

Neue Ansätze zur Beurteilung der Fahrsimulatorvalidität

Schlüsselwörter: Fahrsimulator, Validität, Informationsverarbeitung, Bahnführung, Blickbewegung

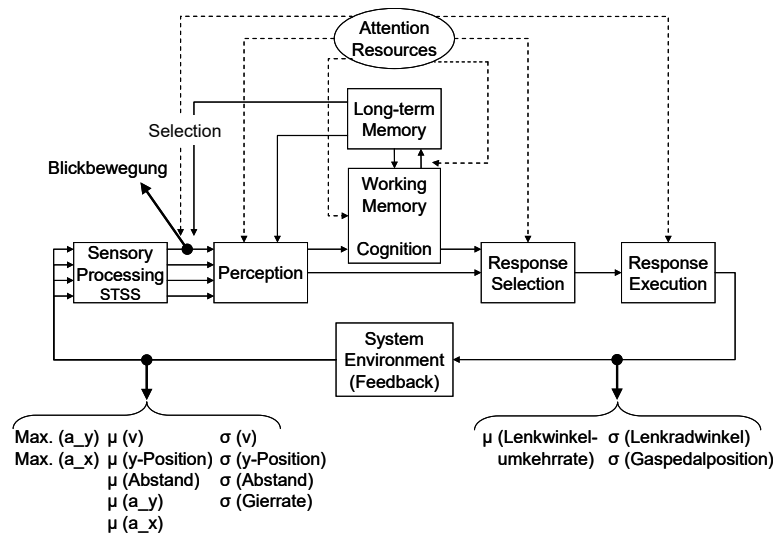


Bild 1: Um Validierungskennwerte erweitertes Stufenmodell der menschlichen Informationsverarbeitung nach Wickens & Hollands (2000), μ = Mittelwert, σ =Standardabweichung

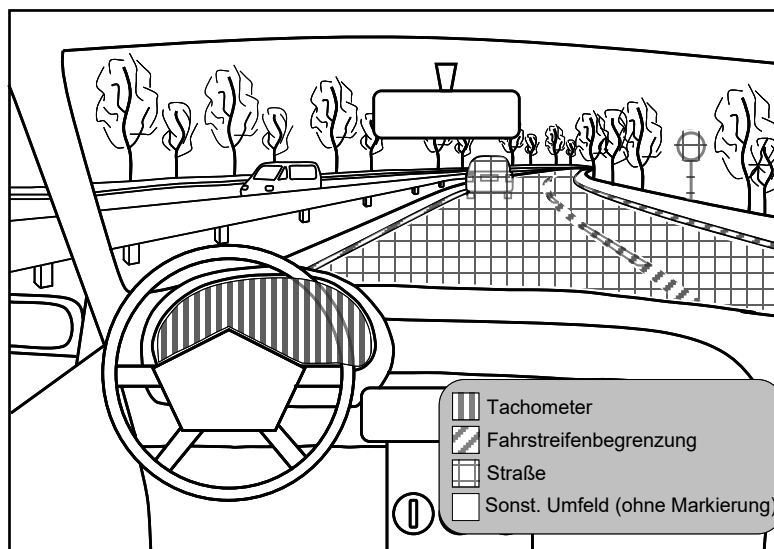


Bild 2: Interessensbereiche der Blickbewegungsanalyse

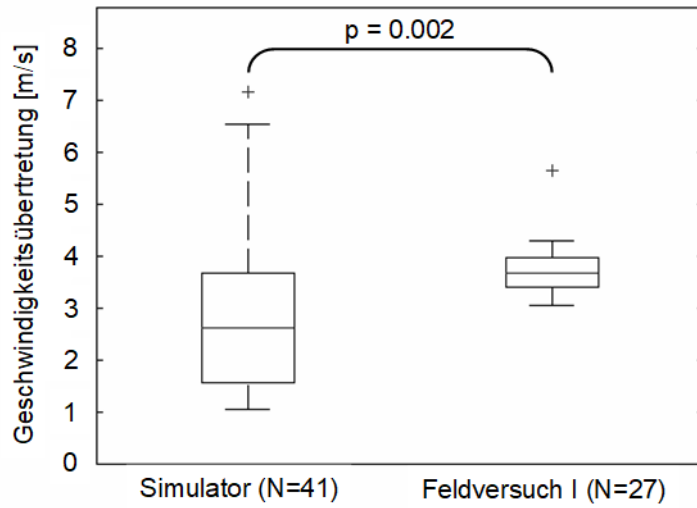


Bild 3: Verteilung der Werte der mittleren Geschwindigkeitsübertretung je Proband im Simulator und Feldversuch

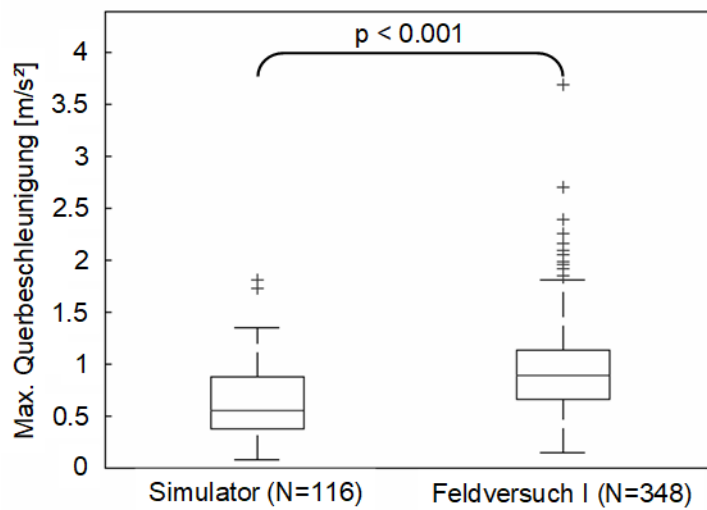


Bild 4: Verteilung der maximalen Querbeschleunigungswerte je Fahrstreifenwechsel im Simulator und Feldversuch

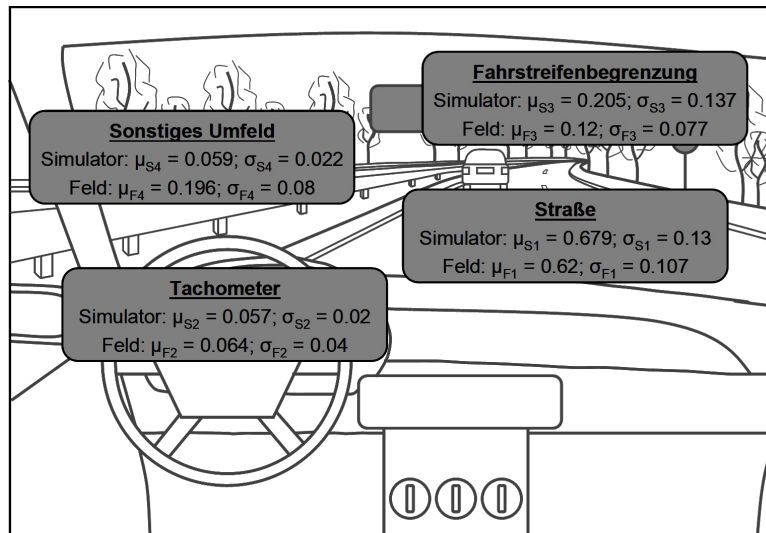


Bild 5: Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ) der relativen kumulierten Blickdauer je Interessensbereich für Simulator und Feldversuch

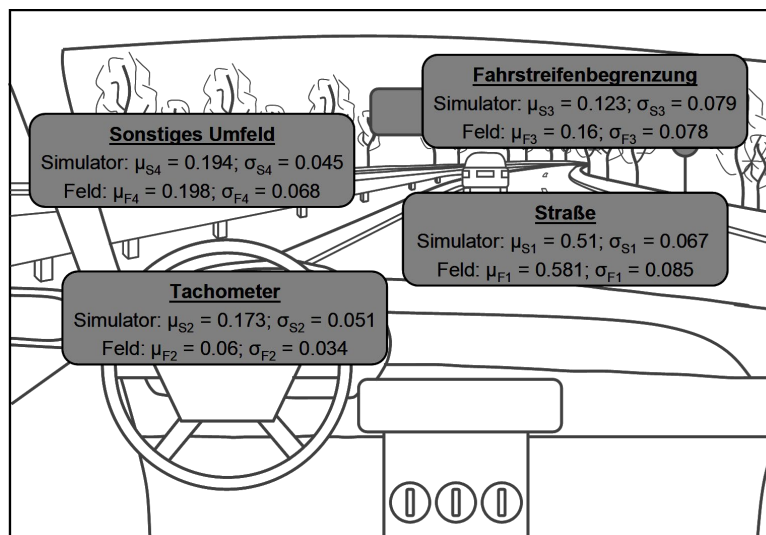


Bild 6: Mittelwerte (μ) und Standardabweichungen (σ) der relativen Blickhäufigkeit je Interessensbereich für Simulator und Feldversuch

Tabelle 1: Signifikanzniveaus, Freiheitsgrade und Testverfahren der Ergebnisse der Blickbewegungsanalyse, zweiseitige Testverfahren mit unabhängigen Stichproben; Signifikanzniveaus: *** = 5%; ** = 1%; ***=0.1%

Praktische Relevanz

Die Fahr Simulatorvalidierung, d.h. die Analyse der Übertragbarkeit der Ergebnisse aus Simulatoruntersuchungen auf die Realität, ist notwendige Voraussetzung für den Einsatz einer Fahrsimulation. Die bisher zur Validierung von Fahr Simulatoren verwendeten Kennwerte sind bei der Evaluation von Fahrerassistenzsystemen zum Teil aber nur von einer untergeordneten Rolle, da aufgrund der zunehmenden Unterstützungsleistungen von Fahrerassistenzsystemen immer mehr Stabilisierungsaufgaben von den Assistenzsystemen anstatt wie bisher vom Fahrer, übernommen werden.

Zusammenfassung

Wie ein Literaturüberblick zeigt, beschränken sich die bisher durchgeführten Studien meist auf Kennwerte der Fahrzeugstabilisierung wie z.B. die Standardabweichung der Querposition auf dem Fahrstreifen. Um den Katalog der bestehenden Kennwerte zu erweitern werden das Stufenmodell der menschlichen Informationsverarbeitung

von Wickens und Hollands (2000) sowie die Drei-Ebenen-Hierarchie der Fahrzeugführung nach Donges (1982) herangezogen. Beide stellen das Fahrerverhalten im gesamten Wirkungsgefüge Fahrer-Fahrzeug-Umwelt dar und bieten so einen Ansatz systematisch nach neuen Angriffspunkten für eine Validierung zu suchen. Anhand dieser Systematik werden exemplarisch Kenngrößen ausgewählt und anhand von Daten aus Feld- und Fahr Simulatorversuchen evaluiert (z.B. Blickbewegungsanalyse).

1 Einführung und Fragestellung

Fahr Simulatoren spielen in der heutigen Fahrzeugforschung eine tragende Rolle, da mit deren Hilfe die Mensch-Maschine-Interaktion von neuen Systemen, die noch nicht für den Straßenverkehr zugelassen oder vorhanden sind, untersucht werden können. Liegen sicherheitskritische Fragestellungen vor, ist der Fahr Simulator oftmals der einzige Weg einer Evaluation. Aus diesem Grund steigt auch das Bestreben für Forschungsvorhaben hoch entwickelte Fahr Simulatoren zu entwerfen und einzusetzen. Ziel ist es bei den Probanden ein möglichst realistisches Fahrerverhalten hervorzurufen.

Es existiert eine Vielzahl aufwendiger Fahr Simulatoren, die mit beachtlichem Aufwand betrieben werden. Unabhängig davon wie ausgereift die technischen Elemente des Simulators aber sind, handelt es sich dennoch um eine künstliche Umgebung. Um die Frage der Übertragbarkeit von Ergebnissen aus Fahr Simulatoruntersuchungen beantworten zu können, wurden in zahlreichen Validierungsuntersuchungen Realfahrten mit Fahrten in Simulatoren unterschiedlichster Komplexität verglichen. Dabei wurden verschiedenste Kombinationen an objektiven und subjektiven Kennwerten des Fahrerverhaltens zur Ermittlung der Validität von Fahr Simulatoren herangezogen.

Wird das Fahrerverhalten zwischen Simulator und Realfahrt durch die Gegenüberstellung von vorher definierten Kennwerten verglichen, können die Ergebnisse nicht nur auf Vorliegen oder Fehlen von Validität untersucht werden. Zusätzlich kann zwischen relativer und absoluter Validität unterschieden werden. Von relativer Validität wird gesprochen, wenn die zu vergleichenden Kennwerte im Simulator dieselbe Tendenz wie im Feldversuch aufweisen (Blana 1996). So können Straßenmarkierungen sowohl im Simulator, als auch in der Realfahrt zu niedrigeren Geschwindigkeiten im Vergleich zu fehlenden Straßenmarkierungen führen, die Geschwindigkeitsabnahme im Simulator fällt aber höher aus als im Feld (Riemersma et al. 1990). Dagegen müssen die betrachteten Kriterien bei absoluter Validität identische oder zumindest in engen Grenzen gleichartige Werte aufweisen (Blana 1996). Dies liegt beispielsweise vor, wenn zwischen Simulator und Realfahrt kein statistisch signifikanter Unterschied bezüglich der durchschnittlichen Geschwindigkeit festgestellt werden kann. Da es sich bei absoluter Validität um eine allgemeingültige und damit erstrebenswertere Beurteilung des Fahrerverhaltens handelt, wird in dieser Studie das Vorliegen dieser getestet.

Eine der ersten Studien, die sich umfassend mit der Validität von Fahr Simulatoren beschäftigte, ist bei Blaauw (1982) zu finden. In dieser Studie wurde die Validität des statischen TNO Fahr Simulators bei Geradeausfahrten untersucht. In den Feld- und Simulatorversuchen wurden die Probanden instruiert entweder möglichst gerade oder mit möglichst konstanter Geschwindigkeit (100 km/h) zu fahren (ein Tachometer stand zur Verfügung). Dabei wurde den Probanden teilweise keine dieser Anweisung gegeben, nur eine der beiden oder beide gleichzeitig. Zur Analyse des Querführungsverhaltens wurden die durchschnittliche Position auf dem Fahrstreifen und deren Standardabweichung sowie die Standardabweichung der Gierrate und des Lenkradwinkels untersucht. Es wurde relative Validität festgestellt. Zur Untersuchung des Geschwindigkeitsregelverhaltens wurden die mittlere Fahrgeschwindigkeit und deren Standardabweichung sowie die Standardabweichung der Gaspedalposition herangezogen und es zeigte sich absolute Validität.

Harms (1996) untersuchte die Validität des dynamischen VTI Fahr Simulators im Hinblick auf die Fahrgeschwindigkeit und der Fahrbahnposition der Probanden. Obwohl im Simulator tendenziell schneller gefahren wurde, konnte eine absolute Validität der mittleren Geschwindigkeitswerte festgestellt werden. Zusätzlich wurden der Mittelwert der Fahrbahnposition zur Überprüfung der absoluten Übertragbarkeit herangezogen. Es konnten keine absolute Validität (im Simulator fuhren die Probanden näher an der Mittellinie als im Feld) und nur schwache Korrelationen bzgl. der Fahrbahnposition festgestellt werden.

Panerai et al. (2001) verglichen das Geschwindigkeitsregelverhalten ohne visuelle Rückmeldung der gefahrenen Geschwindigkeit und das Abstandsverhalten zu vorausfahrenden Fahrzeugen zwischen einem LKW-Fahr Simulator und LKW-Fahrten im Feld. Dabei waren die mittleren Geschwindigkeitswerte bezogen auf verschiedene Streckensegmente ebenso wie die Geschwindigkeitswerte bezogen auf Geschwindigkeitsvorgaben (Geschwindigkeitsbeschränkungen und Geschwindigkeitsanweisungen) hoch korreliert. Des Weiteren wies eine lineare Regression mit der Simulatorgeschwindigkeit als erklärende Variable und der Feldgeschwindigkeit als erklärende Variable auf absolute Validität hin. Im Hinblick auf das Abstandsverhalten wurde festgestellt, dass die mittleren Abstandswerte im Simulator etwa doppelt so groß waren wie im Feld.

Reymond et al. (2001) stellten bei einer Gegenüberstellung von Fahrsimulator und Feld fest, dass die Mittelwerte der Querbeschleunigung im dynamischen Fahrsimulator eher den Mittelwerten in der Realität entsprechen als bei statischer Simulatorexécution. Dabei wird aber darauf hingewiesen, dass die Stichprobengröße nicht ausreicht, um statistisch valide Aussagen treffen zu können.

Godley et al. (2002) untersuchten die Validität des dynamischen MUARC Fahrsimulators zur Analyse des Geschwindigkeitsverhaltens in Verbindung mit Maßnahmen, um die gefahrene Geschwindigkeit vor Gefahrenzonen zu verringern. Dazu wurde die mittlere Fahrgeschwindigkeit an Strecken mit „rumble strips“ (Rüttelstreifen zur akustischen Anzeige von zu hoher Geschwindigkeit) herangezogen und untersucht. Aus den Resultaten wurde gefolgert, dass insgesamt relative Validität bezüglich des Geschwindigkeitsverhaltens vorlag.

Brünger-Koch et al. (2006) bewerteten in ihrer Studie verschiedene Bewegungscharakteristiken des dynamischen DLR Fahrsimulators untereinander und im Vergleich zur Realität. Die mittlere Geschwindigkeit und deren Standardabweichung, die Standardabweichung der Fahrbahnposition sowie die Lenkwinkelumkehrrate wurden analysiert. Die durchschnittliche Geschwindigkeit lag im Feldversuch signifikant geringer und im Unterschied zu den bisher genannten Studien konnte bezüglich dieses Kennwertes keine absolute oder relative Validität festgestellt werden. Bezogen auf die Standardabweichung der Geschwindigkeit wurde hingegen kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Untersuchungsumgebungen nachgewiesen. Hinsichtlich der Standardabweichung der Fahrbahnposition wurde ebenfalls kein signifikanter Unterschied zwischen Simulator und Feld bestimmt. Bezogen auf die Lenkwinkelumkehrrate wurde bei geraden Streckenabschnitten ein wesentlich größerer Wert bei der Realfahrt als im Simulator beobachtet.

Hirata et al. (2007) untersuchten die Validität des dynamischen MOVIC-T4 Fahrsimulators bei Tunnelfahrten im Simulator und im Feld. Im ersten Versuch sollten die Probanden ohne visuelle Geschwindigkeitsanzeige mehrmals bestimmte Soll-Geschwindigkeiten fahren. Die mittleren Fahrgeschwindigkeiten waren im Simulator höher, aber nicht statistisch signifikant. Zusätzlich wurden die Probanden angewiesen vorausfahrenden Fahrzeugen mit vier verschiedenen Soll-Abständen mehrmals zu folgen. Die von den Fahrern gewählten Ist-Abstände waren zwar im Simulator geringer, aber nur bei Vorgabe des geringsten Soll-Abstandes wurde ein signifikanter Unterschied zwischen dem Simulator und dem Feld beobachtet. Bei der Aufforderung, einem vorausfahrenden Fahrzeug mit einem selbstgewählten Sicherheitsabstand zu folgen, wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt, aber es zeigte sich die Tendenz, dass bei höheren Geschwindigkeiten der Abstand im Simulator im Verhältnis zur Realität abnimmt. Ferner wurde das Verzögerungsverhalten untersucht, indem die Fahrer, sowohl im Feld als auch im Simulator, beginnend an einem ersten Schild verzögern sollten, um möglichst nahe an einem zweiten Schild zum Stillstand zu kommen. Bei Betrachtung der maximalen Verzögerungswerte wurde festgestellt, dass die Fahrer im Fahrsimulator signifikant stärkere Verzögerungen gewählt haben als im Feld. Daneben wurde festgestellt, dass eine dynamische Simulatorexécution die Verzögerungswerte gegenüber einer statischen Ausführung signifikant verringert.

Um den Zusammenhang und Anknüpfungspunkt der eben vorgestellten Kennwerte der Fahrsimulatorvalidierung bezüglich der Verarbeitung von Informationen bei Ausführung der Fahraufgabe aufzeigen zu können, werden diese dem von Wickens und Hollands (2000) entwickelten Stufenmodell der menschlichen Informationsverarbeitung (Bild 1) zugeordnet. Diese liefern mit ihrem Stufenmodell einen grundsätzlichen Rahmen, um das menschliche Verhalten bei der Interaktion mit einem System, beispielsweise einem Fahrzeug oder Fahrsimulator, zu analysieren. Dabei teilt sich die Informationsverarbeitung in eine Folge von Teilbereichen, deren Funktion in der Transformation oder der Ausführung von Operationen bezüglich der Information besteht. Des Weiteren weist die Rückkopplung über „System Environment“ darauf hin, dass kein fester Startpunkt vorliegt, die Informationsverarbeitung also in jeder Stufe ausgelöst werden kann. Beim „Sensory Processing“ werden die durch menschliche Sinneswahrnehmung, wie Sehen oder Hören, verfügbaren Informationen aufgenommen und können für kurze Zeit im „short-term sensory store“ (STSS) zwischengespeichert werden. Im Bereich „Perception“ findet das Entschlüsseln der Bedeutung bezüglich der ungefilterten Reize statt. Dabei wird, falls vorhanden, auf bereits Erlebtes zurückgegriffen. In der „Cognition“ werden die wahrgenommenen Informationen analysiert und zur Entscheidung vorbereitet. Dazu gehören Aktivitäten wie das Planen einer optimalen Route. Abhängig vom Neuheits- und Komplexitätsgrad einer Entscheidung benötigt der Fahrer in dieser Stufe auch unterschiedlich viel Zeit. In den folgenden Abschnitten (Response Selection und Execution) geht es um die durch die vorherigen Bereiche ausgelöste Wahl und Ausführung geeigneter Reaktionen, welche dafür Sorge tragen sollen, dass ein angestrebtes Ziel erreicht wird. Der Fahrzeugführer entscheidet sich beispielsweise nach einer Beschleunigung eine bestimmte Geschwindigkeit konstant zu halten. Diese Entscheidung könnte durch Veränderung der Gaspedalposition ausgeführt werden. Dabei lassen Durchschnitts- oder Maximalwerte von Validierungskenngrößen Rückschlüsse auf die „Response Selection“ zu, also auf die Wahl der Sollgrößen der Fahrzeugführung, während die Variabilität von Kennwerten, also deren Standardabweichungen, Rückschlüsse auf die „Response Execution“ zu lassen. Diese zeigen die Ausführung der gewählten Reaktion. Die Rückkopplung (Feedback) macht deutlich, dass die ausgeführten Aktionen früher oder später durch das System wahrnehmbar werden. Hier kann zwischen vom Fahrer ausgehenden Kennwerten wie Lenkwinkel oder Gaspedalposition (direkte Fahrerhaltenskennwerte) und vom System Fahrzeug bzw. Simulator ausgehenden Kennwerten

(indirekte Fahrerverhaltenskennwerte), wie Geschwindigkeit oder Fahrstreifenposition, unterschieden werden. Während erstere direkt nach der „Response Execution“ abgegriffen werden können, liegen die vom System Fahrzeug ausgehenden Kennwerte im Bereich nach der Rückkopplung. Gemeinsam ist all diesen Kennwerten, dass sie sich auf den Abschnitt ab der Reaktionswahl, aber vor erneutem Eingang von Reizen beziehen. Jedoch spielt die Aufmerksamkeit (Attention) eine zentrale Rolle im Informationsverarbeitungsprozess. Da viele der mentalen Operationen nicht automatisch sondern durch selektive Anwendung begrenzter Ressourcen ausgeführt werden, muss eine gesteuerte Auswahl dieser stattfinden. Wie das Modell aufzeigt, bezieht sich die Auswahl auf die Sinnesreize. Für das Blickverhalten beispielsweise bedeutet dies, dass der Mensch sich entscheiden muss wann er wo hinsieht, er kann seine visuelle Aufmerksamkeit also nicht gleichzeitig auf alle visuellen Reize richten. Genau an diesem Punkt kann eine Analyse des Blickbewegungsverhaltens angreifen und Fahr Simulatorvalidität an einem anderen Teilbereich der Informationsverarbeitung untersucht werden. Ein Vergleich der Blickbewegungen zwischen Fahr Simulator und Feldversuch zeigt, ob Personen gleiche selektive Aufmerksamkeit in beiden Systemen zeigen oder nicht und stellt möglicherweise eine weitere Methode zur Fahr Simulatorvalidierung da.

Ein weiteres Modell zur Fahrerverhaltensanalyse liefert Donges (1982), welches mit dem Modell von Wickens und Hollands (2000) in Verbindung gebracht werden kann. Donges (1982) untergliedert die Aufgabe der Fahrzeugführung in eine dreistufige Hierarchie, die Navigations-, Bahnführungs- und Stabilisierungsebene. Hierbei beinhaltet die Navigationsebene die Auswahl einer geeigneten Fahrtroute aus den gegebenen Möglichkeiten und die Abschätzung des zeitlichen Fahrtablaufs. Dieser Prozess steht im Zusammenhang mit dem Teilbereich „Cognition“ des Stufenmodells der menschlichen Informationsverarbeitung, welcher für zeitintensive Operationen verantwortlich ist. In der Bahnführungsebene legt der Fahrer zur Umsetzung der gewählten Fahrtroute und aufgrund der situativen Gegebenheiten in der Fahrzeugumgebung eine Sollspur und eine Sollgeschwindigkeit fest. Diese Ebene steht in Verbindung mit der „Response Selection“, da dort der Fahrzeugführer seine Reaktionswahl festlegt und so die Sollgrößen bestimmt. In der Stabilisierungsebene ist der Fahrer dafür verantwortlich, dass der Ist-Zustand der Fahrzeugbewegung dem Soll-Zustand der Bahnführungsgrößen mit annehmbarer Genauigkeit folgt. Dies ist Teil der „Response Execution“ im Modell von Wickens und Hollands (2000). Dabei ist festzustellen, dass die in bisherigen Studien herangezogenen Kennwerte zur Untersuchung der Fahr Simulatorvalidität das Bahnführungs- (Durchschnitts- oder Maximalwerte) und Stabilisierungsverhalten (Standardabweichungen) des Fahrers beschreiben. In Zukunft werden immer mehr Fahrerassistenzsysteme in die Fahrzeuge Einzug halten, die die Fahrer stärker auch im städtischen Bereich unterstützen werden. In frühen Entwicklungsstadien dieser Systeme sind Fahr Simulatoren sehr gut geeignet, um die HMI Gestaltung sowie die Funktionalität der Systeme unter Einbeziehung von Autofahrern validieren zu können. Dementsprechend werden zur Validierung des genutzten Fahr Simulators Kenngrößen, die das vom Fahrer gewählte Bahnführungsverhalten des Fahrzeugs beschreiben, wichtiger, da größere Anteile der Fahrzeugstabilisierung von den Fahrerassistenzsystemen übernommen werden. Neue Kennwerte, die dies ermöglichen sollen und die im Folgenden näher erläutert werden, sind die durchschnittliche Geschwindigkeitsübertretung und die maximale Querbeschleunigung beim Fahrstreifenwechsel.

Die Geschwindigkeitsübertretung, integriert über eine Fahrmission, gibt Aufschluss über die Sollgeschwindigkeit, die der Fahrer wählt und bildet somit dessen Risikobereitschaft ab. Zusätzlich ermöglicht sie den Vergleich ähnlicher Streckenabschnitte mit unterschiedlichen Geschwindigkeitsbeschränkungen. Ebenso bietet die maximale Querbeschleunigung beim Fahrstreifenwechsel eine neue Analysemöglichkeit, da diese von der gewählten Bahnführung des Fahrers bestimmt wird und keine Stabilisierungsgröße ist.

2 Methodik

Die dieser Studie zugrunde liegenden Daten wurden in zwei Feldstudien und einer Fahr Simulatorstudie am Institut für Arbeitswissenschaft (IAD) der Technischen Universität Darmstadt im Rahmen von unterschiedlichen Forschungsprojekten erhoben.

Bei Feldversuch I, der für die Validierung anhand der Geschwindigkeitsübertretungen und der maximalen Querbeschleunigungen herangezogen wurde, ist ein Autobahnrundkurs mit einem Fahrzeug der oberen Mittelklasse befahren worden (Abendroth 2001). Der 228 km lange Rundkurs führte von der Technischen Universität Darmstadt über die A5 in Richtung Süden. Der Rückweg verlief über die A6, A61, A60, A67 und A672 zurück nach Darmstadt. Während der Versuchsfahrt wurden unterschiedliche Messwerte mit einer Abtastrate von 10 Hz erfasst und später auf eine Speicherfrequenz von 1 Hz aggregiert (z.B. Geschwindigkeit, Querbeschleunigung). Die Anzahl der Probanden lag bei 27 (26 männlich und 1 weiblich) im Alter zwischen 31 und 68 Jahren ($\mu=52.1$ Jahre, $\sigma=10.7$ Jahre).

Die Daten des Feldversuch II wurden zur Analyse der Blickbewegungen genutzt (Schreiber et al. 2010). Dabei befuhren die Probanden in einem Fahrzeug der oberen Mittelklasse in einer Teilstrecke des Versuchs die autobahnähnlich ausgebaute Bundesstraße 26 im Osten Darmstadts. Die Länge dieser Strecke betrug ca. 15 km

mit einer Fahrzeit von etwa 8-10 Minuten. Zur Aufzeichnung der Blickbewegungen wurde in den Versuchsfahrten ein Head-Mounted-System eingesetzt, d.h. die Probanden trugen einen Helm, an dem die für die Blickbewegungsaufnahme benötigten Komponenten (Infrarotkamera, Prisma und Umfeldkamera) montiert waren. Es wurde die aktuelle Blickrichtung berechnet und auf dem von der Umfeldkamera aufgezeichnetem Bild als Markierung dargestellt. Mittels einer Videocodierung mit der Software Interact wurden die Fixationsdauern und Fixationshäufigkeiten der Fahrer auf definierte Interessensbereiche aggregiert und die entsprechenden Zeitspannen bestimmt und gespeichert. Das Probandenkollektiv (Feldversuch II) setzte sich aus 13 Versuchsteilnehmern zusammen (11 männlich und 2 weiblich) im Alter von 25 bis 72 Jahren ($\mu=36.2$ Jahre, $\sigma= 13.4$ Jahre). Bei den Fahrern handelte es sich um überwiegend geübte Fahrer mit langjähriger Erfahrung.

Die Simulatorversuche fanden in einem statischen Fahrsimulator statt. Dieser bestand aus dem Fahrersitz, Armaturenbrett und Pedalen eines Mittelklassefahrzeuges, einer Rechneinheit und einem Beamer, welcher die Umgebung grafisch darstellte. Die zur Simulation verwendete Software war STISIM Drive 2.06.08. Bei der simulierten Strecke handelte es sich um ein 62 km langes Autobahnszenario, welches entlang der A3 von Seligenstadt bis Würzburg-Kist führte. Die Anzahl der Probanden lag bei 41 (32 männlich und 9 weiblich) im Alter zwischen 19 und 53 Jahren ($\mu=28.27$ Jahre, $\sigma=9.82$ Jahre). Die fahrzeugspezifischen Messwerte wurden mit 50 Hz aufgezeichnet. Um die Bewegungen der Augen aufzuzeichnen und eine Blickbewegungsanalyse zu ermöglichen, wurde das gleiche Blickbewegungsanalyzesystem eingesetzt wie bei Feldversuch II. Die Auswertung der Blickbewegungsdaten erfolgte aufgrund von wenigen Ausfällen des Systems für 36 der 41 Probanden.

Ein möglicher Einfluss der unterschiedlichen Zusammensetzung der Probandenkollektive im Hinblick auf Alter und Geschlecht auf die Ergebnisse wurde für die beiden Versuchsreihen im Feld sowie die Fahrsimulator-Versuchsreihe überprüft. Für die Analyse des Alterseinflusses wurden die Probandenkollektive jeweils anhand des Medians der Variable Alter in „jünger“ und „älter“ unterteilt und die Unterschiede zwischen diesen Gruppen statistisch untersucht. Für die Kenngrößen mittlere Geschwindigkeitsübertretung und maximale Querschleunigung beim Fahrstreifenwechsel wurden weder signifikante Unterschiede der Mittelwerte für Männer und Frauen noch der Mittelwerte für jüngere und ältere Fahrer festgestellt. Bei der relativen Blickhäufigkeit wurden Einflüsse des Alters im Feldversuch II auf den Interessensbereich „Fahrstreifenbegrenzung“ festgestellt (U-Test, $p=0.045$). Ebenso gibt es bei der relativen Blickhäufigkeit auf die Fahrstreifenbegrenzung einen Einfluss durch das Geschlecht der Fahrer im Simulatorversuch (t-Test, $p=0.042$). Die relative kumulierte Blickdauer auf den Tachometer wird im Simulatorversuch durch das Geschlecht der Fahrer beeinflusst (t-Test, $p=0.026$).

Da der Fokus auf dem Vergleich des Fahrerhaltens im Simulator und der Realität liegt, soll das Geschwindigkeitsverhalten während gewöhnlicher Autobahnfahrt untersucht werden. Neu ist dabei, dass nicht die gefahrene Geschwindigkeit, sondern die Überschreitung der Geschwindigkeitsbegrenzung untersucht wird. Dazu wurden aus Feldversuch I die Daten der Streckenabschnitte mit einem Tempolimit von 80, 100, 120 oder 130 km/h betrachtet. Zusätzlich wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Simulatorversuchen die Geschwindigkeiten von über 140 km/h auf die maximal mögliche Höchstgeschwindigkeit im Simulator von 140 km/h zurückgesetzt. Aufbauend auf diesen Messwerten konnte die Geschwindigkeitsübertretung, d.h. die rein positiven Werte der Differenz aus tatsächlicher und zulässiger Geschwindigkeit bestimmt werden. Für jeden Probanden war dadurch die Berechnung eines Mittelwerts der Geschwindigkeitsübertretung möglich. Um die, für einen Vergleich notwendigen Geschwindigkeitsübertretungen im Fahrsimulator bestimmen zu können, wurden die Streckenabschnitte ausgesucht, die Geschwindigkeitsbeschränkungen von 100 oder 120 km/h aufwiesen. Anschließend wurde für jeden Probanden der beiden Versuchsreihen die mittlere Höhe der Geschwindigkeitsübertretung über die gesamte Fahrt errechnet.

Als zweite Vergleichsgröße sollte die maximale Querschleunigung herangezogen werden. Da die unterschiedlichen Streckenverläufe eine Gegenüberstellung zwischen Feldversuch und Simulatorfahrt erschwerten, wurde dieser Wert auf das Fahrmanöver „Fahrstreifenwechsel“ beschränkt. Zur Gegenüberstellung der maximalen Querschleunigung während eines Fahrstreifenwechsels wurden die aufgezeichneten Messgrößen von Feldversuch I auf Streckenabschnitte mit 120 oder 130 km/h Tempolimits beschränkt, in denen der Proband mindestens 60 km/h fuhr. Für jeden nach rechts ausgeführten Fahrstreifenwechsel, d.h. vom linken auf den mittleren oder vom mittleren auf den rechten Fahrstreifen, wurde aus einem Zeitraum von 5 Sekunden die maximale Querschleunigung bestimmt (nach Fastenmeier 2001 beträgt die Spannweite der Dauer von Fahrstreifenwechseln zwischen 1.7 und 4.9 Sekunden). Für die Bestimmung der maximalen Querschleunigungen bei den Fahrstreifenwechseln in den Simulatorversuchen wurde ein 7.2 km langer Abschnitt mit einer Geschwindigkeitsbegrenzung auf 120 km/h gewählt. Für jeden in diesem Bereich nach rechts durchgeführten Fahrstreifenwechsel wurde die maximale Querschleunigung bestimmt. Dabei wurde die Dauer eines Fahrstreifenwechsels auf 2.5 Sekunden nach Überquerung der Mittellinie und 2.5 Sekunden vor Überquerung der Mittellinie, also auf insgesamt 5 Sekunden festgelegt.

Um die Blickbewegungsdaten aus Feldversuch II mit den im Simulator aufgezeichneten Daten vergleichen zu können, müssen die kodierten Interessensbereiche angepasst werden. In Bild 2 sind die durch Zusammenfassen

von Bereichen aneinander angeglichene Interessensbereiche des Feld- und Simulatorversuchs aufgeführt. Der Blickbereich „Straße“ beinhaltet den Blick auf die Fahrbahn vor dem Fahrzeug inkl. vorausfahrender Fahrzeuge und Straßenschilder. „Tachometer“ bedeutet, dass sich der Blick auf den Tachometer (inkl. Navigationsgerät) orientierte und „Fahrstreifenbegrenzung“ besagt, der Blick richtete sich auf die Fahrstreifenbegrenzungen der voraus liegenden Straße. Der Interessensbereich „sonstiges Umfeld“ beinhaltet alle weiteren Blickbereiche, wie die Umgebung außerhalb des Verkehrsgeschehens oder die gegenüberliegende Fahrbahn. Als Kennwerte der Blickbewegungsanalyse wurden die relative kumulierte Blickdauer und die relative Blickhäufigkeit je Proband und Interessensbereich berechnet. Die Blickdauer bezeichnet hierbei die Zeitdauer einer einzelnen Fixation auf einen Interessensbereich. Diese wurde für jeden Bereich aufsummiert und ihr prozentualer Anteil an der Gesamtblickdauer auf alle Interessensbereiche berechnet. Die Blickhäufigkeit gibt die Häufigkeiten der Blickzuwendungen auf einen Interessensbereich an. Auch bei dieser Kenngröße wurde das Verhältnis zur Summe der Blickzuwendungen auf alle Bereiche je Proband und Interessensbereich bestimmt. Dadurch war es bei beiden Kenngrößen vernachlässigbar, dass die Zeitdauer der Simulatorfahrt erheblich länger war als die der Realfahrt.

Um die jeweiligen Stichproben einander gegenüberzustellen, werden als empirischen Testverfahren t-Tests für unabhängige Stichproben verwendet. Da in keinem Fall mehr als zwei Stichproben untersucht werden, kann auf entsprechende Testverfahren verzichtet werden. Die Voraussetzung der Normalverteilung der Stichproben kann entweder aufgrund des zentralen Grenzwerttheorems (Stichprobengröße > 30 Versuchspersonen) angenommen werden (Bortz 2005) oder wird durch einen Kolmogorov-Smirnov-Lilliefors-Test überprüft. Varianzhomogenität wird mithilfe des F-Tests überprüft. Liegt diese vor, kommt der t-Test zum Einsatz, bei Varianzheterogenität dagegen der t-Test für ungleiche Varianzen (Welch-Test).

3 Ergebnisse

3.1 Geschwindigkeitsübertretungen

Die Geschwindigkeitsübertretungen in Feldversuch I sind hoch signifikant größer ($t_{51.276} = -3.325$, $p = 0.002$, Varianzheterogenität, Welch-Test) als im Fahrsimulator. Während die Probanden der Fahrsimulatorstudie die Geschwindigkeitsbegrenzung im Mittel um ca. 2.8 m/s überschritten ($\sigma = 1.64$ m/s), taten die Probanden des Feldversuchs dies im Mittel mit ca. 3.7 m/s ($\sigma = 0.52$ m/s), also mit 0.9 m/s mehr.

In Bild 3 sind die Ergebnisse der beiden Versuchsfahrten dargestellt. Diese zeigen, dass nicht nur die mittlere Geschwindigkeitsübertretung unterschiedlich, sondern auch die Streuung dieser im Simulator größer ist, als im Feldversuch. Das Fahrsimulatorszenario sorgt zwar für eine niedrigere durchschnittliche Geschwindigkeitsüberschreitung, dafür ist die Spannweite zwischen den von den Versuchspersonen gewählten Überschreitungen größer. Im Feldversuch herrscht dagegen mehr Übereinstimmung unter den Probanden in Bezug auf die durchschnittliche Höhe der Überschreitung. Insgesamt konnte keine absolute Validität in Bezug auf die Geschwindigkeitsüberschreitung festgestellt werden (siehe auch Abendroth et al. 2011).

3.2 Querbeschleunigungen

Im Hinblick auf die maximal auftretenden Querbeschleunigungen bei Fahrstreifenwechseln kann ein höchst signifikanter Unterschied ($t_{462} = 5.655$, $p < 0.001$, Varianzhomogenität, t-Test) festgestellt werden. Die maximalen Querbeschleunigungen im Feldversuch I sind signifikant höher. Während die Probanden beim Fahrstreifenwechsel im Fahrsimulator durchschnittlich eine maximale Querbeschleunigung von 0.67 m/s^2 ($\sigma = 0.40 \text{ m/s}^2$) erreichen, liegt der Wert im Feldversuch bei 0.93 m/s^2 ($\sigma = 0.43 \text{ m/s}^2$).

Bild 4 zeigt die Verteilung der maximalen Querbeschleunigung für alle analysierten Fahrstreifenwechsel. Somit liegt auch bezüglich der maximalen Querbeschleunigung beim Fahrstreifenwechsel keine absolute Validität zwischen Feld und Simulator vor.

3.3 Blickbewegungen

Die durchschnittliche relative kumulierte Blickdauer und die relative Blickhäufigkeit je Interessensbereich für den Simulator- und Feldversuch sowie die dazugehörigen Standardabweichungen sind in Bild 5 und Bild 6 aufgeführt. Sie zeigen deutlich die hohen Ausprägungen bei „Straße“. Sowohl im Feldversuch II als auch im Fahrsimulator liegen die relative kumulierte Blickdauer als auch die relative Blickhäufigkeit für den Interessensbereich „Straße“ im Durchschnitt bei über 0.5, d.h. im Mittel ist zu mehr als 50% der Fahrtzeit der Blick des Fahrers auf diesen Interessensbereich gerichtet und über 50% aller Blickzuwendungen fallen auf ihn. Dagegen besitzt „Tachometer“ sowohl im Feld als auch im Simulator die geringste durchschnittliche relative kumulierte Blickdauer. Auf diesen Bereich richtet der Proband seinen Blick somit zeitlich nur flüchtig. Die relative Blickhäufigkeit ist im Mittel bzgl.

des Interessensbereichs „Fahrstreifenbegrenzung“ im Simulator am geringsten, in der Realität ist dies „Tachometer“. Die Mittelwerte der zusätzlichen Interessensbereiche liegen jeweils zwischen diesen Werten.

Die unterschiedlichen Interessensbereiche werden mit Hypothesentests auf signifikante Unterschiede bezüglich der relativen kumulierten Blickdauer und der relativen Blickhäufigkeit untersucht. Die Ergebnisse sowie die herangezogenen Testverfahren sind in Tabelle 1 aufgeführt. Der Vergleich der relativen kumulierten Blickdauer zwischen Feld- und Simulatorversuch bezogen auf „Fahrstreifenbegrenzung“ weist einen hoch signifikanten Unterschied auf, mit einem größeren Mittelwert im Simulator (siehe Bild 5), d.h. die relative kumulierte Blickdauer war im Fahrsimulator hoch signifikant größer. Des Weiteren ist die relative kumulierte Blickdauer des Interessensbereichs „sonstiges Umfeld“ höchst signifikant unterschiedlich, wobei im Feld der höhere Mittelwert beobachtet wurde (siehe Bild 5). Bei „Straße“ und „Tachometer“ ist hingegen kein signifikanter Unterschied zwischen Realität und Simulator festzustellen.

Abweichend sind die Ergebnisse der relativen Blickhäufigkeit. Bei den Interessensbereichen „Fahrstreifenbegrenzung“ und „sonstiges Umfeld“ ist kein signifikanter Unterschied der Feld- und Simulatorversuche abzuleiten. „Straße“, mit einem höheren Mittelwert im Feld (siehe Bild 6), offenbart einen hoch signifikanten Unterschied. Der Anteil an Blickzuwendungen auf diesen Bereich ist im Feldversuch daher hoch signifikant größer. Ferner weist „Tachometer“ einen höchst signifikanten Unterschied auf, verbunden mit einem größeren Durchschnittswert im Fahrsimulator (siehe Bild 6). Im Simulator richtet sich der Blick somit öfters auf den Tachometer, relativ zu allen Blickzuwendungen. Demzufolge liegt absolute Validität bezüglich der Interessensbereiche bei jeweils einzelnen Kennwerten vor, aber keiner der Interessensbereiche weist für beide Kennwerte absolute Validität auf.

4 Diskussion

Der Fokus dieser Studie liegt auf der Frage, inwieweit neue Kennwerte für die Validierung von Fahrsimulatoren systematisch abgeleitet werden können. Zusätzlich soll die Anwendung neuer Testgrößen auf Bahnführungsebene getestet werden, die für die Evaluation von Fahrerassistenzsystemen, die primäre Fahraufgaben übernehmen, wichtig sind. Um dies abschätzen zu können, werden in diesem Abschnitt die erzielten Resultate zu den Kennwerten der Blickbewegungsanalyse, der maximalen Querbeschleunigung beim Fahrstreifenwechsel und der Geschwindigkeitsübertretung diskutiert.

Ein unterschiedliches Fahrerverhalten im Simulator und im Feldversuch wurde für die Geschwindigkeitsübertretungen der Fahrer sowie für die maximalen Querbeschleunigungen bei Fahrstreifenwechseln festgestellt. Diese Unterschiede zeigen, dass der genutzte statische Fahrsimulator im Hinblick auf diese Fahrerverhaltensgrößen nicht valide ist, was im Hinblick auf die unterschiedlichen Gegebenheiten der beiden Untersuchungsumgebungen auch nicht zu erwarten wäre; denn die Fahrer erhalten im statischen Fahrsimulator keine Rückmeldungen durch Beschleunigungskräfte auf die eingegebenen Lenk- und Pedalbewegungen. Überraschend erscheint allerdings, dass höhere Geschwindigkeitsüberschreitungen und höhere maximale Querbeschleunigungen, die tendenziell für ein risikoreicheres Fahrerverhalten stehen, nicht wie zu erwarten im Simulator, sondern im Feld auftraten. Grundsätzlich würde man die simulierte Umgebung mit einem stärkeren Sicherheitsempfinden durch die Probanden verbinden, da diesen die Künstlichkeit der Umgebung und damit auch das niedrigere Gefahrenpotential bei Fehlverhalten bewusst sein müsste. Diese Erkenntnisse müssten eigentlich für risikoreicheres Fahrverhalten im Simulator sorgen. Für höhere maximale Querbeschleunigungen im Simulator spricht zusätzlich der statische Aufbau ohne Bewegungsplattform, da dadurch der für viele unangenehme Effekt zu hoher Querkräfte automatisch ausbleibt. Stattdessen zeigen die Ergebnisse, dass fehlende Beschleunigungskräfte für die Probanden ungewohnt zu sein scheinen und deren wahrgenommene Unsicherheit beim Fahren in der simulierten Umgebung erhöhen. Diese Unsicherheit wiederum sorgt für ein vorsichtigeres und in diesem Fall zu niedrigerem Festlegen von Sollgrößen der Fahrzeugführung durch die Probanden im Simulator. Ebenso können die unterschiedlichen mentalen Modelle der Fahrer für das Fahren mit einem Realfahrzeug sowie das Fahren in einem Fahrsimulator, die durch die Erfahrungen der Fahrer mit diesen Aufgaben geprägt werden, einen Einfluss auf das Verhalten der Fahrer im Simulator sowie im Feld haben.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kennwerte mittlere Geschwindigkeitsübertretung und maximale Querbeschleunigung beim Fahrstreifenwechsel als mögliche Kennwerte zur Validierung von Fahrsimulatoren anhand der vom Fahrer gewählten Bahnführungsgrößen geeignet sind.

Neben den neuen Kenngrößen auf Bahnführungsebene wurden die Blickbewegungen als Kenngröße zur Beurteilung der visuellen Aufmerksamkeitsverteilung zur Validitätsuntersuchung herangezogen. In den durchgeführten Versuchen richteten die Probanden im Feld und im Simulator ihren Blick während des Hauptteils der Versuchszeit auf die „Straße“. Bei den hier vorgestellten Versuchen wurden keine signifikanten Auswirkungen der Untersuchungsumgebung auf die relative kumulierte Blickdauer beobachtet. Daraus ergibt sich, dass in beiden Untersuchungsumgebungen die für die primäre Fahrzeugführungsaufgabe wichtigen Informationen des

Interessensbereiches „Straße“ vom Probanden wahrgenommen werden. Dies wird nicht durch die künstliche visuelle Umgebung beeinflusst. Auch die relative Blickhäufigkeit des Interessensbereiches „Straße“ ist im Feld und im Simulator am stärksten ausgeprägt. Jedoch ist in der hier durchgeführten Studie der Anteil der Blickzuwendungen im Simulator hoch signifikant geringer als im Feld. Der Grund hierfür könnte die einfache und übersichtliche Darstellung der Umgebung im Simulator sein. In der Realität sind zahlreiche Objekte außerhalb des Verkehrsgeschehens wahrzunehmen, was in der simulierten Umgebung des hier eingesetzten Simulators nicht der Fall ist. Da der Blick der Probanden größtenteils auf „Straße“ gerichtet war, wurde in der Realität von dort häufig kurz auf die Umgebung und zurück geblickt und diese Handlung fand im Simulator aufgrund der einfachen Umgebungsdarstellung seltener statt.

Die relative kumulierte Blickdauer des Interessensbereiches „Tachometer“ besitzt nur sehr geringe Werte und es konnte keine signifikante Beeinflussung durch die Untersuchungsumgebung beobachtet werden. Sowohl im Feld als auch im Simulator reichte ein kurzer Blick um die nachgefragte Information, die gefahrene Geschwindigkeit, zu erhalten. Dennoch war der Anteil der Blickzuwendungen auf den Tachometer im Simulator höchst signifikant größer. Im Simulator fehlten dem Fahrer die Beschleunigungskräfte in Längsrichtung. Eine Längsgeschwindigkeitsveränderung kann im statischen Simulator nur über einen Blick zum Tachometer oder dem visuellen Eindruck des projizierten Simulatorbildes wahrgenommen werden. In Feldversuchen ist es dem Fahrer zusätzlich möglich über Längsbeschleunigungskräfte Geschwindigkeitsveränderungen wahrzunehmen. Diese im Simulator fehlende Information kompensierte der Fahrer somit wahrscheinlich über den Blick zum Tachometer als Rückmeldung über die gefahrene Geschwindigkeit.

Die relative kumulierte Blickdauer des Interessensbereiches „Fahrstreifenbegrenzung“ ließ einen hoch signifikanten Unterschied feststellen. Im Simulator werden die Fahrstreifenbegrenzungen im Verhältnis zur Fahrzeit länger betrachtet als in der Realität. Eine denkbare Erklärung könnten die fehlenden Beschleunigungskräfte (hier insbesondere die Querschleunigung) im Simulator darstellen. Aufgrund dieses Umstands beobachtet der Fahrer im Simulator die Begrenzungen länger, um sicherzustellen, dass er den Fahrstreifen nicht verlässt. Die relative Blickhäufigkeit weist dagegen keinen signifikanten Unterschied auf.

Der Vergleich der Blickbewegungsergebnisse in den beiden Untersuchungsumgebungen hat gezeigt, dass auf die für die Ausführung der primären Fahraufgabe relevanten Informationen aus der Umgebung, insbesondere der Straße, von den Fahrern dieselbe visuelle Aufmerksamkeit zugewendet wird. Auch eine einfache visuelle Darstellung genügt demnach für die valide Ausführung der primären Fahrzeugführungsaufgabe im Fahrsimulator. Eine Validierung eines Fahrsimulators anhand der Blickbewegungskenngrößen ist dann Voraussetzung für Fahrsimulatoruntersuchungen, wenn die visuelle Ablenkung des Fahrers beurteilt werden soll (, so z.B. bei der Überprüfung von Mensch-Maschine-Schnittstellen von Fahrerassistenz- oder -Informationssystemen.

4 Ausblick

Insgesamt erscheinen die gewählten Kenngrößen geeignet, Fahrsimulatoren und deren Validität auf Bahnführungsebene und bezüglich der Aufmerksamkeitsverteilung des Fahrers zu beurteilen. Da von einer Zunahme der Automatisierung von Fahreraufgaben auf Stabilisierungsebene durch Fahrerassistenzsysteme ausgegangen werden kann, sollten zukünftige Validierungsuntersuchungen möglichst stärker auf Kenngrößen der Bahnführungsebene bezogen werden. Die Ergebnisse legen den Schluss nahe, dass eine Validitätsüberprüfung mit einer kleinen Auswahl an Kenngrößen bei der Inbetriebnahme eines Fahrsimulators nicht unbedingt ausreichend ist. Anhand der hier vorgestellten Kennwerte zeigt sich, dass für Untersuchungen in denen das visuelle Verhalten des Fahrers überprüft werden soll, ein einfacher statischer Simulator ausreichen kann. Werden andere Untersuchungsziele fokussiert ist möglicherweise eine aufwendigere Fahrsimulation nötig. Eine Validierung sollte also nicht hinsichtlich des Fahrsimulators, sondern für die Kombination Untersuchungsszenario und Fahrsimulator erfolgen.

Literatur

Abendroth, B.: Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrer Typen. In Landau, K. (Hg.). Schriftenreihe Arbeitsorganisation, Stuttgart, 2001

Abendroth, B.; Schreiber, M.; Maul, D.; Maul, S.; Bruder, R.: Übertragbarkeit des Längsführungsverhaltens von Simulatorstudien auf Realfahrten - Was macht der Fahrer im Simulator anders als im Feld? In: Mensch, Technik, Organisation – Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess, 57. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. 23.-25. März 2011, Technische Universität Chemnitz. Dortmund: GfA-Press, S. 157-160

Blaauw, G.J.: Driving experience and task demands in simulator and instrumented car: a validation study. Human Factors, 24, 473-486, 1982

- Blana, E.: Driving simulator validation studies: A literature review. Institute for Transport Studies, University of Leeds, Working Paper 480, 1996
- Bortz, J.: Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 6., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2005
- Brünger-Koch, M.; Briest, S.; Vollrath, M.: Do you feel the difference? A motion assessment study. Proceedings of the Driving Simulation Conference DSC, 2006
- Donges, E.: Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. Automobil-Industrie, 2, 183-190, 1982
- Fastenmeier, W.; Hinderer, J.; Lehning, U.; Gstalter, H.: Analyse von Spurwechselfvorgängen im Verkehr. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 55, 15-23, 2001
- Godley, S.T.; Triggs, T.J.; Fildes, B.N.: Driving simulator validation for speed research. Accident Analysis and Prevention, 34, 589-600, 2002
- Harms, L.: Driving Performance on a Real Road and in a Driving Simulator: Results of a Validation Study. In Gale, A.G.; Brown, I.D.; Haselgrave, C.M.; Taylor, S. (Eds.). Vision in Vehicles V (pp. 19-26). Amsterdam, Elsevier, 1996
- Hirata, T.; Yai, T.; Takagawa, T.: Development of the Driving Simulation System MOVIC-T4 and its Validation Using Field Driving Data. Tsinghua Science and Technology, 12, 141-150, 2007
- Panerai, F.; Droulez, J.; Kelada, J.-M.; Balligand, E.; Favre, B.: Speed and safety distance control in truck driving: comparison of simulation and real-world environment. Proceedings of the Driving Simulation Conference DSC, 2001
- Reymond, G.; Kemeny, A.; Droulez, J.; Berthoz, A.: Role of Lateral Acceleration in Curve Driving: Driver Model and Experiments on a Real Vehicle and a Driving Simulator. Human Factors, 43, 483-495, 2001
- Riemersma, J.B.J.; van der Horst, A.R.A.; Hoekstra, W.; Alink, G.M.M.; Otten, N.: The Validity of a Driving Simulator in Evaluating Speed-Reducing Measures. Traffic Engineering & Control, 31, 416-420, 1990
- Schreiber, M.; Kauer, M.; Schlesinger, D.; Hakuli, S.; Bruder, R.: Verification of a Maneuver Catalog for a Maneuver-Based Vehicle Guidance System: A Combined Laboratory-Field Study. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 3683-3689, 2010
- Wickens, C.D.; Hollands, J.G.: Engineering Psychology and Human Performance, 3rd ed, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2000