Navigation, Führung und Stabilisierung (Donges, 1982). Die **Navigation** umfasst die Auswahl einer geeigneten Fahrtroute und die Abschätzung des voraussichtlichen Zeitbedarfs, sodass eine „örtlich punktuelle beziehungsweise zeitlich diskrete Aufgabenerfüllung durch den Fahrer“ (Donges, 2012, S. 16) erwartet wird. Ist die Umgebung dem Fahrer bekannt, erfolgt eine Einordnung der Navigation auf der fertigkeitsbasierten Ebene. Bei einem neuen Umfeld werden Verhaltensmuster der wissensbasierten Ebene zur Aufgabenerfüllung aktiviert.

Die Ebenen der Führung und der Stabilisierung sind als dynamischer Prozess zu verstehen. Die **Führung** erwartet dabei die Ableitung von Führungsgrößen wie der Sollspur oder der Sollgeschwindigkeit in antizipatorischer Manier, um „günstige Vorbedingungen für möglichst geringe Abweichungen zwischen Führungs- und Istgrößen zu schaffen“ (Donges, 2012, S. 16). So muss die Handlungsrelevanz in einer Verkehrssituation erkannt und die richtige Handlungsplanung abgeleitet werden. Dabei spielt auch die aktive Suche nach anderen Verkehrsteilnehmern sowie die Vorhersage von deren Verhalten eine wichtige Rolle. Die **Stabilisierung** umfasst die korrigierenden Stelleingriffe zur Anpassung der Fahrzeugbewegung an die festgelegten Führungsgrößen. So hält der Fahrer mithilfe des Lenkrads die Spur und mithilfe des Gas- und Bremspedals die gewählte Geschwindigkeit. Vollrath und Krems (2011) geben für die jeweiligen Ebenen folgenden Zeitbedarf an:

- Navigation: mehr als 10 Sekunden
- Führung: 1-10 Sekunden
- Stabilisierung: weniger als eine Sekunde

Der Zeitbedarf hat einen Einfluss auf die Fehlertoleranz (Donges, 2012). Je weniger Zeit dem Fahrer zur Verfügung steht, desto kritischer kann eine verspätete oder fehlerhafte Entscheidung sein und im schlimmsten Fall zu einem Unfall führen.

Für den dynamischen Prozess hängt die benötigte Verhaltensebene von Rasmussen (1983) demnach ebenfalls von der individuellen Erfahrung des Fahrers sowie der bereits erlebten Häufigkeit der jeweiligen Situation ab. Ein Fahranfänger wird dementsprechend viele Tätigkeiten auf der wissensbasierten Ebene ausführen und erst mit der Zeit die Fähigkeit entwickeln, unbewusste Handlungen auf der fertigkeitsbasierten Ebene durchzuführen. Unerwartete kritische Bedingungen zwingen den Fahrer trotz entwickelter Routine in die Verhaltensebenen des regel- und wissensbasierten Verhaltens hinein (Donges, 2012). Hinsichtlich der Sicherheit stellt die Führungsebene die wichtigste Aufgabe dar, da dort antizipatorisch entschieden wird, wie die Führungsgrößen für eine Fahrt zu wählen sind. Abbildung 2.6 fasst den zuvor benannten Zusammenhang der Modelle von Rasmussen (1983) und Donges (1982) zusammen. Das Ausmaß der grau eingefärbten Verbindungspfeile bildet die beschriebenen Abhängigkeiten zwischen den drei Ebenen beider Modelle ab.

Bezugnehmend auf das Unfallrisiko können die Teilbereiche der Fahraufgabe hinsichtlich ihrer Rolle bei der Entstehung von Unfällen analysiert werden. Vollrath (2010) stellt ein **aufgabenorientiertes Fahrermodell** vor, welches die entscheidenden Aufgaben des Fahrers enthält. Als Basis diente dafür eine Unfallanalyse von über 4000 Unfällen, welche im Jahr 2010 in der Stadt Braunschweig geschehen sind. Die schweren Unfälle (Sachschaden über 6000 Euro, mit Verletzten, Getöteten oder Verstößen) wurden dabei für einen Vergleich mit bundesdeutschen Unfällen gewichtet, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen. Die Analyse der Fehlhandlungen der Fahrer und deren Ursachen wurde nach dem Verständ-

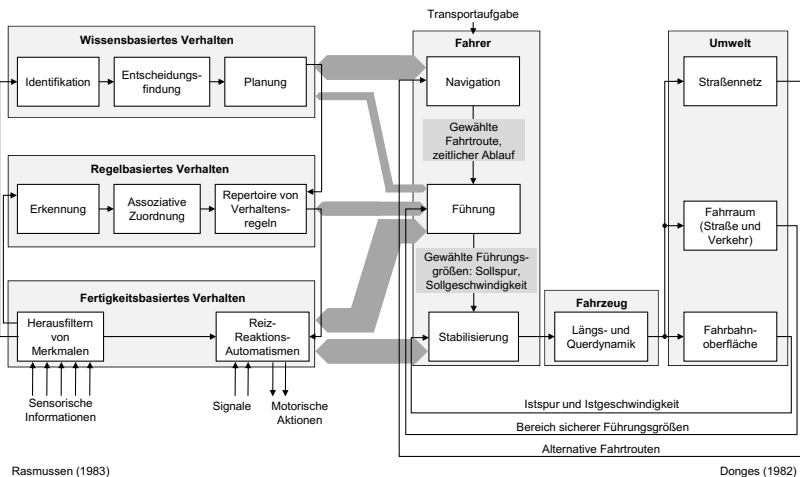


Abbildung 2.6: Zusammenhang des Drei-Ebenen-Modells für zielgerichtete Tätigkeiten (Rasmussen, 1983) und Drei-Ebenen Modell der Fahraufgabe (Donges, 1982). Eigene Darstellung nach Donges (2012).

nis von Hacker (1998) durchgeführt. Dabei bildet die Fehlhandlung die Aktion ab, die für den Handlungsfehler ausschlaggebend war. Die Ursache beschreibt die psychischen Prozesse, die der Fehlhandlung zugrunde liegen. Für eine detaillierte Aufarbeitung dieses Zusammenhangs wird auf die Arbeit von Vollrath, Briest und Schießl (2006) verwiesen. Bezugnehmend auf das weitere Vorgehen von Vollrath (2010) wurden die Ursachen der verschiedenen Fehlhandlungen den unterschiedlichen Stufen des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses zugeordnet und in vier Bereiche unterteilt: Informationsmangel, Fehlinterpretation, Fehlentscheidung und Ausführungsfehler. Dem Mangel an Informationen sowie Fehlentscheidungen kommt dabei eine zentrale Rolle bei den Ursachen zu. Den Fehlern und ihren Ursachen können bestimmte Fahraufgaben zugeordnet werden, welche das aufgabenorientierte Fahrermodell ergeben (Abbildung 2.7). Darin werden die wesentlichen Aufgaben des Fahrers beschrieben, welche er ausführen muss, um sicher zu fahren.

Die Regelungs- und die Führungsebene (Donges, 1982) stellen im Fahrermodell nach Vollrath (2010) die Bereiche der Fahraufgabe dar. Die Navigationsebene wird nicht berücksichtigt, da Fehler bei der Routenplanung nicht direkt zu einem Unfall führen. Auf der Führungsebene sind Elemente des Situationsbewusstseins (z. B. das Wahrnehmen und Interpretieren von anderen Verkehrsteilnehmern) relevant, welche in eine Planung der Position und der Geschwindigkeit übergehen. Innerhalb der Regelungsebene werden diese Handlungspläne in aktive Handlungen an den bekannten Stellgrößen überführt.

Die Analyse von Vollrath (2010) zeigt ein weiteres Mal, dass in Abhängigkeit vom Situationsbewusstsein die Handlungsplanung im Rahmen der Führungsaufgabe den gefährde-

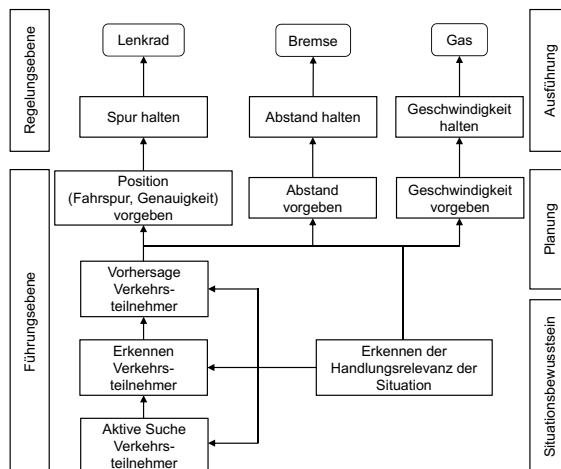


Abbildung 2.7: Aufgabenorientiertes Fahrermodell. Eigene Darstellung nach Vollrath (2010).

ten Bereich für die Hauptursachen Informationsmangel und Fehlentscheidungen darstellt. Gemäß dem Schwerpunkt dieser Arbeit sollte die Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen daher hauptsächlich auf dem Gebiet der Führungsaufgabe geschehen.

2.2 Unfallanalyse

Nach der Beschreibung der menschlichen Informationsverarbeitung und der komplexen Teilbereiche der Fahraufgabe soll eine Unfallanalyse Aufschluss über die Fahrmanöver bieten, bei denen es an Fahrerunterstützung fehlt. Mit dem Ziel, einen Überblick über die aktuellen Unfallschwerpunkte zu erlangen, wurde eine umfangreiche Unfallanalyse durchgeführt, die auf GIDAS-Daten basiert. Die Abkürzung GIDAS steht für *German In-Depth Accident Study*, welche seit dem Jahr 1999 ein Gemeinschaftsprojekt der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT) ist (Technische Universität Dresden, 2014). Die GIDAS-Daten beruhen auf analysierten Unfällen im Großraum Hannover und Dresden im Zeitraum 1995-2013 und werden in einer Datenbank bereitgehalten.

Als weitere Quelle existiert der Destatis-Bericht für Verkehrsunfälle, den das Statistische Bundesamt jedes Jahr veröffentlicht. Die dort erfassten Unfallraten beziehen sich jeweils auf den Zeitraum eines Kalenderjahres (DESTATIS Statistisches Bundesamt, 2013).

Für die in dieser Arbeit vorgenommene Unfallanalyse wird auf die GIDAS-Daten zurückgegriffen. Ein Abgleich von GIDAS- und Destatis-Unfalldaten zeigt, dass die Ergebnisse hinsichtlich der Kriterien Lichtverhältnisse und Ortslage nahezu identisch sind, sodass trotz der ortsbezogenen Erfassung der GIDAS-Daten ein Rückschluss auf Gesamtdeutschland zulässig ist.

2.2.1 Allgemeine Betrachtung von Fahrmanövern

Bei der Unfallforschung wird zwischen dem **Unfalltyp** und der **Unfallart** eines Unfalls unterschieden. Das Statistische Bundesamt definiert die beiden Begriffe wie folgt:

„Der Unfalltyp beschreibt die Konfliktsituation, die zum Unfall führte, d. h. die Phase des Verkehrsgeschehens, in der ein Fehlverhalten oder eine sonstige Ursache den weiteren Ablauf nicht mehr kontrollierbar machte.“ (DESTATIS Statistisches Bundesamt, 2013, S. 16)

„Die Unfallart beschreibt vom gesamten Unfallablauf die Bewegungsrichtung der beteiligten Fahrzeuge zueinander beim ersten Zusammenstoß auf der Fahrbahn oder, wenn es nicht zum Zusammenstoß gekommen ist, die erste mechanische Einwirkung auf einen Verkehrsteilnehmer.“ (DESTATIS Statistisches Bundesamt, 2013, S. 17)

Zusammengefasst beschreibt der Unfalltyp die Art der Konfliktauslösung vor dem Unfall, während die Unfallart die eigentlich Kollision beschreibt. Der Fokus der Unfallanalyse wird

auf den Unfalltyp gelegt, um herauszuarbeiten, welchen Unfallauslösern aktiv entgegenge-wirkt werden sollte.

Beim Unfalltyp werden sieben Kategorien unterschieden, welche hier vorerst nur auf-gezählt werden (DESTATIS Statistisches Bundesamt, 2013). Eine detaillierte Erläuterung erfolgt im Nachhinein im Kontext der zu begutachtenden Unfalltypen.

1. Fahr Unfall
2. Abbiege-Unfall
3. Einbiegen-/ Kreuzen-Unfall
4. Überschreiten-Unfall
5. Unfall durch ruhenden Verkehr
6. Unfall im Längsverkehr
7. sonstiger Unfall

Zwecks Analyse der Unfalltypen wird die Auswertung der GIDAS-Daten fallweise auf Unfalalebene durchgeführt. Im Detail werden die Unfälle nach Unfallschwere (Unfälle mit Getöteten), Unfalltyp (sieben Kategorien), Tageszeit (Tag, Nacht, Dämmerung), PKW-Beteiligung und Ortslage (innerorts, außerorts ohne Autobahn, Autobahn) analysiert.

Die Unfallanalyse wird auf die Unfalldaten bei Nacht und Dämmerung fokussiert, weil diese Arbeit ihren Schwerpunkt in der Betrachtung von kritischen Fahrmanövern zu diesen Tageszeiten hat. Nur bei Tageslicheinschränkungen kann der Fahrer mit Licht unterstützt werden.

Weil zwei Drittel aller Unfälle mit Getöteten und PKW-Beteiligung außerorts stattfinden (inkl. Autobahn), werden die Unfalltypen bei Nacht und Dämmerung in diesen Ortslagen be-sonders intensiv betrachtet. Die Hälfte aller Unfälle ereignet sich auf Straßen außerorts ohne Autobahn. Die Analyse der Unfallforschungsdaten (GIDAS, 2014) zeigt Unfalltypschwer-punkte beim Fahr Unfall und Unfall im Längsverkehr auf. Von allen Unfällen mit Getöteten und PKW-Beteiligung, die sich bei Nacht außerorts (ohne Autobahn) ereignen, sind 56,7 % Fahr Unfälle und 25,8 % Unfälle im Längsverkehr. Bei Dämmerung betragen die Anteile 66,7 % (Fahr Unfall) und 23,3 % (Unfall im Längsverkehr). Tabelle 2.1 zeigt die Verteilung für alle Unfalltypen auf.

Von allen Unfällen mit Getöteten und PKW-Beteiligung, die sich bei Nacht auf der Autobahn ereignen, sind 47,6 % Fahr Unfälle und 38,1 % Unfälle im Längsverkehr. Bei Dämmerung ergibt sich ein Anteil von 25 % bei Fahr Unfällen und 75 % bei Unfällen im Längsverkehr. Tabelle 2.2 zeigt die Verteilung für alle Unfalltypen auf.

Tabelle 2.1: GIDAS-Auswertung nach Unfallschwere, Unfalltyp, Tageszeit, PKW-Beteiligung für außerorts (ohne Autobahn).

Unfalltyp	Tag	Nacht	Dämmerung	Summe
<i>Fahrerunfall</i>	49.2 %	56.7 %	66.7 %	53.2 %
<i>Abbiege-Unfall</i>	7.5 %	0.0 %	3.3 %	4.8 %
<i>Einbiegen/Kreuzen-Unfall</i>	9.1 %	3.1 %	0.0 %	6.4 %
<i>Überschreitenunfall</i>	2.7 %	6.2 %	0.0 %	3.5 %
<i>Unfall durch ruhenden Verkehr</i>	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
<i>Unfall im Längsverkehr</i>	22.5 %	25.8 %	23.3 %	23.6 %
<i>sonstiger Unfall</i>	9.1 %	8.2 %	6.7 %	8.6 %
<i>Gesamtanteil außerorts</i>	55.5 %	45.3 %	50.8 %	51.5 %

Tabelle 2.2: GIDAS-Auswertung nach Unfallschwere, Unfalltyp, Tageszeit, PKW-Beteiligung für die Autobahn.

Unfalltyp	Tag	Nacht	Dämmerung	Summe
<i>Fahrerunfall</i>	28.3 %	47.6 %	25.0 %	36.5 %
<i>Abbiege-Unfall</i>	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
<i>Einbiegen/Kreuzen-Unfall</i>	2.2 %	0.0 %	0.0 %	1.0 %
<i>Überschreitenunfall</i>	0.0 %	4.8 %	0.0 %	2.1 %
<i>Unfall durch ruhenden Verkehr</i>	0.0 %	0.0 %	0.0 %	0.0 %
<i>Unfall im Längsverkehr</i>	58.7 %	38.1 %	75.0 %	51.0 %
<i>sonstiger Unfall</i>	10.9 %	9.5 %	0.0 %	9.4 %
<i>Gesamtanteil auf Autobahn</i>	13.6 %	19.6 %	13.6 %	15.7 %

Ob der Fortschritt der Technik, insbesondere im Bereich der Fahrerassistenzsysteme, einen Einfluss auf die Unfalldaten hat, wurde durch den Vergleich des Gesamtdatensatzes der GIDAS-Daten (1995-2013) und dem Auszug der aktuellen Daten (2005-2012) überprüft. Beim Auszug fließt das Jahr 2013 nicht in die Analyse ein, da der Datensatz dieses Jahres noch nicht vollständig vorliegt. Es wird kein Unterschied festgestellt, sodass die Ergebnisse des Gesamtdatensatzes (1995-2013) die Grundlage der weiteren Unfallanalyse bilden.

2.2.2 Schwerpunktbildung

Die eben beschriebene Analyse zeigt Schwerpunkte bei den Unfalltypen **Fahrerunfall** und **Unfälle im Längsverkehr** auf der Autobahn und anderen Straßen außerorts. Die Definitionen des Statistischen Bundesamts lauten wie folgt:

„Der [...] [Fahrerunfall] wurde ausgelöst durch den Verlust der Kontrolle über das Fahrzeug [...], ohne dass andere Verkehrsteilnehmer dazu beigetragen haben, infolge unkontrollierter Fahrzeugbewegungen kann es dann aber zum

Zusammenstoß mit anderen Verkehrsteilnehmern gekommen sein.“ (DESTATIS Statistisches Bundesamt, 2013, S. 16)

„Der Unfall [im Längsverkehr] wurde ausgelöst durch einen Konflikt zwischen Verkehrsteilnehmern, die sich in gleicher oder entgegengesetzter Richtung bewegten, sofern dieser Konflikt nicht einem anderen Unfalltyp entspricht.“ (DESTATIS Statistisches Bundesamt, 2013, S. 16)

Für die weitere Analyse wurden diese beiden Unfalltypen bezüglich ihrer **Unfalltypschlüssel** sowie ihrer **Unfallursachen** bei Nacht und Dämmerung detaillierter betrachtet. Beim Fahr Unfall ist die Hauptursache die an den Straßenverlauf unangepasste Geschwindigkeit des Fahrzeugs (GIDAS, 2014). Der Straßenverlauf beziehungsweise der Straßenzustand wird in diesen Fällen falsch eingeschätzt. Hieraus resultiert ein Verlust der Fahrzeugkontrolle, insbesondere in Kurven.

Bezüglich des Unfalls im Längsverkehr kristallisieren sich vier Unfalltypschlüssel mit den folgenden Unfallursachen heraus:

- Die Unfallursachen beim **Spurwechsel nach links** setzen sich zusammen aus der ungenügenden Beachtung des nachkommenden Verkehrs, der fehlerhaften Einschätzung von Geschwindigkeit und Abstand des nachkommenden Verkehrs sowie schlechten Sichtbedingungen (Wetter, Straßenverlauf, Verdeckung durch andere Verkehrsteilnehmer).
- Beim **Überholen mit Gegenverkehr** führen sowohl die fehlerhafte Einschätzung des entgegenkommenden Verkehrs und der eigenen Beschleunigungskapazität als auch die Missachtung des Gegenverkehrs im Zusammenspiel mit unzureichenden Sichtverhältnissen zum Unfall.
- Das **Auffahren auf einen Vorfahrer** ist auf ungenügenden Sicherheitsabstand und zu schnelle Geschwindigkeit zurückzuführen.
- Beim Unfalltypschlüssel **Begegnende** handelt es sich um die Benutzung der falschen Fahrbahn (auch Richtungsfahrbahn) oder eine verbotswidrige Nutzung anderer Straßenteile sowie um den Verstoß gegen das Rechtsfahrgebot. Die versehentliche oder willentliche Missachtung der Straßenführung und Straßenschilder beziehungsweise zu weites Linksfahren aufgrund von Einengung und/ oder Unaufmerksamkeit bilden hierfür die Unfallursachen.

Während es bereits diverse Fahrerassistenzsysteme zur Unterstützung für Auffahrnfälle gibt (z. B. Front Assist, Adaptive Cruise Control, adaptives Bremslicht (Volkswagen AG, 2015b)), stellt die Überholung mit Gegenverkehr ein Fahrmanöver dar, für welche lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme aufgrund von Sichtverdeckungen zwischen beiden Manöverpartnern nicht hilfreich erscheinen. Der Spurwechsel nach links umfasst neben einem einfachen Fahrstreifenwechsel auch das Einfädelmanöver. Beide Situationen bieten Zeit und Raum, den Fahrer rechtzeitig durch lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme zu unterstützen. Licht bietet hierbei die Möglichkeit, die Aufmerksamkeit des Fahrers auf die relevanten Bereiche

zu lenken beziehungsweise durch Lichtfunktionen eine angemessene Reaktion zu erreichen (Schlag et al., 2009). Auch im Fall der unangepassten Geschwindigkeit an den Straßenverlauf wird ein Einfluss auf das Fahrverhalten durch Lichtanimationen vermutet. So ergeben sich drei Schwerpunktmanöver in dieser Arbeit, für die Unterstützungsmöglichkeiten mit Licht erarbeitet werden sollen:

1. **Folgen einer Straße** mit verbesserter Fahrzeugkontrolle in unvorhergesehenen Situationen
2. Einfacher **Fahrstreifenwechsel** mit verbesserter Beachtung des nachkommenden Verkehrs
3. **Einfädelmanöver** mit verbesserter Beachtung des nachkommenden Verkehrs

Den Bogen zum aufgabenorientierten Fahrermodell von Vollrath (2010) spannend, kann die Führungsebene der Fahraufgabe als die Ebene klassifiziert werden, welche die häufigsten Fehlhandlungen enthält, die zu einem Unfall führen. Beim Folgen einer Straße erkennt der Fahrer nicht oder zu spät, dass die Geschwindigkeit an den Straßenverlauf angepasst werden muss. Die unvermeidbare Folge ist der Kontrollverlust über sein Fahrzeug. Beim Fahrstreifenwechsel steht die fehlende, aktive Suche nach anderen Verkehrsteilnehmern und die Überforderung durch die komplexe Fahrsituation im Vordergrund. Zu beachten ist, dass die visuelle Wahrnehmung des Menschen bei Dunkelheit verschiedenen physiologischen Beeinträchtigungen ausgesetzt ist (Deutscher Verkehrssicherheitsrat e.V., 2003). Infolge von Blendung und reduzierter Sehleistung kommt es neben schlechter Erkennung von Kontrasten und Farbunterschieden zu verschlechterter Einschätzung von Entfernungen (Bockelmann, 2003; Kerwien, 2010). Schlag et al. (2009) bestätigen, dass aufgrund der schlechten Sichtbedingungen Abstände und Geschwindigkeiten anderer Verkehrsteilnehmer noch schlechter als bei Tag eingeschätzt werden können. Das Problem spitzt sich durch die Tatsache zu, dass große Distanzen oft überschätzt und hohe Geschwindigkeiten eher unterschätzt werden (Hakkinen, 1963, zit. nach Schlag et al., 2009). Das wahrgenommene Risiko des Fahrers (Wilde, 1982) ist zudem besonders bei der Kategorie Fahrnunfall von zentraler Bedeutung.

2.3 Stand der Forschung

Den Fahrer in den drei Schwerpunktmanövern (Abschnitt 2.2.2) mit aktiven Lichtfunktionen zu unterstützen, ist ein (öffentlich) bisher selten erforschtes Themengebiet. Um dennoch einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand zu gewinnen, wird der Kreis der Recherche auf nicht lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme für die Manöver Geschwindigkeitsbegrenzung, Spurwechsel und Einfädelung ausgeweitet. Im Folgenden werden relevante Studien für die Konzeptionierung neuer Lichtfunktionen für die drei Fahrmanöver vorgestellt.

2.3.1 Geschwindigkeitsbegrenzung

Vollrath, Briest und Schießl (2006) stellen drei Fahrerassistenzsysteme für das Folgen einer Straße vor, welche sich teilweise noch in der Entwicklung befinden: Die Geschwindigkeitsregelanlage (GRA), der *Curve Speed Assistant (CSA)* und die *Intelligent Speed Adaption (ISA)*.

Die **GRA** ist eine Komfortfunktion, die eine vom Fahrer eingestellte Geschwindigkeit konstant hält. Die Funktion greift nicht in die Fahrzeugverzögerung ein, sodass die Geschwindigkeit nicht an den Straßenverlauf angepasst wird.

Der noch nicht in Serie produzierte **CSA** errechnet mit Hilfe der Fahrzeugsensorik eine Geschwindigkeit für den vorliegenden Straßenverlauf, die als sicher und komfortabel zu fahren eingestuft wird. In der Konzeptarbeit von Ebersbach und Mayser (2004) kann zwischen einem Regel- und einem Empfehlungsmodus unterschieden werden. Beim Regelmodus gibt der Fahrer seine Wunschgeschwindigkeit ein, welche in der Geschwindigkeitsanzeige im Kombi-Instrument durch eine grünes Licht emittierende Diode (LED) markiert wird. Muss aufgrund des Straßenverlaufs die Geschwindigkeit reduziert werden, erfolgt der Eingriff durch das System. Der Fahrer wird ca. eine Sekunde vor Eingriff durch eine gelbe LED über die geplante Geschwindigkeitsreduktion informiert.

Im Empfehlungsmodus wird die Geschwindigkeit, die dem Fahrer für den Straßenverlauf nahegelegt wird, durch eine Markierung mit einer gelben LED angezeigt. Überschreitet der Fahrer diese Geschwindigkeit bis zu 10 km/h, erfolgt eine optische Warnung durch ein Blinken der LED. Wird die empfohlene Geschwindigkeit um mehr als 10 km/h überschritten, ertönt ein Warnton.

Die Autoren verglichen die beiden Systeme in einer Realfahrtstudie mit $N = 20$ Probanden. Die gelieferten Prognosen wurden an drei unterschiedliche Fahrstile (entspannt, normal, sportlich) angepasst. Obwohl die mentale Beanspruchung im Regelmodus geringer und der Fahrspaß höher ausfallen, ist das Sicherheitsempfinden beim Empfehlungsmodus höher. Zudem wird diese Zusammenarbeit von Mensch und Maschine als gebrauchstauglicher bewertet und erzeugt ein höheres Systemvertrauen. Demnach wird der Empfehlungsmodus favorisiert, in welchem kein Eingriff durch das System erfolgt, sondern lediglich Informationen bereitgestellt werden.

Die **ISA** befindet sich ebenfalls noch im Stadium der Entwicklung. Funktionell soll sie die Geschwindigkeit an die Rahmenbedingungen anpassen, insbesondere an die vorgegebenen Geschwindigkeitsbegrenzungen. Das System hat vier Stufen: Während in der einfachsten Variante nur Informationen an den Fahrer geliefert werden (z. B. zugelassene Geschwindigkeit und Ist-Geschwindigkeit), warnt die zweite Stufe konkret bei Überschreitungen der erlaubten Geschwindigkeit. Weiterführend kann die ISA den Fahrer aktiv bei der Geschwindigkeitseinhaltung unterstützen (z. B. durch ein aktives Gaspedal, welches die Rückstellkraft des Gaspedals erhöht) oder sogar aktiv in die Fahrzeugführung eingreifen, sollte die erlaubte Geschwindigkeit überschritten werden. Trotz der vier Stufen gibt es im internationalen

Raum keine Differenzierung der Bezeichnung. Bauer und Seeck (2004) empfehlen daher die alternative Betitelung *Intelligent Speed Management* mit Detailangaben zur Ausführung des Systems. Nur bei aktiv eingreifenden Varianten sollte die Bezeichnung *Intelligent Speed Adaption* verwendet werden.

Studien zur ISA betonen, dass die Fahrerassistenz zu einer Reduzierung der durchschnittlichen Geschwindigkeit und der Anpassung an bestehende Geschwindigkeitsbegrenzungen führen kann (van der Pas, Kessels, Veroude & van Wee, 2014; Institute for Road Safety Research, 2015). Dieser positive Effekt nimmt allerdings mit der zunehmenden Dauer der Nutzung ab (Lai, Hjalmdahl, Chorlton & Wiklund, 2010). Bei Deaktivierung des Systems fallen die Fahrer zudem in ihre alten Verhaltensmuster zurück (van der Pas et al., 2014). Der Einfluss auf das Fahrverhalten hängt zudem von der Ausführung des Systems ab (Institute for Road Safety Research, 2015). Während eingreifende Systeme das Fahrverhalten effektiver beeinflussen (Regan et al., 2006), bevorzugen die Fahrer die informierenden und warnenden Systeme (Young, Regan, Triggs, Jontof-Hutter & Newstead, 2010). Bietet das Fahrerassistenzsystem die Möglichkeit deaktiviert zu werden, wird es mit zunehmenden Gebrauch häufiger ausgeschaltet (Carsten & Fowkes, 2000). Die regelmäßige Verwendung der ISA hängt neben der Bereitschaft des Fahrers von der korrekten Nutzung sowie der Bereitstellung geeigneten Kartenmaterials ab (Institute for Road Safety Research, 2015). Ein kontinuierliches visuelles und auditives Feedback wird einem haptischen Feedback vorgezogen. Die generelle Idee des Systems wird als nützlich, effektiv und sozial erwünscht eingeordnet (Regan et al., 2006).

Neben den Untersuchungen zum CSA und zur ISA existieren weitere Ansätze zur Geschwindigkeitsbegrenzung des Fahrers. Merrihpour, Donmez und Battista (2014) berichten von einem System für die Geschwindigkeits- und Abstandsregelung mittels eines **Echtzeit-Feedbacks**, in Verbindung mit einem Belohnungssystem bei Einhaltung der Vorgaben. Mit $N = 37$ Probanden untersuchten sie in einer 16-wöchigen Realfahrtstudie die Auswirkungen auf das Fahrverhalten. Eine vorherige (Baseline) und eine post-Erhebung der Fahrdaten ohne Assistenz runden das Versuchsdesign ab. Anhand einer Clusteranalyse wurde die Stichprobe in zwei Fahrstiltypen eingeteilt: Cluster A umfasste dabei die regelkonformen Fahrer mit einer mehrheitlichen Einhaltung von vorgegebener Geschwindigkeit und Abstand. Probanden im Cluster B zeigten dagegen öfters ein nichtkonformes Fahrverhalten in den genannten Variablen. Das Echtzeit-Feedback wurde den Probanden über ein Display mitgeteilt, welches im direkten Blickfeld hinter dem Lenkrad an der Windschutzscheibe befestigt war. Das Echtzeit-Feedback variierte in zwei Stufen: Ein grüner Punkt und Symbole zur Geschwindigkeit und Abstand meldeten ein konformes Fahrverhalten in beiden Aspekten zurück. Wurde in mindestens einer Variable ein unerwünschtes Verhalten gezeigt ($\text{Ego-Geschwindigkeit} \geq \text{Regelgeschwindigkeit} + 2 \text{ km/h}$, $\text{time headway} < 1.2 \text{ s}$), verfärbte sich der Punkt gelb und die Symbole veränderten sich. Je konformer die Fahrer sich verhielten, desto mehr Punkte sammelten sie, welche am Ende der Studie in Gutscheine umgetauscht werden konnten.

Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Anstieg der konformen Geschwindigkeitseinhaltung, wenn die Probanden mit dem Echtzeit-Feedback konfrontiert werden. Zeigten die Fahrer aus Cluster B in der Baseline noch ein signifikant schlechteres Fahrverhalten als Cluster A, so nähern sie sich mithilfe des Systems den Daten der konformen Fahrer an. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen besteht nicht mehr. Nach der Intervention (post-Fahrt ohne System) zeigt sich allerdings eine Tendenz zum ursprünglichen Verhalten, wobei die negative Veränderung in Cluster B prägnanter ausfällt. Dennoch zeigen beide Gruppen in der post-Erhebung immer noch ein signifikant besseres Verhalten als in der Baseline. Hinsichtlich der Abstandhaltung treten ähnliche Effekte auf. In Cluster A ist jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen der Baseline und der Intervention zu finden, da die konforme Gruppe schon zu Beginn ein sehr gutes Abstandsverhalten zeigt. Cluster B offenbart erneut einen Anstieg an konformen Fahrverhalten in Verbindung mit einem Echtzeit-Feedback und einen erheblichen Abfall nach Deaktivierung des Systems. Dennoch ist das post-Verhalten immer noch signifikant konformer als in der Baseline. Insgesamt zeigt sich eine verstärkte Wirkung des Systems bei Fahrern mit verbesserbarem Fahrverhalten (Cluster B).

In einer subjektiven Bewertung heben alle Probanden das Echtzeit-Feedback als positiven Aspekt hervor und sind offen und gewillt, ihr persönliches Fahrverhalten anzupassen. Das Belohnungssystem in Form von Gutscheinen wird auf Platz 4 der Anreize zur Systemnutzung genannt. An der Spitze liegen die Neugier nach der Beeinflussung und der Beurteilung des eigenen Fahrverhaltens sowie dem eigenen Erleben eines innovativen Systems. Dennoch sollte die Wirkung eines derartigen Belohnungssystems nicht unterschätzt werden und bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen beachtet werden (z. B. in Form von Beitragsermäßigungen der Kfz-Versicherung bei konformen Verhalten).

Várhelyi, Kaufmann und Persson (2015) stellen eine Realfahrtstudie mit $N = 24$ Probanden vor, in der u. a. das Fahrerassistenzsystem *Curve Speed Warning* zur Geschwindigkeitskontrolle untersucht wurde, schwerpunktmäßig in Kurven. Die Warnungen wurden dem Fahrer über ein Display im Kombi-Instrument mitgeteilt, auf dem die Straße und das eigene Auto abgebildet wurden. Auf geraden Strecken wurde bei der Überschreitung der Geschwindigkeitsvorgabe die einzuhaltende Geschwindigkeit in Form eines Verkehrsschildes als Icon über dem Fahrzeug dargestellt. Wurde eine zu hohe Geschwindigkeit vor Kurven gewählt, differenzierte die Warnung zwei Stufen: Als Vorwarnung wurde eine Kurve mit gelben Rändern und nach vorne zeigenden, gelben Pfeilspitzen abgebildet. Als dringende Warnung färbten sich die Kurvenränder sowie die Gräten rot, ein Warnton ertönte und der Gurt wurde gestrafft. Jeder Proband erlebte eine 53 km lange Strecke auf Landstraßen und Autobahn mit und ohne System. Die Probanden wurden vorher über die zu erwartenden Warnungen instruiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die meisten Probanden die Geschwindigkeit vor Kurven bereits vor der Warnung reduzieren. Es wird dennoch ein Unterschied zwischen der durchschnittlichen Geschwindigkeit beim Durchfahren der Kurve mit und ohne System gefunden. Bei Aktivierung der Warnungen fahren die Probanden mit einer signifikant geringeren Ge-

schwindigkeit durch die Kurven. In der abschließenden subjektiven Befragung loben die Versuchspersonen, dass das Sicherheitsgefühl durch das System gesteigert werde, kritisieren allerdings den späten Zeitpunkt der Warnung.

Der Bericht des VTT Technical Research Centre of Finland Ltd (1998) beschreibt eine weitere Studie zur **Geschwindigkeitsbegrenzung in Kurven**. Zusätzlich zu einer Anzeige im Display wurde der Fahrer mithilfe eines digitalen Straßenschilds, Querbalken oder einer automatischen Geschwindigkeitskontrolle auf seine Geschwindigkeitsüberschreitung hingewiesen.

- Das **digitale Schild am Straßenrand** stand 100 m vor dem Kurvenanfang und wurde aktiviert, sobald sich das Fahrzeug 300 m vor dem Kurvenanfang befand und die vorgegebene Geschwindigkeit überschritt.
- Das **Display** im Fahrzeug befand sich in der Mitte des Armaturenbretts und wurde 250 m vor Kurvenanfang aktiviert, sobald die vorgegebene Geschwindigkeit nicht eingehalten wurde. Am Anfang der Kurve verschwand die Anzeige.
- Die **Querbalken** waren im rechten Winkel zum Straßenrand auf der Fahrbahn implementiert. Mit zunehmender Entfernung vom Fahrzeug nahm der Abstand zwischen den Querbalken ab. Die Aktivierung erfolgte 150 m vor dem Kurvenanfang. Beim Scheitelpunkt der Kurve wurden die Querbalken deaktiviert.
- Die **automatische Geschwindigkeitskontrolle** wurde unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit 300 m vor der Kurve aktiviert mit dem Hinweis „*speed control ahead*“. Bei einem Abstand von 200 m zum Kurvenanfang wechselte der Hinweis zu „*speed control activated*“. Das System war bis zum Ende jeder Kurve aktiv.

Die Untersuchung fand in einem Fahrsimulator mit $N = 30$ Probanden statt. Die Versuchsstrecke bestand aus mehreren Kurven. Jeder Fahrer erlebte alle vier Arten der Geschwindigkeitskontrolle sowie eine Baseline-Fahrt ohne Unterstützung.

Die höchste Geschwindigkeitsreduktion ist bei der automatischen Geschwindigkeitskontrolle zu finden. Auch die anderen drei Hinweisarten führen jeweils zu einer signifikant höheren Verzögerung, als wenn kein Hinweis dargeboten wird (Baseline). Subjektiv wird die automatische Geschwindigkeitskontrolle am negativsten bewertet, während zwischen der Displayanzeige, dem Straßenschild und den Querbalken keine Unterschiede festzustellen sind. Zusammenfassend wird resümiert, dass in dem hier untersuchten Szenario die Hinweisart zur Geschwindigkeitsreduktion in Kurven irrelevant zu sein scheint, ein genereller Hinweis aber für eine Auswirkung auf das Fahrverhalten erforderlich ist.

In Summe stellen die erläuterten Untersuchungen dar, dass ein Hinweis zur Geschwindigkeit in Kurven eine effektive Wirkung auf das Fahrverhalten bringen kann. Allerdings werden aktiv in das Fahrverhalten eingreifende Systeme negativ bewertet, während Empfehlungen zum Fahrverhalten akzeptiert und berücksichtigt werden. Die Anzeige dieser

Hinweise findet fast ausschließlich über Anzeigen der gefahrenen Geschwindigkeit und der Geschwindigkeitsvorgabe in Form von Zahlen beziehungsweise Straßenschildern statt. Várhelyi et al. (2015) erweitern das Konzept durch den Einsatz von statischen Pfeilspitzen, während die Arbeit des VTT Technical Research Centre of Finland Ltd (1998) den Querbalken ebenfalls eine Wirkung nachweisen kann. Eine Untersuchung zur Beeinflussung des Fahrverhaltens durch dynamische Symbole ist in der Literatur bisher nicht bekannt.

Die Problematik der an den Straßenverlauf angepassten Geschwindigkeit besitzt ein erhöhtes Potential zur Fehlinterpretation beziehungsweise Fehlentscheidung und führt in Konsequenz zur Fehlanpassung der Fahrers. Eine warnende, zum Teil aktiv unterstützende Funktion stellt die empfohlene Strategie für neue Fahrerassistenzsysteme dar (Vollrath, Briest & Schießl, 2006).

2.3.2 Spurwechsel

Hinsichtlich des Spurwechselmanövers bestehen innovative Ansätze, welche von den bestehenden Fahrerassistenzsystemen wie dem *Blindspot-Assistenten* oder dem *Side Assist* (Abschnitt 2.4.1) abweichen.

Hofmann, Rinkenauer und Gude (2010) untersuchten die Wirkung von bereitgestellten Informationen zur **Beschleunigung des Spurwechsels**. Die Stichprobe war mit $N = 12$ gering. Aufgrund des interessanten Einsatzes richtungsweisender Symbole wird die Studie trotz geringer Stichprobe vorgestellt.

Die Autoren variierten die Anzahl der zu überquerenden Spuren sowie die Richtung des Spurwechsels und erfassten die Reaktionszeit der Probanden. Die Informationen zum Spurwechsel wurden in einem HUD-Display dargestellt, welches innerhalb der Fahrsimulatorwelt simuliert wurde. Die Information zur Spurwechselaufforderung erfolgte immer in zwei Schritten: Zuerst erschien eine erste Anzeige in rot (*precue information*), welche unterschiedliche Details anzeigte. Anschließend folgte die Spurwechselaufforderung in grün (*full information*), welche immer die Richtung des Spurwechsels sowie die Anzahl der zu wechselnden Fahrbahnen vorgab. Abbildung 2.8 stellt alle Varianten dar, welche im Folgenden genauer erläutert werden.

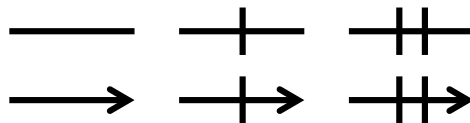


Abbildung 2.8: Variationen der bereitgestellten Informationen zur Spurwechselaufforderung. Eigene Darstellung nach Hofmann et al. (2010).

Die horizontale Linie in der ersten Reihe links zeigt dabei die Basisfunktion der *precue information*. Die Erweiterung mit einer beziehungsweise zwei vertikalen Linien visualisiert die nächste Stufe und informiert über die Anzahl der zu wechselnden Spuren. Der Pfeil in der zweiten Reihe links kann ebenfalls die zweite Stufe darstellen und zeigt die Richtung des gewünschten Spurwechsels an. Eine Kombination von Richtungsanzeige und Spuranzahl ist ebenfalls als erste Informationsstufe möglich, wie die darauffolgenden zwei Symbole mit einer Pfeilspitze sowie einer beziehungsweise zwei vertikalen Linien zeigen. Diese sind ebenfalls immer eine Variation der *full information*. Sie gibt sowohl über die Richtung als auch die Anzahl der zu wechselnden Spuren Auskunft und wird in grün eingeblendet. Die Probanden wurden vor Versuchsstart über alle Informationsdarstellungen instruiert.

Die Ergebnisse der Studien offenbaren, dass die Einblendung von *precue information* vor der eigentlichen Spurwechselaufforderung einen positiven Effekt auf die Reaktionszeit des Fahrers hat. Sowohl durch die Einblendung der Richtung als auch das Anzeigen der Spuranzahl kann der Spurwechsel beschleunigt werden. Die Reaktionszeit kann weiterhin verringert werden, wenn beide Informationen in der *precue information* angezeigt werden. Die Anzeige der Richtung führt allerdings zu einem größeren Vorteil bezüglich der Reaktionszeit als die Anzahl der zu wechselnden Spuren. Subjektive Daten zur Systemakzeptanz wurden nicht erhoben.

Habenicht (2012) entwickelt einen **manöverbasierten Querführungsassistenten**, der die Intention des Fahrers zum Spurwechsel erkennt und die Ausführung des Fahrmanövers mittels eines Displays im Fahrzeug empfiehlt. Der sogenannte Fahrstreifenwechselassistent visualisiert dabei die empfohlene Längsdynamik, die verbleibende Zeit bis zum gefahrlosen Spurwechsel sowie dessen Richtung (Abbildung 2.9).

Die Längsdynamikinformation wird dabei zentral abgebildet und entspricht im linken Bild einer hohen Beschleunigungsempfehlung (Abbildung 2.9). Die vertikalen Balken an der

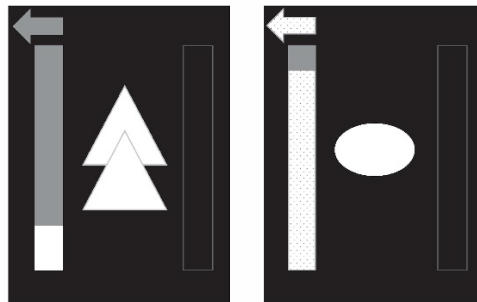


Abbildung 2.9: Konzept des Fahrstreifenwechselassistenten. Eigene Darstellung nach Habenicht (2012).

Seite werden je nach Richtung des Spurwechsels links oder rechts grau eingefärbt (hier: links). Der weiße Füllstand (linkes Bild) zeigt die Zeit bis zum möglichen Spurwechsel an. Ist der ideale Zeitpunkt zum Spurwechsel gekommen, färbt sich der Balken grün ein (gepunktete Fläche im rechten Bild) und bildet nun die Zeit bis zum Ende des Spurwechsels ab. Das Konzept wird auf einem Display angezeigt, welches auf dem Armaturenbrett rechts vom Lenkrad installiert ist.

Der Fahrstreifenwechselassistent wurde im Rahmen einer Realfahrtstudie auf einem Testgelände mit einem herkömmliche Spurwechselassistenten (LEDs im Seitenspiegel) des Typs III (Überwachung des toten Winkels und der Annäherungszone, Abschnitt 2.4.1) und einer Kontrollgruppe ohne Assistenz verglichen. Die Probanden wurden vor der Durchführung über die Funktionen des neu eingeführten Fahrstreifenwechselassistenten instruiert. Der subjektive Systemeindruck, die subjektive Beanspruchung sowie das Sicherheitsempfinden wurde von $N = 37$ Probanden erfasst. Dabei interagierten die Versuchspersonen mehrmals mit den verschiedenen Assistenten und durchfuhren das Szenario auch ohne Fahrerassistenz (Kontrollfahrt). Der subjektive Systemeindruck wurde nur in Bezug auf das neue Konzept erhoben.

Der Fahrstreifenwechselassistent wird als intuitiv, übersichtlich und komfortabel eingestuft. Dennoch wird auch eine Ablenkung durch das System wahrgenommen, wodurch keine Belastungs- und Komplexitätsreduktion erreicht werden kann. Hinsichtlich der subjektiven Beanspruchung gibt es keine Unterschiede zwischen den drei Stufen der Assistenz. Das Sicherheitsempfinden wird mittels der verfügbaren Reaktionszeit zum Spurwechsel erhoben. Je mehr Reaktionszeit dem Fahrer zur Verfügung steht, desto sicherer ist die Situation. Die Herleitung der dazugehörigen Formel kann in Habenicht (2012) detailliert nachvollzogen werden. Der herkömmliche Spurwechselassistent führt zu einem höheren Sicherheitsempfinden als die Fahrt ohne Assistenzsystem. Bei der Interaktion mit dem Fahrstreifenwechselassistenten steht noch mehr Reaktionszeit zur Verfügung. Das innovative System wird demnach als noch sicherer als das bekannte System eingestuft.

Omerbegovic, Kammann, Funk und Neumann (2015) stellen eine Untersuchung vor, welche ein **lichtbasiertes Fahrerassistenzsystem** im Rahmen einer Realfahrtstudie auf einem Testgelände untersucht. Es ist die einzige bekannte Studie, in der das Licht der Scheinwerfer als innovative Fahrerassistenz eingesetzt wird. Erkennt das Fahrzeug die Spurwechselintention des Fahrers, informiert die Lichtfunktion über die Machbarkeit eines Spurwechsels. Dabei wird zwischen einer empfehlenden Lichtfunktion (Spurwechsel ist möglich) und einer warnenden Lichtfunktion (Spurwechsel ist nicht möglich) differenziert. Bezüglich vertiefender Details zur Erkennung und Klassifikation der Spurwechselintention des Fahrers sei auf die Arbeit von Omerbegovic, Funk und Neumann (2014) verwiesen.

Die empfehlende Lichtfunktion leuchtet die Zielspur heller aus, wenn ein gefahrloser Spurwechsel möglich ist (Omerbegovic et al., 2015). Dafür wird die Lichtintensität der Scheinwerfer erhöht, und die Aufmerksamkeit des Fahrer mittels einer dynamischen Erweiterung der Lichtverteilung zur Zielspur gelenkt. Die warnende Lichtfunktion dimmt

dagegen die Helligkeit der Scheinwerfer im linken Bereich ab, um den Fahrer von dem Spurwechsel abzuhalten. Beide Lichtfunktionen wurden mit $N = 40$ Probanden bezüglich ihrer Wirkung auf das Fahrverhalten, das Blickverhalten sowie den subjektiv empfundenen Stress im Vergleich zu einer Kontrollfahrt ohne Lichtfunktion untersucht. Hinsichtlich der empfehlenden Lichtfunktion nehmen 82,4 % der Probanden die Assistenz wahr. Die Blickzuwendung zur Zielspur verdoppelt sich bei der Fahrt mit dem System im Vergleich zur Fahrt ohne System. 64,7 % fühlen sich durch diese Lichtfunktion unterstützt. Hinsichtlich der warnenden Lichtfunktion nehmen nur 47,1 % die Assistenz wahr. Dennoch werden auch hier doppelt so viele Blicke zur Zielspur erfasst als in der Fahrt ohne System. Unterschiede im Fahrverhalten werden nicht gefunden. Der subjektiv wahrgenommene Stress wird während sämtlicher Fahrten mit maximal 2 auf einer Skala von 0 bis 10 eingestuft und offenbart somit keine Unterschiede.

Als Zusammenfassung der Studien kann man sagen, dass eine Richtungsangabe das Verhalten beim Spurwechsel unterstützt (Hofmann et al., 2010). Zudem liegen erste Ideen bezüglich einer Kombination von Längsdynamikhinweisen und Richtungsangaben (Nutzung von Pfeilen) zur Unterstützung des Spurwechsels vor (Habenicht, 2012). Omerbegovic et al. (2015) zeigen zudem ein Konzept zum Einsatz von lichtbasierter Fahrerassistenz und unterstreichen, dass eine empfehlende Lichtfunktion des eigenen Fahrzeugs den Spurwechsel positiv unterstützt. Eine Warnung durch die Reduktion von Reizen (Abdimmung der Lichtverteilung) zu generieren, stellt einen neuartigen Ansatz dar. Konzepte mit Projektionen von Fremdfahrzeugen, die den Fahrer beim Spurwechsel unterstützen, sind bisher in keiner Studie untersucht.

2.3.3 Einfädelung

Eine hilfreiche Fahrerassistenz für das Einfädelmanöver besteht laut Vollrath, Schießl und Knake-Langhorst (2006) aus einem Komfortsystem und einem Sicherheitssystem. Dabei unterstützt das Komfortsystem den Fahrer bei der Vermeidung von Überforderung, während das Sicherheitssystem zur Kompensation der Fahrerfehler eingesetzt wird. Sowohl die ausreichende Abstandhaltung zum Vorderfahrzeug als auch das flüssige Heranführen des eigenen Fahrzeugs an eine geeignete Lücke werden dabei als die zwei Teilaufgaben definiert, welche die Sicherheit dieses Fahrmanövers maßgeblich beeinflussen.

Knake-Langhorst, Löper und Schebitz (2014) stellen einen **Einfädelassistenten** vor, welche sich der „neuartige[n] Betrachtung sämtlicher vom Fahrer potenziell einsehbarer Lücken auf dem Zielfahrstreifen“ (S. 39) widmet. Der Assistent unterstützt den Fahrer in Autobahnknotenpunkten und -anschlussstellen. Er unterteilt sich in vier Stufen:

1. Die **Basisfunktion** informiert über die optimale Geschwindigkeitswahl bezogen auf die Fahrstreifengeometrie und integriert bekannte Assistenzsysteme:
 - Spurverlassungswarnung
 - Abstandswarnung zum Vorderfahrzeug
 - Spurwechselwarnung bei Belegung des Zielstreifens

2. Der **Lückenfinder** detektiert und bewertet alle verfügbaren Lücken auf dem Zielfahstreifen und unterstützt somit die Orientierung der Fahrer im Verkehrsgeschehen.
3. Der **Lückenführer** nimmt eine Priorisierung der Lücken vor und unterstützt bei der Handlungsplanung durch die „Empfehlung der anzuweisierenden Position innerhalb der höchst priorisierten Lücke“ (Knake-Langhorst et al., 2014, S. 39). Zudem erfolgt bei Bedarf eine Beschleunigungsempfehlung, um das Fahrzeug auf die Höhe der Zielposition zu führen.
4. Die **automatische Längsführung** regelt die Fahrzeuggeschwindigkeit selbständig, kann aber durch den Fahrer übersteuert werden. Sie unterstützt auf der Ebene der Handlungsausführung.

Die Fahraufgabe des Fahrers bleibt die manuelle Querführung des Fahrzeugs. Das technische System wurde durch den Einbau in ein Testfahrzeug in realen Versuchsszenarien erfolgreich validiert. Die Anzeige des Assistenten erfolgt auf einem Display in der Mittelkonsole. Dabei werden mögliche Lücken grün markiert, während durch andere Fahrzeuge besetzte Teile der Fahrbahn rot eingefärbt werden. Eine empirische Studie zur Evaluation des Systems ist nicht bekannt.

Eine einfachere **Umsetzung eines Einfädelassistenten** stellen de Waard, Dijksterhuis und Brookhuis (2009) vor. Dieser wurde in einer Fahrstudie mit $N = 33$ Probanden neben anderen Einflussfaktoren auf das Einfädelverhalten (Verkehrsdichte von LKWs, Länge des Beschleunigungsstreifen und Anwesenheit eines langsameren Folgefahrzeugs) evaluiert. Die Stichprobe wurde in jüngere (25-40 Jahre, $n = 16$) und ältere (> 65 Jahre, $n = 17$) Fahrer unterteilt, sodass Alterseffekte zusätzlich erhoben wurden. Der Einfädelassistent wurde immer dann aktiviert, wenn die Fahrzeuggeschwindigkeit unterhalb der Zielgeschwindigkeit lag. Dabei wurde zwischen zwei Zielgeschwindigkeiten unterschieden:

- Zielgeschwindigkeit **80 km/h** bei 400 m Entfernung zur ersten Einfädelmöglichkeit (Beginn der gestrichelten Fahrbahnmarkierung zwischen Beschleunigungsstreifen und Zielspur)
- Zielgeschwindigkeit **90 km/h** bei 100 m Entfernung zum gleichen Punkt

Wurde eine dieser Zielgeschwindigkeiten nicht eingehalten, ertönte die Aussage „*Accelerate!*“ (engl.: „Beschleunige!“). Pro Einfädelmanöver ertönte der Ausruf maximal zwei Mal. Die Probanden waren zur Beginn der Durchführung über das System informiert. Der Einfädelassistent wurde in 21.2 % der Fahrten aktiviert, meistens bei den älteren Fahrern.

Die Ergebnisse zeigen eine Geschwindigkeitszunahme über die gesamte Stichprobe, wenn die Probanden mit dem System fahren. Kommt es zur Aktivierung des Systems, ist die Geschwindigkeitszunahme höher, als wenn das System nicht aktiviert wird. Zur Akzeptanzbewertung des Einfädelassistenten evaluieren die Probanden das Konzept nach der Instruktion und nach der Durchführung hinsichtlich seines Nutzens und seiner erzeugten Zufriedenheit. Während bei den älteren Fahrern die Bewertungen nach der Durchführung

auf beiden Skalen positiv ansteigen, nimmt die Akzeptanz der jüngeren Fahrer nach dem aktiven Erleben des Systems ab. Die Autoren kritisierten im Nachhinein die Einfachheit des Systems: Eine Aufforderung zur Beschleunigung, lediglich aufgrund der eigenen Geschwindigkeit und ohne Beachtung des Umfelds, sei eine zu simple Umsetzung der Assistenz.

Ein weiterer Ansatz ist das kooperative Konzept *Gap Assist* des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (2014). Eine Anzeige im HUD hilft dem Fahrer bei dichtem Verkehr, eine ausreichend große Lücke für den Spurwechsel zu finden. Eine vorgeschaltete Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern ermöglicht das Einfädeln durch die Längsführungsanpassung der Partner. Möchte ein Fahrer von der rechten auf die linke Spur einfädeln, sucht der *Gap Assist* nach Aktivierung ein Partnerfahrzeug auf der Zielspur, welches durch eine kurze Bremsung eine Lücke entstehen lassen könnte. Daraufhin wird eine Anfrage an das System dieses Fahrzeugs geschickt. Nach Bestätigung des Fahrers auf der Zielspur wird das Beschleunigungsverhalten seines Partnerfahrzeugs angepasst und bei ausreichender Lücke eine Mitteilung zum Einfädeln an das einscherende Fahrzeug kommuniziert.

Der Nutzer ist ab der Aktivierung des Systems durchgehend über den Status der Systemanfrage durch Anzeigen im HUD informiert. Das eigene Fahrzeug ist immer im Zentrum abgebildet. Der Nachrichtenaustausch zwischen den Fahrern (Anfrage und Zusage) wird im jeweiligen Fahrzeug durch eine Sprechblase angezeigt. Ein grünes Rechteck zeigt die freie Lücke an.

Bremssungen und schnelle Beschleunigungen können durch diese Kooperation beider Fahrzeug vermieden werden. Dies führt zu einem effizienteren Verkehrsfluss. Das System ist nach aktuellen Veröffentlichungen für den Spurwechsel auf der Autobahn vorgesehen. Eine Unterstützung in einer Einfädelsituation ist bei ausreichender Technik ebenfalls vorstellbar. Eine empirische Studie zur Evaluation des Systems ist nicht bekannt.

Hinsichtlich des Einfädelmanövers wird festgehalten, dass ein umfangreiches Konzept zur Fahrerunterstützung vorliegt (Knake-Langhorst et al., 2014). Eine abschließende technische Validierung steht bisher noch aus. Speziell für das Einfädelmanöver evaluierte Konzepte präsentieren keine zufriedenstellende Fahrerassistenz (de Waard et al., 2009). Der Ansatz, zusätzlich zur Spurwechselaufforderung auf die Längsdynamik einzuwirken, wird verfolgt. Der kooperative Ansatz zur Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern öffnet zudem ein neues Forschungsfeld. Weitere aussagekräftige Studien zur Einfädelassistentz sind nicht bekannt.

2.4 Stand der Technik

Der Stand der Technik fasst bestehende Fahrerassistenzsysteme für die relevanten Fahrmanöver Geschwindigkeitsbegrenzung, Spurwechsel und Einfädelung zusammen. Fahrerassistenzsysteme sind dabei als Komfortsysteme zu verstehen. Sie unterstützen den Fahrer bei

seiner Fahraufgabe. Das Kapitel bietet zudem einen Überblick über bestehende und sich in Entwicklung befindende lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme. Abschließend werden die technischen Voraussetzungen für eine hochauflösende Lichtverteilung kurz dargestellt.

2.4.1 Bestehende Fahrerassistenzsysteme

Um den Fahrer hinsichtlich seiner Geschwindigkeitswahl zu unterstützen, existiert die bereits in Serie hergestellte **Verkehrszeichenerkennung**, die den Fahrer über die aktuelle Geschwindigkeitsbegrenzung und Überholverbote in Kenntnis setzt (Winner, Hakuli, Lotz & Singer, 2015). Mithilfe des Kamera- und des GPS-Systems im Fahrzeug werden Verkehrszeichen und Daten einer digitalen Karte erfasst. Die Darstellung der Information erfolgt im Display des Navigationsgeräts, in der Multifunktionsanzeige oder im HUD.

Der **prädiktive Effizienzassistent** (Audi AG, 2014) weist den Fahrer auf Basis von Streckendaten auf ein sicheres Fahrverhalten bezüglich seiner Geschwindigkeit hin. Das System erkennt dabei Kurven, Kreuzungen, Kreisverkehre und Gefälle sowie den Beginn von Ortschaften und Geschwindigkeitsbegrenzung-Schildern. Im HUD oder im Kombi-Instrument erscheint neben einem schriftlichen Hinweis ein grün eingefärbter Fuß, der vom Gaspedal genommen werden soll.

Hinsichtlich der Spurwechselassistentz beschreibt die ISO-Norm 17387 **Fahrstreifenwechselwarnsysteme** (DIN ISO 17387, 2008), welche als *Lane Change Decision Aid Systems (LCDAS)* bezeichnet werden. Dabei werden drei Systemtypen unterschieden, welche sich über die eingesetzten Umfeldsensoren differenzieren (Bartels, Meinecke & Steinmeyer, 2015). Systeme vom Typ I überwachen dabei lediglich den toten Winkel auf der linken und rechten Seite des eigenen Fahrzeugs, während Systeme vom Typ II nur die linke und rechte Annäherungszone überprüfen. Systeme des Typs III kombinieren beide Eigenschaften und liefern Informationen über beide Bereiche auf beiden Seiten des Fahrzeugs.

Der **Blindspot-Assistent** stellt beispielsweise ein Fahrstreifenwechselwarnsystem des Typs I dar (Bartels et al., 2015). Das System überwacht ab einer Geschwindigkeit von 15 km/h den Bereich von 20 m neben und hinter dem Fahrzeug. Der **Side Assist** wird dem Typ III zugeordnet. Zwei Radarsysteme im Heck erfassen dabei Bereiche bis ca. 70 m hinter und im toten Winkel neben dem Fahrzeug (Volkswagen AG, 2015b). Eine gelbe LED im Außenspiegel leuchtet unabhängig von der Spurwechselintention des Fahrers auf, sobald ein Fahrzeug auf der Nebenfahrbahn detektiert wird. Um unnötige Warnungen zu vermeiden, wird bei Typ III-Systemen die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem eigenen Fahrzeug und Fahrzeugen auf der Nebenfahrbahn berücksichtigt. Bestätigt der Fahrer trotz des konstanten Leuchtens der LED den Blinker, fängt die LED auf der jeweiligen Seite mit erhöhter Helligkeit an zu blinken und weist somit auf die Gefahr eines sich annähernden Fahrzeugs hin. Die Erweiterung des Warnsystems durch einen Spurhaltungsassistenten verstärkt die Warnung zusätzlich durch eine leichte Vibration am Lenkrad, sollte der Fahrer trotz blinkender LED den Spurwechsel einleiten (Bartels et al., 2015).

2.4.2 Bestehende lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme

Aktive Lichtfunktionen, wie sie in dieser Arbeit entwickelt werden, bestehen bisher nicht im Serieneinsatz. Vorhandene adaptive Scheinwerfersysteme legen den Schwerpunkt auf die Verbesserung der Sicht (Kurvenfahrlicht, Abbiegelicht, *Dynamic Light Assist*) und den Hinweis auf Gefahren (Markierungslicht, adaptives Bremslicht). Derartige Funktionen werden unter dem Begriff „lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme“ zusammengefasst (Amsel, Florissen & Pietzonka, 2010).

Das Kurvenfahrlicht unterscheidet sich in eine dynamische und eine prädiktive Ausführung (Priesner, 2010). Bisher ist jedoch nur die dynamische Variante im Serieneinsatz für Kunden verfügbar. Beim **dynamischen Kurvenfahrlicht** schwenken die Scheinwerfer unter Berücksichtigung von Lenkwinkel und Geschwindigkeit um bis zu 15 Grad zur Seite (Volkswagen AG, 2015b). Die Fahrbahnausleuchtung verbessert sich damit in Kurven um bis zu 90 % (Abbildung 2.10). Das Kurvenfahrlicht wird ab einer minimalen Geschwindigkeit von 10 km/h aktiviert und basiert meist auf einem Bi-Xenon Schwenksystem. Eine Kombination mit Halogenlampen ist allerdings ebenfalls möglich (Priesner, 2010).

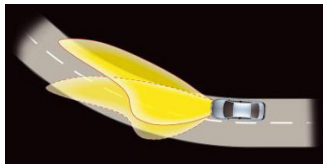


Abbildung 2.10: Dynamisches Kurvenfahrlicht (Volkswagen AG, 2015b).

Das **prädiktive Kurvenfahrlicht** steuert die Scheinwerferausrichtung vorausschauend und passt sie dem Straßenverlauf an (Fraunhofer-Institut für Eingebettete Systeme und Kommunikationstechnik, 2012). Mithilfe von Straßenattributen, digitalen Kartendaten sowie Lenkwinkel- und Beschleunigungssensoren wird die gegenwärtige und zukünftige Fahrzeugposition ermittelt. Vorhandene Lücken in den gesammelten Daten sollen durch ein vom Fraunhofer-Institut für Eingebettete Systeme und Kommunikationstechnik (2012) entwickeltes Datenfusionsmodul geschlossen werden. Eine *Car-to-X*-Einheit zur Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und der Infrastruktur erweitert die Vorhersagbarkeit des Systems. Der Fahrzeughersteller Audi AG zeigt einen ersten Schritt in Richtung Serieneinsatz und bietet ein dynamisches Kurvenlicht im Matrix-LED-Scheinwerfer an, welches mit navigationsdatenbasierter Fahrzeugunterstützung bereits kurz vor dem Lenkradeinschlag reagiert (Audi AG, 2015).

Das **statische Abbiegelicht** wird häufig in Kombination mit dem Kurvenlicht von Fahrzeugherstellern angeboten. Je nach Modell ist das System in den Hauptscheinwerfern oder in den Nebelscheinwerfern eingebaut (Volkswagen AG, 2015b). Das Abbiegelicht wird bei eingeschlagenem Lenkrad oder gesetztem Blinker automatisch an Kreuzungen oder Einmündungen zugeschaltet. Die Aktivierung des Lichts geschieht situationsabhängig und

nur unterhalb von 40 km/h. Der Abbiegebereich wird dadurch ausgeleuchtet und vereinfacht die Wahrnehmung von Passanten, sodass das Unfallrisiko sinkt (Abbildung 2.11).



Abbildung 2.11: Statisches Abbiegelicht (Volkswagen AG, 2015b).

Eine weiteres adaptives Schweinwerfersystem im Serieneinsatz ist der sogenannte **Dynamic Light Assist**. Dieser erzeugt eine variable Straßenausleuchtung mit dauerhaftem Fernlicht ohne Blendung des Gegenverkehrs (Volkswagen AG, 2015b). Teile des Fernlichts werden dafür durch eine Maskierungsfunktion abgeblendet (Abbildung 2.12). Eine Kamera im Innenspiegel liefert die notwendigen Daten über die Straßenbeleuchtung und die anderen Verkehrsteilnehmer.

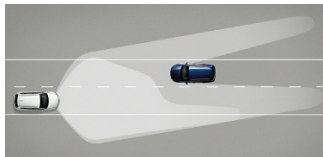


Abbildung 2.12: *Dynamic Light Assist* (Volkswagen AG, 2015b).

Automotive Lighting (2011) hat ein neues aktives Nachtsichtsystem mit dem sogenannten **Markierungslicht** entwickelt. Für das menschliche Auge unsichtbare Infrarotquellen der Scheinwerfer beleuchten die Fahrbahn und erfassen die Straßenszene. Personen, Tiere sowie kalte Objekte (beispielsweise Hindernisse) können dadurch vom System frühzeitig erkannt werden. Ein schwenkbares Lichtmodul erzeugt das Markierungslicht, welches je nach Fahrzeughersteller das erkannte Objekt ein- bis mehrfach mit einem Spotlicht markiert.

Während der Fahrer durch die bisher beschriebenen lichtbasierten Fahrerassistenzsysteme unterstützt wurde, dient das **adaptive Bremslicht** zur verbesserten Wahrnehmung des eigenen Fahrzeugs für andere Verkehrsteilnehmer. Während bei einem leichten Abbremsen das bekannte Bremslicht angezeigt wird, blinken bei einer Notbremsung die Bremsleuchten (Winner et al., 2012). Kurz vor dem Fahrzeugstillstand wird zudem die Warnblinkanlage eingeschaltet, deren Deaktivierung durch das erneute Beschleunigen automatisch oder mithilfe des manuellen Betätigens der Warnblinkanlage geschieht.

Das in der Rückleuchte des Fahrzeugs verbaute **intelligente Laser-Schlusslicht** geht mithilfe einer Laserdiode einen Schritt weiter: Der Laser projiziert einen roten Balken auf die Fahrbahn, der den Hintermann zur Abstandseinhaltung aufruft (Berlitz, 2015). Sorgen schlechte Wetterverhältnisse wie Nebel für schlechte Sicht, werden die Laserstrahlen

durch die Wasserpartikel in der Luft sichtbar, sodass der rote Balken als ein Warndreieck wahrgenommen wird und die Warnung verstärkt. Die Lichtprojektion ist nur vom direkten Hinterrum zu sehen. Ein Serieneinsatz dieses Systems ist jedoch aktuell wegen fehlender gesetzlicher Grundlagen nicht möglich.

Ebenfalls noch nicht in Serie sind verschiedene innovative Lichtkonzepte zur Längsführungsunterstützung im urbanen Bereich und in Baustellen sowie zur Hilfestellung bei der Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion. Die **optische Fahrerunterstützung** projiziert zwei statische Lichtstreifen vor das Fahrzeug, welche die Fahrzeugbreite verdeutlichen (Hanser Automotive, 2013). Dem Fahrer soll dadurch die Spurhaltung in Engstellen oder Baustellen erleichtert werden, da die eigene Position des Fahrzeugs sowie die Reststreifenbreite einfacher abgeschätzt werden können.

Kume (2015) stellt eine **Road Surface-illuminated Signal Lamp** vor, welche durch Lichtprojektionen eine Notbremsung verstärken (Abbildung 2.13, links), ein Zurücksetzen des Fahrzeugs kommunizieren (Abbildung 2.13, mittig) oder eine Spurwechselintention verdeutlichen soll (Abbildung 2.13, rechts). Das LED-Licht wird dabei mithilfe einer Sammellinse gebündelt und durch verschiedene Formen einer Blende auf die Straße projiziert.

Mitsubishi (2015) führt die Projektionen zur Längsführung mit dem **innovative directional indicator system** weiter und entwirft für das Vorwärtsfahren sowie das Zurücksetzen im urbanen Bereich Lichtprojektionen. Das Vorwärtsfahren wird dabei durch nach vorne zeigende Pfeile kommuniziert, welche vor das Fahrzeug projiziert werden. Das Zurücksetzen wird mit Hilfe von rot eingefärbten Bögen hinter dem Fahrzeug dargestellt. Die Lichtfunktionen sollen dem Fußgänger die Intention des Fahrzeugs verdeutlichen. Zur Warnung vor aufgehenden Türen bei z. B. Busstops wird ebenfalls eine Lichtfunktion vorgestellt, welche den Radius einer aufgehenden Tür durch einen blaugrünen Fächer anzeigt. Die Lichtprojektion wird ebenfalls auf Basis von LEDs entwickelt. Weitere Details sind bisher nicht bekannt.

Eine Weiterentwicklung der Umfeldbeleuchtung durch LEDs im Außenspiegel (Manz, Kooß, Klinger & Schellinger, 2007) stellt der **Lichtteppich** in Form eines Lichtmoduls im Bereich der Fahrertür an der Schwelle zum Fahrzeugboden dar (Fraunhofer Gesellschaft,



Abbildung 2.13: Notbremsung, links, Zurücksetzen, mittig, und Verstärkung des Blinkers, rechts. Eigene Darstellung nach Kume (2015).

2015). Im Gegensatz zur herkömmlichen Umfeldbeleuchtung wird das Licht auch bei Öffnen der Tür konstant auf den Einstiegsbereich projiziert. Winzige, lichtstarke digitale Projektoren ermöglichen ein scharfes Bild der Projektion, deren Anordnung die Form der Lichtfunktion bestimmt.

Um den Überblick über bestehende beziehungsweise sich öffentlich in Entwicklung befindende lichtbasierte Fahrerassistenzsysteme abzuschließen, sind die Konzeptideen zur Fahrzeug-Fußgänger-Interaktion mittels Licht von Lehmann (2015) zu beachten. Neben den LED-Leuchtmodulen an Front und Heck kommuniziert das Fahrzeug, indem es mithilfe eines **Laser-Projektionssystems** Informationen auf die Fahrbahn projiziert. Erste Ideen sind dabei ein virtueller Zebrastreifen, um einem Fußgänger am Straßenrand die gefahrlose Überquerung der Straße zu ermöglichen sowie die Anzeige der geplanten Halteposition bei Einleitung einer Bremsung im urbanen Bereich. Die vorgestellten Lichtkonzepte werden durch einzelne Laserdioden oder LEDs mit dem Einsatz von Blenden umgesetzt.

2.4.3 Technische Voraussetzung für eine hochauflösende Lichtverteilung

Die Entwicklung der Lichtkonzepte dieser Arbeit setzt eine hochauflösende Lichtverteilung voraus, welche durch eine detaillierte Pixelansteuerung jegliche Formen projizieren kann. Es existieren mehrere Technologien zur Realisierung einer hochauflösenden Lichtverteilung als technische Grundlage für die Projektion von aktiven Lichtfunktionen. Im Folgenden werden zwei Ansätze beschrieben, die sich zur Zeit noch im Forschungsstadium befinden.

Auf dem Konzept der digitalen Mikrospiegelvorrichtung (*engl. digital micromirror device (DMD)*) basiert ein hochauflösendes Scheinwerfersystem. Bei einem **DMD-Scheinwerfer** bilden ein Chip mit bis zu 8 652 000 einzeln steuerbaren Mikrospiegeln (4160 x 2080 Pixel) sowie eine Lichtquelle (LED, Laser) die technischen Hauptmodule (Frank, 2013). Die Spiegel teilen das Licht in kleine Pixel auf (Specht, 2015). Elektrostatische Felder ermöglichen eine Kippung jedes einzelnen Mikrospiegels bis zu 5000 Mal pro Sekunde. Je nach Stellung des Spiegels wird das Licht entweder auf die Straße reflektiert oder nicht. Im Grundaufbau wird lediglich weißes Licht projiziert. Durch eine Erweiterung mit einem vor den DMD-Chip geschalteten Farbrad kann die Projektion allerdings auch farbig gestaltet werden (Hutchison, 2005). Für weitere Details wird auf die Vorstellung des Monopol-Herstellers und Patentträgers *Texas Instruments* verwiesen (Texas Instruments, 2013).

Eine Alternative besteht im **RGB-Laserscanner**, welcher ebenfalls eine hochauflösende Lichtverteilung ermöglicht (Roth et al., 2015). Bei diesem Ansatz werden ein roter, grüner und blauer Laserstrahl mithilfe einer Linse auf einen beweglichen Mikrospiegel (*engl. Micro-Opto-Electro-Mechanical-System (MOEMS)*) fokussiert. Der Spiegel lenkt das Licht vor dem Fahrzeug in Form eines ansteuerbaren Rasters auf die Straße. Innerhalb dieser Fläche ist die Darstellung von beliebigen Symbolen und Formen in verschiedenen Farben möglich. Für weitere Details bezüglich des technischen Grundaufbaus wird auf die Arbeiten von Roth et al. (2014) und Roth et al. (2015) verwiesen.

2.5 Zusammenfassung

In Bezug auf die menschliche Informationsverarbeitung kann festgehalten werden, dass die Handlungsplanung im Mittelpunkt der zu entwickelnden Fahrmanöverunterstützung stehen sollte. Im Rahmen der Führungsaufgabe stellt diese abhängig vom Situationsbewusstsein den gefährdeten Bereich für die Hauptproblematiken Informationsmangel und Fehlentscheidungen des Fahrers dar (Vollrath, 2010).

Basierend auf der beschriebenen Unfallanalyse liegt der Schwerpunkt für die Erarbeitung von Unterstützungsmöglichkeiten auf folgenden drei Fahrmanövern:

- Folgen einer Straße
- Einfacher Fahrstreifenwechsel
- Einfädelmanöver

Eine an den Straßenverlauf unangepasste Geschwindigkeit erhöht das Risiko von Fehlinterpretationen beziehungsweise Fehlentscheidungen, welche durch eine Fehlanpassung des Fahrers zu Unfällen führen können. Hinsichtlich des Fahrstreifenwechsels und Einfädelns besteht die Gefahr sowohl bei der ungenügenden Beachtung als auch der erschwerten Wahrnehmung von Abstand und Geschwindigkeit des nachkommenden Verkehrs.

Die vorgestellten Untersuchungen heben hervor, dass ein Hinweis zur Geschwindigkeit in Kurven eine effektive Wirkung auf das Fahrverhalten bringen kann, und Empfehlungen zum Fahrverhalten akzeptiert und berücksichtigt werden (Ebersbach & Mayser, 2004). Eine Richtungsangabe unterstützt das Verhalten beim Fahrstreifenwechsel positiv (Hofmann et al., 2010). Erste Ansätze mit Kombinationen von Längsdynamikhinweisen und Richtungsangaben können diese Hilfestellung erweitern (Habenicht, 2012). Der Einsatz einer umgeformten Lichtverteilung unterstreicht zudem mögliche Empfehlungen, um einen Fahrstreifenwechsel zu unterstützen (Omerbegovic et al., 2015). Speziell für das Einfädelmanöver evaluierte Konzepte präsentieren keine zufriedenstellende Fahrerassistenz (de Waard et al., 2009). Eine Kombination aus Spurwechselaufforderung und Längsdynamikhinweisen wird auch für dieses Manöver verfolgt.

Bisher existierende Fahrerassistenzsysteme haben einen Warncharakter und greifen häufig in den Fahrverlauf ein. Neuartige Systemansätze zur Entscheidungsunterstützung in der Handlungsplanung nutzen das Kombi-Instrument, Anzeigeflächen in der Mittelkonsole oder das HUD zur Darstellung der Fahrerassistenz. Licht wird lediglich zur Wahrnehmungsoptimierung und Verbesserung der Sicht eingesetzt. Die technischen Voraussetzungen für eine hochauflösende Lichtverteilung zur Projektion von innovativen Lichtfunktionen sind in absehbarer Zeit realisierbar (Texas Instruments, 2013; Roth et al., 2014, 2015).

Licht führt!?

Konzeption und Evaluation von
Fahrmanöverunterstützung durch lichtbasierte
Fahrerassistenzsysteme

Krahnstöver, A.Z.

2017, XXV, 176 S. 67 Abb., 35 Abb. in Farbe., Softcover

ISBN: 978-3-658-17160-5