OTTO VON GUERICKE UNIVERSITÄT MAGDEBURG

FAKULTÄT FÜR NATURWISSENSCHAFTEN

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Hochschulgrades

Master of Science (M. Sc.)

im Studiengang Psychologie

Schwerpunkt Umweltpsychologie/Mensch-Technik-Interaktion

Realisierung einer Aufgabenanalyse unter simulierten Spurwechselbedingungen - Erfassung kognitiver Fahranforderungen

Durchgeführt an der

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Braunschweig,

am Institut für Verkehrssystemtechnik, in der Abteilung Automotive

eingereicht von:	
Name:	Julia Bühring
E-Mail-Adresse:	julia.buehring@st.ovgu.de
Matrikelnummer:	197850
Erstgutachter:	Prof. Ellen Matthies
Zweitgutachter:	Dr. Psych. Meike Jipp
Betreuer	Dipl. Psych. David Käthner
Ausgabetermin:	10.04.2017
Abgabetermin:	24.08.2017

„Was kostet das Leben?

Oft nur einen Spurwechsel.“

Erhard Horst Bellermann

Sperrvermerk

Die nachfolgende Abschlussarbeit enthält vertrauliche Daten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. Veröffentlichungen oder Vervielfältigungen der Arbeit sowie die Weitergabe an Dritte – auch nur auszugsweise – sind, ohne ausdrückliche Genehmigung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt nicht gestattet. Die Abschlussarbeit liegt den Dozenten und dem Prüfungsamt zu Prüfungszwecken vor.

Kurzfassung

Fokus dieser explorativen Arbeit waren Kognitionen, die während einer simulierten Spurwechselaufgabe während des Autofahrens ablaufen. Dazu führten Probanden[1] zwei verschiedene Arten von Spurwechselmanövern in der Simulation einer zweispurigen Autobahn durch, die im Rahmen des EU-Forschungsprojektes AutoMate (Automotive Big Data Marketplace for Innovative Cross-sectorial Vehicle Data Services) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) entstand. Das Ziel der Studie lag in der Erstellung und Identifizierung von Fahrerkognitionen und den zugrundeliegenden Zielen bei Spurwechselmanövern auf der simulierten Strecke. Dazu wurde die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion mit einer Methode aus der GOMS-Familie (Goals, Operators, Methods, Selection Rules), der Cognitive-Perceptual-Motor-GOMS (CPM-GOMS), modelliert. Die formale Analyse wurde durch die empirische Methode des „Lauten Denkens“ ergänzt, wobei die Versuchspersonen gebeten werden ihre Gedanken laut zu äußern. Diese Methode erlaubt die Erfassung kognitiver Prozesse und Fahrerziele während der Aufgabenbearbeitung. Durch die Verbalisierungen der Gedanken von neun Probanden wurden zahlreiche kognitive Operatoren und Ziele in den Daten aufgedeckt. Eine wichtige Erkenntnis war, dass sich das Laute Denken als zuverlässiges Instrument zur Erfassung kognitiver Prozesse erwies, ohne die Aufgabenausführung zu beeinträchtigen. Diese Ergebnisse sollten jedoch mit anderen Instrumenten (z. B. Eye-Tracking- und Fahrdatenaufnahmesysteme) repliziert werden, um die Erfassung von allgemeineren Implikationen zu ermöglichen. Abschließend werden Erkenntnisse über die Verbalisierungsfähigkeit der Probanden, die Objektivität kognitiver Operatoren und Ziele, die Einteilung von Spurwechsel- und Phasenzeiten sowie die Festlegung von Operatordauern diskutiert. Schließlich dient diese Arbeit als Grundlage für die Erweiterung einer CPM-GOMS.

Schlagwörter:

Spurwechsel, Fahrsimulator, Kognition, Prüfverfahren, Lautes Denken, Fahrerverhalten, Fahrerabsicht, GOMS, Aufgabenanalyse, Aufgabenmodellierung, Workload

[1] Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit geschlechtsneutral formuliert bzw. die maskuline Form verwendet. Es werden jedoch immer beide Geschlechter angesprochen.

Abstract

This exploratory investigation focused on driving related cognitions during lane change maneuvers. Participants experimentally executed appropriate maneuvers performing two different types of lane change on a simulated two-lane highway, which was developed as part of the EU research project AutoMate (Automotive Big Data Marketplace for Innovative Cross-sectorial Vehicle Data Services) by the German Aerospace Center (DLR). Aim of the investigation was to set up and identify driving cognitions as well as underlying goals for lane change maneuvers on the simulated route. For this purpose, the driver-vehicle interaction was modeled using the Cognitive-Perceptual-Motor-GOMS (CPM-GOMS) method derived from the GOMS family (Goals, Operators, Methods, Selection Rules). The formal data analysis was supplemented by asking participants to verbalize their thoughts during the trials, a method commonly referred to as 'thinking aloud'. This method allowed the recording of the drivers' cognitive processes and set goals during task performance. The sample consisted of nine subjects, whose verbalization of thoughts revealed numerous cognitive operators and goals during data analysis. Thinking aloud was found to be a reliable instrument in the detection of cognitive processes, and to be applicable without noticeably affecting task performance. However, these results should be replicated using other instruments for corresponding data acquisition, for example eye tracking combined with driving data, to allow drawing of more generalizable implications. In conclusion, findings regarding verbalization ability, objectivity of cognitive operators and goals, classification of lane-change times and phase-time, as well as defining time periods of operators are discussed. This work has potential to serve as basis for the expansion of a CPM-GOMS.

Keywords:

Lane change, simulator (driving), cognition, test method, thinking aloud, driver behaviour, driver's intention, CPM-GOMS, task analysis, task modeling, workload

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung IV

Abstract V

Inhaltsverzeichnis VI

Abbildungsverzeichnis VIII

Tabellenverzeichnis X

Abkürzungsverzeichnis XI

Formelzeichen und Indizes XII

1. Einleitung 1

1.1. Theoretischer Hintergrund 3

1.1.1. Kognition und Kognitive Modellierung 3

1.1.2. Fahraufgabe 3

1.1.3. Fahraufgabenanalysen 4

1.1.4. Spurwechselaufgabe 6

1.1.4.1. Spurwechsel 6

1.1.4.2. Spurwechselsituationen 7

1.1.4.3. Spurwechseldauern 7

1.1.4.4. Modelle zur Fahraufgabe „Spurwechsel“ 8

1.1.5. GOMS 9

1.1.5.1. Das Model Human Processor 9

1.1.5.2. GOMS-Methode 10

1.2. State-of-the-Art 12

1.2.1. Cognitive-Perceptual-Motor-GOMS 12

1.2.1.1. Konzept 12

1.2.1.2. Anwendung der CPM-GOMS auf die Spurwechselaufgabe 14

1.2.2. Think Aloud 20

1.2.2.1. Hintergrund und Beschreibung 20

1.2.2.2. Arten des Think Aloud 22

1.2.2.3. Aktuelle Anwendungen 23

1.2.2.4. Eignung der Methode 23

1.2.2.5. Durchführungshinweise 24

1.3. Fragestellung 25

2. Methodisches Vorgehen 26

2.1. Stichprobe 26

2.2. Gerätetechnik und Versuchsaufbau 30

2.2.1. Fahrszenarien 30

2.2.2. Umgebung und weitere Materialien 31
2.3. Versuchsdurchführung 33
2.4. Anwendung des Think Aloud 34
2.4.1. Durchführung des Think Aloud 35
2.4.1.1. Equipment 35
2.4.1.2. Versuchsablauf 35
2.4.2. Datenannotation und –aufbereitung 36
2.4.2.1. Vorbereitung der Videodateien für die Auswertung 36
2.4.2.2. Erstellung der Videoprotokolle 37
2.4.2.3. Vorbereitung der Protokolle zur Auswertung 37
2.5. Auswertung 38
2.5.1. Matching von Fahr- und Verbaldaten 38
2.5.2. Objektive Maße der mentalen Beanspruchung 39
2.5.3. Analyse der kognitiven Operatoren und Ziele 40

3. Ergebnisse 41
3.1. Übersicht der entwickelten GOMS-Komponenten 41
3.2. Spurwechsel 42
3.3. Einfluss der Messung auf die Spurwechselaufgabe 42
3.4. Kognitive Operatoren 43
3.4.1. Gedächtnisprozesse 43
3.4.2. Entscheidungen 44
3.4.3. Bewertungen 48
3.4.4. Überprüfungen 51
3.4.5. Antizipationen 52
3.5. Ziele 53

4. Diskussion 57
4.1. Kritik 57
4.1.1. Theoretisch-konzeptionelle Anmerkungen 57
4.1.2. Methodisch-operationelle Anmerkungen 58
4.1.3. Interpretation der Ergebnisse 61
4.1.3.1. Bewertung der kognitiven Operatoren 61
4.1.3.2. Bewertung der Ziele 64
4.2. Implikationen 65
4.3. Zusammenfassung und Ausblick 67

Literaturverzeichnis i

Anhangsverzeichnis ix

Anhang x

Eigenständigkeitserklärung xxvii

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1. Modell zur Ableitung von Fahranforderungen (nach Fastenmeier & Gstalter, 2003). 5
Abbildung 2. Model Human Processor (in Anlehnung an Card et al., 1983). 9
Abbildung 3. Zielhierarchie „Schnelle Fahrt“. 10
Abbildung 4. Beispiel eines CPM-GOMS-Modells der Methode „Blinken“. 13
Abbildung 5. Skizze des Gedächtnismodells von Atkinson and Shiffrin (1968). 21
Abbildung 6. Verteilung von Alter und Geschlecht. 26
Abbildung 7. Streudiagramm der Merkmale Führerscheinbesitz und Kilometerleistung. 27
Abbildung 8. Zusammenhang von Führerscheinbesitz und Alter. 27
Abbildung 9. Fahrhäufigkeit auf verschiedenen Strecken. 28
Abbildung 10. Durchschnittliche Fahrhäufigkeit im letzten halben Jahr. 28
Abbildung 11. Häufigkeitsverteilung der bevorzugten Fahrweise. 29
Abbildung 12. Durchschnittliche Geschwindigkeiten auf Autobahnen. 29
Abbildung 13. SimCar. 31
Abbildung 14. Digitale Tachometeranzeige im Fahrzeug-MockUp. 32
Abbildung 15. Kamera-Mikrofonapparatur. 32
Abbildung 16. Cockpit-Panoramaansicht des MockUps mit Mehrkamera-Eye-Tracking-System. ..33
Abbildung 17. Transkriptionsbeispiel einer WAV-Datei in FOLCKER. 36
Abbildung 18. Kodierungsbeispiel einer EAF-Datei in ELAN. 37
Abbildung 19. Spurwechselzeitpunkt (T0): Mitte Hinterachse schneidet die Mittellinie. 38
Abbildung 20. Standardabweichungen der Fahrparameter je Messzeitpunkt. 43
Abbildung 21. Häufigkeitsverteilung des Operators „Erinnern von Regeln“. 44
Abbildung 22. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Entscheiden - Spur zu wechseln“ und „Entscheiden - Zu überholen“. 44
Abbildung 23. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Entscheiden - Spur zu halten“ und „Entscheiden - Zu folgen“. 45
Abbildung 24. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Entscheiden - Seitenspiegelblick auszuführen“ und „Entscheiden - Rückspiegelblick auszuführen“. 45
Abbildung 25. Häufigkeitsverteilung des Operators „Entscheiden - Schulterblick auszuführen“. 46
Abbildung 26. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Entscheiden - Zu blinken“ und „Entscheiden - Blinker auszuschalten“. 46
Abbildung 27. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Entscheiden - Zu lenken“ und „Entscheiden - Zurück zu lenken“. 47
Abbildung 28. Häufigkeitsverteilung des Operators „Entscheiden - Zu beschleunigen“. 47
Abbildung 29. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Entscheiden - Zu verlangsamen“ und „Entscheiden - Zu bremsen“. 48

Abbildung 30. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Bewerten - Spurbelegung des seitlichen Verkehrs“ und „Bewerten - Spurbelegung des hinteren Verkehrs“. 48
Abbildung 31. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Bewerten - Lückengröße für bevorstehenden Spurwechsel“ und „Bewerten - Abstand zum Vorderfahrzeug“. 49
Abbildung 32. Häufigkeitsverteilung des Operators „Bewerten - Geschwindigkeit des vorderen Verkehrs“. 49
Abbildung 33. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Bewerten - Absolute Geschwindigkeit“ und „Bewerten - Position des Ego-Fahrzeugs“. 50
Abbildung 34. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Bewerten - Position des Vorderfahrzeugs“ und „Bewerten - Position des seitlichen Fahrzeugs“. 50
Abbildung 35. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Bewerten - Geschwindigkeit des seitlichen Fahrzeugs“ und „Bewerten - Geschwindigkeit des hinteren Fahrzeugs“. 51
Abbildung 36. Häufigkeitsverteilung des Operators „Überprüfen - Absolute Geschwindigkeit“. 51
Abbildung 37. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Überprüfen - Spurbelegung des seitlichen Verkehrs“ und „Überprüfen - Spurbelegung des hinteren Verkehrs“. 52
Abbildung 38. Häufigkeitsverteilung des Operators „Antizipieren - Überholen des seitlichen Fahrzeugs“. 52
Abbildung 39. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Antizipieren - Erscheinen des Fahrzeugs im Rückspiegel“ und „Antizipieren - Annäherung des seitlichen Fahrzeugs“. 53
Abbildung 40. Häufigkeitsverteilung des Ziels „Sicherung“. 53
Abbildung 41. Häufigkeitsverteilung der Ziele „Spurwechsel“ und „Überholen“. 54
Abbildung 42. Häufigkeitsverteilung der Ziele „Spurhalten“ und „Folgefahrt“. 54
Abbildung 43. Häufigkeitsverteilung des Ziels „Geschwindigkeitsanpassung“. 55
Abbildung 44. Häufigkeitsverteilung der Ziele „Warten auf Lücke“ und „Spurwechselabsicht signalisieren“. 55
Abbildung 45. Häufigkeitsverteilung der Ziele „Spurwechseldurchführung“ und „Einordnen“ 56
Abbildung 46. Häufigkeitsverteilung der Ziele „Blinksignal beenden“ und „Regeln befolgen“. 56

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Fahreraktivitäten und Bereiche beim Spurwechselprozess 6
Tabelle 2 Versuchsablauf mit Zeitangaben 33
Tabelle 3 Beispielfragen und Antworten beim RTA 36
Tabelle 4 Zeiten Spurwechselphasen (in Sekunden) 39
Tabelle 5 Während der Spurwechselmanöver eingetretene Ziele und ihre Beschreibung 41
Tabelle 6 Während der Spurwechselmanöver eingetretene Unterziele und ihre Beschreibung 42

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	**Beschreibung**
ACC	anteriorer cingulärer Cortex
AG	Arbeitsgedächtnis
CMN	Card, Moran und Newell
CTA	Concurrent Think Aloud
CPM	Cognitive-Perceptual-Motor
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EEG	Elektroenzephalogramm
FAS	Fahrerassistenzsysteme
GOMS	Goals, Operators, Methods, Selection Rules
K-S-Test	Kolmogorov-Smirnov-Test
KZG	Kurzzeitgedächtnis
LZG	Langzeitgedächtnis
MHP	Model Human Processor
ms	Millisekunden
RTA	Retrospective Think Aloud
TA	Think Aloud
TTC	Time-To-Collision
VR-Lab	Virtual Reality Labor

Formelzeichen und Indizes

Symbol	**Beschreibung**
df	Freiheitsgrad
f	Effektstärke nach Cohen
η^2_p	Partielles Eta-Quadrat
F	Testprüfgröße des F-Tests
N	Stichprobengröße
n	Anzahl
M	Mittelwert
Max	Maximum
Min	Minimum
p	Signifikanzniveau
r	Korrelationskoeffizient von Pearson
r_S	Spearman-Koeffizient
SD	Standardabweichung
$T0$	Mittelpunkt der Hinterachse überschreitet Mittelpunkt der
χ^2	Chi-Quadrat-Koeffizient
z	Standardwert (gewonnen durch lineare Transformation)

Index	**Beschreibung**
CS-nTA	Controlled Scenario (no Think Aloud)
CS-TA	Controlled Scenario (Think Aloud)
LC l2r	Lane change (left to right)
LC r2l	Lane change (right to left)
RS-nTA	Realistic Scenario (no Think Aloud)
RS-TA	Realistic Scenario (Think Aloud)

1. Einleitung

In den letzten Jahrzehnten wurde viel Forschung im Bereich der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion betrieben, um die Entwicklung sowie Verbesserung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) voranzutreiben. Dabei kann eine genaue Beschreibung bestimmter Fahrverhalten bei verschiedenen Fahraufgaben für die Entwicklung von Assistenzsystemen zur Entlastung des Fahrers und Erhöhung der Sicherheit genutzt werden (Fastenmeier, Hinderer, Lehning & Gstalter, 2001). Der Mehrwert dieser Assistenz zeigt sich vor allem in sicherheitskritischen Situationen vor denen das System den Fahrer rechtzeitig informieren und die Fahrzeugführung ggf. übernehmen kann. Denn 90 % der Verkehrsunfälle sind die Folge menschlichen Fehlverhaltens (Statistisches Bundesamt, 2013). Unfälle auf Autobahnen werden als besonders katastrophal (Statistisches Bundesamt, 2013) und Spurwechselmanöver auf Autobahnen als besonders kritische Situationen betrachtet (Andree, 2015). In den Unfallstatistiken des statistischen Bundesamtes spiegelt sich die Häufigkeit und Schwere der Unfälle in Zusammenhang mit diesen Fahrmanövern wieder. Laut Statistischem Bundesamt (2017) gab es im Jahr 2016 auf deutschen Straßen insgesamt ca. 2,6 Millionen polizeilich erfasste Unfälle, mehr als jemals zuvor. Innerortsstraßen weisen dabei die höchste Unfallrate auf (74 %). Jedoch wurde die Mehrheit der Unfalltoten außerorts registriert (70 %). Aufgeschlüsselt nach Unfalltypen und Ortslagen geschehen die meisten Unfälle mit Personenschaden (N = 80638) vergleichsweise im Längsverkehr, mit einem Zuwachs von 2,2 %. Die Unfälle mit Personenschaden auf Autobahnen stiegen im Vergleich zum Vorjahr um 5,3 % auf 21179.

Die Ursachen für derartige Unfälle sind vielfältig. Sie reichen von Verstößen gegen das Rechtsfahrgebot oder Geschwindigkeitsbegrenzungen über ungenügende Sicherheitsabstände, unangepasste Geschwindigkeiten, fehlerhaftes Wechseln des Fahrstreifens und unzulässiges Rechtsüberholen bis hin zu Fehlern während des Überholens (z. B. Nichtbeachtung des nachfolgenden Verkehrs, fehlende oder verspätete Ankündigung des Ausscherens) sowie beim Wiedereinordnen nach rechts (Statistisches Bundesamt, 2017). Bei Spurwechselunfällen steigen nach Habenicht (2012) die kognitiven und motorischen Ansprüche an den Fahrer, sodass dieser gezwungen ist mehrere Aufgaben parallel auszuführen (z. B. die Regelung der Quer- und Längsdynamik und Beobachtung weiterer Fahrzeuge). Zusätzlich berichtet Schiessl (2008) eine erhöhte mentale Belastung (Workload) in Verbindung mit Spurwechselmanövern (zit. nach Henning, 2010). Die kognitive Überforderung und daraus resultierende Fahrfehler entstehen durch die gleichzeitige Überwachung aller Richtungen sowie Geschwindigkeits- und Abstandseinschätzungen (Sparmann, 1978). Um den Fahrer beim steigenden Verkehrsaufkommen und erhöhten Differenzgeschwindigkeiten auf Autobahnen zu unterstützen, Geschwindigkeiten und Abstände besser einzuschätzen sowie keine Fahrzeuge zu übersehen (Habenicht, 2012) bieten Automobilhersteller verschiedene Fahrstreifenwechselwarnsysteme an. Als Ausgangspunkt dient den Assistenzsystemen die Spurwechselabsicht des Fahrers (Henning, 2010). Die Unterstützung beim Spurwechselmanöver ist systemabhängig (Henning, 2010), sodass sich der Einsatz an der aktuellen Spurwechselphase orientiert. Die Spurwechselmöglichkeit sollte eher zum

Beginn der Vorbereitungsphase signalisiert werden, eine Kollisionswarnung zum seitlichen Fahrzeug jedoch zum Start der Durchführungsphase, bevor das Auto die Mittellinie überfährt (Henning, 2010). Das bedeutet, das FAS muss in der Lage sein, das Ziel des Fahrers rechtzeitig zu erkennen. Einerseits können rechtzeitige Spurwechselinformationen durch Hinzunahme der Assistenz den Spurwechsel erleichtern (z. B. Side Blind Zone Alert). Andererseits kann das FAS (z. B. ein Spurverlassenswarner) vor einer irrtümlichen Warnung (z. B. Fahrer beabsichtigt den Spurwechsel) rechtzeitigt abgeschaltet werden (Henning, 2010). Obwohl es bereits Algorithmen gibt, die die Ziele des Fahrers berücksichtigen, können sich das auch weitere Assistenzsysteme zu Nutze machen (Henning, 2010). Als Beispiele nennt Henning (2010) den Workload-Manager, den Spurverlassenswarner (Lane Departue Warning), den adaptiven Tempomaten (Adaptive Cruise Control) und Systeme zur Kollisionsverminderung und Kollisionsvermeidung (Collision Mitigation/Avoidance).
Viele bestehende FAS werden der Komplexität der vorherrschenden Verkehrssituationen jedoch noch nicht gerecht. Insbesondere bei komplexen Manövern, wie z. B. Spurwechseln, bedarf es intensiverer Forschung bezüglich der dahinterliegenden Fahrerkognition (Andree, 2015). Hinzu kommt, dass viele Maßnahmen (bspw. situativ und zeitlich angepasste Informationsdarbietungen, sichere und transparente Bedienkonzepte etc.) nicht aufeinander bzw. auf den Informationsbedarf oder die Verarbeitungskapazität des Fahrers abgestimmt sind und die technische Umsetzung nicht einwandfrei funktioniert (Fastenmeier, 2015). Das Institut für Verkehrssystemtechnik des DLR Braunschweig arbeitet im EU-Forschungsprojekt „AutoMate“ an der Entwicklung eines Aufgabenmodells für die Spurwechselaufgabe, um zukünftig Fahrermodellierungsempfehlungen für etwaige Assistenzsysteme geben zu können. Bisherige Entwicklungen im Bereich der Fahrerassistenz berücksichtigen kaum Grundlagenforschungen zu kognitiven Prozessen bei Spurwechseln. Die vorliegende Arbeit entstand in Kooperation mit dem DLR. Sie widmet sich der Erforschung der kognitiven Prozesse mithilfe der Aufgabenanalyse CPM-GOMS, mit dem Ziel der Modellierung von Fahrerzielen sowie zukünftigen Fahrverhaltens bei Spurwechselmanövern.

Eine Übersicht über den Wissensstand zum Fahrverhalten und der Spurwechselaufgabe bis hin zu heute eingesetzten kognitiven Modellen sowie Aufgabenanalysen liefert zunächst die Grundlage, auf der sich eine zu modellierende Aufgabenanalyse aufbauen lässt. Das Kernstück bildet die Einführung in die GOMS-Familie, die in dieser Arbeit eine wesentliche Rolle einnimmt. Darauf folgend, wird der aktuelle Stand zur Nutzung von CPM-GOMS-Analysen aufgezeigt, die theoretische Basis für die später verwendeten kognitiven Operatoren und Ziele gelegt sowie ein Werkzeug zur Erfassung kognitiver Prozesse vorgestellt. Hier wird auf eine, in diesem Zusammenhang bisher wenig berücksichtigte, Erhebungsmethode, das Laute Denken, eingegangen. In einem nächsten Schritt werden durch die aus der Literatur recherchierten Erkenntnisse die konkreten Forschungsfragen und Ziele dieser Arbeit abgeleitet. Danach folgen die Konzeptumsetzung am Beispiel der Spurwechsel-situation und die Beschreibung der in dieser Arbeit benutzten Werkzeuge und Methoden sowie daraus resultierende experimentelle Ergebnisse. Abschließend werden die vorgestellten Modellkomponenten

anhand realer Messdaten diskutiert und Stärken und Schwächen des Modells sowie der angewandten Messmethode aufgezeigt. Die Arbeit schließt mit einer kurzen Zusammenfassung und zeigt weitere Entwicklungsmöglichkeiten im Bereich der Aufgabenanalyse im Fahrkontext auf.

1.1. Theoretischer Hintergrund

Zur Entwicklung neuer Modellierungsansätze für ein realistischeres, menschlicheres Fahrverhalten, ist es zunächst notwendig, vermehrt kognitive Bearbeitungsschritte zu integrieren. Bisherige Modelle beschreiben nur sehr eingeschränkt die wesentlichen Aspekte von Fahrverhalten. Formale Evaluationstechniken, wie die GOMS (Kap. 1.1.5), eignen sich besonders zukünftiges Verhalten zu beschreiben sowie vorherzusagen und könnten diese Forschungslücke füllen.

1.1.1. Kognition und Kognitive Modellierung

Modelle in der Psychologie werden in die Wahrnehmungstheorie, die Kognitionstheorie, die Handlungspsychologie und die Psychomotorik unterteilt (Hiesgen, 2012). In der kognitiven Psychologie wird Kognition als Informationsverarbeitung verstanden (Hiesgen, 2012) und bezieht sich auf mentale Prozesse, durch die sensorische Informationen transformiert, reduziert, verarbeitet, konsolidiert, dekodiert und verwendet werden (Neisser, 1967). Die Kognitionswissenschaft hat diese Definition auf algorithmisch angemessene Informationsverarbeitungsprozesse spezifiziert (Lexikon der Neurowissenschaft, 2000). Bei diesen Computationen werden Kenntnisse über Hirnregionen zwar nicht bestritten, für die Beschreibung und Erklärung der kognitiven Prozesse sind diese jedoch nicht essentiell (ebd.). Dieser Kognitionsbegriff ist vor allem im Bereich der Informatik, insbesondere der künstlichen Intelligenz, vertreten (ebd.). Allerdings wurden in der kognitiven Psychologie ebenfalls computersimulierte Modelle zu kognitiven Prozessen (z. B. Problemlösen) entwickelt (ebd.). Die kognitive Modellierung hat sich als produktives Mittel zum Verständnis und zur Vorhersage von Nutzerverhalten (Salvucci & Lee, 2003), Leistungszeiten und -variabilität erwiesen. So halfen sowohl higher-level Modellierungskonzepte, wie die GOMS (Kap. 1.1.5), bei der erfolgreichen Vorhersage des Benutzerverhaltens als auch Modellierungen des Fahr- und Sekundär-Task-Verhaltens bei der Bewertung von Schnittstellen, wodurch sich der theoretische und praktische Nutzen der kognitiven Modellierung für die Mensch-Technik-Interaktion ergibt (Salvucci & Lee, 2003).

1.1.2. Fahraufgabe

Aus verkehrswissenschaftlicher Sicht ist es notwendig die Aufgabe des Menschen, als Fahrer in einem komplexen System, wie dem Verkehrssystem, zu modellieren und die Fahraufgabe dazu in kleineren Mensch-Maschine-Systemen (MMS) - sogenannte Fahrer-Fahrzeug-Straße - zu betrachten (Fastenmeier & Gstalter, 2002). Diesbezüglich hat das 3-Ebenen-Modell von Michon (1985) mit den drei Stufen Navigation, Bahnführung und Stabilisierung enormen Anklang gefunden (Fastenmeier & Gstalter, 2002). Diese Stufen spiegeln die typischen Anforderungsformen der Fahraufgabe wider (Kramer, 1986; zit. nach Fastenmeier & Gstalter, 2002).

Auf der Navigationsebene versucht der Fahrer durch seine Routenauswahl sein Fahrziel zu erreichen (Fastenmeier & Gstalter, 2002) und fahrtbezogene Kosten-Risiko-Abschätzungen vorzunehmen (Meinel, 2013). Studien zu kognitiven Mechansimen der Navigationsebene existieren, bis auf einige wenige (z. B. Chamle, 2004), kaum (Meinel, 2013), da verspätete Entscheidungen oder Fehler auf dieser Stufe normalerweise keine katastrophalen Folgen haben (Abendroth & Bruder, 2015). Bei der Bahnführungsebene werden Manöver ausgewählt und ausgeführt (Fastenmeier & Gstalter, 2002). Zur Bahnführungsaufgabe gehört die Ableitung von Führungsgrößen (z. B. Sollspur und Sollgeschwindigkeit) aufgrund der aktuellen Verkehrssituation (z. B. Fahrbahnmarkierungen oder andere Verkehrsteilnehmer) sowie des geplanten Fahrtablaufs (Donges, 1993, zit. nach Meinel, 2013). Dabei „handelt es sich […] um einen hoch antizipatorischen Steuervorgang“ (Donges, 1978, zit. nach Meinel, 2013). Die Stabilisierungsebene umfasst die Durchführung von Stelleingriffen, um Abweichungen zwischen Ist- und Sollzuständen zu kompensieren (ebd.). Einerseits bedeutet das für die Querdynamik bspw., dass der Fahrer angemessene Lenkbewegungen durchführen und eventuelle Pfadfehler reaktionsschnell und ausgewogen, innerhalb bestimmter Grenzen, stabilisieren muss (Meinel, 2013). Andererseits wird die Längsdynamik des Fahrzeugs mittels Gas- und Bremspedal überprüft (Donges, 1982, zit. nach Meinel, 2013), wobei die zentrale Informationsquelle das Fahrzeug selbst ist (Alexander & Lunenfeld, 1975; zit. nach Meinel, 2013). Die Fahraufgaben ermöglichen es, mentale und psychomotorische Anforderungen an den Fahrer abzuleiten (Schneider, 2010). Demnach muss der Fahrer die Fahraufgabe in Aktionen umsetzen (ebd.). Eine Aktion oder eine Aktionsfolge ist bspw. das Fahrmanöver „Spurwechsel“ (Kap. 1.1.4.1), bei dem die aktuelle Fahrsituation in eine neue Situation überführt wird (Schneider, 2010). Für die Entwicklung von FAS, für derartige Fahrmanöver, ist ein größeres Verständnis der Kognitionen des Fahrers sowie des daraus hervorgehenden Verhaltens notwendig (Andree, 2015). Dafür empfiehlt sich der Einsatz von Aufgabenanalysen (ebd.).

1.1.3. Fahraufgabenanalysen

Es existieren bereits zahlreiche Fahrermodelle (Habenicht, 2012). Einer der ersten und sehr umfangreichen Fahraufgabenanalysen wurde von McKnight und Adams in den 1970er Jahren erstellt (Fastenmeier & Gstalter, 2007), wobei das gesamte Transportsystem analysiert wurde, um kritische Fahrverhaltensweisen zu identifizieren und eine Gefährdungsbeurteilung zu machen (Andree, 2015). Andree (2015) führt noch weitere Arbeiten an, die sich die Aufgabenanalyse, in der Vergangenheit, zur Identifikation von Fahrverhalten bei verschiedenen Fahraufgaben, zu Nutze machten. So haben Allen, Lumenfeld und Alexander (1971) die Fahraufgabe in Teilaufgaben zerlegt, kategorisiert und hierarchisch strukturiert. Dabei wurden für die Teilaufgaben notwendige Informationen identifiziert, die wiederum für die Forschung und Entwicklung von FAS genutzt werden. Des Weiteren erarbeiteten Walker, Stanton und Young (2001) das Hierarchical Task Analysis of Driving Research Tool, wobei die Fahraufgaben auf einer fünfstufigen Skala, von einfachen motorischen, bis hin zu komplexen kognitiven Aufgaben, unterteilt wurden, um die kognitiven Prozesse des Fahrers zu bestimmen. Ward, Hancock, Ganey und Szalma (2003) kombinierten sogar die kognitive Aufgabenanalyse und das

Naturalistic Decision Making zur Erforschung der kognitiven und perzeptuell-motorischen Fahranforderungen im Realverkehr. Die, im Folgenden, dargestellten Fahraufgabenanalysen bilden die Basis für diese Arbeit.

Aufgrund fehlender verkehrsspezifischer Standardverfahren entwickelten Fastenmeier und Gstalter (2003) die Situative Anforderungsanalyse von Fahraufgaben. Hierbei werden bekannte Ansätze zur Aufgaben- und Anforderungsanalyse integriert (ebd.). Während der Aufgabenanalyse wird eine gewählte Fahraufgabe in zeitlich strukturierte Teilaufgaben zerlegt (ebd.). Im Anschluss erfolgt, basierend auf den, in Abbildung 1, dargestellten Modellvorstellungen, eine Anforderungsanalyse (ebd.). Die Kategorien der Anforderungsanalyse basieren auf dem Modell menschlicher Informationsverarbeitung von Rasmussen (1980) (ebd.). Aus den daraus resultierenden Fehlerlisten sowie Komplexitäts- und Risikoeinschätzungen folgen dann fahrerassistenzunterstützende Vorschläge zur Entlastung des Fahrers (ebd.).

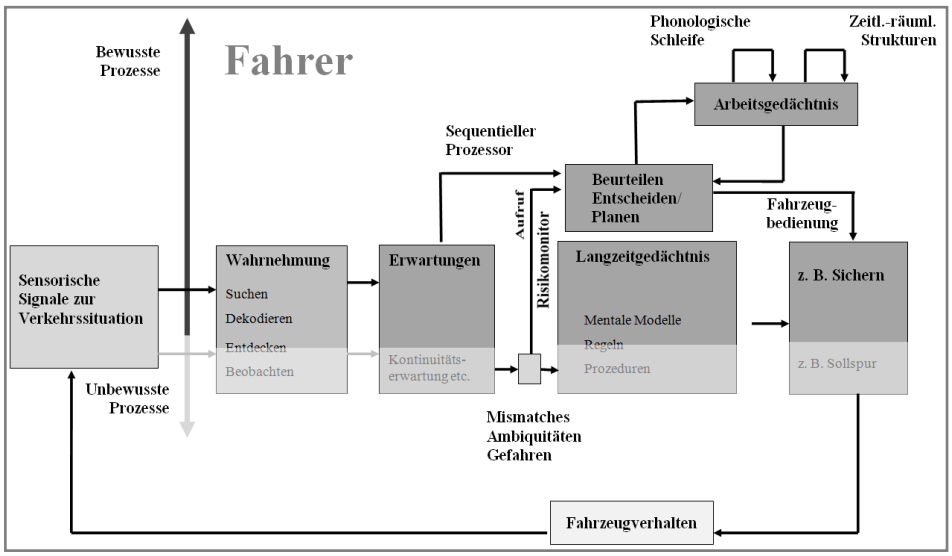


Abbildung 1. Modell zur Ableitung von Fahranforderungen (nach Fastenmeier & Gstalter, 2003).

Richard, Campbell und Brown (2006) untersuchten, mithilfe einer Aufgabenanalyse, sieben Kreuzungsszenarien, wobei sie die Szenarien in Aufgaben, Teilaufgaben und in grundlegende Informationsverarbeitungselemente, die perzeptueller, kognitiver und psychomotorischer Natur waren, gliederten. Die Autoren identifizierten, unter Berücksichtigung von Arbeitsbelastung, Aufgabenfolge, räumlicher Verteilung u. a., fünf Teilaufgaben, bei denen Informationsverarbeitungsengpässe auftreten können (Andree, 2015).

Die Studien geben einen ersten Überblick, über den bisherigen Stand der Forschung, in der Verkehrspsychologie, zum allgemeinen Fahrverhalten. Modelle zur Fahraufgabe, Spurwechsel auf Autobahnen, sind allerdings kaum vorhanden (Andree, 2015). Andree (2015) versuchte, mithilfe einer Aufgabenanalyse, das Fahrverhalten von drei Versuchspersonen, auf einer zweispurigen Autobahn, im Realverkehr, zu erfassen. Hauptaugenmerk lag auf der Erstellung und Untersuchung geeigneter

motorischer und perzeptueller Operatoren, mit dem Ergebnis, dass diese Analyseform, für die drei untersuchten Spurwechselarten, als inhaltlich sowie methodisch geeignet interpretiert wurde.
Da die in dieser Arbeit vorgeschlagene Methode, zur Analyse menschlichen Fahrverhaltens, am Fahrmanöver des Spurwechsels ausgerichtet wurde, erfolgt zunächst ein kurzer Abriss bisheriger Untersuchungen von Spurwechselmanövern.

1.1.4. Spurwechselaufgabe

In diesem Abschnitt wird näher erläutert, was ein Spurwechsel ist (Kap. 1.1.4.1), woraus Spurwechselvorgänge im Allgemeinen bestehen (Kap. 1.1.4.2) und welche dieser Komponenten wesentlich für die vorliegende Studie sind (Kap. 1.1.4.4).

1.1.4.1. Spurwechsel

Als generelle Fahrerziele, in Anlehnung an den Situationskontext von Filzek (2003), ergeben sich die Freie Fahrt (Spurhalten), die Folgefahrt, die Annäherungsfahrt, das Zurückfallen des eigenen Fahrzeugs (Ego-Fahrzeugs), das Überholen und der Spurwechsel. Folgend werden vor allem die Spurwechselmanöver fokussiert, da diese besonders kritische Fahrmanöver auf Autobahnen darstellen (Kap. 1). Unter einem idealen Spurwechsel wird die vom Fahrer intendierte Positionsänderung eines Fahrzeugs, von der Startspur auf die Zielspur, innerhalb eines bestimmten Zeitraums, verstanden (Fastenmeier et al., 2001). Dabei gilt er nur als vollständig ausgeführt, wenn er die drei Merkmale: Überschreitung der gegebenen Fahrstreifenmarkierung, Blockieren der Start- und Zielspur sowie Neupositionierung des Fahrzeugs auf der Zielspur aufweist (ebd.). In Anbetracht dieser Kriterien lassen sich nach Fastenmeier und Kollegen (2001) dem Spurwechselprozess vier Aktivitätsbereiche mit jeweiligen spezifischen Fahreraktivitäten zuordnen (Tab. 1).

Tabelle 1

Fahreraktivitäten und Bereiche beim Spurwechselprozess

Aktivitätsbereiche	Spezifische Fahreraktivitäten
Entscheidungsprozess für einen Spurwechsel	Spurwechselentschluss Prüfung der Legalität Prüfung der Durchführbarkeit
Vorbereitung eines Spurwechsels	Signalisieren der Intention, die Spur zu wechseln Herstellung der erforderlichen Geschwindigkeit
Beginn und Durchführung eines Spurwechsels	Erneute Sicherung Fahrzeugsteuerung auf die Zielspur durch Lenkung Anpassung der Geschwindigkeit
Abschluss eines Spurwechsels	Neupositionierung des Fahrzeugs Beenden des Blinksignals Anpassung der Geschwindigkeit

Im Idealfall überprüft der Fahrer in der Entscheidungsphase zunächst, ob ein Spurwechsel legal (z. B. kein Überholverbot) und durchführbar ist. In der darauffolgenden Phase weist er, idealerweise, mittels

Blinksignal, auf seine Spurwechselabsicht hin und passt die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs, durch Verlangsamung oder Beschleunigung, dem Verkehr der Zielspur an. Nach abermaliger Überprüfung der Verkehrssituation beginnt die Durchführungsphase. Die Querlage wird dabei durch bewusstes Lenken solange vergrößert, bis die Mittelspur überfahren ist. Erneut kann die Geschwindigkeit angepasst werden. Schließlich wird das Fahrzeug auf der Zielspur neu positioniert und das Blinksignal beendet. Der Spurwechsel setzt sich demnach aus Einzelhandlungen bzw. Handlungsketten des Fahrers zusammen (Schneider, 2010). Innerhalb der einzelnen Phasen kann es bei jedem Spurwechsel zu unterschiedlichen Verkehrssituationen kommen, sodass in der Realität Spurwechsel nicht immer idealtypisch verlaufen. Gute Beispiele hierfür sind das frühzeitige Signalisieren des Spurwechsels oder die Vernachlässigung eines Schulterblicks.

1.1.4.2. Spurwechselsituationen

Spuränderungen können aus diversen Gründen auftreten, wie bspw. durch das Einfädeln (meist nach links; Ziel: Auffahren auf die Autobahn), die gewünschte Fahrtrichtung (meist nach rechts; Ziel: Abfahren von der Autobahn), das Überholen verlangsamter Führungsfahrzeuge (meist nach links; Ziel: Beginn eines Überholmanövers), die Spurwahl (meist nach rechts; Ziel: Beenden eines Überholmanövers), das überraschende Ausweichen (nach links und nach rechts) aufgrund eines schnell abbremsenden Führungsfahrzeugs (Fastenmeier et al., 2001), eine Änderung der Anzahl der verfügbaren Fahrspuren oder die Platzschaffung für ein auffahrendes Fahrzeug (Fastenmeier et al., 2001; Fitch et al., 2009). Der Spurwechsel kann also einem übergeordneten Fahrmanöver, wie bspw. einem Überholvorgang, angehören (Schneider, 2010). Demnach stellen Spurwechsel Teilaufgaben einer größeren Fahraufgabe dar, sodass ihre Beschreibung und Beurteilung von der jeweiligen Verkehrskonstellation abhängig ist (Fastenmeier & Gstalter, 2002).

Fastenmeier und Kollegen (2001) fanden in ihrer Studie (Kap. 1.1.4.4) heraus, dass freiwillige Spurwechsel der Fahrer, wie die Spurwahl und das Überholen, am häufigsten gezeigt wurden. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich daher auf die zwei Spurwechselarten: 1) Spurwechsel von rechts nach links sowie 2) Spurwechsel von links nach rechts, ohne Autobahnzufahrten oder -abfahrten. Das Einfädeln und die Fahrtrichtung bleiben deshalb unberücksichtigt. In der Arbeit werden die, für die zwei gewählten Spurwechselarten, relevanten Ziele „Überholen, Folgefahrt, Spurhalten und Spurwechsel“ sowie die damit einhergehenden Unterziele „Warten auf Lücke, Sicherung, Befolgen von (Verkehrs-) Regeln, Geschwindigkeitsanpassung, Spurwechseldurchführung, Signalisieren der Spurwechselabsicht, Einordnen sowie Beenden des Blinksignals“ berücksichtigt.

1.1.4.3. Spurwechseldauern

Im Allgemeinen ist die Spurwechselzeit abhängig vom Spurwechselziel (z. B. freies Wechseln oder Überholen) und von der Verkehrsdichte (Sporrer, Prell, Buck & Schaible, 1998). Daher finden sich in der Literatur keine einheitlichen Angaben zu konkreten Spurwechselzeiten. Dort reichen sie von mindestens 2 Sekunden (Sporrer et al., 1998) bis bspw. 7,4 Sekunden (Freyer, 2008).Wird die Spurwechseldauer auf die einzelnen Phasen aus Kap. 1.1.4.1 aufgeteilt, ergibt sich, für die

Entscheidungsphase, ein Zeitintervall, welches 10 Sekunden vor dem Beginn der Durchführungsphase anfängt (Fahrer trifft Spurwechselentscheidung) und bis zum Lenkeingang andauert (Tijerina, Garrott, Stoltzfus & Parmer, 2005). Diese Phase unterstützt den Fahrer bei der Suche nach Informationen (z. B. durch visuelle Kontrollen von Spiegeln und Kopfdrehen), die ihm Auskunft, über eine Fortführung oder Aufschiebung des Spurwechsels, geben soll (Tijerina et al., 2005). In der Vorbereitungsphase versucht der Fahrer, verstärkt durch visuelle Suche, festzustellen, ob ein Spurwechsel möglich ist (Doshi & Trivedi, 2008). Dieser Vorgang dauert ca. 3 Sekunden (Doshi & Trivedi, 2008). Die Dauer der Spurwechseldurchführung (ohne Notausweichen), unabhängig von der Geschwindigkeit, beträgt 3,1 bis 6,5 Sekunden (Sporrer et al., 1998). Die Auswertung von Sporrer und Kollegen (1998), von 250 Videoaufnahmen von Realspurwechseln im fließenden Verkehr, ergab, bei schnellen Fahrstreifenwechseln (130 km/h), eine Spurwechselzeit von 3,1 bis 4,7 Sekunden. Die letzte Phase endete bei Andree (2015) mindestens 3 Sekunden nach der Durchführungsphase. Inwieweit der Spurwechselablauf bzw. einzelne Spurwechselphasen in vergangenen Analysen betrachtet wurden, wird im nächsten Kapitel erläutert.

1.1.4.4. Modelle zur Fahraufgabe „Spurwechsel“

Obwohl die Ansätze zur Ermittlung der Fahraufgabe unter Verwendung von Aufgaben- sowie Anforderungsanalysen sehr umfangreich und vielseitig sind (Kap. 1.1.3), existieren kaum Modelle, die eine Verbindung zwischen den analytisch definierten Abläufen und den tatsächlichen Fahrdaten herstellen. Sowohl Henning (2010), als auch Andree (2015), haben bereits eine Zusammenstellung vergangener Spurwechselanalysen gemacht. Diese reicht von Gipps (1986) mathematischer Beschreibung des Entscheidungsprozess vor einem Spurwechsel und die dazu notwendigen Einflussfaktoren, gefolgt von Chovan, Tijerina, Alexander und Hendricks (1994) perfektem Ablaufplan einer Spurwechselentscheidung, über das 1997 erschienene CORSIM–Modell von Halati, Lieu und Walker (1997), das Spurwechsel in obligatorische Spurwechsel und Spurwechsel nach freiem Ermessen unterscheidet. Andere Modelle lieferten eine genauere Beschreibung des Spurwechselverhaltens (Henning, 2010). Beispielsweise führten van Winsum, Waard und Brookhuis (1999) eine Simulatorstudie durch, in der sie drei Phasen beim Spurwechselmanöver darauf testeten, ob das Ende einer Phase Einfluss auf die folgende Phase hat. Während sich diese Phasen ausschließlich auf die Lenkdynamik beziehen, gehen Fastenmeier und Kollegen (2001) von zwei weiteren Phasen aus, die vor dem Lenkradeinschlag stattfinden, sodass sie auf insgesamt vier Phasen kommen (vgl. Kap. 1.1.4.1).

Gemein ist diesen Modellen, dass sie einen idealisierten Spurwechselablauf darstellen, der, für die realen Anforderungen und komplexen kognitiven Prozesse, nicht angemessen ist (Henning, 2010). Daher beschäftigte sich Andree (2015), in ihrer Arbeit, mit einer Analyse der Spurwechselaufgabe (Kap. 1.1.3), der sogenannten GOMS, die dem hohen Anspruch gerecht werden soll (Kap. 1.2.1). Dabei betrachtete sie im Besonderen die motorischen und perzeptuellen Prozesse während der Aufgabenausführung. GOMS (Kap. 1.1.5) soll nun auch die Grundlage für die Erstellung der kognitiven Operatoren und Ziele bei der Spurwechselaufgabe im Fahrsimulator bilden.

1.1.5. GOMS

Aufgabenmodelle, welche besonders geeignet sind, um menschliche Entscheidungen und Handlungen mit einzubinden und alle denkbaren Bedienstrategien des Systems sowie die Performance des Mensch-Computer-Systems vorherzusagen (Card, Moran & Newell, 1983; John & Kieras, 1996), stammen aus der GOMS-Familie. Die GOMS-Analyse ist somit in der Lage Verhaltensvorhersagen (z. B. Fahrverhalten) zu machen. Die Grundlage bildet das Modell der menschlichen Informationsverarbeitung, welches Card und Kollegen (1983), in Anlehnung an die Computertechnologie, entwickelt haben.

1.1.5.1. Das Model Human Processor

Beim Model Human Processor (MHP) handelt es sich hypothetisch um eine kognitive Architektur, die in der Lage ist, menschliche Informationsverarbeitungsprozesse zu modellieren. Das MHP unterscheidet ein sensorisches, kognitives sowie motorisches System (Abb. 2). Die drei inter-agierenden Systeme bestehen jeweils aus Prozessor und Speicher (ausgenommen das speicherlose motorische System). Kennzeichnend für jedes System sind die Speicherkapazität einer Information, die Verweildauer einer Information im Speicher, die Speicherart und die Zykluszeit eines Prozessors. Die Zykluszeit des kognitiven Prozessors beträgt bspw. 70 ms.

Zunächst wird die Information über den Prozessor des perzeptuellen Systems aufgenommen, erkannt und im Arbeitsgedächtnis (AG) in einem Zwischenspeicher (z. B. visuell) abgelegt. Im Anschluss verarbeitet das kognitive System die kodierten Informationen der sensorischen Zwischenspeicher in seinem Arbeitsspeicher. Zusätzlich nutzt der kognitive Prozessor zuvor gespeicherte Informationen des Langzeitgedächtnisses (LZG), um Entscheidungen zu treffen. Das motorische System führt entsprechend der Vorgaben des kognitiven Prozessors die körperlichen Aktionen aus. Dabei laufen Prozesse innerhalb eines Prozessors sequentiell ab. Zwischen den Prozessoren sind jedoch parallele Arbeitsabläufe möglich.

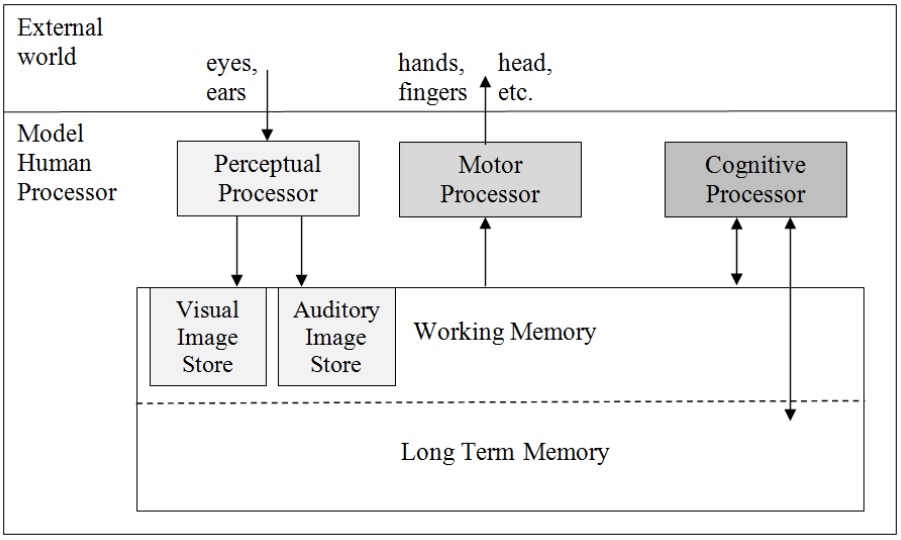


Abbildung 2. Model Human Processor (in Anlehnung an Card et al., 1983).

Kognitives System. Das kognitive System stellt die komplexeste Struktur des MHP dar. Je nach Aufgabenschwierigkeit ändern sich die Anforderungen an dessen Speicher und den Prozessor. So genügt, bei leichten Aufgaben, die Herstellung einer Verbindung zwischen dem Wahrnehmungssystem und dem motorischen System. Mit steigender Komplexität erhöhen sich die Ansprüche, sodass kognitive Prozesse wie Lernen, Informationsabruf, Entscheidungsfindung und Problemlösen notwendig werden. Das kognitive System verfügt über zwei Speichersysteme: den Arbeits- und den Langzeitspeicher, die dem Kurzzeitgedächtnis (KZG) und LZG entsprechen. Der Arbeitsspeicher ist Teil des Langzeitspeichers und arbeitet mit den internen Produkten des LZG sowie den kodierten Informationen des Wahrnehmungssystems. Dabei können bis zu sieben Chunks verwendet werden, bevor diese überschrieben werden. Das LZG wird über den kognitiven Prozessor vom Arbeitsspeicher kontaktiert und verfügt im Allgemeinen über unbegrenzte Speicherkapazität.

1.1.5.2. GOMS-Methode

GOMS ist eine in den 1980er Jahren von Card und Kollegen (1983) entwickelte Methode. Der MHP bildet die dahinterliegende kognitive Theorie. Die Methode wurde ursprünglich in komplexen Systemen der Mensch-Computer-Interaktion (z. B. Überprüfung von Systemfunktionalität) angewendet (Andree, 2015). Mittels GOMS sind Vorhersagen zu Bearbeitungs- und Lernzeiten einer vorgegebenen Aufgabe möglich. Dabei handelt es sich um eine Familie von Techniken, zur Analyse der menschlichen Leistung, in Bezug auf die notwendigen Ziele (Goals), Operatoren (Operators), Methoden (Methods) und Auswahlregeln (Selection rules), zur Erfüllung der Aufgabe (John & Gray, 1995). Aus diesen vier grundlegenden Modellierungskonstrukten leitet sich das Akronym GOMS ab.

Goals. In jedem System gibt es Ziele und Teilziele, die der Benutzer erreichen will und deren Darstellung in Form einer Zielhierarchie erfolgt (Card et al., 1983). Kann ein Ziel nicht direkt mit einem Operator erreicht werden, bilden die Hürden, die zuerst überwunden werden müssen, Unterziele (ebd.). Können auch diese nicht direkt erreicht werden, wird die Zerlegung in Unterziele rekursiv durchgeführt, bis ein erreichbares Ziel gefunden wird (ebd.). Eine Aufgabenanalyse könnte zum Beispiel mit dem obersten Ziel „Schnelle Fahrt“ beginnen (Abb. 3). Bei allen GOMS-Methoden hat die Erstellung einer Liste der zu erreichenden Ziele oberste Priorität, da daraufhin die Unterziele erstellt und Aufgaben effizienter gestaltet werden können.

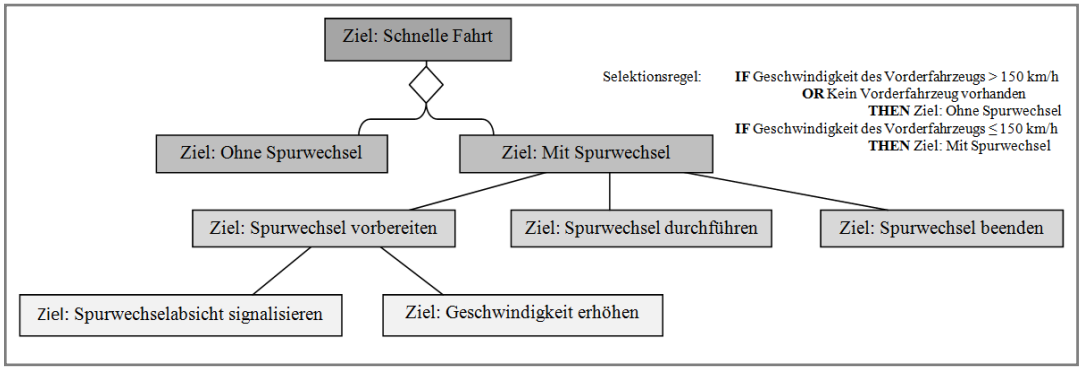


Abbildung 3. Zielhierarchie „Schnelle Fahrt“.

Operators. Dabei werden die Mensch-System-Interaktionen in elementare Aktionen zerlegt, die, basierend auf dem MHP, motorisch, perzeptuell und kognitiv sein können (Card et al., 1983). Operatoren können den mentalen Zustand des Nutzers oder die externe Umwelt physisch verändern (ebd). Jedem Operator lässt sich (in Abhängigkeit von den Userfähigkeiten) eine durchschnittliche Ausführungszeit zuweisen (ebd.). Durch das Addieren von Ausführungszeiten der Operatoren können schließlich Gesamtzeiten für Ziele errechnet werden. Die Parameter der Operatoren, wie z. B. die Ausführungszeit, sollten unabhängig von dem Operatorverlauf, also frei von einem bestimmten Kontext sein und können auf unterschiedliche Weise ermittelt werden, z. B. durch eine Konstante, durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung oder durch eine Parameterfunktion (John & Kieras, 1996). Dabei hängt die Vorhersagegenauigkeit von der Genauigkeit der Vorannahmen sowie der Dauerschätzungen ab. Kognitive Operatoren greifen zum Beispiel, wenn eine Information gespeichert oder ein Befehl aktiviert werden soll. Kognitive Operatoren des Unterziels „Spurwechselabsicht signalisieren“ könnten die Vorbereitung zum Blinken sein, die Initiierung der Hand- und Armbewegung sowie die Überprüfung der aus dem perzeptuellen System erhaltenen Informationen. Perzeptuelle Operatoren wären die visuelle Wahrnehmung des Blinkhebels oder die auditorische Wahrnehmung des Blinkgeräuschs und motorische Operatoren könnten die Arm- und Handbewegungen zum Blinker sowie das Bewegen des Blinkhebels nach unten sein. Was einen Operator ausmacht, entscheiden Modellierer auf der Grundlage einer genauen Analyse (Freed, Matessa, Remington & Vera, 2003). Je feiner die Granularität[2] der Analyse ist, desto mehr spiegeln die Operatoren grundlegende psychologische Mechanismen wider (Card et al., 1983). Bei einer grobgranularen Analyse reflektieren sie eher die Besonderheiten der Aufgabenumgebung, wie das Endgerät oder die physikalische Anordnung (ebd.).

*Methods***.** Methoden sind Abfolgen dieser Operatoren (z. B. das Bewegen der Hand zum Blinker und das anschließende Drücken des Blinkers) bzw. von Unterzielaufrufen zum Erreichen eines Ziels (Freed et al., 2003). Sie sind passend zur Zielhierarchie ebenfalls hierarchisch geordnet. Die Möglichkeit in der ein User sein Aufgabenwissen in Form von Plänen speichert, existiert bereits im Vorfeld einer Task-Performance und resultiert aus früheren Erfahrungen, Analysen sowie Instruktionen (Card et al., 1983).

Selection Rules. Führen mehrere Methoden zum selben Ziel, helfen Regeln bei der Auswahl, welche Methode, wann gewählt wird (Card et al., 1983). Jede Selektionsregel ist gleich aufgebaut: „falls das-und-das in der aktuellen Aufgabe zutrifft, verwende die Methode X“ (Card et al., 1983). Ein Beispiel für Selektionsregeln des Ziels „Schnelle Fahrt“ ist in Abbildung 3 (S. 12) aufgeführt.

Möchte man mit GOMS das Routineverhalten eines Benutzers modellieren (John, Vera, Matessa, Freed & Remington, 2002) sind Benutzer erforderlich, die mit der Aufgabe vertraut und geübt sind (Andree, 2015). Erfahrene Benutzer haben, für eine gegebene Aufgabe, eine angemessene Zielstruktur sowie effektive Methoden und Auswahlregeln, für das Abarbeiten dieser Zielstruktur,

[2] Der Begriff *Granularität* stammt aus dem Bereich der parallelen Computer-Architekturen (vgl. Schulthess & Schöttner; 2002) und kennzeichnet die Anzahl der Untergliederungen eines Elementes.

verfügbar (Wandmacher, 1993). GOMS-Modelle erlauben somit - für hochgradig eingeübte Aufgaben - zuverlässige Vorhersagen des zeitlichen Verlaufs. Im Laufe der Zeit sind verschiedene Varianten der GOMS entstanden, z. B. GOMS von Card, Moran und Newell (CMN-GOMS), Natural GOMS Language, Keystroke Level Model oder CPM-GOMS. Die verschiedenen GOMS-Varianten unterscheiden sich massiv hinsichtlich der Komplexität der Modellierung, dem Durchführungsaufwand und der Genauigkeit der geschätzten Zeiten (John & Kieras, 1996). Im weiteren Verlauf wird daher lediglich die für die vorliegende Arbeit relevante Variante näher vorgestellt (Kap. 1.2.1).

1.2. State-of-the-Art

Traditionell hat GOMS die menschliche Leistung als perzeptuelle, kognitive und motorische Aktivitäten, die nacheinander ausgeführt wurden, integriert. Jedoch erfordern viele Aufgaben, dass Benutzer parallel Aktivitäten durchführen (John & Gray, 1995), z. B. die visuelle Suche nach Umgebungsinformationen, während der Fahrer Gas gibt, Kontrollblicke ausführt und den Blinker setzt.

1.2.1. Cognitive-Perceptual-Motor-GOMS

Beim verwendeten Aufgabenmodell handelt es sich um eine CPM-GOMS. Die CPM-GOMS hat sich aus der CMN-GOMS entwickelt (Card et al., 1983) und geht von einem Ressourcenmodell aus, bei dem die motorischen, perzeptuellen und kognitiven Aktionen parallel laufenden Ressourcen zugeordnet und im Zeitverlauf dargestellt werden können (John & Gray, 1995). Die Anwendung der CPM-GOMS in der Studie von Gray, John und Atwood (1993), zum Vergleich der Ausführungszeiten eines bestehenden mit einem künftigen Arbeitsplatz einer US-Telefongesellschaft, verfestigte ihren Ruf als erfolgreiches, für komplexe, reale Aufgaben geeignetes Evaluationstool.

1.2.1.1. Konzept

Die CPM-GOMS von John (1990) ist eine GOMS-Variante, die eng verknüpft mit dem MHP ist (Kap. 1.1.5.), welcher allen GOMS-Techniken zugrunde liegt und die menschliche Informationsverarbeitung, durch allgemeine Operationen sowie das Zusammenwirken der Prozessoren, Systeme und Speicher, skizziert (Back, Myung & Yoon, 2010). Sie nutzt den MHP unmittelbar für die Aufgabenanalyse, indem Aufgaben hierarchisch dekomponiert (Harris, 2000) und die Operatoren für die jeweiligen Prozessoren und deren sequentielle Abhängigkeiten bestimmt werden. Die Operatoren sind hierbei einfache perzeptuelle, motorische und kognitive Aktionen, die über ihren Prozessor mit einem spezifischen Zeitaufwand gesteuert werden. Abhängigkeiten können sich bspw. ergeben, wenn zwei Operatoren nacheinander über den gleichen Prozessor ausgeführt werden oder ein Operator die Informationen eines Anderen benötigt. CPM-GOMS-Modelle gehen nicht nur von seriell ausgeführten Operatoren aus, sondern lassen auch parallel ablaufende und sich überlappende Operatoren sowie Ziele zu (Gray et al., 1993). Daher sind sie viel detaillierter als ihre Vorgänger (John & Kieras, 1996), jedoch auch wesentlich komplexer (Card et al., 1983).

Die Abkürzung CPM wird auch als Critical-Path-Method ausgelegt. Der kritische Pfad ermöglicht es, die Gesamtausführungszeit der Aufgabe zu analysieren, die für die komplexen Wechselwirkungen, der parallel ausgeführten Operatoren, erforderlich sind (Gray, John & Atwood, 1993; zit. nach Back et al., 2010). Die Abhängigkeiten zwischen den perzeptuellen, motorischen und kognitiven Operatoren werden durch die PERT (Program Evaluation and Review Technique) bzw. daraus abgeleitete Gantt-Diagramme[3] dargestellt (John & Kieras, 1996) (Abb. 4) und der kritische Pfad wird abgebildet (Card et al., 1983). Ein allgemeiner Operator „think“ dauert nach Card und Kollegen (1983) 1250 ms. Bei Green (2003) findet sich ein allgemeiner fahrbezogener mentaler Operator mit einer Ausführungszeit von 1,50 Sekunden für jüngere Fahrer (18 - 30 Jahre) und 2,55 Sekunden für ältere Fahrer (55 - 60 Jahre). Hier zeigt sich bereits, dass es in der Literatur wenige sowie sehr unterschiedliche Ausführungszeiten für kognitive Operatoren insbesondere im Fahrkontext gibt.

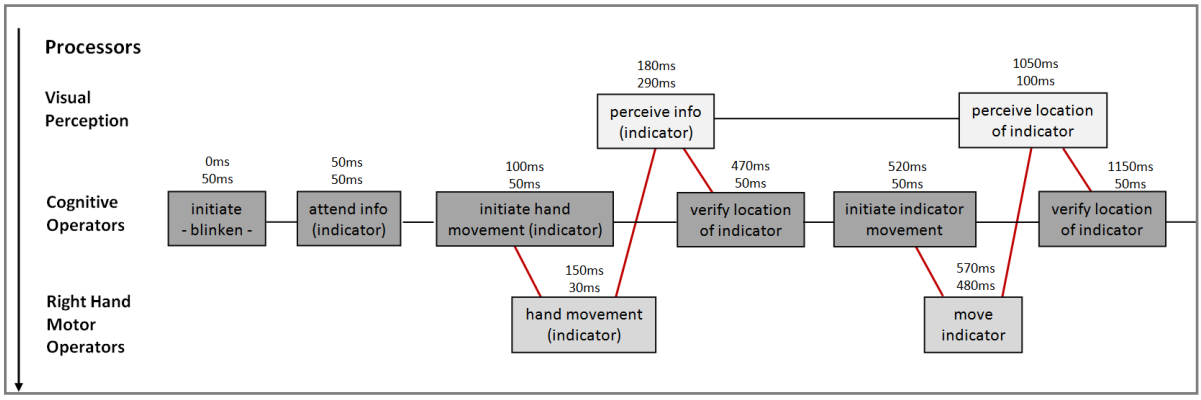


Abbildung 4. Beispiel eines CPM-GOMS-Modells der Methode „Blinken“.

CPM-GOMS-Modelle verwenden die Sequenzform (John & Kieras, 1996). Das bedeutet, sie beinhalten eine feste Sequenz von Operatoren zum Erreichen einer bestimmten Aufgabeninstanz (ebd.). Aufgrund dessen werden Selektionsregeln nicht explizit dargestellt, da der Analytiker für jede Aufgabeninstanz eine Methode auswählt (ebd.). Normalerweise ist die Festlegung der Operator-sequenz für eine einzelne Aufgabeninstanz einfach (ebd.). Mit zunehmender Instanzanzahl erhöht sich jedoch auch die Zahl der zu konstruierenden und auszuwertenden Sequenzmodelle, sodass der Zeitaufwand rapide wachsen kann (ebd.). Positiv ist jedoch, dass ein Analytiker nicht für jede erdenkliche Aufgabensituation das prozedurale Wissen definieren muss (ebd.). Zudem kann er mit einem Blick die Operatorabfolge erfassen (ebd.). Die CPM-GOMS ist vor allem bei der Modellierung von routinemäßiger qualifizierter Aufgabenausführung oder hochgradiger Expertise nützlich (ebd.). So ergab sich bei einem Vergleich verschiedener GOMS-Varianten, dass die CPM-GOMS eine wesentlich kürzere Gesamtausführungszeit, bei einer Textbearbeitungsaufgabe prognostizierte, als die anderen (ebd.). John und Kieras (1996) verweisen auf die Grundannahme der CPM-GOMS-Technik, dass extrem erfahrene Anwender die Aufgabe so schnell ausführen, wie es die MHP-Architektur erlaubt.

[3] *Gantt-Diagramme* stellen detaillierte Leistungsaussagen in den beiden Dimensionen Ort und Zeit dar (Klar et al., 1995).

Bezogen auf den Fahrkontext, würde das z. B. bedeuten, dass der Fahrer genau weiß, dass er den toten Winkel mit einer Augen- und Kopfbewegung überprüft. Demnach weiß der Fahrer, durch seine Erfahrung, wo er hinschauen muss, um die benötigten Informationen zu erhalten. Obwohl es sich bei der Spurwechselaufgabe, um eine sehr komplexe Aufgabe handelt, kann davon ausgegangen werden, dass ein geübter Fahrer, bei Routineabläufen im Straßenverkehr, keine Fehler macht und ist daher für die CPM-Modellierung geeignet. Überdies hat sich die CPM-GOMS als Modellierungsverfahren zur Vorhersage des Zeitverlaufs von Verhalten bewährt (Gray et al., 1993), sodass durch ihre Nutzung ein effizientes Modell geschaffen wird, welches bisher nicht von anderen GOMS-Varianten berücksichtigt wurde.

1.2.1.2. Anwendung der CPM-GOMS auf die Spurwechselaufgabe

Nachdem im Kapitel 1.1.5. die GOMS-Theorie zur Verhaltensvorhersage von Nutzern eines bestimmten Systems vorgestellt wurde, geht dieses Kapitel auf die Umsetzbarkeit dieses Verfahrens ein. Für die Auswertung einer CPM-GOMS muss zunächst eine CMN-GOMS erstellt werden. In einem nächsten Schritt werden die perzeptuellen, kognitiven und motorischen Verarbeitungs-aktivitäten des modellierten Benutzers zeitlich koordiniert. Nach der Identifikation werden die Operatoren auf ein PERT-Diagramm gelegt. Auf diese Weise kann der kritische Pfad oder der Weg, der die längste Zeit in Anspruch nehmen soll, identifiziert werden. Dies gilt als die erforderliche Zeit bis zur Fertigstellung der modellierten Aufgabe. CPM-GOMS (Kap. 1.2.1.1.) wird in dieser Arbeit explizit auf die Spurwechselaufgabe beim Fahren auf zweispurigen geraden Autobahnstrecken angewendet. In den Fokus treten hierbei insbesondere die kognitiven Prozesse und Ziele. John und Kieras (1996) machen in ihrer Arbeit auf das Forschungsproblem hinsichtlich kognitiver Aktivitäten aufmerksam, eröffnen jedoch gleichzeitig, dass z. B. komplexe Entscheidungen in einem CPM-GOMS-Modell als eine Reihe von kleineren kognitiven Operatoren dargestellt werden können (John & Kieras, 1996). Andree (2015) bereitete, in Anlehnung an Richard und Kollegen (2006), bereits einen Ausblick auf auswertbare kognitive Methoden im automobilen Kontext. Methoden der kogni-tiven Prozesse wurden dabei nach Entscheidungen, Bewertungen, Überprüfungen, Signalerkennungen sowie automatisierte Prozeduren klassifiziert und als häufig abhängig voneinander beschrieben. Eine genauere Erfassung sowie Angaben über Ausführungszeiten stehen hier jedoch noch aus.

An dieser Stelle soll diese Arbeit anknüpfen. Die Ideen zu den kognitiven Methoden werden dabei aufgegriffen. Jedoch beginnen die Definitionen zu den kognitiven Operatoren im Gegensatz zum Beispiel „Blinken“ (Kap. 1.2.1.1.) auf einer grobgranularen Ebene. Die kognitiven Prozesse, deren Relevanz nachfolgend kurz erläutert wird und auf die die zu entwickelnden kognitiven Operatoren aufbauen, entstanden in Anlehnung an die Anforderungen an den Fahrer von Fastenmeier und Gstalter (2002).

Gedächtnisprozesse. Wesentlich für die kognitive Verarbeitung von Informationen ist das Gedächtnis, da perzeptuell aufgenommene Informationen, mit dem bereits erlernten und gespeicherten Wissen, abgeglichen werden können (Abendroth & Bruder, 2015).

Die MHP-Architektur (Kap. 1.1.5.1.) modelliert das Gedächtnis, ähnlich wie das klassische Drei-Speicher-Modell (Kap. 1.2.2.1.), aus einem sensorischem Speicher, Kurzzeitspeicher und Langzeitspeicher. Die Informationen, die in KZG und LZG aktiv bearbeitet wurden, werden kontinuierlich aus KZG und LZG und mit neu aufgenommenen Informationen vergleichsweise beurteilt (Abendroth & Bruder, 2015). Erinnerungen von Informationen aus dem LZG, die häufig bewusst verlaufen, beziehen sich auf mentale Modelle, Prozeduren, Bezugsdaten oder Regeln (Fastenmeier & Gstalter, 2002). So könnte ein Fahrer sich bspw. an die Regel „Rechtsfahrgebot“ erinnern. Die Zeitspanne für den CPM-Operator Informationsabruf aus dem LZG liegt bei 550 ms (recall) (MITRE Corporation, 2017) bis 1200 ms (retrieve) (Olson & Olson, 1990). Eine Auflistung weiterer Beispiele aus vorangegangen Studien, deren Operatorzeiten sogar über 1200 ms hinausgehen finden sich ebenfalls bei Olson und Olson (1990). Sowohl die Erinnerungen aus dem LZG, als auch perzeptuelle Informationen, können im AG bewusst gemacht werden (Fastenmeier & Gstalter, 2002). Fastenmeier und Gstalter (2002) unterscheiden dabei nach Sinnesmodalität, das Speichern in der phonologischen Schleife oder zeitlich-räumliche Strukturen (z. B. Zwischenspeichern der Verkehrslage vor dem Ego-Fahrzeug vor dem Sichern nach links beim Spurwechsel von rechts nach links). Dabei ist im Verkehr, vor allem für einen sicheren Spurwechsel, die zeitlich-räumliche Speicherung von Informationen, die nicht mehr durch Blickbewegungen kontrollierbar sind, vorrangig (vgl. Fastenmeier & Gstalter, 2002). Ein Operator der das Einlesen von Informationen ins AG sowie das Behalten dieser Informationen im AG beinhaltet, besteht etwa 50 ms (MITRE Corporation, 2017). Abgespeicherte Informationen können wiederum aus dem AG abgerufen und mit weiteren Informationen verknüpft werden. Da bei MITRE Corporation (2017) nicht erläutert wird, ob sich der Operator „recall“ auf das LZG oder AG bezieht, wird davon ausgegangen, dass der Abruf von Inhalten aus dem AG ebenfalls mindestens 550 ms dauert. Das Memorieren wird, wie beim Einlesen von Informationen ins AG, danach unterschieden, ob es in der phonologischen Schleife durchgeführt wird oder die Informationen zeitlich-räumlich gespeichert werden (z. B. Erinnern der Verkehrslage vor dem Ego-Fahrzeug vor dem Sichern nach links beim Spurwechsel von rechts nach links) und bildet die Basis für Entscheidungen (Fastenmeier & Gstalter, 2002).

Entscheidungen. Bei Entscheidungen handelt es sich um bewusstseinspflichtige kognitive Prozesse (Fastenmeier & Gstalter, 2002). Perzeptuelle Informationen, wie z. B. aus der Umgebung (z. B. andere Verkehrsteilnehmer) sowie vom Fahrzeug (z. B. Anzeigen, Stell- und Bedienelemente und die Fahrzeugdynamik) werden auf der Stufe der Informationsverarbeitung, i. e. S. Kognition (Abendroth & Bruder, 2015), mit den Informationen aus dem AG und LZG zusammengebracht und je nach Zielvorstellung zu Entscheidungen weiterverarbeitet (Fastenmeier & Gstalter, 2002). Ob eine Information letztendlich handlungsauslösend ist (aktiver Fall) oder die Situation hingenommen wird (passiver Fall), wird auf dieser Stufe entschieden (Abendroth & Bruder, 2015). Demzufolge treten sie auf, wenn ein Organismus mit mehreren Optionen konfrontiert wird, jede bewertet und eine auswählen soll (Corrado, Sugrue, Brown & Newson, 2009).

Corrado und Kollegen (2009) postulieren Entscheidungen folglich als zweistufigen Prozess aus 1) Bewertung und 2) Auswahl einer Option. Entscheidungsvariablen, zum Abschätzen, welche Option attraktiver ist (z. B. Belohnungsgröße, Belohnungsqualität, Risiko, Ungewissheit, Verzögerung, Kosten, physiologische Zustände wie Hunger, sozialer Druck), verknüpfen die beiden Prozessanteile. Das Ergebnis des Entscheidungsprozesses (z. B. Spurwechsel) ist objektiv messbar. Meinel (2013) beschreibt z. B. drei Stufen beim Entscheidungsprozess über die Initiierung von Fahrmanövern: 1) die Identifizierung alternativer Handlungswege, 2) die Bewertung der Erfolgswahrscheinlichkeiten jeder Alternative und 3) die Auswahl der passendsten Alternative. Wichtig hierbei sind die Erfahrung des Fahrers, das Urteils- und Schätzvermögen sowie die Vorhersagefähigkeiten (Meinel, 2013). Der Fahrer erhält so eine vollständigere Repräsentation der Fahrumgebung, als ein technisches System, da er mit steigender Fahrerfahrung auf solche bzw. ähnliche gespeicherte Situationen zurückgreifen kann, weshalb seine Entscheidungen, bei genügend Zeit, besser funktionieren (Abendroth & Bruder, 2015).

Eine wesentliche Rolle für die Entscheidung innerhalb des Informationsverarbeitungsprozesses nimmt die Auswahl der Handlung mit dem größtmöglichen Nutzen unter Berücksichtigung des damit einhergehenden Risikos ein (Abendroth & Bruder, 2015). So sind Trägheit und Reaktionsdauer abhängig von der Fahrsituation sowie der Aufmerksamkeit, z. B. reagiert ein Fahrer, bei einer Folgefahrt schneller und entscheidet sich für kleinere Abstände (Abendroth & Bruder, 2015). Zwischen verschiedenen Methoden zu wählen, dauert nach Olson und Olson (1990) 1250 ms. Bei Card und Kollegen (1983) beläuft sich die Dauer des "Mental operator, choose, retrieve“-Prozesses auf 620 ms. Explizite Studien bezüglich der Dauern von Entscheidungsoperatoren im Fahrkontext konnten, bei der Recherche, nicht identifiziert werden. Die erarbeiteten Entscheidungsmethoden bestehen nach Andree (2015) aus dem Operator selbst und bilden in den meisten Fällen den Beginn einer Kette von Methoden. Nach Andree (2015) können derartige Entscheidungen nicht nur bewusst (z. B. Entscheidung Gas zu geben) sondern auch unbewusst (z. B. Entscheidung Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs zu bewerten) ablaufen.

Mögliche Entscheidungsoperatoren können bspw. die zu fahrende Geschwindigkeit, die Einhaltung des Längsabstands, Überholmanöver, die Wahl des Fahrstreifens und der Querposition betreffen. Henning (2010) bezieht sich in seiner Arbeit ebenfalls explizit auf Spurwechselvorgänge. Für ihn gehören Entscheidungsprozesse zu den wichtigsten kognitiven Prozessen. Bei der Entscheidung für einen Spurwechsel betont er zwei wesentliche Punkte. Einerseits kann ein langsameres bzw. leicht schnelleres Vorderfahrzeug das Ziel „Spurwechsel“ auslösen. Andererseits kann der Fahrer willentlich die Spur wechseln, nachdem er die Lückengröße der Zielspur kontrolliert oder die Zielspur auf andere Fahrzeuge überprüft hat.

Überprüfungen. Überprüfungen setzen Entscheidungen voraus und führen zu neuen Entscheidungen (Andree, 2015). Die Auftretensfrequenz von Überprüfungen hängt von den Geschwindigkeiten und der Spurwechselhäufigkeit auf der Autobahn ab (ebd.). Dabei können Geschwindigkeiten, die Spurbelegung oder der tote Winkel überprüft werden (ebd.).

Card und Kollegen (1983) gehen davon aus, dass ein „verify“ Operator eingesetzt wird, um zu überprüfen, ob das, was tatsächlich passiert ist, den Absichten des Benutzers entspricht. Einfacher gesagt, soll die Frage geklärt werden, ob eine Gegebenheit die Anforderung erfüllt, bspw. ob ein Fahrer unterhalb der Geschwindigkeitsbegrenzung fährt (ja/nein). Ein dazu passender Operator könnte lauten „Überprüfen - Absolute Geschwindigkeit“. Derartige Operatoren gehen häufig mit einer visuellen Kontrolle des Wahrnehmungssystems einher. Um z. B. die absolute Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs zu überprüfen, wird eine Augenbewegung initiiert, um den Tachometer zu kontrollieren. Bei Card und Kollegen (1983) dauert eine (nicht speziell fahrbezogene) Überprüfung 50 ms.

Beurteilungen/Bewertungen. Die Begriffe Beurteilungen und Bewertungen werden in dieser Arbeit synonym verwendet. Beurteilungen zählen nicht zu den reinen Beobachtungen, da sie perzeptuelle Informationen zusätzlich zu einem Standard in Bezug setzen (Fastenmeier & Gstalter, 2002). Dieser IST-SOLL-Vergleich wird anschließend beurteilt. Derartige Beurteilungen liegen Entscheidungsprozessen zugrunde (Fastenmeier & Gstalter, 2002), da sie den Input für die Auswahl bilden (Corrado et al., 2009). So verwendet der Fahrer Beurteilungsleistungen, um Abstands- (Längsabstände, z. B. zum vorausfahrenden Fahrzeug oder zwischen zwei Fahrzeugen auf dem Nebenfahrstreifen, und Querabstände, z. B. Fahrzeuge auf gleicher Höhe, zu oder zwischen anderen Verkehrsteilnehmern) sowie Geschwindigkeitseinschätzungen (vom Ego- oder Fremdfahrzeug) vorzunehmen (Abendroth & Bruder, 2015) und daraufhin potentiell kritische Situationen zu antizipieren.

Fastenmeier und Gstalter (2002) unterscheiden Bewertungen nach zeitlich-räumlichen Konstellationen (z. B. Beurteilen von Abständen beim Spurwechsel oder bei Überholmanövern), der Situation sowie dem Fahrzeugpotential. Ein Beispieloperator für zeitlich-räumliche Konstellationen könnte lauten: „Bewerten - Längsabstand zum Vorderfahrzeug“. Demnach heißt die Frage inwiefern eine Gegebenheit (z. B. aktueller Abstand) die Anforderung (z. B. Mindestabstand) erfüllt. Eine beispielhafte qualitative Aussage könnte sein: „der Abstand ist ausreichend“. Zur Beurteilung absoluter Längsabstände verwendet der Fahrer unterschiedliche Informationen (Abendroth & Bruder, 2015). Die Blickwinkelgeschwindigkeit hilft dem Fahrer z. B. Aussagen über Abstandsveränderungen zum Vorderfahrzeug zu machen (ebd.). Hierbei wird von einer Wahrnehmungsschwelle bei idealer Sicht ausgegangen. Die Wahrnehmungsschwelle von Abständen und Geschwindigkeiten bei Folgefahrten ist wiederum abhängig von der Beobachtungsdauer. Im Allgemeinen zeigen Fahrer, bei geringeren Geschwindigkeiten, einen größeren und bei höheren Geschwindigkeiten, einen kleineren Sicherheitsabstand (ebd.). Allerdings werden die Aktionen des Fahrers durch die Time To Collision (TTC) beeinflusst (ebd.).

Situationsbeurteilungen treten auf, wenn die Situation als schwierig, aufmerksamkeitsfordernd oder riskant eingestuft wird (Fastenmeier & Gstalter, 2002). Im Normalverkehr kommen bewusste Situationsbeurteilungen nur vereinzelt vor, da der Fahrer beim Fahren keine kontinuierliche

Risikoeinschätzung vornimmt (ebd.). Bei der Fahrzeugpotentialbeurteilung geht es um energetische Fahrzeugmöglichkeiten, wie z. B. die antizipative Geschwindigkeits- und Beschleunigungseinschätzung (ebd.). Ein Operator könnte „Bewerten –Absolute Geschwindigkeit“ lauten. Woraufhin ein neuer kognitiver Prozess, die Antizipation, mit dem Operator „Antizipieren - Annäherung an Vorderfahrzeug“, gestartet werden könnte.

Antizipationen. Unter Antizipation wird eine gedankliche Vorwegnahme künftiger Sachverhalte verstanden, wobei jeder Gedanke mit einer Zielvorstellung verknüpft ist, welche antizipiert wird (Dorsch, Wirtz & Strohmer, 2017). Hoffmann (1993) bemerkt, dass neben dem erwartenden Zielzustand sowohl die Ausgangsbedingungen (antizipationsrelevante Stimuli), als auch die Konsequenzen der jeweiligen Verhaltensmöglichkeiten, antizipiert werden müssen. In der Antizipation im Straßenverkehr sieht Sommer (2012) die Kompetenz durch Wissen (über Ausgangsbedingungen) sowie Wahrnehmung der aktuellen Verkehrssituation, zukünftige Situationen und Verhaltensweisen anderer Verkehrsteilnehmer korrekt einzuschätzen. Dabei hängt die Güte der Antizipationsleistung von der Erfahrung im Straßenverkehr ab (Sommer, 2012). Da neuartige, nicht vorhersehbare Situationen mit starker Unsicherheit einhergehen, versucht der Mensch über Wissensaufnahme diese Verunsicherung zu reduzieren (Hoffmann, 1993). Der Lernprozess ist dabei nicht zwangsläufig abhängig von der Alters- oder Fahrpraxisstufe, da Erfahrungen im Straßenverkehr auch als Fußgänger oder Radfahrer gemacht und Verkehrsregelwissen ggf. bereits in der Schule vermittelt wird (Sommer, 2012). Entscheidend sind vor allem Situationen, die der Fahrer bereits erlebt und im LZG abgespeichert hat, da er eine künftig kritische Situation, anhand der gespeicherten relevanten Merkmale für diese Situation, eine Gefahreneinstufung vornimmt und demensprechend reagieren wird. Für eine konfliktfreie Zielerreichung in einer hochdynamischen Verkehrssituation ist also ein stetiges Antizipieren der zukünftigen Situation notwendig (Sommer, 2012), z. B. das Antizipieren kritischer Verkehrssituationen, wie das knappe Einscheren eines Fahrzeugs oder die Missachtung von Vorfahrtsregeln durch andere Verkehrsteilnehmer (Abendroth & Bruder, 2015).

Die Vielfältigkeit der relevanten Faktoren führt folglich zu verschiedensten Zeitangaben in der Literatur (Sommer, 2012). Als obere Grenze wird häufig eine Vorausschau-Zeit von 10 Sekunden genannt (Hristov, 2009). Das Antizipationsminimum wird zwischen 1,5 bis 3 Sekunden angegeben (Braess & Donges, 2006; Tanida & Pöppel, 2006; van der Hulst, Rothengatter & Meijman, 1998) und orientiert sich an den Reaktionszeiten auf das antizipationsrelevante Merkmal (van der Hulst et al., 1998). Alles in allem liegen Antizipationszeiten von Fahrern, zumindest auf geraden Strecken, ohne Überholmöglichkeit, in einem Zeitfenster von 2 - 10 Sekunden (Sommer, 2012). Sommer (2012) diskutiert zur Erhebung der Antizipationsleistung diverse Verfahren zur direkten Messung, z. B. mittels subjektiver Einschätzung und mittels Probandenbefragung. Die Probandenbefragung läuft dabei ähnlich zur Situation Awareness Global Assessment Technique von Endsley (1988) ab, nur das hier Antizipationen anstelle des Situationsbewusstseins erfasst werden.

Den Probanden werden zu vordefinierten Zeitpunkten Fragen bzgl. des gezeigten Bild- oder Videomaterials gestellt und die Antworten mit den realen Gegebenheiten verglichen. Weiterhin können Antizipationsleistungen durch indirekte Messverfahren z. B. anhand von Prozessmaßen (Bsp. Blickbewegungen oder Lautes Denken) oder von Reaktionszeiten beim Tastendruck erfasst werden (Sommer, 2012). Velichkovsky, Rothert, Kopf, Dornhöfer und Joos (2002) versuchten in ihrer Studie Antizipationsleistungen aus der Verteilung der Fixationsdauern im Blickverhalten herauszulesen. Sie fanden einen plötzlichen Anstieg von Fixationen, die länger als 600 ms andauerten. Zusätzlich spricht auch die anschließende Geschwindigkeitsreduzierung dafür, dass es sich bei Fixationen, um ein indirektes Maß zur Antizipationserfassung handelt (Sommer, 2012). Ebenfalls geeignet zur indirekten Erfassung von Antizipationen ist das Laute Denken (Kap. 1.2.2). Färber (2000) hat zu diesem Zweck, alle Gedanken seiner Probanden, während der Fahrt, aussprechen lassen, die Äußerungen aufgezeichnet und analysiert (Sommer, 2012). Im Anschluss wurde eine Videoanalyse mit charakteristischen Fahrtausschnitten durchgeführt, wobei sowohl Begründungen für das Beschleunigungs-, Verzögerungs- und Abstandverhalten der Teilnehmer, als auch Vermutungen über das Fahrverhalten weiterer Verkehrsteilnehmer, erfasst wurden (ebd.).

Sommer (2012) kommt zu dem Schluss, dass sich für das experimentelle Setting am ehesten ein Fahrsimulator eignet, da sowohl vergleichbare Bedingungen für alle Versuchspersonen hergestellt, als auch die notwendigen Verhaltensparameter gewonnen werden können. Befragungen sollten eher zusätzlich zu den tatsächlich gemessenen Verhaltensdaten erfasst werden (Sommer, 2012). Außerdem betont Sommer (2012), in ihrer Arbeit, zur Messung vorausschauenden Fahrens, die Erhebung von Fahrleistungsparametern, insbesondere Maße der Längsführung. Entscheidend ist, wann der Proband in der nötigen Art und Weise handelt. Dabei gilt er als vorausschauender, umso früher er auf den antizipationsrelevanten Reiz mit dem Anpassen seines Fahrverhaltens antwortet. Die notwendige Handlung zur Konfliktvermeidung umfasst normalerweise die Reduktion der aktuellen Geschwindigkeit (z. B. Rösler, 2010; zit. nach Sommer, 2012), wobei das Loslassen des Gaspedals, im Gegensatz zur Betätigung des Bremspedals, als aussagekräftiger gilt (Sommer, 2012). Einerseits findet es zeitlich früher statt (Sommer, 2012), andererseits ist in den meisten Fällen das Loslassen des Gaspedals zur Geschwindigkeitsanpassung ausreichend (Houtenbos, 2008; zit. nach Sommer, 2012). Zur Erfassung der Frühzeitigkeit der Reaktion werden bei Sommer (2012) sowohl zeitbasierte Maße, als auch entfernungsbasierte Maße, diskutiert. Bei der Messung zeitbasierter Maße, wie bspw. der TTC oder dem zeitlichen Abstand der Fahrzeuge (Time Headway) zum Zeitpunkt der Handlung (= Entfernung/Eigengeschwindigkeit), reduzierten, in der Studie von van der Hulst und Kollegen (1998), die Probanden, bereits 3 Sekunden vor der Verlangsamung des Vorderfahrzeugs, ihre Geschwindigkeit. Zeitbasierte Maße sind jedoch nur anwendbar, wenn Geschwindigkeiten vorgegeben werden, z. B. eine instruierte Geschwindigkeit von 120 km/h (Kap. 2.2.1). Bei selbst gewählter Geschwindigkeit gilt automatisch der Proband mit geringerer Ausgangsgeschwindigkeit als vorausschauender, z. B. eine instruierte Geschwindigkeit von 110 - 150 km/h.

In diesem Fall sollten entfernungsbasierte Maße (z. B. Entfernung (m) zwischen Hindernis und Fahrer zum Reaktionszeitpunkt (Loslassen des Gaspedals)) herangezogen werden. Abschließend werden bei Sommer (2012) Methoden zur Extraktion antizipationsrelevanter Stimuli diskutiert. Hervorzuheben sind dabei die Aufgaben- und Anforderungsanalysen (Endsley, 2000; Fastenmeier & Gstalter, 2008), wobei die antizipationsrelevanten Merkmale zwar sehr umfassend sind, jedoch erweist sich eine Zusammenfassung durch Experten als ökonomischer.

Zusammenfassung. Als Nächstes musste ein Weg gefunden werden, um mit der hypothetischen Natur der Operatoren und Ziele umzugehen. Da unbekannt ist, welche empirischen Erkenntnisse zu CPM-Modellen im Fahrkontext existieren, gibt es keine a priori Art zu wissen, welche Operatoren und Ziele bei der Spurwechselaufgabe relevant sind. Die kognitiven Prozesse, auf die sich die theoretischen Vorstellungen beziehen und die im Rahmen der Simulatorstudie erfasst wurden, wurden auf der Grundlage verschiedenster Literatur zu kognitiven Prozessen (Kap. 1.2.1.2), Fahr´-aufgabenanalysen (Kap. 1.1.3) und Spurwechselmanövern (Kap. 1.1.4) in Form von Operatoren und Zielen operationalisiert. In einem nächsten Schritt wurden Korrelate dieser Vermutungen in den empirischen Daten identifiziert. Die Identifizierung hilft dabei, bestimmte kognitive Operatoren oder Ziele beizubehalten, abzulehnen und neue Hypothesen über andere zu bilden. Allerdings hängt die Identifizierung von der Genauigkeit der anfänglichen Vermutungen über die Variablen ab. Um diese Genauigkeit zu verbessern, muss mit dem begonnen werden, was beobachtbar ist. Die vorher fest-gelegten Ziele und Operatoren dienten als vorläufige Beobachtungskategorien für eine systematische Protokollierung. Die verwendete Methode zur Protokollierung wird im nächsten Kapitel vorgestellt.

1.2.2. Think Aloud

Ein Vergleich verschiedener Methoden der Usability-Forschung zeigt, dass die Methode Lautes Denken für die Zwecke dieser Untersuchung am geeignetsten war (Frøkjær & Hornbæk, 2008). Ursprünglich als psychologische Forschungsmethode entwickelt, stellt sie inzwischen eine verbreitete Technik zur Evaluation von Mensch-Maschine-Schnittstellen dar (Nielsen, 1993; Sarodnick & Brau, 2006). Diese, aus der Kognitionspsychologie stammende Technik, erreicht, wie kaum eine andere, Zugang zu den kognitiven Prozessen, die während einer Handlung ablaufen (Sandmann, 2014).

1.2.2.1. Hintergrund und Beschreibung

Die Think Aloud (TA) Methode, auch unter den Begriffen Denke-Laut-Methode, Gedankenprotokoll, Think Aloud Protocol, Thinking Aloud Protocol, Talk Aloud Interview oder Verbal Protocol bekannt (Konrad, 2010; Nielsen, 1993), ermöglicht es, Einblicke in die mentalen Aktivitäten einer Person, während der Aufgabenbearbeitung, zu erhalten und den (Verarbeitungs-) Prozess zu untersuchen, der zu mentalen Repräsentationen führt (Konrad, 2010).TA bedeutet, dass das Individuum seine Gedanken handlungsbegleitend mündlich beschreiben soll (Gediga & Hamborg, 2002). Theoretisch gründet TA auf Ansätzen der menschlichen Informationsverarbeitung (Konrad, 2010).

In diesem Zusammenhang nannten Ericsson und Simon das Drei-Speicher-Modell, welches ein sensorisches Register, das KZG und das LZG unterscheidet (Konrad, 2010) (Abb. 5).

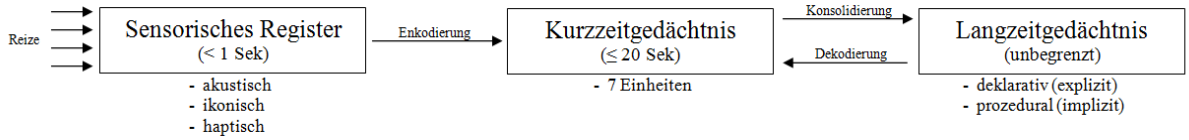


Abbildung 5. Skizze des Gedächtnismodells von Atkinson and Shiffrin (1968).

Das Gedächtnismodell entwickelte sich aus der Computermetapher, wonach das menschliche Gehirn den Prozessen in Computern ähnelt (Gallistel & King, 2010). Daher finden sich viele Parallelen zum MHP (Kap. 1.1.5), sodass davon ausgegangen werden kann, dass unter Verwendung das TA wesentliche Aspekte kognitiver Prozesse für die CPM-GOMS erfasst werden. So werden auch hier externe Informationen in sensorischen Registern in Sekundenbruchteilen gespeichert sowie - gefiltert durch Aufmerksamkeitsprozesse - kodiert an das KZG weitergegeben (Konrad, 2010). Durch häufige Wiederholungen ist wiederum eine Speicherung im LZG möglich (ebd.).

Obwohl die Methode des Lauten Denkens, über mehrere Jahrzehnte, nicht mehr verwendet wurde, wuchs das Interesse an Verfahren, die Daten über interne kognitive Prozesse lieferten (Konrad, 2010). So begannen auch Newell und Simon (1972), mit Hilfe des TA den Problemlösungsprozess des Menschen genauer zu analysieren. Demnach verwendete Newell, als einer der GOMS-Erfinder, die Laute-Denken-Methode ebenfalls in diesem Rahmen. Unter Berücksichtigung der Theorien zur menschlichen Informationsverarbeitung differenzierten Ericsson und Simon drei Verbalisierungs-ebenen des Lauten Denkens (Konrad, 2010):

- Ebene 1: Verbal kodierte Informationen im KZG können direkt verbalisiert werden, z. B. Handlungsbeschreibung (talk aloud)
- Ebene 2: Nicht-verbal kodierte Informationen im KZG, die zunächst dekodiert und anschließend ausgesprochen werden, z. B. interne Gedankenprozesse (TA)
- Ebene 3: Andere Verbalisierungen, wobei der Proband retrospektiv über seine Gedanken berichtet (reflection prompts)

Da ein Zuwachs der beteiligten kognitiven Prozesse mit steigendem mentalen Workload einhergeht und dadurch die Reliabilität der Daten sinkt, gelten nach Ericsson und Simon (1980) nur die ersten beiden Ebenen als reliable Datenquellen. Aufgrund dessen wird beim Lauten Denken während der Aufgabenbearbeitung (Kap. 1.2.2.2) besonderes Augenmerk auf Verbalisierungsdaten gelegt, die direkt aus dem KZG abgerufen werden bzw. auf das Denken und implizite Wissen der Versuchs-personen. Die Erfassung der Handlungsbeschreibung könnte den Probanden außerdem unterstützend beim Verbalisieren komplexerer Gedankengänge dienen, die einen Assoziationsprozess voraussetzen. Die genannten Verfahren werden im Folgenden diskutiert.

1.2.2.2. Arten des Think Aloud

Das TA kann nach Häder (2015) unterschiedliche Formen annehmen. Die Concurrent (engl. simultan) Think Aloud (CTA) meint das Laute Denken während der Aufgabenbearbeitung. Dadurch ist es einerseits möglich kognitive Prozesse direkt zu verbalisieren (Birns, Joffre, Leclerc & Paulsen, 2002; Ericsson & Simon, 1993). Andererseits werden diese Denkprozesse nicht durch das TA beeinflusst, da das Verbalisieren der Gedanken automatisch erfolgt (Ericsson & Simon, 1993; van Someren, Barnard & Sandberg, 1994). Van den Haak, De Jong und Schellens (2003) bestätigten in ihrer Studie, dass subjektiv keine mentale Mehrbelastung empfunden wrd, die Teilnehmer jedoch mehr Fehler bei der Aufgabenbewältigung machen. Des Weiteren fanden Zhao, McDonald und Edwards (2014) heraus, dass eine spezielle Instruktion zur Verbalisierung von Erwartungen und Erfahrungen den kognitiven Workload ebenfalls erhöht. Jedoch ist sie der klassischen Instruktion nach Ericsson und Simon nur laut zu denken hinsichtlich der Qualität und Quantität der erhobenen Daten überlegen. Zudem ist die kognitive Belastung in den Phasen des Schweigens erhöht (Cooke, 2010; Guan, Lee, Cuddihy & Ramey, 2006).

Cooke (2010) fand in ihrer Studie mithilfe von Augenbewegungen heraus, dass zu 80 % widergespiegelt wird, was die Versuchspersonen gerade denken. Die fehlenden 20 % seien dadurch erklärbar, dass die visuelle Verarbeitung von Informationen schneller ist als deren Verbalisierung. In den äußerungsfreien Phasen werden nach Cooke (2010) die dargestellten Informationen vom Probanden analysiert und verarbeitet. Außerdem wurde, bei einem Vergleich zwischen TA und relaxtem TA (VP werden häufiger unterbrochen), gezeigt, dass, bei der relaxteren Form, die Bearbeitungszeiten der Aufgaben länger andauerten, die Aufgabenstellung übergangen wurde und der kognitive Workload subjektiv erhöht war (Hertzum, Hansen & Andersen, 2009). Aufgrund der erhöhten Anforderungen an die Versuchsperson ist die CTA nicht für jeden geeignet (Häder, 2015).

Um die Schwächen der CTA zu umgehen, gibt es das Retrospective (engl. rückblicken) Think Aloud (RTA), wobei keine simultanen Verbalisierungen notwendig sind, da Versuchspersonen erst nach der Aufgabenbearbeitung Fragen zur Systeminteraktion beantworten sollen (Birns et al., 2002). Die RTA bietet die Gelegenheit Zusatzinformationen hinsichtlich der kognitiven Prozesse und Nutzerannahmen zu erhalten (Guan et al., 2006) und der Proband kann sich reflektiert und ganzheitlich zur Aufgabenbewältigung äußern (Birns et al., 2002). Vorteilhaft ist hierbei zudem, dass die Validität nicht von der Aufgabenkomplexität beeinflusst wird (Guan et al., 2006). Außerdem fanden Guan und Kollegen (2006) heraus, dass, bei der RTA, Phasen des Schweigens ebenfalls auf Komplikationen bezüglich der Aufgabenbearbeitung hinweisen. Bei der RTA sieht Häder (2015) das Problem, dass der Proband versuchen wird, die Antwort zu begründen und dadurch nicht der eigentliche kognitive Prozess dargestellt wird. Durch die Erklärungsversuche des Probanden kann jedoch die Aussagegüte verfälscht werden (Birns et al., 2002).

Birns und Kollegen (2002) kommen zu dem Schluss, dass eine Kombination der CTA und RTA der effektivste Weg ist, um gleichzeitig Informationen über den Denkprozess des Nutzers sowie seine Erinnerungen und Konzepte zu erhalten. Da beide Verfahren über einander ausgleichende Stärken und Schwächen verfügen, wird für die vorliegende Arbeit diese Methodenkombination als sinnvoll erachtet.

1.2.2.3. Aktuelle Anwendungen

Die TA-Methode wurde bereits in verschiedensten Forschungs- und Praxisfeldern angewendet, wie bspw. in der Problemlöse-, Entscheidungs-, Medien-, Mensch-Maschine-Interaktions-Forschung und beim Einsatz als Usability-Testmethode (Konrad, 2010). Das Potenzial, welches durch diese Anwendungen verstärkt gezeigt wird, ist ein wesentlicher Faktor für die Testung des lauten Denkens im Fahrkontext zur Untersuchung „bewusster“ kognitiver Prozesse während der Fahraufgabe.

Es gibt bereits Fahrsimulator-Studien in der das TA zur Erforschung bestimmter Fragestellungen oder zur Problemidentifikation genutzt wurde. So ließen Kuhlmann, Altschaffel, Hoppe, Dittmann und Neubüser (2015) Probanden ihre Gedanken und Gefühle mit der TA-Methode kommentieren und fanden, mit deren Hilfe, Unterschiede im Fahrverhalten innerhalb einer Fehlersituation sowie zwischen verschiedenen Fehlersituationen heraus. Auch Pampel, Jamson, Hibberd und Barnard (2015) wendeten in einem Fahrsimulator-Experiment das Laute Denken an, um mentale Modelle zum Thema ökologisches Fahren zu erforschen. Zur Formulierung von Hypothesen über die Konformität des Fahrers mit dem Connected Cruise Control, einem Fahrerassistenzsystem, welches den Fahrer im dichten Autobahnverkehr dabei beraten soll, wie dieser fahren soll, wurde in der Studie von Risto und Martens (2013), zur Bewertung der anfänglichen Reaktion der Fahrer auf die Ratschläge, ebenfalls das TA angewendet. Allerdings ergab die Literaturrecherche keine empirischen Arbeiten, die Lautes Denken explizit zur Erfassung kognitiver Prozesse bezüglich der Fahraufgabe angewandt wurde.

1.2.2.4. Eignung der Methode

Die flexiblen Einsatzmöglichkeiten des TA (Nielsen, 2012) sind ein Grund dafür, dass sich das Laute Denken als das Mittel der Wahl für die vorliegende Studie zeigte. Es lässt sich, aufgrund ähnlicher theoretischer Annahmen zu Informationsverarbeitungsprozessen (Kap. 1.1.5.1 und 1.2.2.1), gut mit der GOMS verbinden. Durch das direkte Verbalisieren ist die Erfassung absoluter Zeitstempel möglich, was der CPM-GOMS zugute kommt. Da die Anwendung des Lauten Denkens im Fahrkontext zur Aufgabenanalyse relativ neu ist, ist eine Überprüfung der Aufgabenleistung sowohl mit, als auch ohne TA unabdingbar. Um Änderungen des Fahrerleistungsvermögens während der Aufgabenausführung (z. B. durch TA) aufzudecken, eignen sich indirekte Methoden, die sich auf fahrzeuginterne Parameter (z. B. Lenkradbewegungen) stützen (Henze, Bergholz & Kücükay, 2009).

Als vorteilhaft, bei der Anwendung der TA, erweist sich zudem der benötigte Stichprobenumfang. Nielsen (1994) konnte, in seinem Experiment zum Finden von Usability-Problemen, mithilfe des Lauten Denkens nachweisen, dass, ab dem sechsten Proband, nur noch

durchschnittlich 5 % Zusatzinformationen gewonnen werden können (die Prozentzahl sinkt mit jedem zusätzlichen Probanden). Trotz der wenigen Probanden werden jedoch viele Daten für die Auswertung generiert. Zudem handelt es sich beim TA, um eine sehr ökonomische Methode innerhalb der Anwendung, da die Datenmenge im Vergleich zum Aufwand sehr umfangreich ist (Nielsen, 2012). Durch den Erhalt qualitativer Daten gestaltet sich das TA jedoch als weniger ökonomisch (ebd.). Aus quantitativer Sicht ist es mithilfe der Methode zwar möglich auf kognitive Prozesse zu schließen, dennoch gibt es Vorbehalte hinsichtlich der geltenden Hauptgütekriterien (Yang, 2003; zit. nach Konrad, 2010). Allerdings können, bei qualitativem Forschungshintergrund, viele Nachteile eher als Stärken gesehen werden (Konrad, 2010).

1.2.2.5. Durchführungshinweise

Nach Charters (2003) wirkt sich ein qualitativer Forschungsansatz sowohl auf die Auswahl der Probanden, als auch auf die weitere Verarbeitung der Daten aus. Berücksichtigung finden sollten demnach: die Aufgabenauswahl, die Rolle des Forschers sowie die Interpretationsmethode (ebd.). Die Probandenauswahl ist dabei abhängig vom Forschungsziel und den Forschungsfragen (Sandmann, 2014). Zusätzlich sollten zwei wesentliche Kriterien für das TA bedacht werden: 1. Grad des fachlichen Wissens und 2. Grad der Sprachfähigkeit (van Someren et al., 1994). Zudem greifen Boren und Ramey (2000) in ihrer Publikation die Handlungsanweisungen von Ericsson und Simon wieder auf. Diese sind unter anderem: Sammlung und Analyse harter verbaler Daten (keine Schlussfolgerungen, Meinungen etc.), Gabe einer detaillierten Instruktion, Erinnerung an das laute Denken bei einer zeitlich vorher festgelegten Sprechpause (15 - 60 Sekunden), keine sonstigen Interaktionen. Allerdings führen Boren und Ramey (2000), als Basis für die Interaktion mit der Versuchsperson, die Idee an, im Sinne der Kommunikationstheorie ein asymmetrisches Sprecher-Zuhörer-Verhältnis herzustellen, sodass der Forscher eher die Rolle des Zuhörers bzw. Lernenden einnimmt.

Der Forscher sollte dafür sorgen, dass sowohl die Rahmenbedingungen, als auch die Untersuchungsmaterialien kontinuierlich den Denkprozess des Probanden anregen (Sandmann, 2014). Zudem sollte ein Versuch, um Ermüdungseffekte zu vermeiden, nicht länger als 60 bis 90 Minuten andauern (ebd.). Während der Aufgabenausführung im Versuch hat sich die Aufzeichnung der Äußerungen durch Audio- und Videodatei als sinnvoll erwiesen (ebd.). So kann die Hinzunahme eines Videomitschnittes zur Analyse nonverbaler Aktionen nützlich sein (Sandmann, 2014), um zu überprüfen, ob z. B. die Verbalisierung eines kognitiven Operators, wie „Entscheiden - Zu blinken“, wirklich bei der Entscheidung ausgesprochen wurde oder erst nach der Handlungsausführung erfolgte und demnach nur eine Reflektion des eigentlichen Operators darstellt. Schließlich benennt Konrad (2010) drei Kriterien zur Unterscheidung des TA: 1. Grad der Strukturierung (Keine vs. spezifische Aufforderung laut zu denken), 2. Zeitpunkt (CTA vs. RTA) sowie 3. Austausch und Dialog (laut Denken für sich vs. für andere) (Kap. 1.2.2.2). Die hier aufgeführten theoretischen Überlegungen werden im Folgenden bedacht.

1.3. Fragestellung

Einen wesentlichen Aspekt, im Fahrkontext, zur Realisierung der Fahraufgabe, stellen die kognitiven Prozesse dar. Werden kognitive Aspekte vernachlässigt, wird der Fahrer schnell von der Assistenz überfordert und verliert das Vertrauen. Um das zu verhindern ist es erforderlich eine Automation zu entwickeln, welche möglichst natürlich fährt, indem sie auch die kognitiven Aspekte des Fahrers berücksichtigt. Bislang gibt es wenige empirische Untersuchungen, die formale Evaluationstechniken zur Erfassung der kognitiven Prozesse beim Spurwechselverhalten auf Autobahnen anwenden. Somit existieren kaum geeignete kognitive Operationen, die als Standard angewendet werden können. Es wurden immer wieder Sachverhalte beobachtet, die zeigen, dass bisherige Assistenzsysteme im Hinblick auf den kognitiven Aspekt schnell an ihre Grenzen stoßen. In diesem Zusammenhang schien eine neue Herangehensweise, der Einsatz eines bereits bestehenden Verfahrens in einem neuen Kontext, als erstrebenswert. Diese Arbeit soll unter Verwendung der CPM-GOMS zur weiteren Klärung der kognitiven Prozesse beim Spurwechselverhalten auf Autobahnen beitragen.

Die Untersuchungsfragen lauten daher:

1) Welche kognitiven Operatoren sind für die Durchführung eines Spurwechsels auf einer zweispurigen Autobahn relevant?
2) Welche dahinterliegenden Ziele verfolgt der Fahrer?

Daraus ergeben sich die folgenden Forschungsziele:

a) Aufstellung kognitiver Operatoren für zwei ausgewählte Spurwechselarten
b) Ermittlung des phasenspezifischen Auftretens kognitiver Operatoren
c) Erarbeitung der Ziele und Unterziele für zwei ausgewählte Spurwechselarten
d) Ermittlung des phasenspezifischen Auftretens der Ziele und Unterziele

Der zentrale Punkt der Fragestellung bestand in der Zerlegung der Spurwechselaufgaben in Teilziele sowie die Zuordnung der kognitiven Operationen und Ziele zu diesen Teilzielen. Dabei können kognitive Operatoren beispielsweise das Antizipieren, das ein Fahrzeug auf der Nachbarspur beschleunigen wird, oder das Beurteilen, der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs, sein. Derartige Operatoren und Ziele aus der Literatur sowie den Daten heraus zu definieren sowie zu analysieren, war der Schwerpunkt dieser Arbeit. Dazu wurden die, mithilfe des Lauten Denkens ermittelten, empirischen Daten von neun Probanden bei zwei unterschiedlichen Spurwechselarten analysiert, deskriptiv ausgewertet und grafisch aufbereitet.

Mit der Untersuchung waren bestimmte Vorstellungen verknüpft. Es wurde davon ausgegangen, dass es spezifische kognitive Operatoren sowie Ziele gibt, die gehäuft in bestimmten Spurwechselphasen auftreten. Jedoch kann die Auftretenshäufigkeit der kognitiven Operatoren und Ziele je nach Spurwechselart variieren. Zusätzlich werden Unterschiede zwischen dem Controlled Scenario (CS) und dem Realistic Scenario (RS) (Kap. 2.2.1) erwartet. Darüber hinaus sollte unter Berücksichtigung bisheriger Studien (Kap. 1.2.2.2) der mentale Workload durch das TA nicht erhöht werden und daher keinen signifikanten Einfluss auf die Durchführungsdauer der Aufgabe haben.

2. Methodisches Vorgehen

Die explorative Fahrsimulationsstudie diente vor allem der Erarbeitung eines, unter anderem an den Fahranforderungen von Fastenmeier und Gstalter (2003) (Kap. 1.1.3), orientierten Kategoriensystems mit kognitiven Operatoren und Zielen, durch die Analyse von Denkprotokollen. Im Folgenden wird die Vorgehensweise des entwickelten Systems aufgezeigt. Zunächst erfolgt die Beschreibung der Stichprobe, der Szenarien und des Simulatoraufbaus. Im Anschluss wird die Versuchsdurchführung inklusive der Fahraufgabe beschrieben. Abschließend wird die Methode zur Modellierung der kognitiven Prozesse vorgestellt.

2.1. Stichprobe

Es war geplant, auswertbare Daten von mindestens sechs Versuchspersonen zu gewinnen. Der Simulator stand für fünf Versuchstage zur Verfügung. Eine Verlängerung zum Ausgleich von Ausfällen war nicht möglich. Pro Versuchstag wurden durchschnittlich vier Versuchspersonen eingeteilt. Insgesamt nahmen schließlich 21 Probanden an der Untersuchung teil. Relevant für die vorliegende Arbeit waren neun Teilnehmer, die während des Experiments einen zusätzlichen Block mit lautem Denken absolvieren mussten (Kap. 2.4). Die Probandenzahl wird als ausreichend erachtet, da Nielsen (1994) experimentell festgestellt hat, dass der TA-Test (Kap. 2.4) keine große Anzahl von Versuchspersonen benötigt. Ähnlich verhält es sich mit der benötigten Probandenanzahl zur Erstellung von GOMS-Modellen (Kap. 1.1.5.2). Zudem war der Transkriptions- und Kategorisierungsaufwand der Datensätze enorm (Kap. 2.4.2), wodurch, trotz weniger Probanden, erhebliche Datenmengen zustande kommen konnten. Die sechs weiblichen und drei männlichen fahrerfahrenen Probanden hatten ein durchschnittliches Alter von 24.89 Jahren (*SD* = 4.76) (Abb. 6).

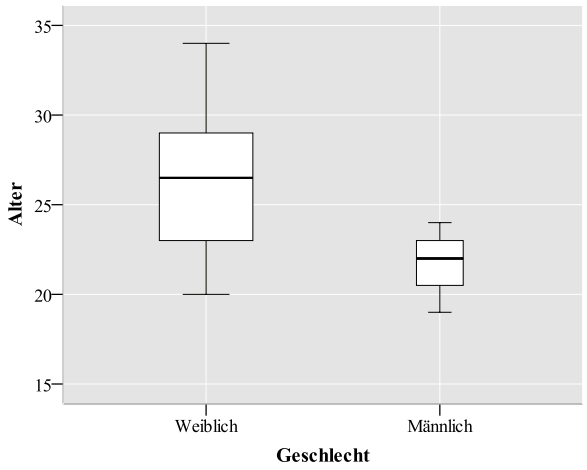


Abbildung 6. Verteilung von Alter und Geschlecht.

Da CPM-GOMS-Modelle von enormer Probandenexpertise, bei der Durchführung von Routineaufgaben, ausgehen (Kap. 1.1.5.2) und auch für das Laute Denken Fachwissen erforderlich ist (Kap. 1.2.2.5), wurden nur geübte Fahrer berücksichtigt. Als Kriterium der Fahrerfahrung wurde der Besitz eines Führerscheins von mindestens drei Jahren vorausgesetzt.

Alle neun Probanden erfüllten dieses Kriterium (*M* = 7.00; *SD* = 4.18). Zudem wurden die, im vergangenen Jahr, als Pkw-Fahrer zurückgelegten Kilometer erfasst. Die angegebene jährliche Fahrleistung war sehr ungleich verteilt. So legten zwei Probanden 20000 km und mehr zurück; ein Proband lag bei 5000 km, drei Probanden machten zwischen 2000 - 4000 km und drei Teilnehmer fuhren maximal 600 km. In Abbildung 7 wird deutlich, dass es keinen Zusammenhang zwischen der zurückgelegten Strecke und der Dauer des Führerscheinbesitzes gibt.

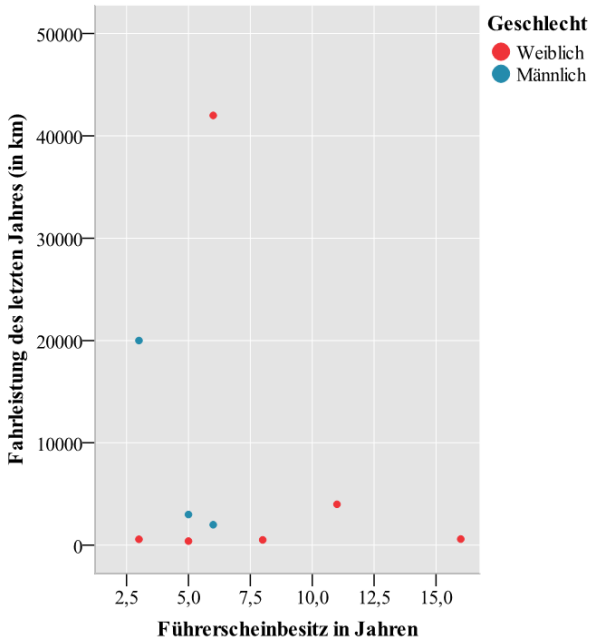


Abbildung 7. Streudiagramm der Merkmale Führerscheinbesitz und Kilometerleistung.

Jedoch bestand ein starker positiver Zusammenhang zwischen dem Alter und der Dauer des Führerscheinbesitzes (Abb. 8). Der Spearman-Koeffizient für den Zusammenhang zwischen beiden Variablen beträgt $r_S = 0.903$. Kendalls Tau-b liegt bei 0.783. Dabei handelt es sich nach Cohen (1992) um einen starken Effekt.

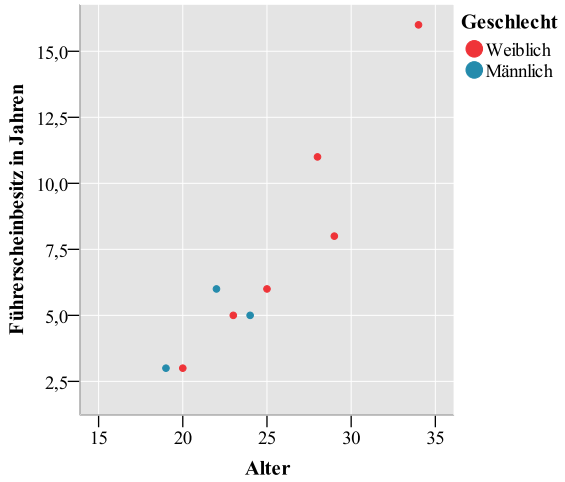


Abbildung 8. Zusammenhang von Führerscheinbesitz und Alter.

Alle Probanden hatten bereits Erfahrung mit dem Fahren auf Autobahnen. Vier Probanden gaben an, diese mehr als 50 % in einer Woche zu nutzen (*M* = 35.67; *SD* = 27.50) (Abb. 9).

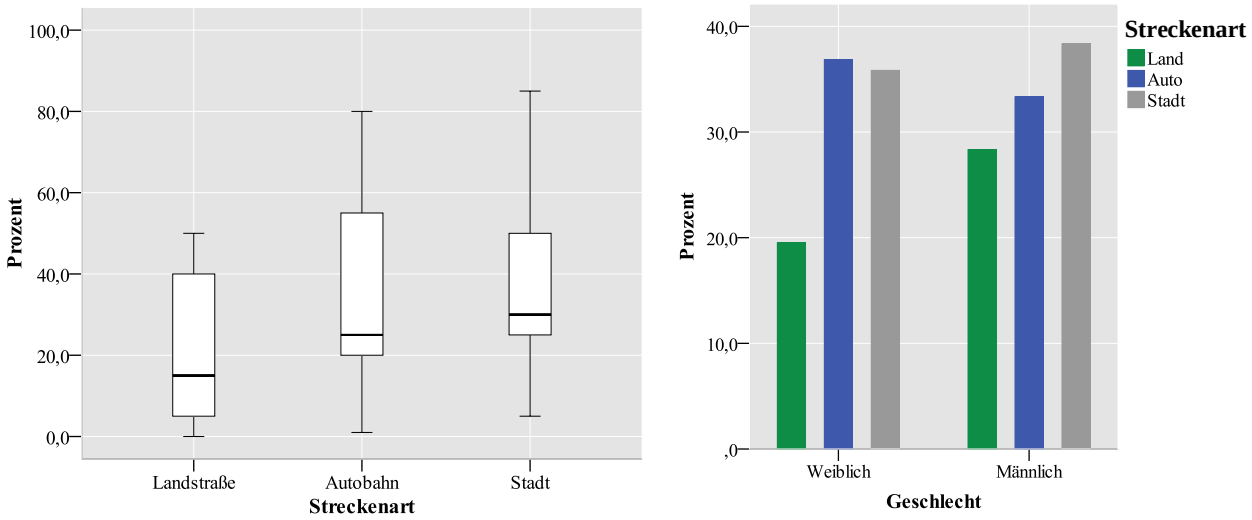


Abbildung 9. Fahrhäufigkeit auf verschiedenen Strecken.

Am häufigsten fuhren die Probanden in der Stadt (*M* = 36.67; *SD* = 23.18) und am wenigsten wurden Fahrten auf der Landstraße angegeben (*M* = 22.44; *SD* = 20.37).

Die aktuelle Fahrfrequenz wurde, neben den Kilometerangaben, zusätzlich durch das gezielte Nachfragen nach dem subjektiven Empfinden der Probanden, wie häufig sie durchschnittlich gefahren sind, erfasst (*M* = 3.56; *SD* = 1.33) (Abb. 10).

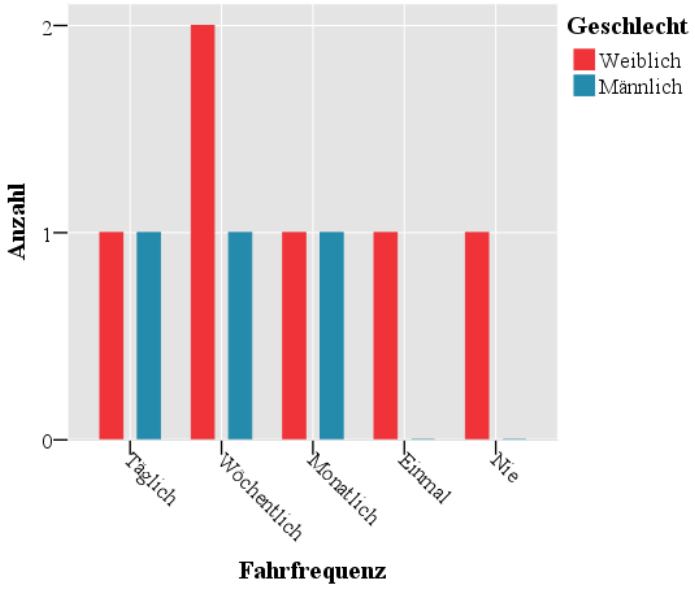


Abbildung 10. Durchschnittliche Fahrhäufigkeit im letzten halben Jahr.

Darüber hinaus wurden die Versuchspersonen gebeten drei Aussagen zum Thema Fahrweise auf einer fünfstufigen Ratingskala zu bewerten.

Dabei reichte die Spanne von „1 = trifft überhaupt nicht zu“ über „3 = teils/teils“ bis hin zu „5 = trifft voll und ganz zu“ (Abb. 11). Indessen gab die Mehrheit an, sich auf der Autobahn wohl zu fühlen (*M* = 2.22; *SD* = 1.48). Des Weiteren äußerten sich sechs der Probanden positiv bezüglich der Aussage „Ich habe Spaß am Autobahnfahren“ (*M* = 4.00; *SD* = 1.50). Einen dynamischen Fahrstil beim Fahren auf Autobahnen haben die wenigsten (*M* = 2.78; *SD* = 1.56).

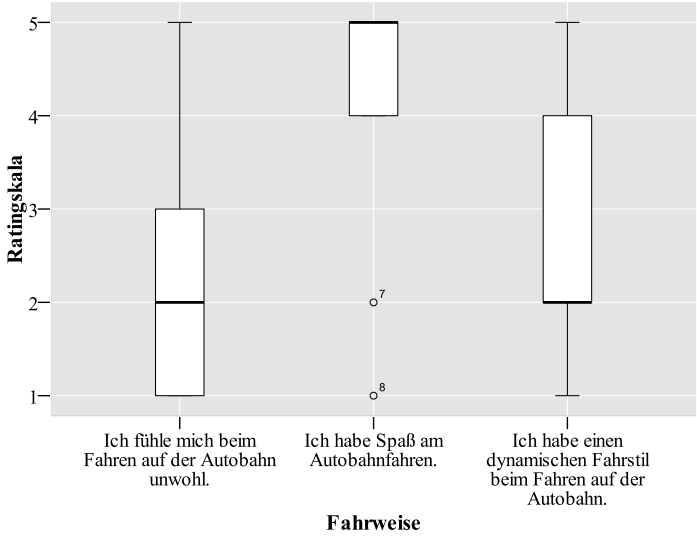


Abbildung 11. Haäufigkeitsverteilung der bevorzugten Fahrweise.

Die Antwortverteilung der Durchschnittsgeschwindigkeit der Versuchspersonen auf Autobahnen wird in Abbildung 12 dargestellt. Demnach bevorzugen Probandinnen etwas niedrigere Geschwindigkeiten.

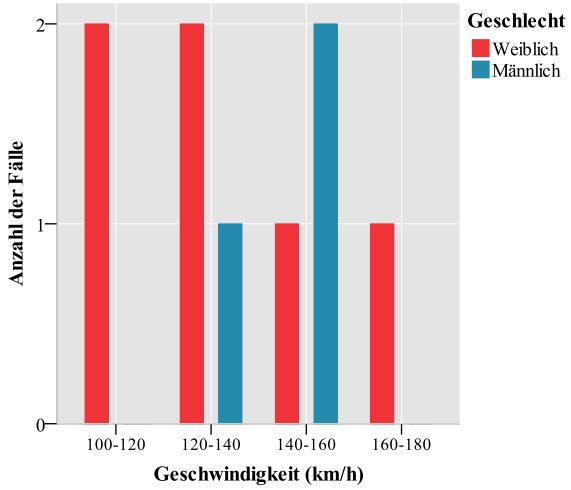


Abbildung 12. Durchschnittliche Geschwindigkeiten auf Autobahnen.

Bis auf drei Probanden hat, bis zum Zeitpunkt der Untersuchung, kein Versuchsteilnehmer an einer Simulatorstudie teilgenommen. Mit einer Ausnahme hatte kein Proband Erfahrungen mit dem TA. Die Stichprobe besteht zum größten Teil aus Studierenden (weiblich = 4, männlich = 3), einer Regionalmanagerin und einer wissenschaftlichen Mitarbeiterin. Zudem waren 44 % der Teilnehmer Mitarbeiter des DLR (weiblich = 3, männlich = 1). Außerdem berichteten fünf Probanden als höchsten Bildungsabschluss das Abitur/die Hochschulreife (weiblich = 2, männlich = 3) und weitere vier

Probandinnen den Fachhochschul-/Hochschulabschluss. Die Probanden erhielten für ihre Teilnahme entweder eine finanzielle Entschädigung in Höhe von 25 Euro oder konnten sich die Studiendauer als Arbeitszeit anrechnen lassen.

2.2. Gerätetechnik und Versuchsaufbau

In der Studie wurden zwei verschiedene Spurwechselszenarien umgesetzt, die sich in der Anzahl sowie Fahrgeschwindigkeit weiterer Fahrzeuge unterschieden. Sowohl diese Szenarien, als auch die benötigten Materialien zur Durchführung der Studie, werden im Folgenden näher erläutert.

2.2.1. Fahrszenarien

Die Szenarien zeigten eine zweispurige Autobahn aus der Sicht eines Pkw-Fahrers und stammen aus der Szenariensammlung des AutoMate-Projektes. Dies geschah in Anlehnung an ein Realfahrt-experiment, in dem, aufgrund von Reizsparsamkeit und geringerer Komplexität im Vergleich zu dreispurigen Autobahnen, Spurwechselmanöver auf zweispurigen Autobahnen, untersucht wurden. Da sich die vorhandene Szenerie für die vorliegende Untersuchung als ausreichend erwies, wurde von der Modellierung eigener Szenarien abgesehen. Wesentlich war einerseits das Vorhandensein eines kontrollierten, vorhersehbaren Szenarios, mit einfachen Situationen und Aufgaben, welches gut auswertbar war, andererseits eine Erhöhung der Schwierigkeit durch Einsatz eines komplexen, realistischen Szenarios. Die Entscheidung für die ausgewählten Situationen basierte auf der Einteilung von Spurwechseln nach Fastenmeier und Kollegen (2001) (Kap. 1.1.4.2). In der Autobahnsimulation waren prinzipiell alle 16 Spurwechseltypen und alle fünf Anlässe möglich. Es wurden solche untersucht, die beim Spurwechsel von rechts nach links und links nach rechts auf der zweispurigen Autobahn, ohne Auf- oder Abfahrt, vorkamen. Im Fahrsimulator wurde eine Spurwechselsituation erzeugt, die für alle Versuchsteilnehmer gleich war und einer realen Spurwechselinitiierung möglichst nahe kam. Daher wurde besonderes Augenmerk auf die Forcierung kontinuierlicher Überholmanöver gelegt, bei denen der Fahrer gleichzeitig auch in eine Entscheidungssituation gezwungen wurde. Der Szenarienablauf sei am folgenden Beispiel erläutert: Die Versuchsteilnehmer sollten auf einer zweispurigen Autobahn fahren. Auf der Spur des Ego-Fahrzeugs befanden sich weitere Fahrzeuge. Je nach Szenario waren jedoch auch auf der Nebenspur keine bzw. andere Fahrzeuge vorhanden. Folgend werden die verwendeten Fahrszenarien kurz erläutert.

Test Drive. Bei der Probefahrt befand sich neben dem Ego-Fahrzeug lediglich Verkehr auf der rechten Fahrbahn. Dabei handelte es sich immer um den gleichen blauen Volkswagen (VW), der mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h fuhr und immer wieder im Abstand von 227 m auftauchte.

Controlled Scenario (CS). Die CS-Fahrt war identisch mit der Übungsfahrt mit der Ausnahme, dass es zusätzlichen Verkehr auf der linken Spur gab. Hierbei drehte es sich um einen blauen VW der in regelmäßigen Abständen vorbei fuhr. Manipuliert wurde neben der Distanz (227 m) die Differenz-geschwindigkeit (20 km/h) zwischen dem Ego-Fahrzeug (120 km/h) und dem überholenden Fahrzeug (140 km/h). Die Überholer wurden getriggert, wenn sich die Probanden auf 150 m an das Fahrzeug auf

der rechten Spur angenähert hatten. Diese Fahrt wurde hauptsächlich eingeführt, um einen eventuellen zusätzlichen mentalen Workload zu mildern, der möglicherweise in der RS-Fahrt dadurch auftrat, dass wesentlich mehr und vielfältigere Elemente diskontinuierlich beim Fahren erschienen und verschwanden. Zusätzlich konnte sichergestellt werden, dass eine Spurwechselsituation erzeugt wurde, bei der alle Versuchsteilnehmer das Überholobjekt zum gleichen Zeitpunkt wahrnehmen konnten und der Zeitpunkt zum Spurwechsel für alle Probanden in einem vergleichbaren Rahmen blieb.

Realistic Scenario (RS). Die RS-Fahrt unterschied sich von der CS-Fahrt dadurch, dass die Fahrzeugelemente des zweiten Szenarios vielfältiger waren. Sie umfassten beispielsweise Motorradfahrer, Pkws oder Lkws, die sich in unterschiedlichen Entfernungen und Trajektorien[4] zum Fahrer befanden. Die Objekte verhielten sich unterschiedlich, wie z. B. in Lücken springende Motorradfahrer oder Pkws, die Spurwechsel, ohne vorherige Signalgabe, durchführten. Der Proband wurde instruiert zwischen 110 - 150 km/h zu fahren. Diese Fahrt wurde eingeführt, um mehr Varianz in den Prozessen der Wahrnehmung, Motorik und Kognition zu erzeugen.

2.2.2. Umgebung und weitere Materialien

Der Versuch fand im Virtual-Reality-Labor (VR-Lab) des DLR-Instituts für Verkehrssystemtechnik am Standort in Braunschweig statt. Dabei handelt es sich um eine hochdynamische und skalierbare Fahrsimulation mit der eine 360°-Darstellung einer virtuellen Welt erreicht wird. Die Entscheidung für das VR-Lab als geeignetste Simulationsumgebung lag in der Notwendigkeit eines hohen Immersionsgrades begründet. Für einen realitätsnahen Versuch war es notwendig die komplette Umgebung im Blick zu behalten, insbesondere mit der Möglichkeit eines Schulterblicks vor einem Überholmanöver. Dadurch konnte gewährleistet werden, dass die Probanden ein annähernd reales Verkehrsverhalten zeigten. Zudem bestand die Option verschiedene Fahrzeuge und MockUps (= Testmodelle) zu integrieren. Die Wahl hierzu viel auf das SimCar (Abb. 13).

Abbildung 13. SimCar.

Dabei handelte es sich um einen viertürigen automatikbetriebenen VW-Golf, der mit einem aktiven Lenkrad, Gas- sowie Bremspedal ausgestattet war. Die Fahrszenen wurden über 12 eyevis Projektoren vom Typ ESPLWXT-1000 auf eine Projektionsfläche mit einem Durchmesser von 5,5 m projiziert.

[4] Gemäß Helbing (1997) ist *Trajektorie* der „Verlauf des Aufenthaltsortes in Abhängigkeit von der Zeit, Ganglinie“ (S. 77).

Zur Darstellung von Automationsanzeigen bzw. fahrzeugbezogenen Anzeigen, wie z. B. einem Tachometer (Abb. 14), wurden modulare Displays verwendet. Die Fahrzeugpositionen des SimCar kamen direkt aus der Verkehrssimulation und waren automatisch verfügbar. Die Fahrzeuginputs, wie Gas, Bremse, Lenkrad, Blinker usw., wurden mit Hilfe der Middleware „Dominion“ zusammengeführt und aufgezeichnet, sodass eine zeitsynchrone Erfassung gewährleistet werden konnte.

Abbildung 14. Digitale Tachometeranzeige im Fahrzeug-MockUp.

Eine Kamera (1) und ein Mikrofon (2) im hinteren Teil des MockUps dokumentierten die Verbalisierungen der Versuchsteilnehmer während der Fahrt, unter Verwendung des TA (Kap. 2.4), zur Erfassung der kognitiven Operatoren und Ziele (Abb. 15). Zur Absicherung wurde hier ebenfalls der Vorderraum des Fahrzeugs erfasst, sodass in der späteren Videoanalyse schneller ersichtlich war, um welche Situation es sich handelte. Besondere versuchsunabhängige Äußerungen der Probanden wurden außerdem in einem separaten Protokoll vom Versuchsleiter festgehalten.

Abbildung 15. Kamera-Mikrofonapparatur.

Zur Erhebung der kognitiven Operatoren wurden zusätzlich die bereits aufgestellten motorischen Operatoren mittels Kontaktmessung der einzelnen Fahrzeugelemente automatisch erfasst. Sowohl zur Erfassung der perzeptuellen, als auch der kognitiven Operatoren, stand das Mehrkamera-Eye-Tracking-System Smart Eye Pro 6.0 zur Sammlung der Kopf- und Blickdaten sowie ein Datenaufzeichnungssystem für die Aufnahme von Videodaten zur Verfügung.

Die Fahrzeugdaten wurden durch die Simulation verfügbar. Die Kameras des Blickregistrierungssystems befanden sich a) im linken Seitenfenster, b) links, c) mittig, d) rechts hinter der

Windschutzscheibe und e) im rechten Seitenfenster (Abb. 16). Wobei die genaue Erstellung und Erschließung der perzeptuellen Operatoren Gegenstand einer anderen Masterarbeit waren, deren Daten jedoch für eine präzisere Einschätzung der kognitiven Operatoren relevant sein könnten.

Abbildung 16. Cockpit-Panoramaansicht des MockUps mit Mehrkamera-Eye-Tracking-System.

2.3. Versuchsdurchführung

Der Hauptversuch fand im Zeitraum vom 27.06. bis 01.07.2016 statt. In der Woche zuvor wurden die Geräte, der Ablauf sowie die Instruktionen bereits an einer Versuchsperson getestet. Die Probanden wurden zunächst begrüßt und gebeten einige Dokumente (Einwilligungserklärung, Beleg für Aufwandsentschädigung) zu unterzeichnen. Anschließend wurden sie sicherheitstechnisch belehrt. Nach der Instruktion (Abb. A.1 - A.3, Anhang A) wurden die Probanden aufgefordert sich in das SimCar zu setzen und eine bequeme Sitzposition einzunehmen sowie die Spiegel einzustellen. Erst im Anschluss konnte der Versuchsleiter die Eye-Tracking-Kameras einstellen und die Probanden kalibrieren, da Positionsveränderungen nach erfolgter Kalibrierung die Messgenauigkeit beeinträchtigen können. Die Versuchspersonen wurden darüber informiert, dass sie sechs Fahrten mit einer Gesamtfahrtzeit von ca. 70 Minuten und individuellen Pausen zwischen den Fahrten absolvieren werden, falls ein Proband simulatorkrank werden würde. Den zeitlichen Ablauf für den einzelnen Probanden zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2

Versuchsablauf mit Zeitangaben

Phasen	Zeit (in Minuten)
Begrüßung	0:05:00
Instruktion, Einverständnis	0:10:00
Kalibrierung (Eye-Tracking)	0:25:00
Training (Gewöhnung an den Simulator)	0:10:00
CS- und RS-Fahrt	0:24:00
Instruktion (TA)	0:05:00
Training (TA)	0:12:00
CS- und RS-Fahrt mit lautem Denken	0:24:00
Videokonfrontation	0:15:00
Verabschiedung, Demographie-Fragebogen	0:05:00
Gesamtes Experiment	= 1:35:00

Zusätzlich entspricht die Vorgehensweise den theoretischen Vorüberlegungen zum Lauten Denken (Kap. 1.2.2.5). Ebenso wurden die Versuchspersonen vor Versuchsbeginn nochmals zur Durchführung der Fahraufgabe instruiert, sodass sie ihre Aussagen an dem konkreten Anwendungskontext ausrichten

konnten. Besondere Betonung lag dabei auf dem Hinweis, dass es, um die Analyse des Fahrverhaltens, bei Spurwechseln auf Autobahnen, geht, die Probanden natürliches Fahrverhalten zeigen und das Rechtsfahrgebot auch im Simulator gilt. Dann verließ der Testleiter das VR-Lab. Nach Überprüfung der Funktionsfähigkeit aller Systeme wurden die Datenaufzeichnung und das erste Szenario gestartet.

Der Versuch gliederte sich dabei in zwei Teilbereiche mit jeweils drei Fahrten: die Baseline-Bedingung und die Experimental-Bedingung. Die erste Fahrt diente einerseits der Übung, wobei sich die Probanden mit dem Fahrzeug und dem Ablauf vertraut machen konnten. Andererseits wurde sichergestellt, dass die Probanden ihre Aufgabe verstanden hatten. Die beiden folgenden Fahrten sowohl das CS, als auch das RS (Kap. 2.2.1), bildeten die Testdurchgänge der Baseline-Bedingung. Die Baseline-Bedingung wurde eingeführt, um Aussagen über die generellen Ziele der Fahraufgabe, ohne zusätzliche mentale Belastung, machen zu können und um zu überprüfen, ob lautes Denken einen Einfluss auf die Ausführungsdauer der Fahraufgabe hat (Olmsted-Hawala, Murphy, Hawala & Ashenfelter, 2010). Zusätzlich wurden die zwei Spurwechselszenarien auch mit dem TA untersucht (= Experimental-Bedingung). Um die kognitiven Operatoren überprüfen zu können, wurden die Probanden daher gebeten, während der Fahraufgabe, nach dem TA, laut zu denken (Kap. 2.4.1.2). Die Reihenfolge der CS- und RS-Fahrten wurden sowohl in der Baseline-, als auch in der Experimental-Bedingung, variiert. Die Zuteilung der Probanden erfolgte zufällig. Während jeder Versuchsfahrt befand sich der Testleiter außerhalb des VR-Labs, sodass eine Beeinflussung des Probanden durch den Testleiter weitestgehend umgangen wurde. Der Testleiter hatte jedoch die Möglichkeit über ein Mikrofon mit dem Probanden zu kommunizieren, um eventuelle Fragen zu beantworten oder Hinweise (z. B. „Sie halten sich nicht an die Geschwindigkeitsbegrenzung.“) zu geben. Zur Geschwindigkeitskontrolle konnte der Testleiter den Tachometer auf einem separaten Bildschirm aufrufen. Zudem hatte er, durch eine Sicherheitskamera, die Möglichkeit einzugreifen, wenn er erkannte, dass es dem Probanden schlecht geht.

Um Reihenfolgeeffekte zu vermeiden wurden die Szenarien der jeweiligen Testdurchgänge randomisiert dargeboten. Da, nach Frommann (2005), beim TA größere Module in kleinere Einheiten von < 10 Minuten gestückelt werden sollten, wurde die Abfolge von kurzen Streckenfahrten einer kontinuierlichen Fahrt vorgezogen. Jedes Szenario wurde somit in circa 10 Minuten durchfahren und mit der Aufforderung „Fahren Sie rechts auf den Seitenstreifen und halten Sie an“ beendet, womit die Datenaufzeichnung ebenfalls endete. Mit einem Online-Fragebogen (Abb. B.1 - B.3, Anhang B) wurden abschließend demographische Daten der Probanden erhoben. Ebenso wurden sie nach Schwierigkeiten gefragt, über das Ziel der Studie informiert und verabschiedet. Die Versuchsdauer lag bei circa eineinhalb Stunden.

2.4. Anwendung des Think Aloud

Mit Hilfe des TA wurden die kognitiven Prozesse während der Aufgabenausführung erfasst. Dazu wurden die Aktionen und Äußerungen der Probanden im MockUp erfasst und ausgewertet. Das hierzu verwendete Material sowie der konkrete Ablauf werden im Folgenden näher beschrieben.

2.4.1. Durchführung des Think Aloud

2.4.1.1. Equipment

Die Aufnahme für das TA-Beispiel „Kaffee kochen“ (vgl. Kap. 2.4.1.2) erfolgte mithilfe eines Videokamerasystems. Für die Aufnahme der RTA wurden ebenfalls eine Videokamera und ein zusätzliches Mikrofon zur Verfügung gestellt (Kap. 2.2.2). Zur Durchführung des RTA stand ein Computerarbeitsplatz im VR-Lab zur Verfügung. Der Rechner für die Datenaufzeichnung während des Versuchs war das Notebook der Versuchsleiterin. Auf dem Lenovo U41 mit einem 17“ TFT-Monitor bestand die Möglichkeit des Zugriffs auf den VLC Media Player, wodurch die Videos der CTA abgespielt wurden. Zusätzlich lief während der RTA-Versuche entweder das Programm Screencast-O-Matic v2.0 oder die Open Broadcaster Software, mit denen es möglich war, Audio- und Videospuren in Echtzeit aufzuzeichnen. Im vorliegenden Falle handelte es sich um einen Zeitcode in Minuten, Sekunden, Millisekunden und Frame-Nummern ab Beginn der Aufzeichnung. Die Transkription erfolgte mittels der Softwares FOLCKER und ELAN (Kap. 2.4.2).

2.4.1.2. Versuchsablauf

Vor den eigentlichen Fahrten mit Lautem Denken wurden die Probanden zunächst an die Methode herangeführt. Nielsen (1993) rät, zur Veranschaulichung dieser Methode und um den Probanden Hemmungen und Ängste zu nehmen, während der Instruktion zum Lauten Denken, zu einem kurzen Beispiel. Aufgrund dessen hat die Testleiterin den Probanden die alltägliche fahrkontextunabhängige Aufgabe „Kaffee kochen“ vorgeführt, indem sie sich selbst im Vorfeld, während dieser Aufgabenbearbeitung mit lautem Denken gefilmt und den Probanden das zweiminütige Videomaterial nach der Instruktion (Abb. C., Anhang C) präsentiert hat. Bei der Instruktion fiel die Wahl auf eine explizite Instruktion, da nach Zhao und Kollegen (2014) dadurch mehr Informationen gewonnen werden (Kap. 1.2.2.2). Die Probanden sollten sich beim Lauten Denken als Experten sehen und sich einen Beifahrer vorstellen, der lernt und zuhört, denn Boren und Ramey (2000) bezweifeln, das Sprache, ohne die Absicht der Kommunikation, funktioniert. Zum Einüben hatten die Probanden im Anschluss an die Einweisung die Gelegenheit eine Probefahrt zu machen. Das Szenario entsprach hierbei der Probefahrt aus der Experimental-Bedingung. Daraufhin folgten die Fahrten der Experimental-Bedingung (Kap. 2.3). In dieser Bedingung blieb der Testleiter ebenfalls in Kontakt mit dem Probanden, jedoch nur, um ihn gegebenenfalls nach 15 sekündigen Sprechpausen mit den Worten „Bitte reden Sie weiter!“ kurz und nondirektiv an das Laute Denken zu erinnern (Kap. 1.2.2.5).

Nach der Durchführung aller Fahrten wurden die gespeicherten Videos, mit Lautem Denken während der Fahrt, gemeinsam mit dem jeweiligen Probanden gesichtet und das RTA durchgeführt. Dazu wurde, nach einer kurzen Überprüfung der Aufnahme auf Bild- und Tonqualität, die Aufzeichnungssoftware am Rechner aktiviert und der Proband gebeten erneut laut zu denken. Hierbei hatte der Proband einerseits die Möglichkeit Auffälligkeiten frei zu äußern. Andererseits konnte der Versuchsleiter, bei länger andauernden Sprechpausen, gezielt Nachfragen stellen, um die gewonnenen

Daten in einen genauer definierten Kontext zu stellen. Beispielfragen durch den Testleiter der RTA finden sich in Tabelle 3.

Tabelle 3

Beispielfragen und Antworten beim RTA

Kontext	Frage	Antwort
Spurwechselentscheidung ja/nein	Warum lohnt es sich nicht rechts rüber zu fahren?	Weil da kein Platz mehr war. Der Abstand mit 20 - 50 m dazwischen wäre zu kurz gewesen.
Konfliktvermeidung	Warum hast du den BMW beobachtet?	Weil er erst nach rechts gefahren und dann relativ schnell nach links ausgeschert ist. Das hat mich verwirrt.
Verkehr beobachten	Woran machst du denn die „Idioten“ fest?	Wenn jemand nicht flüssig, schnell Gas gibt. Ich erwarte von jemandem, der mich (140 km/h) links überholt, dass er das mit 160 - 180 km/h tut.

2.4.2. Datenannotation und –aufbereitung

Um die Verbaldaten in eine statistisch auswertbare Form zu bringen, wurden sie im Anschluss an die Erhebung mithilfe der Transkriptionssoftwares FOLCKER und ELAN kategorisiert. Anschließend wurden die entstandenen GOMS-Komponenten mithilfe von Microsoft Office Excel 2007 und IBM SPSS Statistics Version 24.0 statistisch ausgewertet.

2.4.2.1. Vorbereitung der Videodateien für die Auswertung

Zuerst war es erforderlich die Videodaten der CTA für die Auswertung vorzubereiten. Nothdurft und Schütte (2010) empfehlen eine arbeitsteilige Lösung von FOLCKER und ELAN, um ihre jeweiligen Nachteile zu vermeiden. Für eine kontinuierliche und lückenlose Annotation, die präzise Notation von Pausen und Überlappungen sowie eine Syntaxkontrolle nach den cGAT-Konventionen eines GAT-2-Minimaltranskripts eignete sich insbesondere der Transkripteditor FOLCKER (Schmidt & Schütte, 2016). Da in FOLCKER nur Audiodateien bearbeitbar sind, wurden diese zunächst aus den Videodateien der CTA extrahiert und anschließend ins WAV-Format konvertiert. Das Transkribieren der Verbaldaten (Abb. 17) dauerte ca. sechs Wochen.

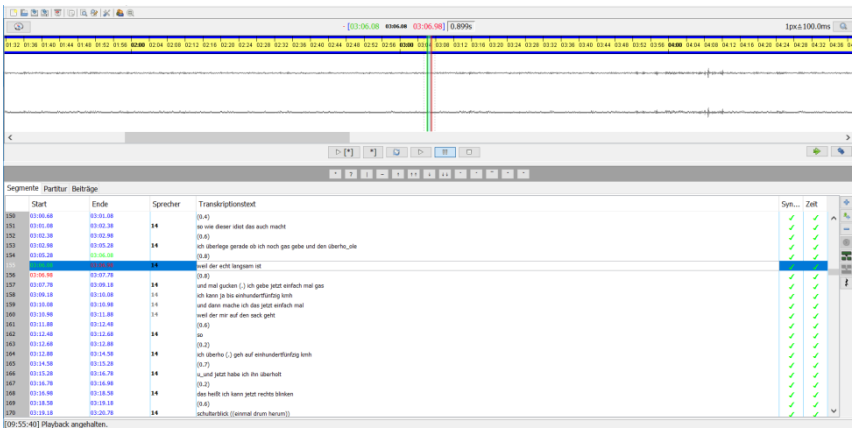


Abbildung 17. Transkriptionsbeispiel einer WAV-Datei in FOLCKER.

Es entstanden 18 CTA-Sprachprotokolle mit 4241 Äußerungen der Probanden.

2.4.2.2. Erstellung der Videoprotokolle

Die Erstellung der Videoprotokolle erfolgte mit der Transkriptionssoftware ELAN. Vorab wurden die Sprachprotokolle in das ELAN-Format exportiert, sodass die Audiodateien mit den Videodateien synchronisiert werden konnten. ELAN bietet einerseits vielfältige Navigationsmöglichkeiten (z. B. frameweises vor- und Zurückspringen für Feinanalysen), die gerade im Hinblick auf das Festlegen von Zeitspannen von enormer Bedeutung sind. Andererseits sind hier mehrere sprecherbezogene Annotationsspuren realisierbar (Nothdurft & Schütte, 2010). Dadurch war es erreichbar die CTA-Kodierungen der Probanden- (1) und Versuchsleitertranskriptionen (2) direkt in die Videoprotokolle einzugliedern (Abb. 18). Zusätzlich wurden die retrospektiven Sprachprotokolle eingegliedert, indem separate Zeilen für die RTA-Transkription der Probanden (3) sowie des Versuchsleiters (4) angelegt und die Transkriptionen, durch einen Videoabgleich, im entsprechenden Segment ergänzt wurden (Abb. 18). Dabei wurden 339 Annotationen der Probanden ergänzt. Die Bearbeitungszeit betrug 10 Wochen.

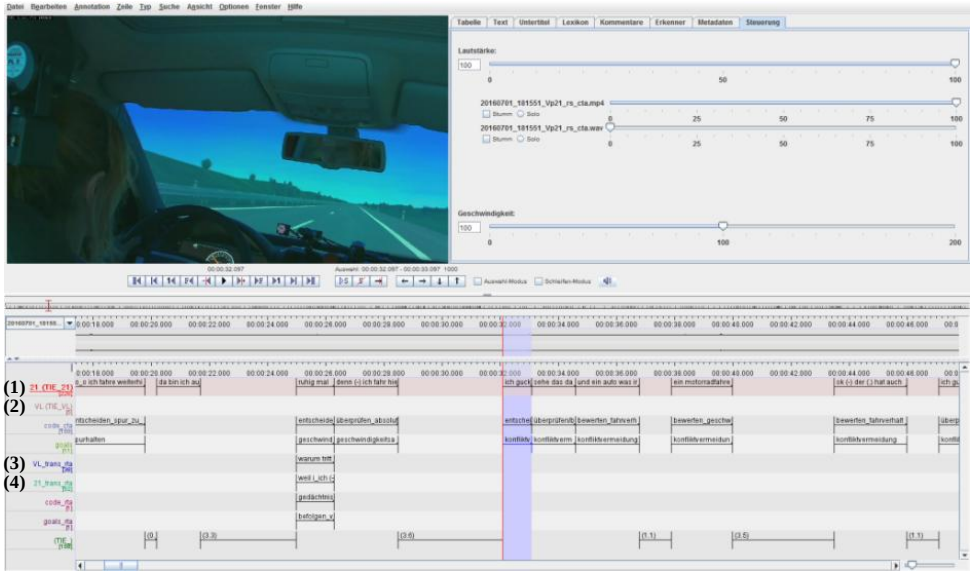


Abbildung 18. Kodierungsbeispiel einer EAF-Datei in ELAN.

2.4.2.3. Vorbereitung der Protokolle zur Auswertung

Weiterhin mussten alle Verbalisierungen in eine Form gebracht werden, die eine quantitative Analyse ermöglicht. Daher wurden die Transkriptionen bestimmten Kategorien (kognitive Prozesse) zugewiesen, die während der Literaturrecherche (Kap. 1.2.1) sowie des Studienverlaufs definiert wurden. Die Unterkategorien (kognitive Operatoren) wurden dann über einen Bottom-up-Ansatz in übergeordnete Ziele zusammengefasst.

Zur Erarbeitung der Ziele wurde sich an den Fahreraktivitäten von Fastenmeier und Kollegen (2001) orientiert. Es erfolgte keine Bewertung der Aussagen, sondern jeder genannte Operator wurde akzeptiert. Mehrgliedrige Aussagen wurden geteilt (z. B. „Fahrzeug wird weiter beschleunigen und

auf die Nachbarspur wechseln). Sinngemäß identische Aussagen, verschiedener Probanden, wurden zu einer Kernaussage zusammengefasst (z. B. „Fahrzeug vor mir blinkt links“ versus „links blinkendes Vorderfahrzeug“). Die Ergebnisse dieser Zuordnungen werden in Kapitel 3.1. dargestellt.

2.5. Auswertung

Zur Datenauswertung standen Daten von neun Versuchspersonen des Simulatorexperimentes (Kap. 2.1.) zur Verfügung. Dabei wurden sowohl die vier Messzeitpunkte (CS-nTA, RS-nTA, CS-TA, RS-TA), als auch die zwei Spurwechselarten (Spurwechsel vom rechten auf den linken Fahrstreifen, Spurwechsel vom linken auf den rechten Fahrstreifen) sowie die vier Spurwechselphasen (Entscheidung, Vorbereitung, Durchführung, Schluss) betrachtet. In den nächsten Unterkapiteln erfolgt daher eine kurze Beschreibung der Herangehensweise zur Auswertung der kognitiven Operatoren und Ziele.

2.5.1. Matching von Fahr- und Verbaldaten

Die Aufzeichnungen des Fahrverhaltens und die zeitgestempelten Dateien der kodierten Verbalisierungen wurden in Microsoft Excel zusammengeführt. Da die Daten nicht zeitsynchron aufgezeichnet werden konnten, wurden die Fahrdaten zunächst mit den Videodaten verglichen und eine experimentelle Echtzeit festgelegt, dass das letzte unbewegliche Bild der Simulation zum Ausgangspunkt wurde. Zudem wurde eine Frame-Dauer von 40 ms bestimmt. Für jede Fahrt jeder Versuchsperson liegt eine eigene Datei vor. Aufgrund der großen Zahl gemessener Zeitpunkte haben diese Dateien zwischen etwa 14709 und 98582 Records.

In der Datenauswertung wurden nur vollständig ausgeführte Spurwechsel berücksichtigt (Kap. 1.1.4.1.). Zur Identifikation der einzelnen Spurwechsel innerhalb der Fahrten wurde ein Zeitpunkt Null (*T0*) definiert. *T0* beinhaltete den Zeitpunkt, an dem der Mittelpunkt der Hinterachse den Mittelpunkt der Fahrbahn (= Nullpunkt der y-Achse) überschreitet (Abb. 19). Überschreitet bedeutet in diesem Zusammenhang ein Wechsel von negativen zu positiven y-Werten.

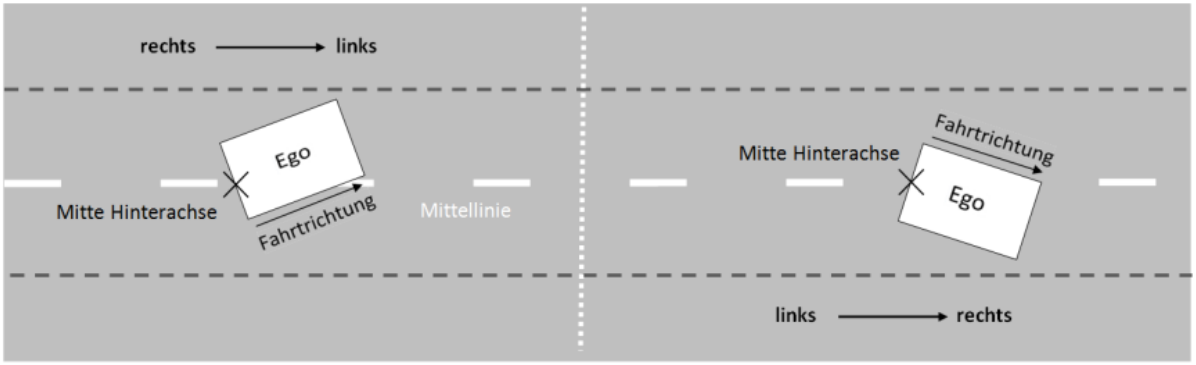


Abbildung 19. Spurwechselzeitpunkt (*T0*): Mitte Hinterachse schneidet die Mittellinie.

Ausgehend von *T0* ergab sich die Variable „vEgo_lane“ zur Identifikation auf welcher Spur sich die Versuchsperson zu einem bestimmten Zeitpunkt befand. Aufgrund dessen entstanden zwei weitere Variablen („frequency_lc_r2l“, „frequency_lc_l2r“) zur Auszählung der Spurwechselhäufigkeiten. Nach der Festlegung von *T0* ergaben sich in Anlehnung an die in Kap. 1.1.4.1. beschriebenen Phasen, die in Tabelle 4 aufgeführten Phasenzeiten. Die Entscheidungsphase begann bei dem in Kap. 1.1.4.3. angegebenen Wert und dauerte bis zum Beginn der Vorbereitungsphase. Die Vorbereitungsphase beläuft sich auf die Zeitspanne von 5 Sekunden vor *T0* bis 2 Sekunden vor dem Spurwechsel. Die Dauer der Durchführungsphase wurde auf 4 Sekunden festgelegt, was annähernd dem Mittelwert der in Kap. 1.1.4.3. angegebenen Zeitspanne entspricht. Die Schlussphase wurde auf 3 Sekunden festgesetzt. Schließlich wurden die zwei neuen Variablen „r2l_phase“ und „l2r_phase“, zur Bestimmung der einzelnen Spurwechselphasen, generiert. Die Auswertung erfolgte mit SPSS.

Tabelle 4

Zeiten der Spurwechselphasen (in Sekunden)

Spurwechselphase	Phasenbeginn	Phasenende
Entscheidung	*T0* - 10	*T0* - 5
Vorbereitung	*T0* - 5	*T0* - 2
Durchführung	*T0* - 2	*T0* + 2
Schluss	*T0* + 2	*T0* + 5

2.5.2. Objektive Maße der mentalen Beanspruchung

Um zu überprüfen, ob die Methode Lautes Denken zur Erfassung kognitiver Prozesse, bei Spurwechseln, geeignet ist, wurden die Lenkbewegungen sowie die Betätigung von Gas- und Bremspedal ausgewertet. Die Grundidee ist, dass eine Mehrbelastung, durch Zusatztätigkeiten (z. B. Lautes Denken), zu einer erschwerten Ausführung bestimmter Regelaufgaben (z. B. Spurhalten) führt. Lenkmaße reagieren sensitiv auf verschiedene Ablenkungsarten während der Fahrt (Knappe, Keinath, Meinecke & Cristina, 2008; Schade & Engeln, 2008). Sie helfen neben anderen Maßen der Fahrzeugquerregelung, seit langem, bei der Bewertung der Fahrzeuggüte (Knappe et al., 2008).

In dieser Arbeit wurde die Standardabweichung über alle aufgezeichneten Lenkradwinkel hinweg berechnet. Die Standardabweichung der Lenkradposition ist, bei geraden Strecken und bei einem Vergleich von Kontroll- und Experimentalfahrt, weniger fehleranfällig (Knappe et al., 2008) und stellte sich somit als geeignetes Maß für die vorliegende Studie heraus. Das Bedienen des Gas- sowie Bremspedals ist, wie das Einsetzen des Lenkrades, ein kontinuierlicher Vorgang. Unregelmäßigkeiten können daher auf eine unruhige, nicht antizipierte Fahrweise hindeuten.

Bei der Auswertung des Fahrtenverlaufs wird die Möglichkeit exploriert, aus den Bewegungen von Gas- und Bremspedal ähnliche Informationen wie aus den Lenkbewegungen zu gewinnen, indem die gleichen Maße berechnet werden. Dazu wurden die Variablen „st_wheel_pos" (für die Lenkradbewegung), „gas_pedal" (für die Gaspedalstellung) und „brake_pedal“ (für die Bremspedalstellung) herangezogen (Kap. 1.2.2.4.).

Zunächst wurde die Standardabweichung der drei Maße, zu den verschiedenen Messzeitpunkten, pro Versuchsperson (Tab. E.1, Anhang E), über den gesamten Fahrtverlauf betrachtet. Eine wichtige Voraussetzung zur Wahl eines geeigneten Statistikverfahrens ist, dass die abhängige Variable innerhalb jedes Messzeitpunktes normalverteilt ist. Aufgrund der wenigen Beobachtungen wurde ergänzend, zum Kolmogorov-Smirnov-Test (K-S-Test), der Shapiro-Wilk herangezogen. Aufgrund der fehlenden Normalverteilung (Tab. E.2, Anhang E), bei den Standardabweichungen der Parameter Lenkradposition und Gaspedalstellung, wurde zur Berechnung der Signifikanz, der parameterfreie Friedman-Test angewendet. Es werden nur die Haupteffekte betrachtet, da sich die Verfahren zur Berechnung von Interaktionseffekten bei nichtparametrischen Varianzanalysen als ungeeignet erwiesen. So ist der Bredenkamp-Test bspw. nur für ausbalancierte Versuchspläne, bei denen keine mehrfache Messwiederholung vorliegt, geeignet (Lüpsen & Rechenzentrum, 2017). Da sich die Gruppen hinsichtlich ihrer Größe nicht unterscheiden, wird als Effektstärkemaß der Korrelationskoeffizient von Pearson angegeben. Zur Beurteilung der Effektgröße dient die Einteilung von Cohen (1992).

Im Falle der vorhandenen Normalverteilung beim Parameter Bremspedalstellung wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung, mit dem Faktor TA (Stufen: nTA, TA) und dem Faktor Szenarioart (Stufen: CS, RS) sowie der Standardabweichung des Parameters Bremspedalstellung als abhängige Variable, durchgeführt. Die ANOVA wurde, wie der Friedman-Test berechnet, um festzustellen, ob es signifikante Unterschiede in der Standardabweichung für jede Fahrleistungsmessung über Szenarioart und TA-Einsatz gab. Aufgrund der kleinen Stichprobe wurde sich bei der Beurteilung der Signifikanz an der „exakten Signifikanz“ orientiert. Mit Ausnahme eines fehlenden Fahrdatensatzes wurden die Messzeitpunkte aller Probanden intraindividuell gegenübergestellt.

2.5.3. Analyse der kognitiven Operatoren und Ziele

Da das Ziel der Arbeit in der Aufstellung und Identifizierung der kognitiven Operatoren und Ziele lag und nicht in der Erstellung einer vollständigen CPM-GOMS, wurden, mithilfe der in den Kapiteln 2.4.2. und 2.5.1. beschriebenen Vorgehensweise, die Häufigkeiten der kognitiven Operatoren und Ziele der Probanden, für die vier definierten Phasen, die Spurwechselart und den Messzeitpunkt, bestimmt. Die Ermittlung der Spurwechseldauern war mithilfe des Lauten Denkens nicht möglich. Daher werden diese im Folgenden nicht berücksichtigt.

Ein Problem soll nicht unerwähnt bleiben. Da die definierten Zeiten der Spurwechselphasen der Realität nicht hundertprozentig entsprechen, kam es zu Überschneidungen der letzten Phasen beim Spurwechsel nach links und den ersten Phasen beim Spurwechsel nach rechts. Bei der statistischen Auswertung wurden die beiden GOMS-Komponenten deshalb nach Spurwechselart getrennt ausgezählt. Operatoren und Ziele, die im Überlappungsbereich auftraten, wurden daher doppelt aufgenommen und sind als Messfehler zu betrachten.

3. Ergebnisse

In diesem Kapitel erfolgt zunächst ein kurzer Überblick über die gefundenen kognitiven Operatoren sowie Ziele (Kap. 3.1). Der darauffolgende Abschnitt gibt die Verteilung der Spurwechselmanöver wieder (Kap. 3.2.). Bevor im Detail auf die Häufigkeitsverteilung der Operatoren (Kap. 3.4.) und Ziele (Kap. 3.5.) eingegangen wird, erfolgt als Nächstes die Eignung ihrer Erhebungsmethode für die Fahrtätigkeit auf zweispurigen Autobahnen analysiert (Kap. 3.3.). Die Beurteilung des Fahrverhaltens findet vor dem Hintergrund statt, dass es keine Störeinflüsse während der Aufgabenbearbeitung gab.

3.1. Übersicht der entwickelten GOMS-Komponenten

Da die kognitiven Operatoren die Voraussetzung für die Ableitung der Fahrerziele bilden, wurde mit der Auswertung dieser Operatoren begonnen. Dazu wurde eine im Vorfeld erstellte Liste möglicher Operatoren herangezogen und überprüft, welche Probandenaussagen diesen am ehesten entsprechen. Danach erfolgte die Zuordnung der Operatoren zu den passenden Aussagen. Die Protokolle der gefundenen Operatoren und entsprechende Beispielaussagen sowie der Operatorbeschreibungen befinden sich in Tabelle D.1 - D.11 (Anhang D). Hier ist z. B. ablesbar, dass der Operator „Überprüfen – Absolute Geschwindigkeit“ mutmaßlich bei Aussagen wie bspw. „Ich bin bei 120 km/h“, auftrat (Tab. D.5, Anhang D). Während die Aussage „Ich fahre zu schnell“ eher auf die Bewertung der Geschwindigkeit des Egofahrzeugs hindeutet (Tab. D.7, Anhang D). Übersichtshalber wird an dieser Stelle für die Einsicht weiterer Operatoren und beispielhafte dazugehörige Aussagen auf den Anhang verwiesen.

Ausgehend von den Operatoren fand die Zuordnung der Ziele statt. So wurde bspw. festgelegt, dass das oberste Ziel, welches hinter dem Operator „Entscheiden – Zu beschleunigen“ liegt, die „Geschwindigkeitsanpassung“ ist oder dass das Überprüfen der seitlichen Spurbelegung, darauf hindeutet, dass der Fahrer, durch die „Sicherung“ der Zielspur, Konflikte mit anderen Fahrzeugen vermeiden will. Eine Auflistung der Ziele wird in Tabelle 5 abgebildet. Tabelle 6 (S. 42) bildet die Unterziele ab. Das allgemeine Schema, welches Ziel welchem Operator zugeordnet wurde sowie dessen Einordnung zu den verschiedenen Phasen, befindet sich in Tabelle D.12 - D.13 (Anhang D).

Tabelle 5

Während der Spurwechselmanöver eingetretene Ziele und ihre Beschreibung

Ziel	Beschreibung
Spurwechsel	Ziel ist es die Spur zu wechseln
Überholen	Ziel ist es ein vorausfahrendes Fahrzeug, durch Spurwechsel nach links, Vorbeifahrt (und eventuellem Spurwechsel nach rechts), zu überholen
Spurhalten	Ziel ist es auf der eigenen Spur zu bleiben
Folgefahrt	Ziel ist es einem vorausfahrenden Fahrzeug, bei annähernd gleicher Geschwindigkeit und relativ konstantem Abstand, zu folgen

Tabelle 6

Während der Spurwechselmanöver eingetretene Unterziele und ihre Beschreibung

Unterziel	Beschreibung
Warten auf Lücke	Ziel ist das Warten auf geeignete Lücke zur Spurwechseldurchführung
Sicherung	Ziel ist die Kontrolle der Fahrzeugumgebung durch Verkehrsbeobachtung zur Vermeidung von Konflikten (Fastenmeier et al., 2001)
Spurwechselabsicht signalisieren	Ziel ist das Anzeigen des Fahrspurwechsels (sowohl beim Ausscheren, als auch beim Einscheren)
Geschwindigkeitsan passung	Ziel ist die Vorbereitung der notwendigen Geschwindigkeit, um den Spurwechsel einzuleiten (Anpassung an Vorderfahrzeug oder Nebenfahrzeug) bzw. abzuschließen (Anpassung an Geschwindigkeit der Zielspur)
Spurwechsel-durchführung	Ziel ist die Lenkeinstellung auf die Zielspur
Blinksignal beenden	Ziel ist das Beenden der Spurwechselabsichtsanzeige
Einordnen	Ziel ist die Neupositionierung des Egofahrzeugs in die Mitte der Zielspur
Regeln befolgen	Ziel ist nach § 1 (StVO, 2013) es die Verkehrsregeln so zu befolgen, dass kein Anderer geschädigt, gefährdet oder mehr, als nach den Umständen unvermeidbar, behindert oder belästigt wird

Dort wird bspw. davon ausgegangen, dass die Ziele „Spurwechsel“ oder „Spurhalten“ vorwiegend in der Entscheidungsphase auftreten, da in dieser Phase die Entscheidung (kognitiver Prozess) für (Entscheiden - Spur zu wechseln) oder gegen (Entscheiden - Spur zu halten) einen Spurwechsel getroffen wird. In dieser Arbeit werden jedoch nur die Operatoren und Ziele aufgeführt, die während der Spurwechselvorgänge eintraten und nicht solche, die generell auftreten können oder zwischen den Spurwechseln gezeigt wurden.

3.2. Spurwechsel

Insgesamt wurden 392 verschiedene Spurwechselmanöver mit Lautem Denken durchgeführt (Tab. E.3, Anhang E). Für die deskriptive Analyse wurden 248 Spurwechsel beim CS-TA (M = 27,56, SD = 3.28) und 122 Spurwechsel beim RS-TA (M = 13.56, SD = 5.15) als geeignet ausgewählt. In der CS-TA Bedingung führten die Probanden 122 Spurwechsel von rechts nach links (M = 13.56, SD = 1.59) und 126 Spurwechsel von links nach rechts (M = 14.00, SD = 1.73) durch. In der RS-TA halbierten sich die Spurwechselmanöver auf 62 Spurwechsel von rechts nach links (M = 6.89, SD = 2.47) und 60 Spurwechsel von links nach rechts (M = 6.67, SD = 2.69). Die verbliebenen Spurwechsel wurden in Bezug auf kognitive Operatoren und Ziele beschrieben.

3.3. Einfluss der Messung auf die Spurwechselaufgabe

Um zu bestimmen, ob CTA einen Einfluss auf die Aufgabenausführung hatte, wurden die Fahrleistungsdaten der TA-Fahrten mit den Fahrleistungsdaten der nTA-Fahrten individuell überprüft (Kap. 1.2.2.4). Die Maße der mentalen Beanspruchung steigen, gegenüber den Bedingungen ohne Lautes Denken, in der TA-Bedingung, leicht an (Abb. 20, S. 43). Nur der Vergleich der Lenkausschläge der Experimentalbedingung zeigt hier den gegenteiligen Befund.

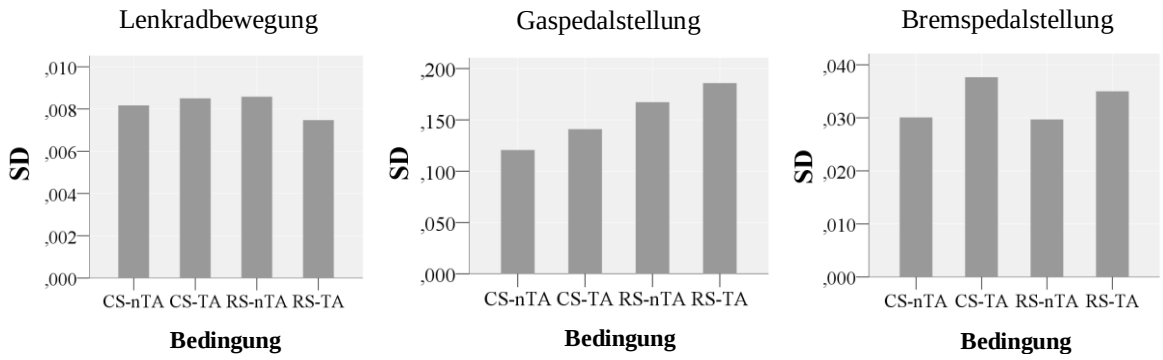


Abbildung 20. Standardabweichungen der Fahrparameter je Messzeitpunkt.

Bei einem Vergleich aller Messzeitpunkte mittels Friedman-Test wurden keine signifikanten Unterschiede ($p > .05$) in den Lenkradpositionen ($\chi^2(3, N = 8) = 2.850$, $p = .450$) gefunden. Die Analyse der Gaspedalstellungen ($\chi^2(4, N = 8) = 13.500$, $p = .001$) ergab jedoch einen signifikanten Unterschied ($p < .05$). Der paarweise Vergleich mittels Dunn-Bonferroni-Tests zeigte lediglich einen signifikanten Unterschied ($p < .05$) zwischen den Phasen CS-nTA und RS-TA ($z = -2.250$, $p = .003$, $r = .80$). Das deutet auf einen starken Einfluss des Szenarios, nicht jedoch des TA, hin. Die zweifaktorielle ANOVA mit Messwiederholung zeigt, dass sowohl die Szenarioart ($F(1, 7) = .242$, $p = .638$, $\eta^2_p = .033$), als auch das TA ($F(1, 7) = 2.756$, $p = .141$, $\eta^2_p = .283$), keinen Einfluss (p > .05) auf die Bremspedalstellung haben. Die Effektstärke *f* nach (Cohen, 1988) liegt für den Haupteffekt der Szenarioart bei .04 und entspricht keinem Effekt. Die Effektstärke für den Haupteffekt des TA ($f = .30$) korrespondiert mit einem mittleren Effekt. Zudem zeigt sich keine signifikante Interaktion von Szenarioart und TA auf die Bremspedalstellung ($F(1,7) = .064$, $p = .807$, $\eta^2_p = .009$). Die Effektstärke für die Interaktion ($f = .01$) entspricht keinem Effekt. Demnach konnte, in Bezug auf die Gesamtfahrleistungsstatistik, keine signifikante Auswirkung des Lauten Denkens auf die Aufgabenausführung nachgewiesen werden.

3.4. Kognitive Operatoren

Wie in Kap. 1.2.1.2. beschrieben, konnten aus Zeitgründen nicht alle kognitiven Prozesse, sondern nur die fünf dort beschriebenen Prozesse, berücksichtigt werden. Im Folgenden werden die während der Spurwechsel aufgetretenen kognitiven Operatoren deskriptiv ausgewertet. Da beim RTA keine Äußerungen zu Spurwechselzeitpunkten gemacht wurden, werden lediglich die Ergebnisse des CTA beschrieben.

3.4.1. Gedächtnisprozesse

Gedächtnisprozesse ($N = 48$) wurden während der Spurwechselmanöver nur sporadisch gezeigt. Von den Operatoren der Gedächtnisprozesse trat der Operator „Informationsabruf aus dem LZG - Erinnern von Regeln“ am häufigsten auf ($N = 37$). Dieser zeigte sich vorwiegend beim CS (72,97 %) (Abb. 21, S. 44). Beim Vergleich der Spurwechselarten belief sich die meiste Häufung beim Spurwechsel nach rechts.

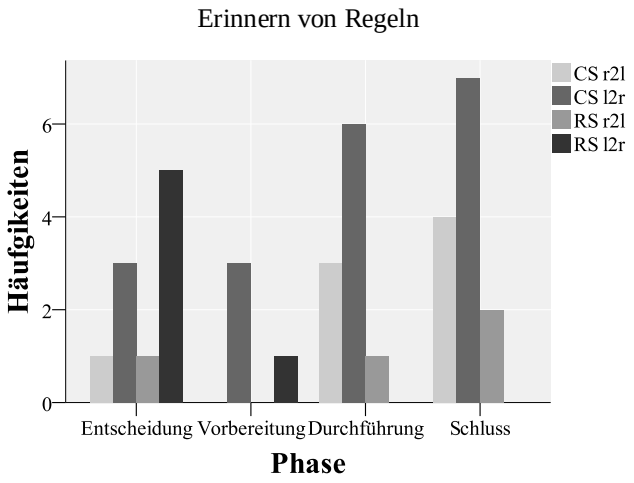


Abbildung 21. Häufigkeitsverteilung des Operators „Erinnern von Regeln“.

Bezüglich der Phasen war der Operator, abgesehen von der Vorbereitungsphase (10,81 %), relativ gleich verteilt, mit einem leichten Peak in der Schlussphase eines Spurwechsels (35,14 %). Bei näherer Betrachtung wird allerdings deutlich, dass sich die Operatorhäufung in der Entscheidungsphase hauptsächlich auf den Spurwechsel nach rechts bezieht (80 %). Die restlichen Operatoren der Gedächtnisprozesse, wie „Informationsabruf aus dem LZG - Erinnern von Prozeduren“ (*N* = 3), „Einlesen von Informationen ins AG - Phonologische Schleife“ (*N* = 2), „Informationsabruf aus dem AG– Phonologische Schleife“ (*N* = 5) sowie „Informationsabruf aus dem AG - Zeitlich-räumliche Strukturen“ (*N* = 1), kamen kaum zum Einsatz. Die genaue Operatorverteilung nach Spurwechselphase, -art und Messzeitpunkt ist in Tabelle E.4 (Anhang E) nachzulesen.

3.4.2. Entscheidungen

Entscheidungen kamen, bei der Betrachtung der Verteilung aller Operatoren, am häufigsten vor (*N* = 995). Der wichtigste Operator, dass es überhaupt zu einem Spurwechsel kommt, ist „Entscheiden - Spur zu wechseln“. Er trat sowohl in der CS-TA, als auch in der RS-TA, bei beiden Spurwechselarten, am häufigsten in der Entscheidungsphase auf (56,71 %, *N* = 164) (Abb. 22).

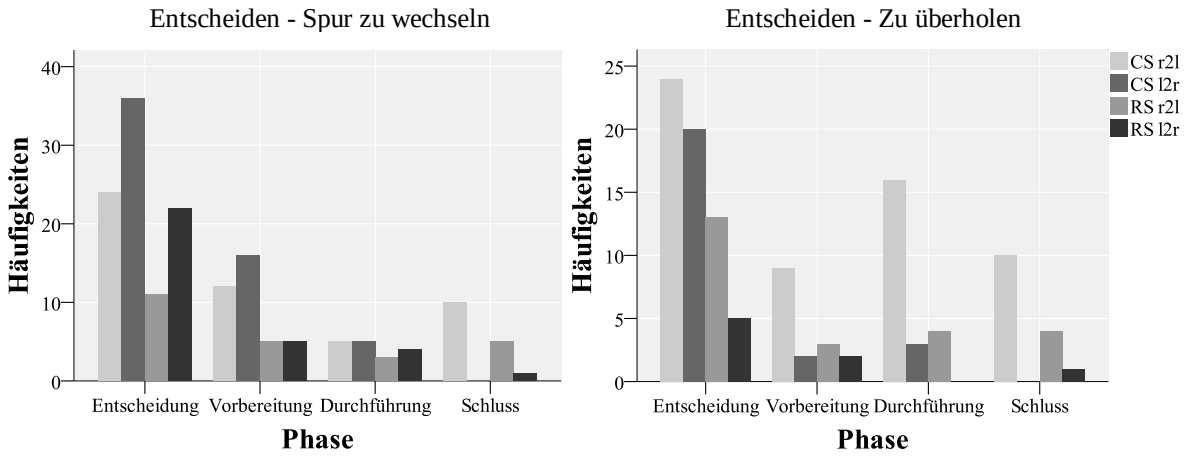


Abbildung 22. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Entscheiden - Spur zu wechseln“ und „Entscheiden - Zu überholen“.

Ähnlich verhielt es sich mit dem Operator „Entscheiden - zu überholen“ (53,45 %, *N* =116) (Abb. 22, S. 44). Dieser Operator hatte einen weiteren Peak in der Durchführungsphase, im CS, beim Spurwechsel nach links (13,79%). Im Gegensatz dazu wurden die Operatoren „Entscheiden - Spur zu halten“ (*N* = 52) und „Entscheiden - zu folgen“ (*N* = 14) mittelhäufig bis kaum und eher in den letzten beiden Phasen gezeigt (Abb. 23).

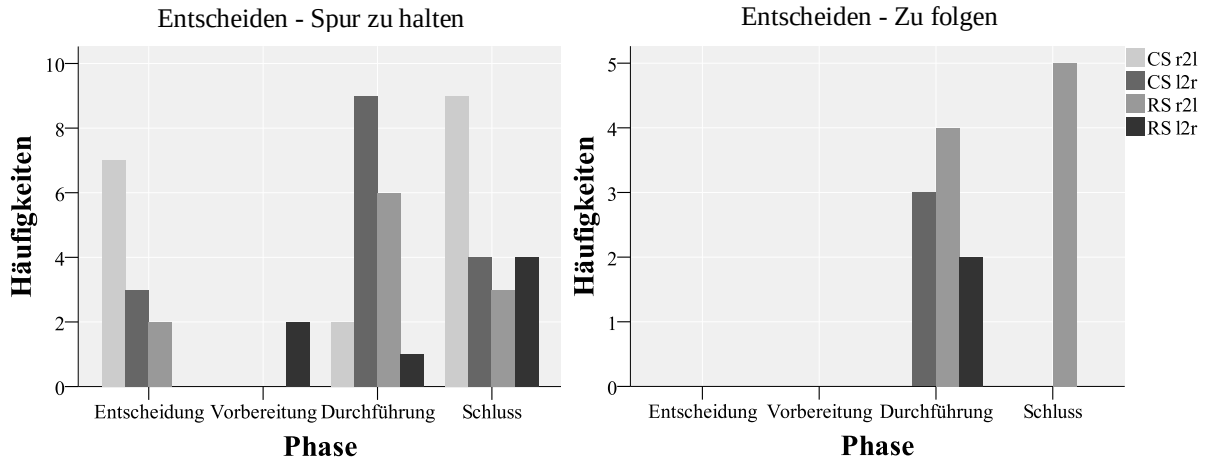


Abbildung 23. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Entscheiden - Spur zu halten“ und „Entscheiden - Zu folgen“.

Um sicherzustellen, dass sich kein Fahrzeug auf der Nachbarspur im Weg befindet, entschieden sich die Probanden oft bewusst für einen Seitenspiegelblick (*N* = 95), Schulterblick (*N* = 67) und Rückspiegelblick auszuführen (*N* = 61). Die Entscheidung zum Blick in den Seitenspiegel fiel eher in der Vorbereitungsphase (49,47 %), insbesondere beim CS (36,84 %) sowie in der Entscheidungsphase (28,42 %) (Abb. 24). Die Entscheidung für einen Rückspiegelblick erfolgte ebenfalls überwiegend in der Vorbereitungsphase (37,71 %), speziell beim Spurwechsel nach rechts (26,23 %) (Abb. 24).

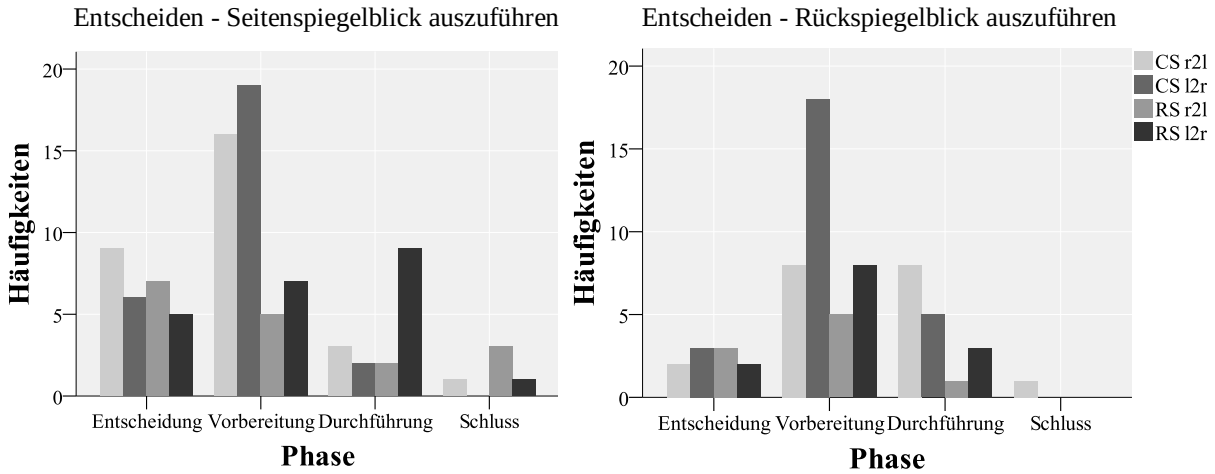


Abbildung 24. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Entscheiden - Seitenspiegelblick auszuführen“ und „Entscheiden - Rückspiegelblick auszuführen“.

Bei näherer Betrachtung der Schulterblickentscheidung wird deutlich, dass dieser Operator häufig in den ersten beiden Spurwechselphasen (73,13 %) und hierbei großenteils im CS beim Spurwechsel nach rechts (31,34 %) sowie im RS beim Spurwechsel nach rechts (14,93 %) auftrat (Abb. 25).

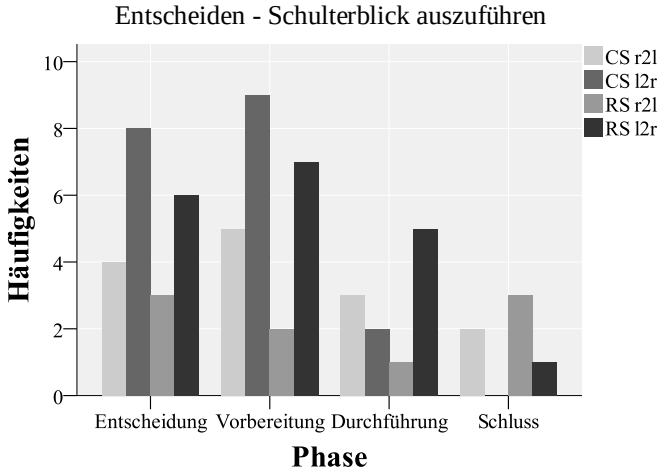


Abbildung 25. Häufigkeitsverteilung des Operators „Entscheiden - Schulterblick auszuführen“.

Insgesamt setzte der Operator „Entscheiden - Seitenfensterblick auszuführen“ während aller Spurwechselmanöver nur einmal ein. Zum Signalisieren der Spurwechselabsicht entschieden sich die Probanden, vorwiegend in der Vorbereitungsphase (58,62 %, *N* = 116), dafür zu blinken (Abb. 26). Besonders deutlich zeigte sich sein Einsatz im CS beim Spurwechsel nach links in der zweiten Phase (31,03 %). Die Entscheidung den Blinker wieder auszuschalten äußerten sie wesentlich seltener (*N* = 26) und vorwiegend in der dritten Spurwechselphase (88,46 %) (Abb. 26).

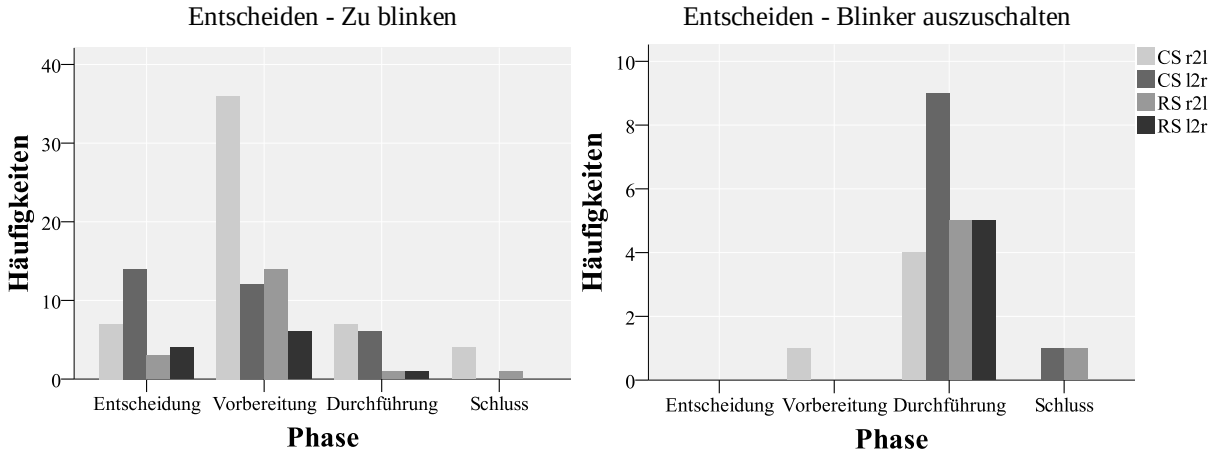


Abbildung 26. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Entscheiden - Zu blinken“ und „Entscheiden - Blinker auszuschalten“.

Die Entscheidung zu lenken (*N* = 141) wurde am häufigsten in der Vorbereitungs- (43,26 %) und Durchführungsphase (44,68 %) eines Spurwechsels getroffen und dabei eher im CS (58,87 %) (Abb. 27, S. 47). Der Operator „Entscheiden - Zurück zu lenken“ trat lediglich 20 mal, hauptsächlich in der Durchführungsphase (85 %), in Erscheinung.

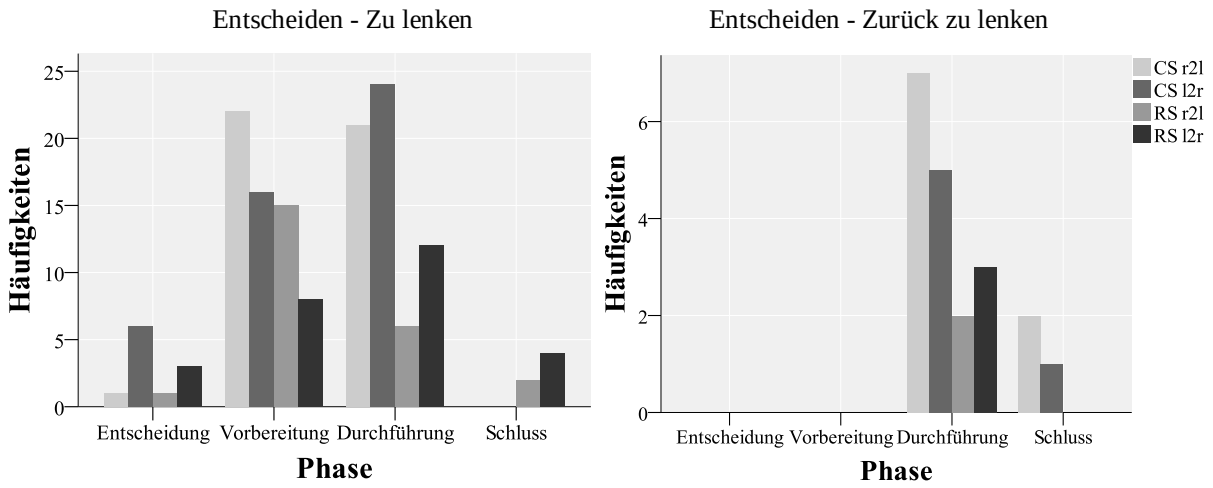


Abbildung 27. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Entscheiden - Zu lenken“ und „Entscheiden - Zurück zu lenken“.

Von den Operatoren der Geschwindigkeitsregulierung kam „Entscheiden - Zu beschleunigen“ am häufigsten zum Einsatz (*N* = 62). Auffällig ist besonders, dass dieser Operator doppelt bis vier mal so oft beim Spurwechsel nach links in der CS-TA Bedingung auftrat, als zu allen anderen Zeitpunkten (Abb. 28). Bei diesem Operator zeigte sich zudem eine Häufung in der ersten (25,81 %) und letzten Spurwechselphase (37,10 %).

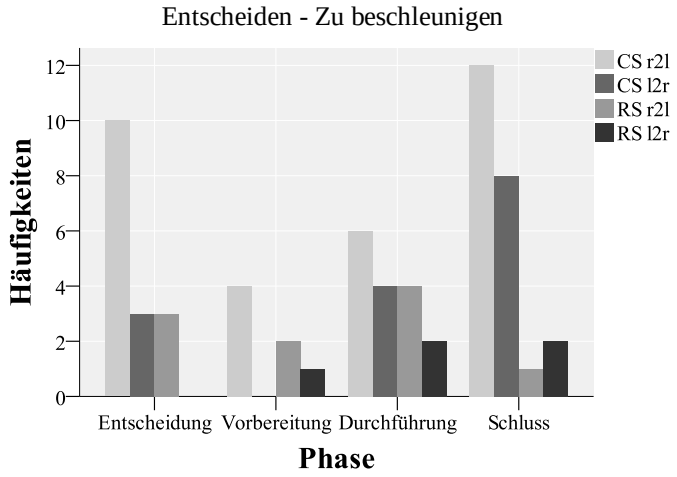


Abbildung 28. Häufigkeitsverteilung des Operators „Entscheiden - Zu beschleunigen“.

Die Entscheidung „zu verlangsamen“ (*N* = 15), „zu bremsen“ (*N* = 14), gefolgt von „Geschwindigkeit beizubehalten“ (*N* = 9) sowie „Absolute Geschwindigkeit zu überprüfen“ (*N* = 7) kamen nur hin und wieder zum Einsatz. Dabei wurde die Entscheidung zur Geschwindigkeitsreduktion hauptsächlich in der Schlussphase, vom CS, beim Spurwechsel nach rechts, gezeigt (Abb. 29, S. 48). Der Operator zur Bremsentscheidung verteilte sich relativ gleichmäßig auf alle Phasen (Abb. 29, S. 48). Am wenigsten wurde der Operator „Entscheiden - Geschwindigkeit einzuhalten“ (*N* = 2) gezeigt. Die genauen Operatorwerte sind in Tabelle E.5 (Anhang E) abgebildet.

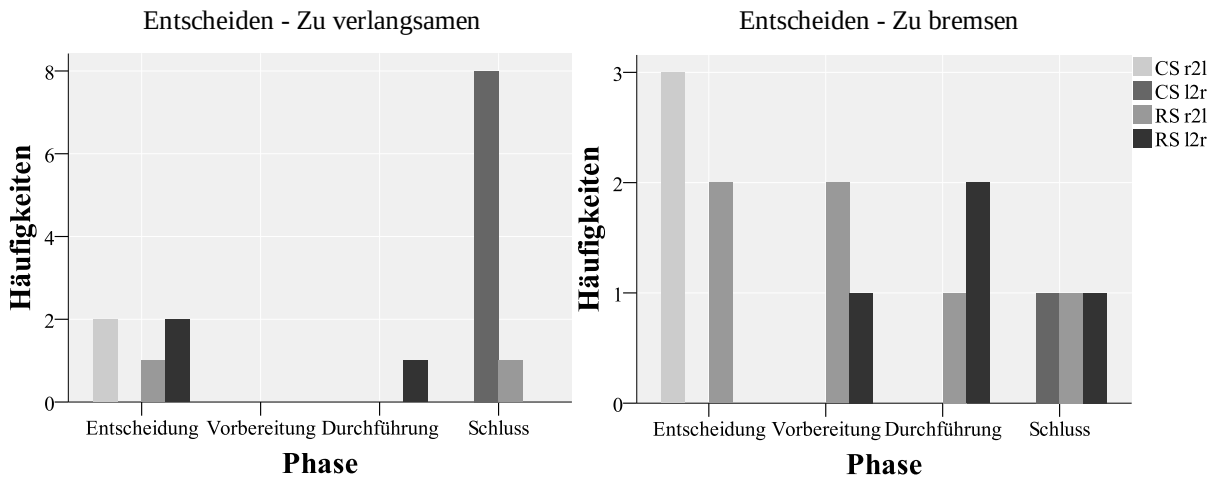


Abbildung 29. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Entscheiden - Zu verlangsamen“ und „Entscheiden - Zu bremsen“.

3.4.3. Bewertungen

Im Allgemeinen wurden Bewertungen von den Probanden häufig vorgenommen (*N* = 398). Hinsichtlich der deskriptiven Werte der Operatoren der Bewertungsprozesse (Tab. E.6, Anhang E), traten unter anderem jene gehäuft auf, die sich auf den Spurwechselbeginn beziehen, um zu bewerten, ob die Zielspur frei ist. Hohe absolute Häufigkeiten zeigen daher die Operatoren „Bewerten - Spurbelegung des seitlichen Verkehrs“ (*N* = 49) und „Bewerten - Spurbelegung des hinteren Verkehrs“ (*N* = 24). Die Spurbelegung des seitlichen Verkehrs beurteilten die Probanden, vor allem beim CS (73,47 %), vorwiegend in der Vorbereitungsphase (34,69 %) (Abb. 30). Am zweithäufigsten trat dieser Operator in der Entscheidungsphase auf (34,69 %), wobei hier die Häufungen unabhängig von der Bedingung oder Spurwechselart auftraten. Die Bewertung der Spurbelegung des hinteren Verkehrs zeigte bezüglich der Phasen keine Besonderheiten (Abb. 30). Jedoch trat dieser Operator auffällig oft im CS, beim Spurwechsel nach rechts, ein (45,83 %).

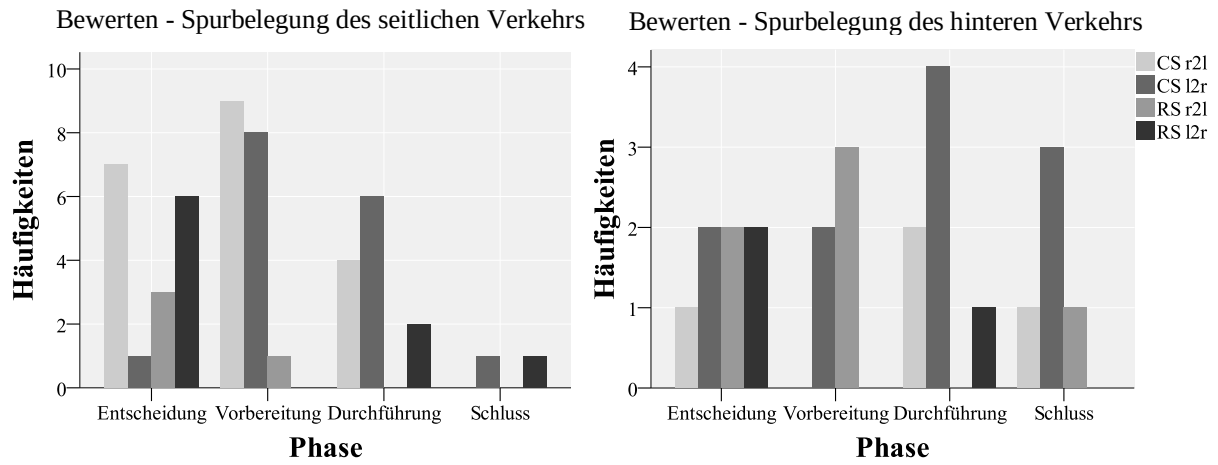


Abbildung 30. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Bewerten - Spurbelegung des seitlichen Verkehrs“ und „Bewerten - Spurbelegung des hinteren Verkehrs“.

Der für den Spurwechselanfang nicht unmittelbar relevante Operator „Bewerten - Spurbelegung des vorderen Verkehrs“ trat hingegen seltener auf (*N* = 16), mit einem leichtem Peak in der Durchführungsphase (37,5 %). Zusätzlich wurde die Lückengröße für einen bevorstehenden Spurwechsel (*N* = 40), besonders in der Entscheidungsphase (45 %), sowie der Abstand zum Vorderfahrzeug (*N* = 34), ebenfalls in der ersten Spurwechselphase (47,06 %), häufig bewertet (Abb. 31).

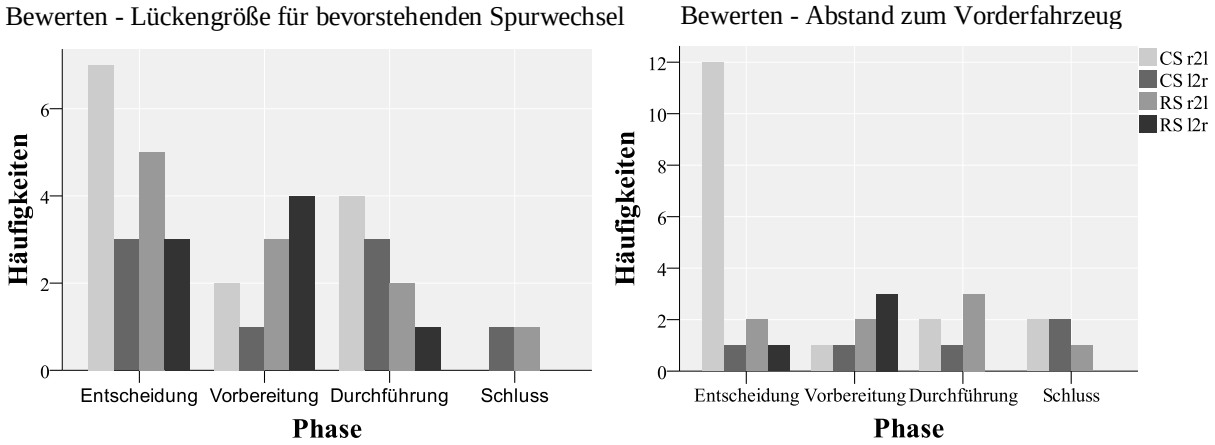


Abbildung 31. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Bewerten - Lückengröße für bevorstehenden Spurwechsel“ und „Bewerten - Abstand zum Vorderfahrzeug“.

Auch der Operator „Bewerten - Geschwindigkeit des vorderen Fahrzeugs“ (*N* = 37) erschien vorwiegend am Anfang eines Spurwechsels (32,43 %) (Abb. 32). Des Weiteren kommt ein ca. zweidrittel häufigeres Auftreten dieses Operators beim Spurwechsel nach rechts hinzu (*N* = 22), wobei die höchsten Werte in der Durchführungsphase im CS (18,18 %) und im RS (27,27 %) ermittelt wurden.

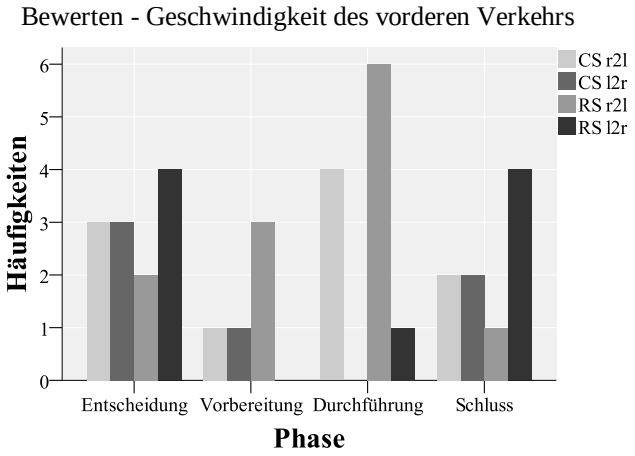


Abbildung 32. Häufigkeitsverteilung des Operators „Bewerten - Geschwindigkeit des vorderen Verkehrs“.

Den mit Abstand am häufigsten gezeigten Operator stellte jedoch „Bewerten – Absolute Geschwindigkeit“ dar (*N* = 63). Die Probanden bewerteten die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs vor allem zu Beginn (38,10 %) und zum Ende eines Spurwechsels (39,68 %) (Abb. 33, S. 50). Die Position des Ego-Fahrzeugs zu bewerten (*N* = 33) war, außer beim Spurwechsel nach links, der RS-TA, vor allem in der Entscheidungsphase relevant (51,52 %) (Abb. 33, S. 50).

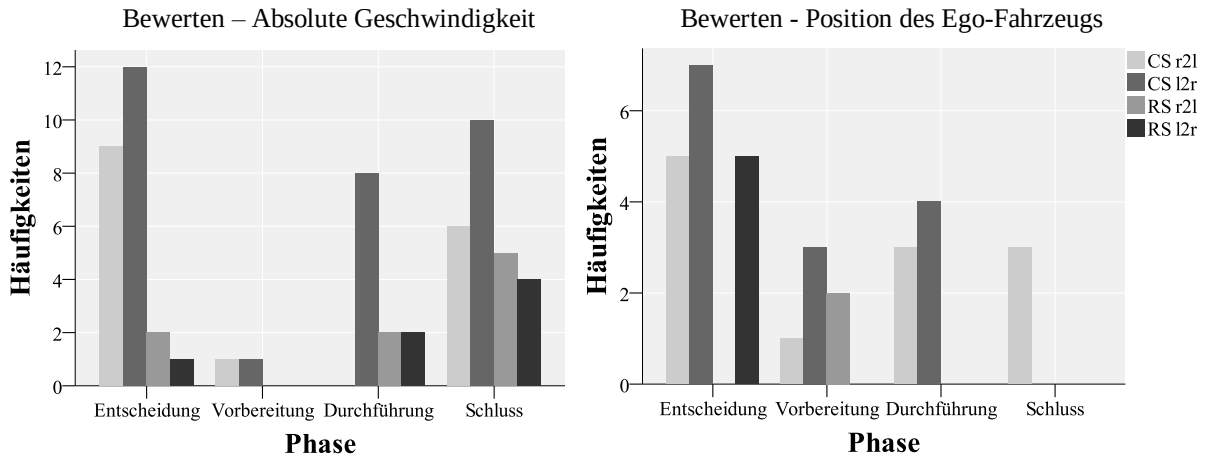


Abbildung 33. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Bewerten - Absolute Geschwindigkeit“ und „Bewerten - Position des Ego-Fahrzeugs“.

Abstandbewertungen zum seitlichen (*N* = 10) oder hinteren Verkehr (*N* = 6) waren während der Spurwechselaufgabe selten. Ähnlich verhielt es sich sowohl mit den Positionsbewertungen des vorderen (*N* = 10) und seitlichen Fahrzeugs (*N* = 20) als auch mit den Geschwindigkeitsbewertungen des seitlichen (*N* = 17) und hinteren Fahrzeugs (*N* = 10). Bezüglich der Bewertung der Position des Vorderfahrzeugs gab es keine phasenspezifischen Auffälligkeiten (Abb. 34). Allerdings fällt auf, dass die Probanden, die Position des seitlichen Fahrzeugs, fast ausschließlich, im CS bewerteten (95 %) bzw. in der Entscheidungsphase (55 %).

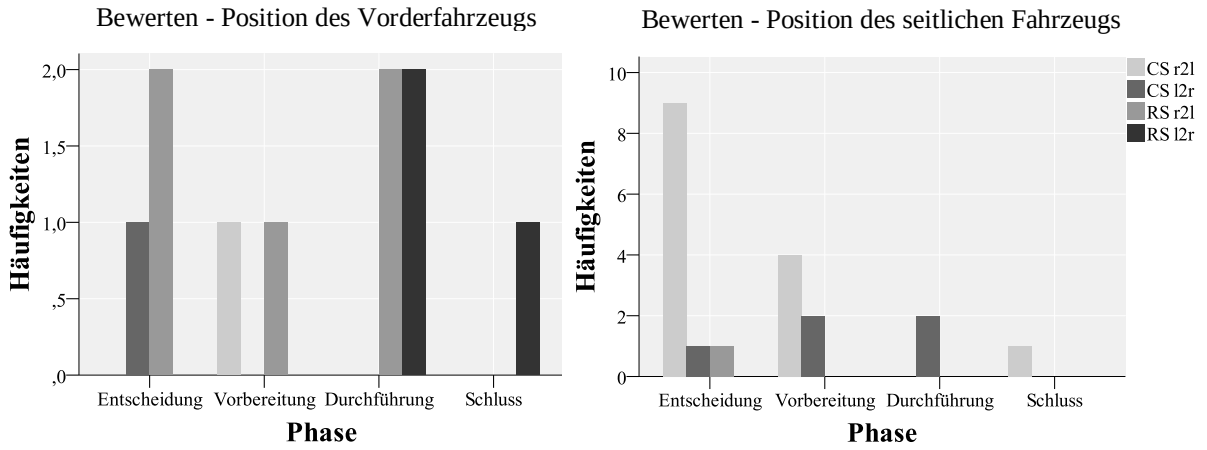


Abbildung 34. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Bewerten - Position des Vorderfahrzeugs“ und „Bewerten - Position des seitlichen Fahrzeugs“.

Sowohl die Geschwindigkeit des seitlichen (*N* = 17) als auch des hinteren Fahrzeugs (*N* = 10) wurde hauptsächlich in der Entscheidungsphase bewertet (Abb. 35, S. 51). Dabei zeigte sich der Operator „Bewerten - Geschwindigkeit des seitlichen Fahrzeugs“ meist im CS, beim Spurwechsel nach links (70,59 %). Wohingegen der Operator „Bewerten - Geschwindigkeit des hinteren Fahrzeugs“ im RS, beim Spurwechsel nach links, vorherrschte (60 %).

Situationsbewertungen (*N* = 11) traten zumeist in der Durchführungsphase auf (54,55 %). Der Operator „Bewerten - der Verkehrsfülle“ wurde nur einmal eingesetzt.

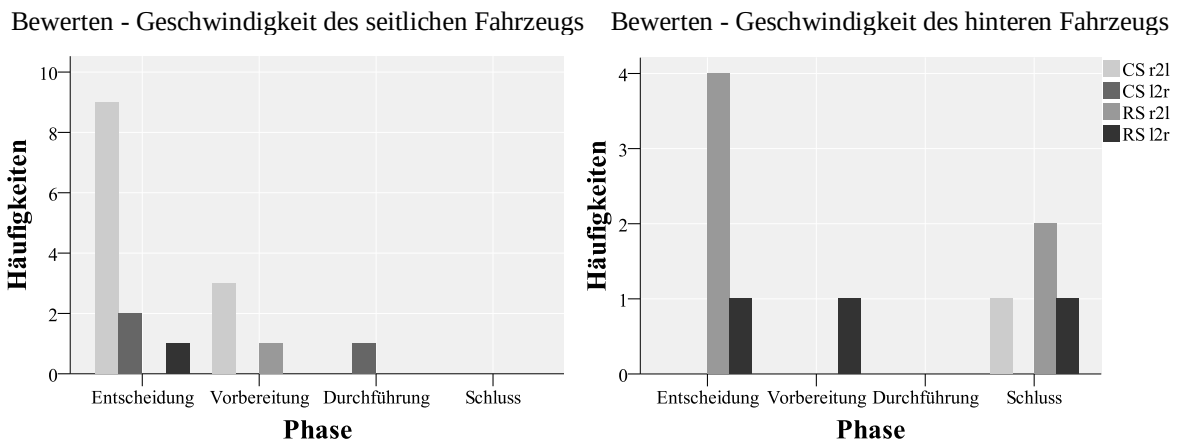


Abbildung 35. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Bewerten - Geschwindigkeit des seitlichen Fahrzeugs“ und „Bewerten - Geschwindigkeit des hinteren Fahrzeugs“.

3.4.4. Überprüfungen

Es zeigt sich deutlich, dass Überprüfungen (*N* = 172) im Gegensatz zu Bewertungen nur halb so oft auftraten. Bei den deskriptiven Ergebnissen der Operatoren, die den Überprüfungen zugeordnet werden (Tab. E.7, Anhang E), gaben die Versuchspersonen am häufigsten an, die absolute Geschwindigkeit zu überprüfen (*N* = 85). Dieser Operator zeigte sich meist in der Durchführungs- (32,94 %) und Schlussphase (38,82 %) (Abb. 36). Auffallend war sein beinahe doppelt so häufiges Auftreten beim CS (62,35 %), im Vergleich zum RS (37,65 %).

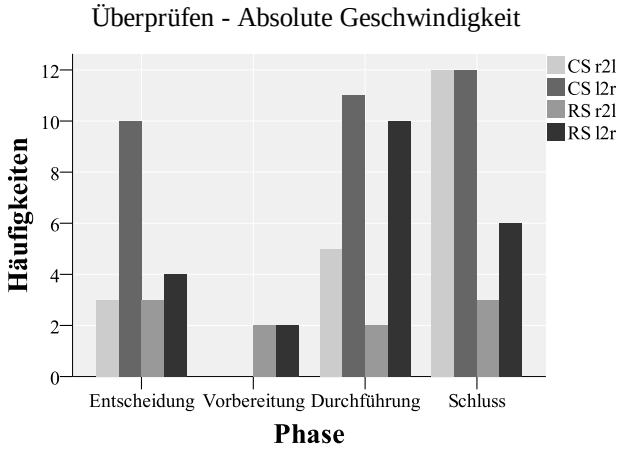


Abbildung 36. Häufigkeitsverteilung des Operators „Überprüfen - Absolute Geschwindigkeit“.

Die Operatoren zum IST-SOLL-Vergleich der Spurbelegung, wie „Überprüfen - Spurbelegung des seitlichen Verkehrs“ (*N* = 45), „Überprüfen - Spurbelegung des hinteren Verkehrs“ (*N* = 28) und „Überprüfen - Spurbelegung des vorderen Verkehrs“ (*N* = 3), traten ähnlich häufig auf wie die Bewertungsoperatoren der Spurbelegung. Die Spurbelegung des seitlichen Verkehrs wurde hauptsächlich in der Vorbereitungsphase (48,89 %), vor allem beim Spurwechsel nach rechts, beim CS-TA (26,67 %), aber nur einmal, bei der gleichen Spurwechselart, beim RS-TA (Abb. 37, S. 52), überprüft. Die Spurbelegung des hinteren Verkehrs prüften die Probanden am meisten in der Entscheidungs- (32,14 %) und Vorbereitungsphase (32,14 %) (Abb. 37, S. 52).

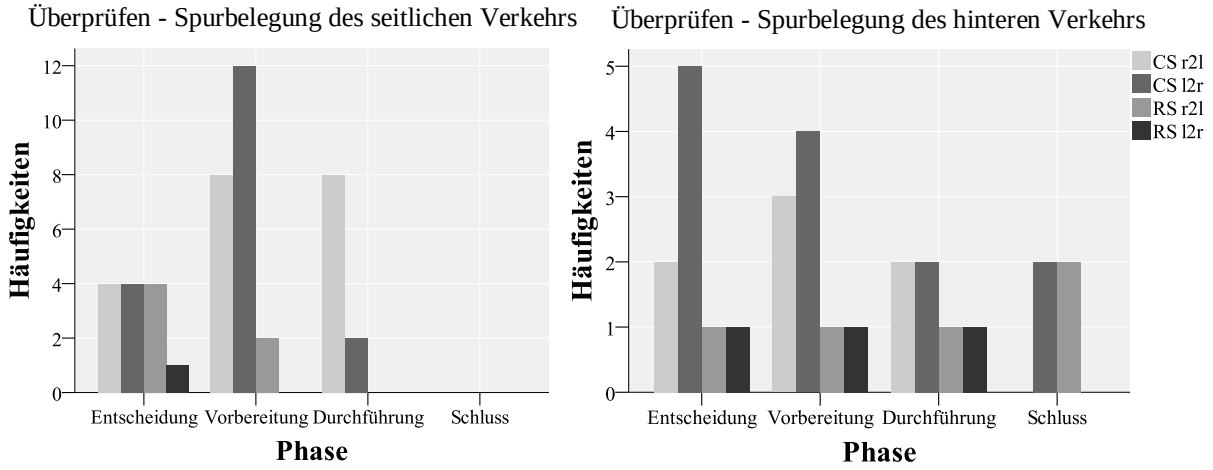


Abbildung 37. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Überprüfen - Spurbelegung des seitlichen Verkehrs“ und „Überprüfen - Spurbelegung des hinteren Verkehrs“.

Die absoluten Häufigkeiten der Operatoren zur Abstandsüberprüfung, Fahrverhaltensüberprüfung seitlicher Fahrzeuge, zur Positionsüberprüfung des Ego-Fahrzeugs sowie zum Prüfen der Lückengröße bewegen sich in einem Bereich von eins bis vier.

3.4.5. Antizipationen

Die Probanden antizipierten insgesamt relativ selten (*N* = 47). Bei Betrachtung der deskriptiven Werte der Operatoren für Antizipationsvorgänge (Tab. E.8, Anhang E), treten vor allem jene in den Fokus, welche für die Absicherung einer freien Zielspur, für einen möglichst zeitnahen Spurwechsel, eingesetzt wurden. Hierbei weisen die Operatoren „Antizipieren - Überholen des seitlichen Fahrzeugs“ (*N* = 24), „Antizipieren - Erscheinen des seitlichen Fahrzeugs im Rückspiegel“ (*N* = 9) und „Antizipieren - Annäherung des seitlichen Fahrzeugs“ (*N* = 6), die größten Häufigkeiten auf. Zudem wurden die drei Operatoren „Antizipieren - Überholen des seitlichen Fahrzeugs“ (50 %) (Abb. 38), „Antizipieren - Erscheinen des seitlichen Fahrzeugs im Rückspiegel“ (77,78 %) (Abb. 39, S. 53) und „Antizipieren - Annäherung des seitlichen Fahrzeugs“ (66,67 %) (Abb. 39, S. 53) meist in der ersten Phase eingesetzt.

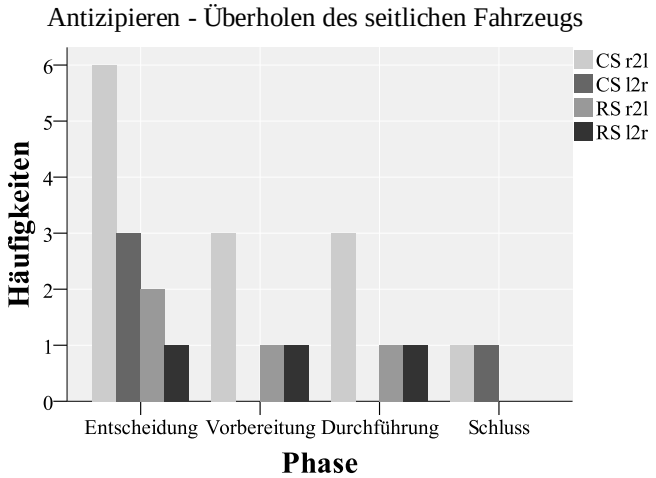


Abbildung 38. Häufigkeitsverteilung des Operators „Antizipieren - Überholen des seitlichen Fahrzeugs“.

Wobei die Versuchspersonen das Erscheinen des Nebenfahrzeugs im Rückspiegel hauptsächlich beim Spurwechsel nach rechts, im CS (77,78 %) und das Überholen des Nebenfahrzeugs vorwiegend beim Spurwechsel nach links (66,67 %) antizipierten.

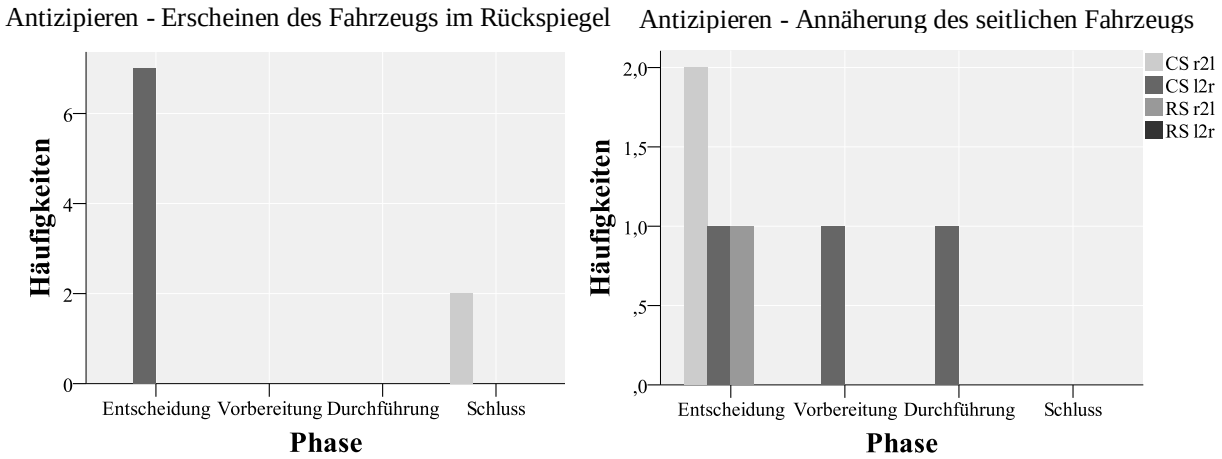


Abbildung 39. Häufigkeitsverteilung der Operatoren „Antizipieren - Erscheinen des Fahrzeugs im Rückspiegel“ und „Antizipieren - Annäherung des seitlichen Fahrzeugs“.

Die anderen Operatoren, die den Antizipationen zugeordnet wurden, wie „Antizipieren - Spurwechsel des vorderen Fahrzeugs“, „Antizipieren - Spurwechsel des seitlichen Fahrzeugs“, „Antizipieren - Überholen des vorderen Fahrzeugs“, „Antizipieren - Geschwindigkeit des vorderen Fahrzeugs“, „Antizipieren - der Verkehrsfülle“, „Antizipieren - der Verkehrskonstellation“ traten, bis auf „Antizipieren - Geschwindigkeit des hinteren Fahrzeugs“ (*N* = 2), jeweils nur einmal auf.

3.5. Ziele

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurden, neben den kognitiven Operatoren, die Ziele des Fahrers deskriptiv ausgewertet (Tab. E.9 - E.10, Anhang E). Die Ergebnisse zeigen, dass das Unterziel „Sicherung“ (*N* = 601) mit Abstand am häufigsten von allen Zielen auftrat (36,40 %). Es zeigte sich vor allem in der Entscheidungs- (33,94 %) und Vorbereitungsphase (32,11 %) und vergleichsweise häufiger im CS (61,40%) als im RS (38,60%) (Abb. 40).

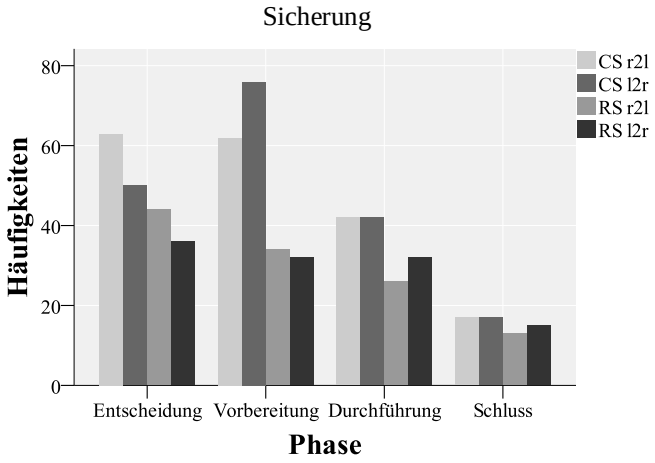


Abbildung 40. Häufigkeitsverteilung des Ziels „Sicherung“.

Das Ziel „Spurwechsel“ zeigte sich am häufigsten in der Entscheidungsphase (53,16 %, *N* = 190) (Abb. 41), ebenso wie das Ziel „Überholen“ (49,18 %, *N* = 122) (Abb. 41). Beim Ziel „Überholen“ sticht jedoch die Häufung im CS, beim Spurwechsel nach links, neben der Entscheidungsphase (25,29%), in der Durchführungs- (14,75 %) und Schlussphase (10,66 %) hervor.

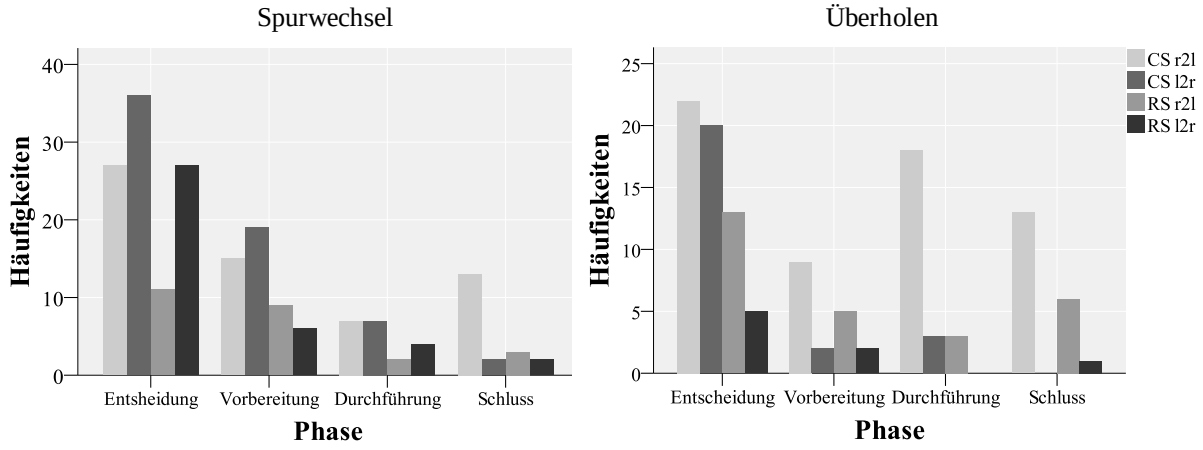


Abbildung 41. Häufigkeitsverteilung der Ziele „Spurwechsel“ und „Überholen“.

Die beiden Ziele „Spurhalten“ (*N* = 43) und „Folgefahrt“ (*N* = 14) wurden indes kaum genannt (Abb. 42). Bei beiden Zielen wird allerdings eine Häufung zum Ende der Spurwechselmanöver deutlich, wobei sich das Ziel „Spurhalten“ vorwiegend in der Durchführungsphase des CS beim Spurwechsel nach rechts offenbart (36 %), während das Ziel „Folgefahrt“ vor allem im RS beim Spurwechsel nach links zum Einsatz kam (64,29 %).

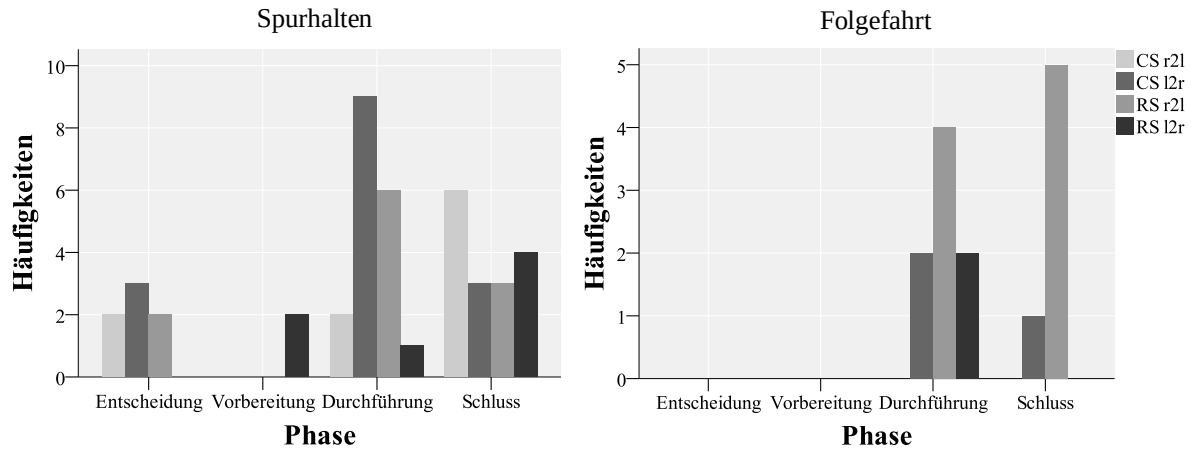


Abbildung 42. Häufigkeitsverteilung der Ziele „Spurhalten“ und „Folgefahrt“.

Bei den Unterzielen trat die „Geschwindigkeitsanpassung“ (*N* = 275) wesentlich hervor. Dieses Ziel hatten Versuchspersonen in erster Linie in der Schlussphase (38,55 %), gefolgt von der Entscheidungsphase (29,09 %) (Abb. 43). Insgesamt wurde dieses Unterziel eher im CS (67,27 %) als im RS gezeigt.

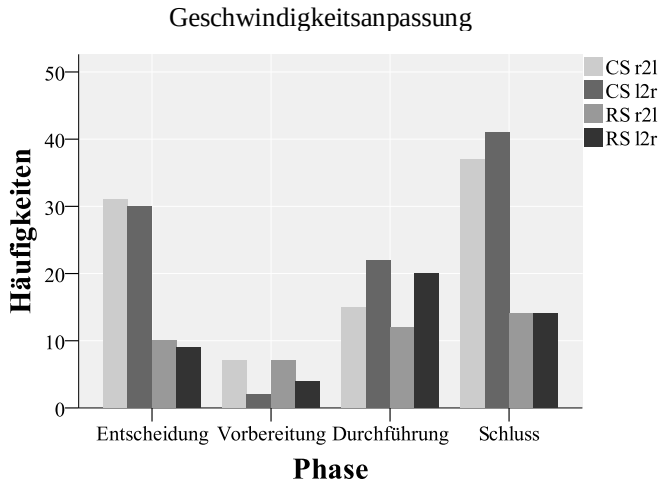


Abbildung 43. Häufigkeitsverteilung des Ziels „Geschwindigkeitsanpassung“.

Die Absicht auf eine Lücke zu warten, hatten die Probanden unregelmäßiger (*N* = 53). Auffällig war hier ein enormes Vorkommen in der Entscheidungsphase (71,70 %) (Abb. 44), während des Spurwechsels nach links, beim CS-TA (43,40 %).

Ein wichtiges Unterziel der Vorbereitungsphase war die „Spurwechselabsicht zu signalisieren“ (56,30 %, *N* = 119) (Abb. 44). Dieses Ziel tritt besonders bei der Betrachtung des CS beim Spurwechsel nach links hervor (60,67 %). Das zweithäufgiste Vorkommen wies dieser Operator in der Entscheidungsphase auf (25,21 %), während er hier am ehesten im CS beim Spurwechsel nach rechts gebraucht wurde (46,67 %, *N* = 30).

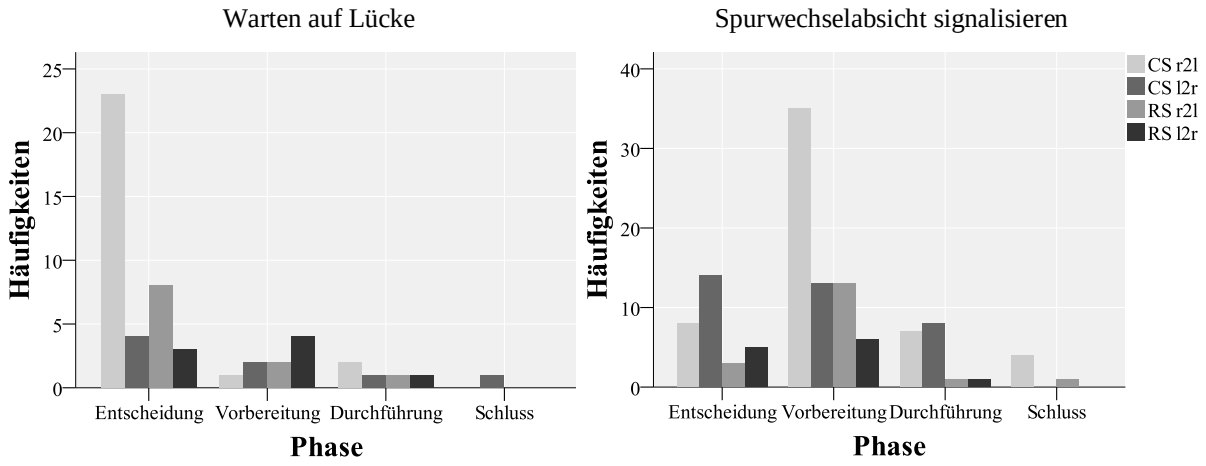


Abbildung 44. Häufigkeitsverteilung der Ziele „Warten auf Lücke“ und „Spurwechselabsicht signalisieren“.

In der Durchführungsphase waren eher die Unterziele „Spurwechseldurchführung“ (45,58 %, *N* = 147) (Abb. 45), „Einordnen“ (82,61 %, *N* = 23) (Abb. 45) sowie „Blinksignal beenden“ (84,62 %, *N* = 26) (Abb. 46) kennzeichnend. In Abbildung 45 ist ersichtlich, dass das Unterziel „Spurwechseldurchführung“ besonders häufig in den Durchführungsphasen des CS sowohl beim Spurwechsel nach links (32,84 %) als auch nach rechts (37,31%) auftrat (*N* = 67). Daneben wurde die „Spurwechseldurchführung“ häufig in der Vorbereitungsphase als Ziel gesetzt (42,86 %, *N* = 147). Das Unterziel „Einordnen“ betraf in erster Linie die Durchführungsphase des CS beim Spurwechsel nach links (34,78 %, *N* = 23). In den ersten beiden Spurwechselphasen wurde es gar nicht gezeigt.

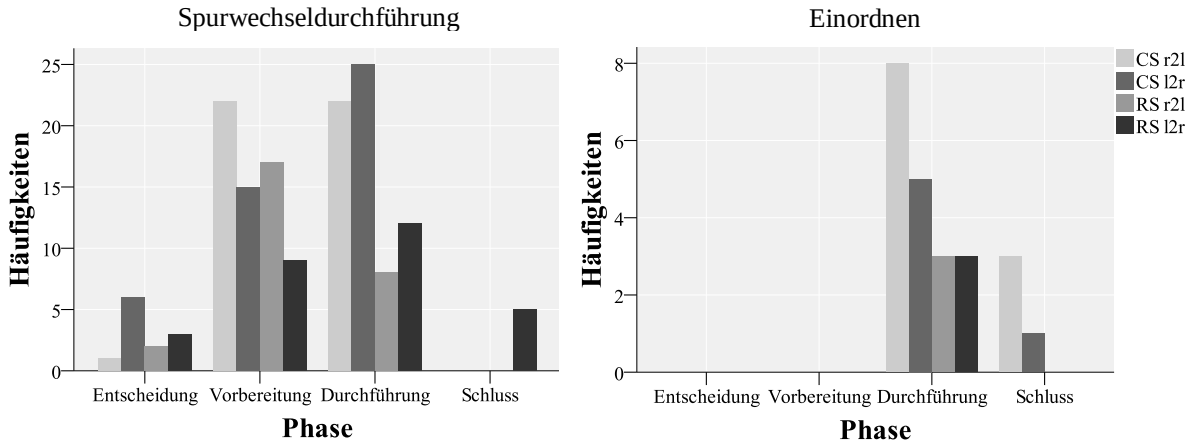


Abbildung 45. Häufigkeitsverteilung der Ziele „Spurwechseldurchführung“ und „Einordnen“

Die Abbildung 46 verdeutlicht, dass das Unterziel „Blinksignal beenden“ insbesondere in der Durchführungsphase des CS beim Spurwechsel nach rechts einsetzte (30,77 %, *N* = 26). In der Entscheidungsphase kam es überhaupt nicht, in der Vorbereitungsphase einmal sowie in der Schlussphase selten (26,92 %), zum Einsatz (*N* = 26). In der Schlussphase war neben der bereits erwähnten „Geschwindigkeitsanpassung“ ebenfalls das Unterziel „Regeln befolgen“ (36,84 %, *N* = 38) relevant (Abb. 46). Dieses Unterziel lässt sich vor allem im CS beim Spurwechsel nach rechts erkennen
(52,63 %).

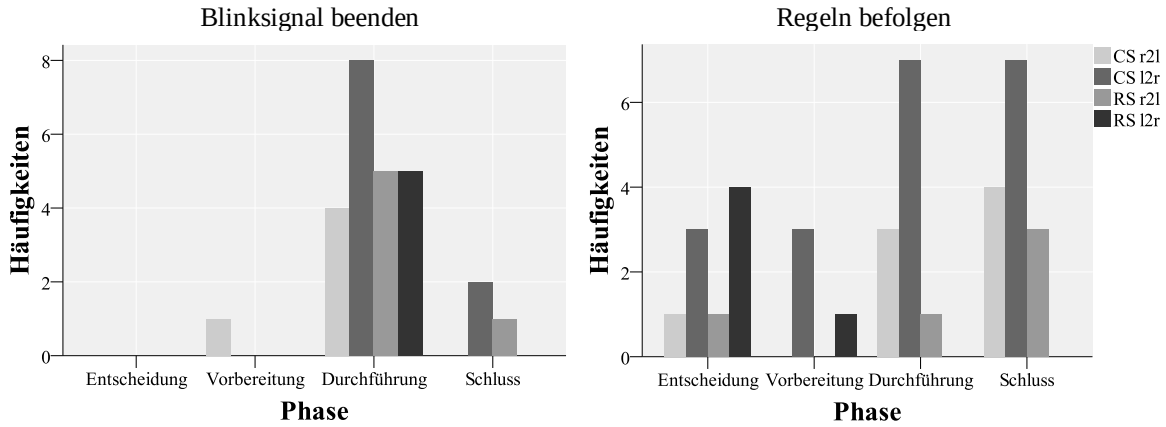


Abbildung 46. Häufigkeitsverteilung der Ziele „Blinksignal beenden“ und „Regeln befolgen“.

4. Diskussion

Nach Abschluss der empirischen Analyse zur Auftretenshäufigkeit der kognitiven Operatoren und Ziele werden im Folgenden die Untersuchungsergebnisse und Beschränkungen dieser Arbeit diskutiert (Kap. 4.1) sowie Implikationen für weiterführende Forschungsarbeiten abgeleitet (Kap. 4.2). Abschließend erfolgt eine kurze Zusammenfassung der Arbeit (Kap. 4.3).

4.1. Kritik

Der Schwerpunkt der Arbeit lag in der Identifizierung kognitiver Operatoren und Ziele, die gehäuft bei Spurwechseln auf zweispurigen Autobahnen auftreten. Hierzu wurde sich eines Verfahrens bedient, welches in diesem Kontext bisher kaum Anwendung fand. Mithilfe des TA wurde das Fahrverhalten von neun Probanden bei zwei verschiedenen Spurwechselarten ermittelt. Die dadurch entstandenen Verbalisierungen wurden transkribiert, annotiert und in die gesuchten CPM-GOMS-Komponenten umgewandelt.

4.1.1. Theoretisch-konzeptionelle Anmerkungen

Die CPM-GOMS stellte sich bezüglich motorischer und perzeptueller Operatoren bereits als geeignet heraus (Andree, 2015). Die Prüfung, ob sie auch in der Lage ist, zuverlässige Vorhersagen über die Fahrleistung bei Autobahnspurwechseln, durch die Zusammenführung der Ziele und Operatorarten, zu machen, bleibt offen. Zu Bedenken ist hierbei, dass bislang keine Studien bekannt sind, in der die kognitiven Operatoren einer CPM-GOMS im Rahmen eines Fahrsimulatorexperiments auf Autobahnen erhoben wurden. Durch die Komplexität der Fahraufgabe (im Ggs. zum Bedienen einer Computermaus) wurde sich in dieser Arbeit lediglich auf einen Teilbereich beschränkt und keine vollständige CPM-GOMS modelliert. Diskutabel bleibt auch die Subjektivität bei der Definition der GOMS-Komponenten (Kap. 2.4.2.3). Was für den einen Modellierer ein Operator ist, stellt für den anderen ein Ziel dar, wobei der Granularitätsgrad nach dem konkreten Untersuchungskontext gestaltet wird. Aus ökonomischen Gründen wurden in dieser Arbeit nicht alle relevanten kognitiven Prozesse berücksichtigt und sind demnach noch ausbaubar. In der Theorie existieren viele weitere Kognitionen, wie Lernen, Aufmerksamkeit, Handlungsplanung oder Problemlösen, von denen einige mehr und andere weniger relevant für den Fahrkontext, insbesondere in einer Spurwechselsituation, sind. Andree (2015) führte in ihrer Arbeit zusätzlich Signalerkennungen und automatisierte Prozeduren als kognitive Prozesse an, die in dieser Studie willentlich nicht berücksichtigt wurden. Signalerkennungen setzen keine Entscheidungen oder andere kognitive Prozesse voraus und werden durch visuelle Reize hervorgerufen sowie vom visuellen System erfasst (Andree, 2015). Als Beispiele nennt Andree (2015) einerseits „Straßenschild erkennen“, was bei Fastenmeier und Gstalter (2002) der perzeptuellen Anforderung „Dekodieren (eines Verkehrsschildes)“ entspricht. Andererseits führt sie die Methode „Blinksignal erkennen“ an, das bei Fastenmeier und Gstalter (2002) eher als „Entdecken (der Zeichengebung eines vorausfahrenden Fahrzeugs)“ kodiert wird. Daher wird davon ausgegangen, dass derartige Prozesse ebenso

der Wahrnehmung zugeschrieben werden können. Automatisierte Prozeduren wie „Pedalstellung regulieren“ (Andree, 2015) werden zwar als Kognitionen angesehen, jedoch lassen sie sich schwer mit der Laute-Denken-Methode erfassen, da beim TA automatisierte Prozesse den Arbeitsspeicher nicht oder kaum betreffen (vgl. Ericsson & Simon, 1980). Für Folgeuntersuchungen (Kap. 4.2), z. B. mithilfe von Elektroenzephalogramm- (EEG) Daten, kann es sich lohnen, diese wieder zu betrachten. Andere Erhebungsmethoden können zudem zur Erfassung spezifischer Operatordauern genutzt werden, sodass die Gesamtausführungszeit eines Spurwechsels ermittelt werden kann. Dies war mithilfe der TA noch nicht möglich. Jedoch konnten alle fünf vermuteten kognitiven Prozesse sowie der ungefähre Einsatzzeitpunkt der Operatoren in den Daten entdeckt werden (Kap. 4.1.3.1). Zukünftig ist zu empfehlen, das weitere kognitive Prozesse in die Analyse eingehen sollten.

4.1.2. Methodisch-operationelle Anmerkungen

Einige Schwächen von GOMS und TA konnten durch das Versuchsdesign umgangen werden.Die wichtigsten Untersuchungserkenntnisse sowie methodische Einschränkungen werden im weiteren Verlauf resümiert.

Stichprobe. Zur Modellierung von Routineverhalten, mithilfe der CPM-GOMS, spielt die Vorerfahrung der Nutzer eine große Rolle (Kap. 1.2.1.1). Die Fahrerfahrung der Probanden konnte durch die Dauer des Führerscheinbesitzes gewährleistet werden. Mit Simulatorfahrten waren jedoch die wenigsten vertraut. Da sie sich allerdings schnell an den Fahrsimulator gewöhnten, die Versuchsfahrten alle auf ein ähnliches Erfahrungslevel brachten und die Simulationsumgebung einer Realfahrt recht nah kam, wird vermutet, dass die Simulation zu keiner Verschlechterung des Routineverhaltens führte. Zukünftig können auch Fahrertypen, z. B. anhand von Aggressivität, Fahrfertigkeiten, Planungshorizont und Ungeduld (Choudhury, 2007; zit. nach Habenicht, 2012) in die Analyse einbezogen werden, um FAS noch differenzieller zu gestalten. So könnte untersucht werden, ob z. B. die bevorzugte Geschwindigkeit oder das Wohlbefinden der Probanden (Abb. C.3, Anhang C) einen Einfluss auf die kognitiven Prozesse im Speziellen oder die Spurwechselaufgabe im Allgemeinen hat. In dieser Studie war ersichtlich, dass die weiblichen Probanden im Mittel eher langsamere Geschwindigkeiten bevorzugten. Einerseits können sich diese langsameren Geschwindigkeiten auf die Anzahl der Spurwechselmanöver auswirken, da diese häufig durch langsamere Fahrzeuge ausgelöst werden (Kap. 4.1.3.2). Andererseits können sie das Spurwechselverhalten im Allgemeinen beeinflussen, indem die Verkehrsdynamik (z. B. geringe Beschleunigung beim Überholvorgang) gestört wird. Daher bietet sich die Prüfung von Geschlechtereffekten an. In Folgestudien sollte zusätzlich das bevorzugte Fahrzeuggetriebe erfragt werden (z. B. Schaltgetriebe vs. Automatikgetriebe), um zu überprüfen, ob die gewohnte Getriebeart einen Einfluss auf die Fahrerkognitionen und Ziele hat. Bezüglich weiterer demografischer Aspekte, wie z. B. Alter und Geschlecht gab es kaum besondere Auffälligkeiten. Die Frage, ob die Probandenanzahl wirklich ausreichte, ist schwer zu beantworten. Die Mindestanzahl von fünf Versuchspersonen (Kap. 2.1) wurde zwar erfüllt, allerdings besaßen nicht alle Probanden die gleiche Expertise sowie Sprachfähigkeit (Kap.1.2.2.5), sodass die Erhebung zusätzlicher Versuchs-

personen persönliche Defizite oder technische Ausfälle ausgleichen könnte. Mit Expertise ist hier die Fahrerfahrung gemeint, deren erforderliches Minimum zwar bei allen Probanden nachgewiesen wurde, dennoch zeigten sich bspw. in der Anzahl der jährlichen Kilometerleistung oder Nutzung der Streckenart Unterschiede. Unterschiede in der Sprachfähigkeit können kaum auf den Bildungstand oder die Muttersprache zurückgeführt werden, da es diesbezüglich keine großen Abweichungen gab. Dies lässt sich eher darauf zurückführen, dass das Kodieren in Worte an sich nicht fehlerfrei ist (David, 2014). Viele Probanden können ihre Gedanken nicht adäquat äußern oder ihre Verbalisierungen sind unvollständig (David, 2014). Van Someren und Kollegen (1994) betonen als negativen Aspekt, dass die Fähigkeit, Gedanken tätigkeitsbegleitend zu formulieren, schwach ausgeprägt sein kann. Allerdings haben die Probanden dieser Studie, trotz der ungewohnten Methode, die Artikulation nie länger als 15 Sekunden unterbrochen und mussten nicht ans Weiterreden erinnert werden.

Einfluss des Messinstrumentes. Der Definition vom Lauten Denken lag bereits zugrunde, dass CTA möglicherweise zu einer Steigerung der mentalen Beanspruchung führen und im Zuge dessen die Ausführung der Fahraufgabe beeinträchtigen kann (Kap. 1.2.2.2). Es gab keine Kontrollgruppe, die die Experimental-Bedingung ohne Lautes Denken durchfahren hat, um zu überprüfen, ob es durch das CTA zu einer erhöhten Fehleranzahl bei der Aufgabenausführung kommt. Bei der Gegenüberstellung der Parameter Lenkbewegung, Gas- und Bremspedalstellung, in der Kontroll- und Experimental-Bedingung, gab es keine nennenswerten Unterschiede. Daraus resultiert, dass das CTA zur Anwendung beim Fahren auf simulierten zweispurigen Autobahnen geeignet ist und dass der Einsatz einer Kontrollgruppe zur Prüfung des Einflusses nicht notwendig war. In Folgeexperimenten kann zusätzlich die subjektive mentale Beanspruchung mittels Rating Scale Mental Effort (Widyanti, Johnson & Waard, 2013) abgefragt werden, um sicherzustellen, dass es keine subjektive Belastung gab, die eventuell einen Einfluss auf die Qualität der Verbalisierungen hat.

Einfluss der Szenarienauswahl. Die gewählten Spurwechselszenarien stellten sich als geeignet heraus. Die Probanden äußerten sich wenig bis gar nicht negativ bezüglich der Realitätsnähe. Zudem hatten sie keinen negativen Einfluss auf die Anwendung des TA. Das konnte durch den Einsatz einer kontrollierten Fahrt bestätigt werden. Unterschiede zwischen dem CS und RS können damit begründet werden, dass realitätsnahe Fahrsituationen das menschliche Gehirn auch unabhängig vom Lauten Denken mehr beanspruchen (vgl. Volk, 2017).

Spurwechselphasen. Zur Identifikation der Operatoren und Ziele war die Festlegung der Phasenzeiten (Kap. 2.5.1) sehr hilfreich. Zumeist zeigten die Probanden inhaltlich das Verhalten, welches Fastenmeier und Kollegen (2001) als Fahreraktivitäten beim Spurwechselprozess vorgaben. Zusätzlich sollten jedoch Fahrparameter festgelegt werden, anhand derer die einzelnen Phasen verankert werden, sodass für jeden einzelnen Spurwechsel, aber auch für jede Spurwechselart, spezifische Phasenzeiten entstehen. Ehmanns (2003) führt aus, dass das Ausscheren nach links auf die Überholspur ein deutlich komplexerer Vorgang ist als das Einscheren nach rechts und daher auch eine längere Spurwechselzeit (2,6 Sekunden) als das Wiedereinscheren (1,9 Sekunden) benötigt. Daher

sollten sich bereits bei den verschiedenen Spurwechselarten Unterschiede zeigen. Als problematisch gestaltete sich außerdem die Auszählung der Auftretenshäufigkeit der Operatoren und Ziele bei Phasenüberlappungen der zwei Spurwechselarten. Zukünftig müssen für diesen Fall Auswertregeln festgelegt werden. Beispielsweise kann die zweite Hälfte des ersten Spurwechsels ab dem Beginn der zweiten Spurwechselart nicht mehr gezählt werden, da es sich bei den auftretenden Operatoren und Ziele um solche handelt, die häufiger in den ersten Spurwechselphasen aufgetreten sind. Eine weitere Möglichkeit zur Vermeidung dieses Messfehlers wäre eine Zeitverlängerung zwischen dem aktuellen und nächsten Spurwechsel, indem Manöver zum Einscheren später forciert werden.

Bewertung des Lauten Denkens. Die CTA-Anwendung war bezüglich der Fragestellung sehr ergiebig. Das das RTA keine Zusatzinfrmationen, während der Surwechselmanöver lieferte, begründeten die Probanden damit, relevante Informatioen bereits beim CTA geäußert zu haben. Zunächst hat das Laute Denken gezeigt, dass es für die Anwendung bei komplexen Aufgaben, wie der Fahraufgabe, geeignet ist. In anderen explorativen Studien hat es sich bereits bewährt (vgl. Kap. 1.2.2). Auch die vorliegende Arbeit ergab eine ausreichende Menge qualitativer Daten, die quantifiziert und statistisch vergleichbar gemacht wurden. Voraussetzung dafür war eine hinreichende Probandenanzahl (Kap. 2.1) sowie die Übereinstimmung der modellspezifischen Verarbeitung von Informationseinheiten mit den Kriterien von Ericsson und Simon (1980) (Kap. 1.2.2.1) und ihrer einfachen Verbalisierung. Die Verbalisierung wirkte sich allerdings nachteilig auf die zeitliche Präzision der Operatoreinsätze aus. Da die Forschungsfrage jedoch vielmehr ihre Identifizierung und weniger die exakte zeitliche Einordnung der Operatoren betrifft, erfüllte sie die Zwecke dieser Untersuchung.

Operationalisierung der Operatoren und Ziele. Wie bereits in Kap. 4.1.1 bemerkt, gestaltete sich die Definition der GOMS-Komponenten als sehr subjektiv. Die festgelegten Operatoren können ebenfalls als Methoden oder Ziele ausgelegt werden. So kann ein anderer Modellierer festlegen, dass der Operator „Überprüfen – absolute Geschwindigkeit“ eher einer Methode, bestehend aus „Überprüfung initiieren“ (kognitiv), „Augenbewegung initiieren“ (kognitiv), „Augenbewegung zum Tachometer durchführen“ (motorisch), „Geschwindigkeitsinformation wahrnehmen“ (perzeptuell) und „Information verifizieren“ (kognitiv) entspricht. Die Ziele wurden zwar anhand des Zuordnungsschemas (Tab. D.11 - D.12, Anhang A) aus den Operatoren abgeleitet, allerdings nah am Kontext protokolliert, sodass basierend auf demselben Operator bspw. in einem Fall das Ziel „Warten auf Lücke“ und ein andermal das Ziel „Spurhalten“ festgesetzt wurde. Nach Rankin (1988) enthalten manche Äußerungen mehrere kognitive Aktivitäten, die nur kontextspezifisch entschlüsselt werden können (David, 2014), sodass sich diese Herangehensweise als die vorteilhafteste erwies. Es kam durchaus vor, dass zu bestimmten Zeitpunkten Operatoren oder Ziele doppelt belegt wurden, bspw. bei Aussagen wie „ich beschleunige jetzt auf 130 km/h“, woraus die Operatoren „Entscheiden - Zu beschleunigen“ und „Überprüfen - Absolute Geschwindigkeit“ resultieren oder „ich wechsel wieder mit etwas Beschleunigung die Spur“, wonach sich die Operatoren „Entscheiden - Zu lenken“ sowie „Entscheiden - Zu beschleunigen“ ergeben. Da das Verbalisieren an sich schon Zeit kostete, wird

davon ausgegangen, dass die Operatoren nicht zeitgleich sondern kurz nacheinander auftraten, was dem Charakter der GOMS-Methode (Kap. 1.1.5.2), dass Operatoren innerhalb eines Prozessors seriell auftreten, Rechnung trägt. Sofern zukünftig, mit den beschriebenen Operatoren und Zielen weiter gearbeitet wird, empfiehlt sich die Erhebung der Interraterreliabilität. Zu diesem Zeitpunkt war der Modellierungsaufwand neuer kognitiver Operatoren so enorm, dass in dieser Arbeit davon abgesehen wurde. Mit bereits bestehenden Operatoren und Zielen verkürzt sich jedoch die Auswertungszeit, sodass die Einschätzung von zwei verschiedenen Beobachtern realistisch wird. Da in der Literatur jedoch keine einheitlichen Maße für die Interraterreliabilität existieren, ist eine Vergleichbarkeit der beobachteten Messgenauigkeit nicht gegeben (David, 2014). Einen weiteren Kritikpunkt bilden die aufwändige Transkribier-, Kodier- und Auswertungszeit. Die Erfassung der kognitiven Operatoren und Ziele hätte zwar auf die jeweiligen Spurwechselmanöver beschränkt werden können, allerdings wäre eine vorherige präzise zeitliche Einordnung notwendig gewesen. Der Vorteil, der Erfassung der kognitiven Operatoren und Ziele während des gesamten Fahrtverlaufs, besteht in der Möglichkeit, die GOMS-Komponenten zukünftig innerhalb und außerhalb von Spurwechselmanövern zu vergleichen und so noch konkretere spurwechselspezifische Eigenschaften zu entdecken.

4.1.3. Interpretation der Ergebnisse

Die Forschungsziele dieser Arbeit waren die Erstellung von kognitiven Operatoren und dahinterliegenden Zielen des Fahrers beim Spurwechsel auf zweispurigen Autobahnen (Kap. 1.3). In den folgenden beiden Teilkapiteln werden diese aufgegriffen und beantwortet. Im Ganzen zeigte sich, dass unter Zunahme der Umgebungskomplexität, die Anzahl der Spurwechselmanöver abnahm, sodass dementsprechend beim RS weniger Operatoren und Ziele gezeigt wurden.

4.1.3.1. Bewertung der kognitiven Operatoren

Insgesamt waren die entwickelten Operatoren und Ziele mit den theoretischen Erwartungen konsistent. Die Resultate sind wie folgt zu interpretieren.

Operatoren der Gedächtnisprozesse. Das sporadische Auftreten der Operatoren der Gedächtnisprozesse ist nicht verwunderlich, sondern dadurch erklärbar, dass diese Prozesse nicht immer bewusst ablaufen. Einerseits können Gedächtnisanteile, die zu einem bestimmten Zeitpunkt aktiviert sind, bewusst wahrgenommen werden (Kihlstrom, 1984). Andererseits können, durch Lenkung der Aufmerksamkeit, Wissensanteile (ausgenommen frühzeitig sensorisch verarbeitete Anteile) ebenfalls dem Bewusstsein zugänglich gemacht werden (ebd.). Finden keine entsprechenden Aufmerksamkeitsprozesse statt, dann sind sie auch nicht verbalisierbar. Zusätzlich wurden lediglich Spurwechselphasen betrachtet. Dabei fokussiert sich der Mensch auf die unmittelbare Erfüllung der Aufgabe, sodass für Gedächtnisabrufe kaum Platz verfügbar bleibt. Auffällig war jedoch die Häufung des Operators „Erinnern von Regeln“ beim Spurwechsel nach rechts. Vermutet wird, dass sich hier mehrfach das Rechtsfahrgebot in Erinnerung gerufen wurde, welches beim Spurwechsel nach links

eine eher untergeordnete Rolle spielt. Die Häufung dieses Operators in der Durchführungs- und Schlussphase ist ein Indiz dafür, dass, nach erfolgreichem Spurwechsel, die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs an die Geschwindigkeit des Verkehrs auf der Zielspur angepasst und dabei die Richtgeschwindigkeit in Erinnerung gerufen werden muss. Die Häufung des Operators in der Entscheidungsphase wird eher in Zusammenhang mit der Spurwechselart „links nach rechts“ gesehen und deutet daher auf das Auffrischen des Rechtsfahrgebotes hin.

Entscheidungsoperatoren. Das Vorkommen der Entscheidungsoperatoren in den spezifischen Phasen entspricht dem vermuteten Auftreten. Es zeigt sich, dass diese gehäuft vor der entsprechenden Handlungsausführung für die jeweilige Alternative auftraten. So wurde bspw. die Entscheidung zum Spurwechsel bzw. Überholmanöver am häufigsten in der Entscheidungsphase getroffen und die Entscheidung dem Vorderfahrzeug zu folgen bzw. die Spur zu halten in den letzten beiden Phasen, im Vorfeld eines neuen Fahrmanövers. Die Spiegel- und Schulterblickentscheidungen sowie die Entscheidung zu blinken, traten, wie erwartet, in den Phasen vor der Spurwechseldurchführung, meistens in der Vorbereitungsphase, auf. Wohingegen sich die Probanden erst in der Durchführungsphase dafür entschieden, den Blinker wieder auszustellen und ein Lenkmanöver einzuleiten. Die Entscheidung das Lenkrad wieder zurückzudrehen wurde hier ebenfalls am häufigsten benannt. Die theoretischen Vermutungen gingen allerdings davon aus, dass die Entscheidung den Blinker auszuschalten und zurückzulenken erst in der Schlussphase getroffen wird. Das gefundene Ergebnis kann einerseits die Bestätigung dafür sein, dass Spurwechselmanöver nicht immer idealtypisch verlaufen (vgl. Kap. 1.1.4.1) oder auf eine falsche zeitliche Zuordnung der Spurwechselphasen hinweisen (vgl. Kap. 4.1.2). Die Entscheidungsoperatoren zur Geschwindigkeitsregulierung traten theoriekonform zumeist in der ersten und letzten Spurwechselphase auf. Die Entscheidung zu beschleunigen fiel dabei besonders häufig beim Spurwechsel nach links, da bei einem Überholmanöver der Vorbeifahrende schneller sein muss als das Überholobjekt. Lediglich die Entscheidung zu bremsen, wurde zu allen Spurwechselphasen gleichermaßen getroffen, was auf eine falsche Einschätzung (z. B. Abstand, Geschwindigkeit des Vorder- oder Nebenfahrzeugs), bzw. eine Anpassung der aktuellen Verkehrssituation (z. B. plötzlich bremsendes Vorderfahrzeug) zurückgeführt wird.

Der, im Vergleich zu den Gedächtnisprozessen, extrem häufige Einsatz von Entscheidungen, wird darauf zurückgeführt, dass diese nach Meinel (2013) eher bewusst getroffen werden. Jeder Entscheidungsoperator kann entweder, aufgrund der dreistufigen Darstellung von Meinel (2013), als Methode, mit den Operatoren: Identifizierung alternativer Handlungswege, Bewertung und Auswahl, angesehen werden oder nur die letztendliche Auswahl der Alternative betreffen. Die Daten deuten daraufhin, dass der Entscheidungsprozess vor bzw. während der Entscheidungsverbalisierung stattfindet, sodass zum Zeitpunkt der Verbalisierung die eigentliche Wahl getroffen wird. Da das Wahlergebnis objektiv messbar ist (vgl. Kap. 1.2.1.2), besteht zusätzlich die Möglichkeit, die wahre Auftretensanzahl von Entscheidungen zu ermitteln, indem die Zahl der Auswahlergebnisse berechnet wird. Gesetzt den Fall, dass Entscheidungen auf Bewertungen beruhen und Bewertungen einen IST-

SOLL-Vergleich, demnach Überprüfungen, voraussetzen, muss es außerdem mindestens soviele Überprüfungen und Bewertungen wie Entscheidungen geben.

Bewertungsoperatoren. Der Einsatz von Bewertungen bestätigt ebenfalls weitestgehend die theoretischen Vorstellungen. Das Bewerten der Lückengröße wurde vergleichsweise oft gezeigt. Das verwundert nicht, da von der Lückenwahl die Sicherheit des Spurwechsels und das schnelle Vorwärtskommen abhängig ist (Habenicht, 2012). Das bestätigt auch ihr vermehrtes Auftreten in der Entscheidungsphase. Weitere fahrerspezifische Kriterien für die Bewertung der besten Lücke, könnten bspw. Komfort, ausgeprägtes Sicherheitsbedürfnis eines ängstlichen Fahrers, Wirtschaftlichkeit und die Dringlichkeit sein (Habenicht, 2012). Auch der Abstand zum Vorderfahrzeug wurde mehrfach in der ersten Phase bewertet. Das bestätigt Hennings (2010) Ansatz, dass, gemäß der Schema-Aktivierungstheorie, der Umweltreiz „langsames Vorderfahrzeug“ das Handlungsschema „Spurwechselvorbereitung“ auslöst und es daraufhin zum Spurwechsel kommt (vgl. Kap. 1.2.1.2). Die Bewertung der Spurbelegung und Position des seitlichen Verkehrs fand, wie erwartet, vor der Spurwechseldurchführung statt. Allerdings wurde die Spurbelegung des hinteren Verkehrs in allen Phasen bewertet, was bezüglich einer ständigen Aktualisierung der Verkehrssituation sinnvoll erscheint. Wohingegen die Spurbelegung und Position des seitlichen Verkehrs vor allem beim Fahrstreifenwechsel interessant wird. Der vordere Verkehr wurde vor allem in der Durchführungs-phase bewertet. Das rührt daher, dass der Fahrer z. B. ein eventuelles Ausscheren des Vorderfahrzeugs oder ein plötzliches Abbremsen des vorderen seitlichen Fahrzeugs berücksichtigen muss. Bezüglich der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs gab es kaum spezifische phasentypische Annahmen. Es wurde lediglich vermutet, dass Operatoren, die die Geschwindigkeit betreffen eher in den letzten drei Spurwechselphasen gezeigt werden. Während des Versuchs wurde die absolute Geschwindigkeit jedoch in der Entscheidungs- und Schlussphase oftmalig bewertet. Eine Bewertung der Position des Ego-Fahrzeugs erfolgte statt in den angenommenen drei Phasen: Entscheidung, Durchführung und Schluss, vorwiegend in der Entscheidungsphase. Bei der Bewertung der Geschwindigkeit anderer Verkehrsteilnehmer wurden im Vorfeld keine Annahmen über ein phasenspezifisches Auftreten getroffen. Die Ergebnisse zeigen eine häufige Bewertung der Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs oftmals in der Entscheidungs- sowie Durchführungsphase. Jedoch trat der Operator auch in den anderen Phasen vergleichsweise oft ein. Aufgrund der wenigen Bewertungen der Geschwindigkeiten anderer Fahrzeuge, können über diese keine Aussagen bezüglich ihres Vorkommens in bestimmten Phasen getroffen werden. Das seltene Auftreten von Situationsbeurteilungen, welches bereits von Fastenmeier und Gstalter (2002) beschrieben wurde (vgl. Kap.1.2.1.2), konnte durch die Ergebnisse belegt werden. Dieser Operator kam besonders in der Durchführungsphase vor, was die Argumentation verdeutlich, das besonders schwierige und riskante Situationen zu Situationsbewertungen führen (vgl. Fastenmeier & Gstalter, 2002). Über die Bewertung des Fahrverhaltens oder der Verkehrsfülle werden, aufgrund der wenigen Daten, keine Aussagen bzgl. bestimmter Auftretensbedingungen getroffen.

Überprüfungsoperatoren. Operatoren zu Überprüfungen lassen sich zukünftig zeitlich dahin-

gehend gut einordnen, dass sie häufig in Verbindung mit bestimmten motorischen bzw. perzeptuellen Operatoren auftreten. So prüft ein Fahrer die absolute Geschwindigkeit während er eine Augenbewegung zum Tachometer macht, die Zahl perzeptuell wahrnimmt und kognitiv den prüfenden IST-SOLL-Vergleich durchführt. Das Überprüfen der absoluten Geschwindigkeit wurde am häufigsten in den letzten beiden Spurwechselphasen verbalisiert, wobei sich bei genauerer Betrachtung der Eye-Tracking-Daten eine Häufung des perzeptuellen Operators beim Spurwechsel nach rechts in der Schlussphase und beim Spurwechsel nach links ebenfalls in der Schlussphase, ergab, sodass diese Daten bei künftigen Arbeiten vergleichend herangezogen werden sollten. Ebenso verhält es sich mit den Überprüfungen der Spurbelegung. Durch Eye-Tracking-Analyse der Kopf- und Augenbewegungen bei Spiegel- und Schulterblicken lassen sich diese Operatoren besser einordnen. Die Verbaldaten zeigen, den Erwartungen entsprechend, als vorläufiges Bild, ein konzentrierteres Vorkommen der Überprüfungen der seitlichen und hinteren Spurbelegung in den ersten beiden Spurwechselphasen. Da die übrigen Überprüfungsoperatoren nur vereinzelt auftraten, lassen sich darüber keine aussagekräftigen Feststellungen machen.

Antizipationsoperatoren. Wie in Kap. 1.2.1.2 beschrieben, finden Antizipationen fortlaufend statt. Der Sinn von Antizipationen liegt darin, dass sie frühzeitig zu einem angepassten Fahrverhalten führen sollen und so Risikosituationen vermieden werden können. Dadurch lässt sich ihr vermindertes Auftreten bei den Spurwechseln während des Versuchs erklären. Während sich der Fahrer zwar auf einen Spurwechsel durch eine Anpassung der Geschwindigkeit vorbereiten kann, bieten andere Spurwechselkomponenten, z. B. das Einleiten des Lenkmanövers, keine Möglichkeit des frühzeitigen Handels, da hier ein genaues Timing erforderlich ist (Sommer, 2012). Das erklärt ebenfalls das gehäufte Antizipieren der Annäherung des seitlichen Fahrzeugs in der Entscheidungsphase beim Spurwechsel nach links. Denn hierbei muss der Fahrer vor einem Spurwechsel, unter Berücksichtigung der Geschwindigkeit des Nebenfahrzeugs, vor einem Spurwechsel die Lückengröße überprüfen und einschätzen, ob die eigene Geschwindigkeit angepasst werden muss. Ebenso verhält es sich mit dem Operator „Antizipieren - Überholen des Nebenfahrzeugs“. Indem der Fahrer erwartet, wann das seitliche Fahrzeug überholt, kann er den Zeitpunkt der Spurwechseldurchführung (Vorscheren oder Nachscheren) besser einschätzen.

4.1.3.2. Bewertung der Ziele

Im Folgenden erfolgt eine kurze Zusammenfassung über die, aus den kognitiven Operatoren abgeleiteten Ziele und ihr Vorkommen innerhalb der Spurwechselmanöver.

Ziele. Das Ziel „Spurwechsel“ hatten die Fahrer, am häufigsten in der Entscheidungsphase. Der Entscheidungsprozess für einen Spurwechsel beinhaltet vorrangig den Spurwechselentschluss (vgl. Fastenmeier und Kollegen, 2001), wodurch ein anderes oberstes Ziel als der Spurwechsel selbst nicht zweckmäßig wäre. Ähnlich verhielt es sich mit dem Auftreten des Ziels „Überholen“. Aufgrund der Tatsache, dass ein Spurwechsel auch Teil eines Überholvorgangs sein kann (vgl. Kap. 1.1.4.2.), verwundert das vermehrte Vorkommen dieses Ziels in der Entscheidungsphase ebenfalls nicht. Bevor

die endgültige Entscheidung zum Spurwechsel getroffen wird, hat der Fahrer bereits das Ziel, das langsamere Vorderfahrzeug zu überholen, wartet jedoch noch auf eine passende Gelegenheit. Anders verhält es sich mit den beiden Zielen „Spurhalten“ und „Folgefahrt“. Da es sich bei diesen Zielen, wie auch beim Spurwechsel oder beim Überholen, um Fahrmanöver, also übergeordnete Ziele, handelt, sollten diese kaum während des Spurwechselprozesses auftreten, sondern erst am Ende bzw. danach einsetzen. Die Ergebnisse bestätigen diese Vermutung. Beide Ziele traten, im Vergleich zum Spurwechsel, deutlich seltener und hauptsächlich in den letzten Spurwechselphasen auf. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Probanden nach Absicherung eines Fahrmanövers, gedanklich auf das folgende Manöver vorbereiten und daher diese Ziele vorrangig werden.

Unterziele. Bei den Unterzielen, des obersten Zieles „Spurwechsel“, gab es kaum Modellabweichungen. Das Ziel „Spurwechselabsicht signalisieren“ zum Wechseln der Spur zeigte sich vorwiegend in der Vorbereitungsphase. Die „Sicherung“ hatte ebenfalls in dieser sowie in der Entscheidungsphase Priorität und wurde von allen Zielen am häufigsten verfolgt. Das Ziel „Spurwechseldurchführung“, also mittels Lenkbewegung auf die Zielspur zu steuern, trat, wie der Name vermuten lässt, vorwiegend in der Durchführungsphase auf. Weiterhin wurden hier die Ziele „Einordnen“ und „Blinksignal“ beenden oftmalig gezeigt, wenngleich diese theoretisch der Schlussphase zugeordnet wurden. Dieser Bias wurde bereits in Kap. 4.1.3.1. hinsichtlich der Operatoren „Entscheiden - Blinker auszuschalten“ und „Entscheiden - Zurück zu lenken“ diskutiert. Das Ziel „Geschwindigkeitsanpassung“ wurde vorwiegend in den letzten beiden Spurwechselphasen ins Auge gefasst. Wodurch die These, dass Fahrer häufig Spurwechsel durchführen, um ihre aktuelle Geschwindigkeit zu halten, bekräftigt wird (vgl. Hetrick, 1997). Das Ziel „Regeln befolgen“ trat überraschenderweise nicht vermehrt in der Entscheidungsphase, zum Prüfen ob ein Spurwechsel legal ist, auf. Stattdessen wiederholte sich dieses Ziel am meisten in der Schlussphase. In dem zuvor erstellten Schema (Tab. A.12 - A.13, Anhang) über die mutmaßlichen Einsätze von Zielen und Operatoren wurde das Ziel nicht in die Schlussphase aufgenommen, da es sich hierbei um das allgemeine und nicht spurwechselartspezifische Auftreten handelt. Dieses Ziel würde, getrennt nach Spurwechselart, lediglich beim Spurwechsel nach rechts relevant werden, da sich hier der Fahrer das Rechtsfahrgebot in Erinnerung ruft.

Eine Möglichkeit, objektiv zu beantworten, welche Operatoren bzw. Ziele eventuell weggelassen werden können, stellen weitere Untersuchungen dar. Einige Komponenten lassen sich aber anhand inhaltlicher Überlegungen ausschließen. Durch sorgfältige Analyse der Verbalisierungen und des Verhaltens lassen sich gute Annäherungen an die versteckten kognitiven Prozesse bilden. Da diese explorative Arbeit in erster Linie dazu diente, in einem wenig erforschten Untersuchungsgebiet begriffliche Voraussetzungen zu schaffen, ist die bisherige Aufstellung der kognitiven Operatoren und Ziele entsprechend nicht erschöpfend.

4.2. Implikationen

Zur Identifizierung weiterer Operatoren besteht die Möglichkeit sich anderer Methoden zu bedienen. Sommer (2012) schlägt zur Feststellung von Antizipationen diverse Methoden vor, wovon einige kurz

in Kap. 1.2.1.2. benannt wurden. So können z. B. die in der Studie erhobenen Blickbewegungen zur Identifizierung von Antizipationen genutzt werden, indem die Verteilung von Fixationsdauern näher betrachtet wird (Sommer, 2012). In der Studie von Sommer (2012) führte bspw. ein antizipations-relevanter Reiz in etwa 25 m Entfernung zu einem plötzlichen Anstieg von langen Fixationsdauern (> 600 ms) (Sommer, 2012). Oder es könnten Ratingskalen eingeführt werden, z. B. eine fünfstufige Skala, bei der die Probanden angeben, wann sie üblicherweise ihre Geschwindigkeit verringern (5 = „sobald ich es sehe“ bis 1 = „in allerletzter Sekunde“), um auf bewusste Entscheidungen zu schließen (Sommer, 2012).Wie in Kap. 4.1.1. dargestellt, gibt es noch weitere für den Fahrkontext relevante Kognitionen. Für diese Prozesse steht die Aufstellung kognitiver Operatoren und Ziele weiterhin aus. Einige lassen sich ggf. auch mit der Methode des TA erheben. Diesbezüglich sollte die Durchführung der RTA angepasst werden. Es empfiehlt sich die Erstellung eines Kriterienkatalogs imVorfeld der RTA und dessen Nutzung während des Videofeedbacks, um sicherzustellen, dass relevante Punkte auch während der Spurwechselmanöver geäußert werden. Zusätzlich kann die Aufzeichnung von Augenbewegungen verwendet werden, um beim RTA detailliertere Verbalisierungen zu erhalten (vgl. Guan et al., 2006). Dadurch sind zukünftig, neben den Operatoren, die Fahrerziele besser erfassbar und müssen nicht nur aus den Operatordaten abgeleitet werden.

Als Nächstes stellt sich die Frage, wie man mit den bereits bekannten kognitiven Operatoren weiter verfahren kann. Zunächst sollten die gefundenen Operatoren mit den Fahrdaten abgeglichen werden, um zu prüfen, ob diese an der richtigen Stelle eingesetzt wurden und daher plausibel sind. Zudem können sich durch den Abgleich mit den Eye-Tracking- und Fahrdaten zusätzliche Operatoren ergeben. Ein weiterer großer Schritt wäre die Überprüfung von Korrelaten im Gehirn für die gefundenen Operatoren, z. B. Integration von Belohnungsinformationen mit den damit verbundenen zukünftigen Handlungen, um zu bewerten, ob ein bestimmtes Ziel erreicht werden kann, im dorsalen Striatum (vgl. Grahn, Parkinson & Owen, 2008), bzw. die Überprüfung von Korrelaten im Gehirn für noch zu entdeckende Operatoren, z. B. die Optimierung von Entscheidungsstrategien und Handlungsplanung im dorsolateralen präfontalen Cortex (vgl. Barraclough, Conroy & Lee, 2004; Wallis, Anderson & Miller, 2001), die Fehlerentdeckung und Verarbeitung von Zielkonflikten im anterioren cingulären Cortex (ACC) (vgl. Bush, Luu & Posner, 2000; Mansouri, Tanaka & Buckley, 2009) oder die Handlungsauswahl in Abhängigkeit ihrer Konsequenzen im ACC (vgl. Doya, 2008).Um die Auswertungsmöglichkeiten nachfolgender Simulatorstudien zu vergrößern, könnte die Entwicklung neuer bzw. Erweiterung bereits vorhandener Messeinrichtungen physiologischer Maße des Menschen dienen. Dumitrescu, Costea, Nemtanu, Badescu und Banica (2016) testeten ein Multisensorsystem zur Vorhersage von Ermüdung und Schläfrigkeit auf Basis des Leistungs-dichtespektrums des EEG und der Korrelation mit dem Herzzyklus oder dem Atmungszyklus. Dabei können die EEG-Daten entweder mit einem Kontaktsystem, einem Helm oder einem berührungslosen System erfasst werden. Ansätze, die in eine ähnliche Richtung vorstoßen, werden teilweise bereits erprobt. So kann ein System des US-Unternehmens Freer Logic und Changhong Research Labs durch einen EEG-Sensor in

einer Neuro-Biomonitor-Kopfstütze einen müden Fahrer durch die Messung seiner Hirnströme erkennen (Burgess, 2017). Um noch realistischere Ergebnisse unter standardisierten Bedingungen zu erhalten, sollten künftige Versuchsfahrten in Simulatoren mit höherem Immersionsgrad durchgeführt werden (z. B. akustisches, haptisches Feedback). Für weitere Simulatorexperimente spricht zudem die Möglichkeit, die Zeitkomponente bei kognitiven Operatoren systematisch zu untersuchen. Diese Variable sollte bei weiteren Anwendungen des GOMS-Verfahrens in den Fokus treten, da der größte Vorteil einer CPM-GOMS in der Erfassung der Ausführungsdauer unter Berücksichtigung paralleler Aktivitäten liegt. Trotz des hohen Auswertungsaufwands, hat sich die Anwendung des Lauten Denkens im Simulatorexperiment zur Identifizierung der kognitiven Operatoren und Ziele als so geeignet herausgestellt, dass das TA auch im Realversuch angewandt werden sollte. Neben der Anwendung unter realen Bedingungen, sollten die Erkenntnisse auf andere Strecken (z. B. dreispurige Autobahnen) und Spurwechselarten übertragen und getestet werden. In diesem Rahmen sind vermutlich weitere Ergänzungen und Anpassungen bisheriger Operatoren und Ziele notwendig.

4.3. Zusammenfassung und Ausblick

Die mobile Zukunft bilden FAS. Viele marktgängige FAS beschränken sich jedoch auf die reine Warnung (z. B. vor Hindernissen). Besonders im Bereich der Querführungsassistenz zeigt die Entwicklung des Automatisierungsgrades Potential. Mit dem technischen Fortschritt der FAS erhöht sich allerdings die mentale Belastung für den Fahrer, da die zusätzliche Informationsflut zu einer Überforderung führen kann. Daher hat die Gestaltung eines FAS, welches die Absichten des Fahrers integriert und dessen Kognitionen berücksichtigt, Priorität. Demzufolge wurde sich im Rahmen dieser Arbeit auf einen aufgabenorientierten Evaluationsansatz zur Modellierung der Spurwechselaufgabe gestützt. Der Fokus der Arbeit lag auf der Erstellung und Identifizierung von Fahrerzielen und kognitiven Operatoren die beim Spurwechsel auf einer zweispurigen Autobahn auftreten. Davon ausgehend, wurde zunächst ein kurzer Überblick über die traditionellen Fahraufgabenanalysen gegeben und daraus resultierende Erkenntnisse in der Arbeit aufgegriffen. Darüber hinaus wurde ein bekanntes Verfahren aus dem Usability-Bereich, das Laute Denken, vorgestellt und für die Erhebung quantitativer statistischer Kenngrößen im Fahrsimulator abgewandelt. Das Laute Denken hat sich als eine auswertungsaufwendige, aber einfach anzuwendende Evaluationstechnik herausgestellt. Diese empirische Technik liefert, in Verbindung mit einem Fahrsimulatorexperiment, eine große Anzahl gut interpretierbarer Verbalisierungen, die zur Bildung von Operatoren und Zielen der Aufgabenanalyse CPM-GOMS nützlich waren. Es konnten viele geeignete Operatoren und Ziele identifiziert werden, mit denen weiter gearbeitet werden kann. Diese Arbeit bildet eine gute Grundlage für verschiedene theoretische und experimentelle Forschungstätigkeiten. In zukünftigen Arbeiten kann die Methode des Lauten Denkens zur Erfassung der kognitiven Prozesse im Fahrkontext erweitert werden. Insbesondere die Validierung und Weiterentwicklung der aufgestellten Operatoren und Ziele sowie die Modellierung der Spurwechselaufgabe mittels CPM-GOMS sind interessante Forschungsgebiete.

Literaturverzeichnis

Abendroth, B. & Bruder, R. (2015). Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *ATZ/MTZ-Fachbuch. Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (3. Aufl., S. 3–15). Wiesbaden: Springer Vieweg. doi:10.1007/978-3-658-05734-3_1

Allen, T. M., Lumenfeld, H., & Alexander, G. J. (1971). Driver information needs. *Highway Research Record*, *366*, 102–115. Retrieved from http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/hrr/1971/366/366-009.pdf

Andree, A. (2015). *Die Erprobung eines aufgabenanalytischen Verfahrens zur Beschreibung der motorischen, perzeptuellen und kognitiven Prozesse bei manuell gefahrenen Spurwechseln auf Autobahnen* (Bachelorarbeit, Lüneburg, Leuphana Universität). Abgerufen von http://elib.dlr.de/100955/1/Bachelorarbeit_AlinaAndree.pdf

Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes. *Psychology of learning and motivation*, *2*, 89–195. doi:10.1016/S0079-7421(08)60422-3

Back, J., Myung, R., & Yoon, D. (2010). Applying CPM-GOMS analysis for predicting and explaining two-handed korean text entry task on mobile phone. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *54*(13), 977–981.

Barraclough, D. J., Conroy, M. L., & Lee, D. (2004). Prefrontal cortex and decision making in a mixed-strategy game. *Nature neuroscience*, *7*(4), 404–410.

Birns, J. H., Joffre, K. A., Leclerc, J. F., & Paulsen, C. A. (2002). Getting the whole picture: Collecting usability data using two methods - concurrent think aloud and retrospective probing. *Proceedings of UPA Conference*, 8–12. doi:10.1.1.111.5466

Boren, T., & Ramey, J. (2000). Thinking aloud: Reconciling theory and practice. *IEEE Transactions on Professional Communication*, *43*(3), 261–278.

Braess, H.-H. & Donges, E. (2006). Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen– „Konsumierbare “oder echte Verbesserungen. In *2. Tagung „Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz"*, TU München, Garching bei München, 4.-5. April 2006. Abgerufen von http://www.ftm.mw.tum.de/uploads/media/17g_braess.pdf

Straßenverkehrs-Ordnung (StVO), Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz 06.03.2013.

Burgess, M. (2017). *This car headrest monitors your brain waves to stop you falling asleep at the wheel.* Retrieved from http://www.wired.co.uk/article/brainwaves-stop-car-driver-tired

Bush, G., Luu, P., & Posner, M. I. (2000). Cognitive and emotional influences in anterior cingulate cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, *4*(6), 215–222.

Card, S. K., Moran, T. P., & Newell, A. (1983). *The psychology of human-computer interaction.* Hillsdale, N.J.: L. Erlbaum Associates.

Charters, E. (2003). The use of think-aloud methods in qualitative research an introduction to think-aloud methods. *Brock Education Journal*, *12*(2), 68–82.

Chovan, J. D., Tijerina, L., Alexander, G., & Hendricks, D. L. (1994). *Examination of Lane Change Crashes and Potential IVHS Countermeasures*. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety.

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (1st ed.). Hoboken: Taylor and Francis.

Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin*, *112*(1), 155–159.

Cooke, L. (2010). Assessing concurrent think-aloud protocol as a usability test method: A technical communication approach. *IEEE Transactions on Professional Communication*, *53*(3), 202–215.

Corrado, G. S., Sugrue, L. P., Brown, J. R., & Newson, W. T. (2009). The trouble with choice: Studying decision variables in the brain. In P. W. Glimcher, C. Camerer, R. A. Poldrack, & E. Fehr (Eds.), Neuroeconomics. Decision making and the brain (1st ed., pp. 463–480). London, San Diego, CA: Academic Press.

David, A. (2014). *Aufgabenspezifische Messung metakognitiver Aktivitäten im Rahmen von Lernaufgaben* (Diss., Chemnitz, TU Chemnitz). Abgerufen von http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-133054

Dorsch, F., Wirtz, M. A. & Strohmer, J. (Hrsg.). (2017). *Dorsch - Lexikon der Psychologie* (18., überarbeitete Auflage). Bern: Huber.

Doshi, A., & Trivedi, M. (2008). A comparative exploration of eye gaze and head motion cues for lane change intent prediction. *2008 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 49–54. doi:10.1109/IVS.2008.4621321

Doya, K. (2008). Modulators of decision making. *Nature neuroscience*, *11*(4), 410–416.

Dumitrescu, C., Costea, I. M., Nemtanu, F., Badescu, I., & Banica, A. (2016). Developing a multi sensors system to detect sleepiness to drivers from transport systems. *2016 IEEE 22nd International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, 175–178. doi:10.1109/SIITME.2016.7777271

Ehmanns, D. (2003). *Modellierung des taktischen Fahrerverhaltens bei Spurwechselvorgängen*. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2002. *Schriftenreihe Automobiltechnik: Vol. 63*. Aachen: Forschungsges. Kraftfahrwesen (fka).

Endsley, M. R. (1988). Situation awareness global assessment technique (SAGAT). In *Aerospace and Electronics Conference, 1988. NAECON 1988., Proceedings of the IEEE 1988 National* (pp. 789-795). doi:10.1109/NAECON.1988.195097

Endsley, M. R. (2000). Direct measurement of situation awareness: Validity and use of SAGAT. In M. R. Endsley, & D. J. Garland (Eds.), *Situation awareness analysis and measurement* (pp. 147–173). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Ericsson, K. A., & Simon, H. A. (1980). Verbal reports as data. *Psychological review*, *87*(3), 215–251.

Ericsson, K. A., & Simon, H. A. (1993). *Protocol analysis: Verbal reports as data*. London: The MIT press.

Fastenmeier, W. (2015). Fahrerassistenzsysteme (FAS) und Automatisierung im Fahrzeug – wird daraus eine Erfolgsgeschichte. *Zeitschrift für Verkehrssicherheit, 61*(1), 15–25. Abgerufen von https://www.researchgate.net/publication/289941712_Fahrerassistenzsysteme_FAS_und_Automatisierung_im_Fahrzeug_-_wird_daraus_eine_Erfolgsgeschichte

Fastenmeier, W. & Gstalter, H. (2002). *INVENT-FAS/FVM, AP 1200: Fahraufgabenklassifikation: Abschlussbericht im Auftrag der BMW AG, Robert Bosch GmbH, DaimlerChrysler AG, Volkswagen AG*. München.

Fastenmeier, W. & Gstalter, H. (2003). Entwicklung und Anwendung einer neuen Methodik zur Fahreraufgabenanalyse. In: *Vol. 1768. VDI-Berichte, Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Anforderungen, Anwendungen, Aspekte für Mensch-Maschine-Systeme ; Tagung Braunschweig, 2. und 3. Juni 2003* (S. 197–213). Düsseldorf: VDI-Verl.

Fastenmeier, W., & Gstalter, H. (2007). Driving task analysis as a tool in traffic safety research and practice. *Safety Science, 45*(9), 952–979.

Fastenmeier, W. & Gstalter, H. (2008). Beitrag psychologischer Erkenntnisse und Methoden zur Bewertung von Fahrerassistenzsystemen (FAS). *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 62*(1), 15–24.

Fastenmeier, W., Hinderer, J., Lehning, U. & Gstalter, H. (2001). Analyse von Spurwechselvorgängen im Verkehr. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 55*(1), 15–23.

Filzek, B. (2003). *Abstandsverhalten auf Autobahnen - Fahrer und ACC im Vergleich*. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss (Als Ms. gedr). *Berichte aus dem Fachgebiet Fahrzeugtechnik der TU Darmstadt: Vol. 536*. Düsseldorf: VDI-Verl.

Fitch, G. M., Lee, S. E., Klauer, S., Hankey, J. M., Sudweeks, J., & Dingus, T. A. (2009). *Analysis of lane-change crashes and near-crashes*. Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.

Freed, M., Matessa, M., Remington, R., & Vera, A. (2003). How apex automates CPM-GOMS. *Proceedings of the fifth international conference on cognitive modeling.* Retrieved from http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download;jsessionid=01A7DA8FDB486359CB8D410C493F0985?doi=10.1.1.102.7780&rep=rep1&type=pdf

Freyer, J. (2008). *Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung des Spurwechselverhaltens von ACC*. Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2008 (1. Aufl.). *Audi-Dissertationsreihe: Vol. 9*. Göttingen: Cuvillier.

Frøkjær, E., & Hornbæk, K. (2008). Metaphors of human thinking for usability inspection and design. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction, 14*(4), 1–33.

Frommann, U. (2005). Die Methode "Lautes Denken". Abgerufen von https://www.e-teaching.org/didaktik/qualitaet/usability/Lautes%20Denken_e-teaching_org.pdf

Gallistel, C. R., & King, A. P. (2010). *Memory and the computational brain: Why cognitive science will transform neuroscience. Blackwell/Maryland lectures in language and cognition*. Chichester: Wiley-Blackwell.

Gediga, G. & Hamborg, K.-C. (2002). Evaluation in der Software-Ergonomie: Methoden und Modelle im Software-Entwicklungsprozess. *Zeitschrift für Psychologie / Journal of Psychology*, *210*(1), 40–57.

Gipps, P. G. (1986). A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological*, *20*(5), 403–414.

Grahn, J. A., Parkinson, J. A., & Owen, A. M. (2008). The cognitive functions of the caudate nucleus. *Progress in neurobiology*, *86*(3), 141–155.

Gray, W. D., John, B. E., & Atwood, M. E. (1993). Project Ernestine: Validating a GOMS analysis for predicting and explaining real-world task performance. *Human-computer interaction*, *8*(3), 237–309.

Green, P. (2003). Motor vehicle driver interfaces. In J. A. Jacko, & A. Sears (Eds.), *Human factors and ergonomics. The human-computer interaction handbook. Fundamentals, evolving technologies and emerging applications* (pp. 844–860). Mahwah, NJ: Erlbaum.

Guan, Z., Lee, S., Cuddihy, E., & Ramey, J. (2006). The validity of the stimulated retrospective think-aloud method as measured by eye tracking. In *Proceedings of the SIGCHI conference 2006* (pp. 1253–1262). doi:10.1145/1124772.1124961

Habenicht, S. (2012). *Entwicklung und Evaluation eines manöverbasierten Fahrstreifenwechselassistenten*. Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2012 (Als Ms. gedr). *FZD Fahrzeugtechnik TU Darmstadt: Jg. 756*. Düsseldorf: VDI-Verl.

Häder, M. (2015). *Empirische Sozialforschung: Eine Einführung* (3. Aufl.). Wiesbaden: Springer VS.

Halati, A., Lieu, H., & Walker, S. (1997). CORSIM-corridor traffic simulation model. *Proceedings of the Traffic Congestion and Traffic Safety in the 21st Century: Challenges, Innovations, and Opportunities*, 570–576. Retrieved from http://worldcat.org/isbn/0784402434

Harris, R. L. (2000). *Information graphics: A comprehensive illustrated reference*. Oxford: Oxford University Press.

Helbing, D. (1997). *Verkehrsdynamik: Neue physikalische Modellierungskonzepte*. Berlin: Springer.

Henning, M. J. (2010). *Preparation for lane change manoeuvres: Behavioural indicators and underlying cognitive processes* (Diss., Chemnitz, TU Chemnitz). Retrieved from http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/6027/data/Dissertation_MHenning.pdf

Henze, R., Bergholz, J. & Kücükay, F. (2009). Fahrerspezifische Adaption der Querführungsassistenz. In *VDI-Berichte: Vol. 2085. Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit ; 5. VDI-Tagung, Braunschweig, 4. und 5. November 2009* (S. 3–22). Düsseldorf: VDI-Verl.

Hertzum, M., Hansen, K. D., & Andersen, H. H. (2009). Scrutinising usability evaluation: Does thinking aloud affect behaviour and mental workload? *Behaviour & information technology*, *28*(2), 165–181.

Hetrick, S. (1997). *Examination of driver lane change behavior and the potential effectiveness of warning onset rules for lane change or "side" crash avoidance system.* (Diss., Virginia, Virginia Polytechnic Institute & State University). Retrieved from http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.331.2840&rep=rep1&type=pdf

Hiesgen, G. (2012). *Effiziente Entwicklung eines menschzentrierten Querführungsassistenzsystems mit einem Fahrsimulator* (Diss., Duisburg/Essen, Universität Duisburg-Essen). Abgerufen von http://duepublico.uni-duisburg-essen.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-29439/Hiesgen_Diss.pdf

Hoffmann, J. (1993). *Vorhersage und Erkenntnis: Die Funktion von Antizipationen in der menschlichen Verhaltenssteuerung und Wahrnehmung*. Göttingen: Hogrefe.

Hristov, B. (2009). *Untersuchung des Blickverhaltens von Kraftfahrern auf Autobahnen* (Diss., Dresden, TU Dresden). Abgerufen von http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/2770/Dissertation-B.Hristov.pdf

John, B., Vera, A., Matessa, M., Freed, M., & Remington, R. (2002). Automating CPM-GOMS. *CHI '02 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 147–154. doi:10.1145/503376.503404

John, B. E., & Gray, W. D. (1995). CPM-GOMS: an analysis method for tasks with parallel activities. In *CHI '95 Conference Companion on Human Factors in Computing Systems* (pp. 393–394). New York, NY: ACM press. doi:10.1145/223355.223738

John, B. E., & Kieras, D. E. (1996). The GOMS family of user interface analysis techniques: Comparison and contrast. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, *3*(4), 320–351.

Kihlstrom, J. F. (1984). Conscious, subconscious, unconscious: A cognitive perspective. In K. S. Bowers, & D. Meichenbaum (Eds.), *The Unconscious Reconsidered* (pp. 149–211). New York: Wiley.

Klar, R., Dauphin, P., Hartleb, F., Hofmann, R., Mohr, B., Quick, A. & Siegle, M. (1995). *Messung und Modellierung paralleler und verteilter Rechensysteme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Knappe, G., Keinath, A. & Meinecke, C. (2008). Die Sensitivität verschiedener Maße zur Fahrzeugquerregelung im Vergleich. In J. Schade & A. Engeln (Hrsg.), *Verkehrspsychologie. Fortschritte der Verkehrspsychologie. Beiträge vom 45. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie* (1. Aufl., S. 237–256). Wiesbaden: VS/ GWV.

Konrad, K. (2010). Lautes Denken. In G. Mey & K. Mruck (Hrsg.), *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie* (S. 476–490). Wiesbaden: Springer VS.

Kuhlmann, S., Altschaffel, R., Hoppe, T., Dittmann, J., & Neubüser, C. (2015). Evaluation of impacts of it-incidents on automotive safety with regard to supporting reaction strategies for the driver. In *Traffic safety through integrated technologies. 24th Enhanced Safety of Vehicles Conference 2015: Gothenburg, Sweden, 8-11 June 2015* (pp. 525–534). Red Hook, NY: Curran Associates Inc. Retrieved from https://www-esv.nhtsa.dot.gov/Proceedings/24/files/24ESV-000156.PDF

Lexikon der Neurowissenschaft (2000). *Kognition.* Abgerufen von http://www.spektrum.de/lexikon/neurowissenschaft/kognition/6572

Mansouri, F. A., Tanaka, K., & Buckley, M. J. (2009). Conflict-induced behavioural adjustment: a clue to the executive functions of the prefrontal cortex. *Nature reviews. Neuroscience*, *10*(2), 141–152.

Meinel, J. (2013). *Spezifische Effekte visueller und kognitiver Ablenkung bei der Kraftfahrzeugführung* (Diss., Berlin, Humboldt-Universität zu Berlin). Abgerufen von http://edoc.hu-berlin.de/dissertationen/meinel-jan-2012-10-19/PDF/meinel.pdf

MITRE Corporation. (2017). Cogulator: A Cognitive Calculator. Retrieved from http://cogulator.io/primer.html#OPERATORS

Neisser, U. (1967). *Cognitive psychology*. New York: Appleton-Century-Crofts.

Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving* (104th ed.). Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.

Nielsen, J. (1993). *Usability Engineering*. Boston, San Diego, New York: AP Professional.

Nielsen, J. (1994). Estimating the number of subjects needed for a thinking aloud test. *International journal of human-computer studies*, *41*(3), 385–397.

Nielsen, J. (2012). Thinking aloud: The #1 usability tool. Retrieved from https://www.nngroup.com/articles/thinking-aloud-the-1-usability-tool/

Nothdurft, F. & Schütte, W. (2010). Kurzanleitung für ELAN. Abgerufen von http://prowiki.ids-mannheim.de/pub/GAIS/TranskriptionEditoren/Kurzanleitung_fuer_ELAN.pdf

Olmsted-Hawala, E. L., Murphy, E. D., Hawala, S., & Ashenfelter, K. T. (2010). Think-aloud protocols: A comparison of three think-aloud protocols for use in testing data-dissemination web sites for usability. In *Chi'10 Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 2381–2390). ACM press. doi:10.1145/1753326.1753685

Olson, J. R., & Olson, G. M. (1990). The growth of cognitive modeling in human-computer interaction since GOMS. *Human–Computer Interaction*, *5*(2-3), 221–265.

Pampel, S. M., Jamson, S. L., Hibberd, D. L., & Barnard, Y. (2015). How I reduce fuel consumption: An experimental study on mental models of eco-driving. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *58*, 669–680. doi:10.1016/j.trc.2015.02.005

Richard, C. M., Campbell, J. L., & Brown, J. L. (2006). Using a task analysis to identify potential information processing bottlenecks in intersection driving scenarios. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, *50*(22), 2433–2437.

Risto, M., & Martens, M. H. (2013). Factors influencing compliance to tactical driver advice: An assessment using a think-aloud protocol. In *Intelligent Transportation Systems-(ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on. IEEE, 2013.* (pp. 1923–1928). doi:10.1109/ITSC.2013.6728510

Salvucci, D. D., & Lee, F. J. (2003). Simple cognitive modeling in a complex cognitive architecture. In *CHI '03 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 265–272). New York, NY: ACM press. doi:10.1145/642611.642658

Sandmann, A. (2014). Lautes Denken – die Analyse von Denk-, Lern- und Problemlöseprozessen. In D. Krüger, I. Parchmann & H. Schecker (Hrsg.), *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung* (S. 179–188). Berlin: Springer Spektrum. doi:10.1007/978-3-642-37827-0_15

Sarodnick, F. & Brau, H. (2006). *Methoden der Usability Evaluation: Wissenschaftliche Grundlagen und praktische Anwendung* (1. Aufl.). *Huber*. Bern: Huber.

Schade, J. & Engeln, A. (Hrsg.). (2008). *Fortschritte der Verkehrspsychologie: Beiträge vom 45. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie* (1. Aufl.). *Verkehrspsychologie*. Wiesbaden: VS/ GWV.

Schmidt, T. & Schütte, W. (2016). FOLKER Transkriptionseditor für das "Forschungs- und Lehrkorpus gesprochenes Deutsch" (FOLK): Transkriptionshandbuch. Abgerufen von http://agd.ids-mannheim.de/ download/FOLKER-Transkriptionshandbuch_preview.pdf

Schneider, J. H. (2010). *Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme* (Diss., Chemnitz, TU Chemnitz). Abgerufen von http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/6150/Diss_JSchneider.pdf

Sommer, K. C. (2012). *Vorausschauendes Fahren-Erfassung, Beschreibung und Bewertung von Antizipationsleistungen im Straßenverkehr* (Diss., München, Univers. Regensburg). Abgerufen von https://epub.uni-regensburg.de/28290/1/Dissertation_Kerstin_Sommer_Druck.pdf

Sparmann, U. (1978). *Spurwechselvorgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen* (Diss., Karlsruhe, Univers. Karlsruhe). Abgerufen von https://www.researchgate.net/publication/35426321_Spurwechselvorgange_auf_zweispurigen_BAB-Richtungsfahrbahnen

Sporrer, A., Prell, G., Buck, J. & Schaible, S. (1998). Realsimulation von Spurwechselvorgängen im Straßenverkehr. *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, *36*, 69–76. Abgerufen von http://worldcat.org/issn/07242050

Statistisches Bundesamt (2017). Verkehr: Verkehrsunfälle: Dezember 2016. Abgerufen von https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/TransportVerkehr/Verkehrsunfaelle/VerkehrsunfaelleMonat/VerkehrsunfaelleM2080700161124.pdf?__blob=publicationFile

Statistisches Bundesamt (Hrsg.). (2013). *Verkehr auf einen Blick*. Wiesbaden.

Tanida, K., & Pöppel, E. (2006). A hierarchical model of operational anticipation windows in driving an automobile. *Cognitive processing*, *7*(4), 275–287.

Tijerina, L., Garrott, W., Stoltzfus, D., & Parmer, E. (2005). Eye glance behavior of van and passenger car drivers during lane change decision phase. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *1937*, 37–43. doi:10.3141/1937-06

Van den Haak, Maaike J., De Jong, M. D. T., & Schellens, P. J. (2003). Retrospective vs. concurrent think-aloud protocols: Testing the usability of an online library catalogue. *Behaviour & information technology*, *22*(5), 339–351.

van der Hulst, M., Rothengatter, T., & Meijman, T. (1998). Strategic adaptations to lack of preview in driving. In *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* (1st ed., pp. 59–75). Retrieved from http://worldcat.org/issn/13698478

van Someren, M. W., Barnard, Y. F. & Sandberg, J. A. C. (1994). *The think aloud method: A practical guide to modelling cognitive processes*. London: Academic Press.

van Winsum, W., de Waard, D., & Brookhuis, K. (1999). Lane change manoeuvres and safety margins. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *2*(3), 139–149.

Velichkovsky, B. M., Rothert, A., Kopf, M., Dornhöfer, S. M., & Joos, M. (2002). Towards an express-diagnostics for level of processing and hazard perception. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, *5*(2), 145–156.

Volk, F. (2017). Audi erforscht Zeitnutzung im Roboterauto. Abgerufen von https://www.automobil-produktion.de/technik-produktion/forschung-entwicklung/audi-erforscht-zeitnutzung-im-roboterauto-217.html

Walker, G. H., Stanton, N. A., & Young, M. S. (2001). Hierarchical task analysis of driving: A new research tool. *Contemporary ergonomics*, 435–440.

Wallis, J. D., Anderson, K. C., & Miller, E. K. (2001). Single neurons in prefrontal cortex encode abstract rules. *Nature*, *411*(6840), 953–956.

Wandmacher, J. (1993). *Software-Ergonomie*. *Mensch - Computer - Kommunikation Grundwissen: Vol. 2*. Berlin: de Gruyter.

Ward, P., Hancock, P. A., Ganey, H. C. N., & Szalma, J. L. (2003). Naturalistic Driving: User and Task Analysis. In *Proceedings of the Second International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design* (pp. 70–72). Retrieved from http://sciences.ucf.edu/psychology/perl/wp-content/uploads/sites/99/2013/01/Ward_Hancock_Ganey_S_2003-Naturalistic-driving_user-task-analysis.pdf

Widyanti, A., Johnson, A., & de Waard, D. (2013). Adaptation of the rating scale mental effort (RSME) for use in Indonesia. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *43*(1), 70–76.

Zhao, T., McDonald, S., & Edwards, H. M. (2014). The impact of two different think-aloud instructions in a usability test: A case of just following orders? *Behaviour & information technology*, *33*(2), 163–183.

Anhangsverzeichnis

A Informationen zum Versuch x

B Online-Befragung xiii

C Instruktion zum Lauten Denken xvi

D Darstellung kognitiver Operatoren und Ziele xvii

E Statistiken und Tabellen xxvi

Anhang

A Informationen zum Versuch

Institut für Verkehrssystemtechnik

Deckblatt

DriveGOMS2

VP-Code _____

(1) Die ersten beiden Ziffern des eigenen Geburtstages (z. B. 08)

(2) Den ersten Buchstaben des eigenen Vornamens

(3) Den ersten Buchstaben des Geburtsortes

VP-Nummer _____

Datum _____

Versuchsbeginn _____

Versuchsende _____

Versuchsleiter _____

Abbildung A.1. Deckblatt zur Versuchsinstruktion.

Institut für Verkehrssystemtechnik

Instruktion

Versuchsablauf

Sehr geehrte Teilnehmerin, sehr geehrter Teilnehmer,

vielen Dank, dass Sie an unserer heutigen Studie teilnehmen. Zunächst ein paar kurze Informationen zu dem Simulator, in dem Sie gleich fahren werden:

Es handelt sich dabei um das Virtual Reality Labor. Dabei werden Projektionen erzeugt, die einen realitätsnahen Eindruck virtueller Szenarien erzeugen, sodass ein realistisches Fahrerleben entsteht. In diesem Virtual Reality Labor befindet sich ein Auto, mit dem Sie heute fahren. Das Auto hat ein Automatikgetriebe. Sie können normal Gas geben, Bremsen, Lenken und Blinken.

Wir wollen heute Ihr Fahrverhalten auf Autobahnen untersuchen. Es geht uns dabei besonders um Spurwechsel, aber auch um andere Aspekte des Fahrverhaltens. Im Versuch fahren Sie sowohl etwas künstlichere als auch etwas realistischere Verkehrsszenarien auf einer zweispurigen Autobahn. Ihre Aufgabe besteht darin, ganz normal zu fahren. Welche Geschwindigkeiten Sie fahren sollen, sagt Ihnen der Versuchsleiter zu Beginn der verschiedenen Abschnitte.

Wichtig: Halten Sie sich bitte an die allgemeinen Verkehrsregeln. Wenn Sie überholen, wechseln Sie bitte wieder zurück auf die rechte Spur, wenn sich die Gelegenheit dazu ergibt.

Neben den Daten, die die Verkehrssimulation selbst liefert, zeichnen wir Video- und Sensordaten sowie Ihre Blick- und Kopfbewegungen auf. Die Daten werden anonymisiert und ausschließlich zu wissenschaftlichen Zwecken ausgewertet. Lassen Sie sich bitte von der Datenaufzeichnung nicht irritieren und reagieren Sie stets so, wie Sie meinen, dass es richtig ist!

Manche Probanden erleben Schwindelgefühle oder sogar Übelkeit während der Versuchsfahrt. Sobald Sie so etwas bemerken, sagen Sie bitte sofort dem Versuchsleiter Bescheid. Falls notwendig, halten Sie unbedingt an!

Abbildung A.2. Instruktion zum Versuchsablauf (Teil 1).

Institut für Verkehrssystemtechnik

Instruktion

Versuchsablauf

Sicherheit im Simulator

Im Fahrzeug sind verschiedene Sensoren verbaut, ebenso wie zahlreiche Kabel. Bewegen Sie sich im Fahrzeug daher bitte besonders vorsichtig.

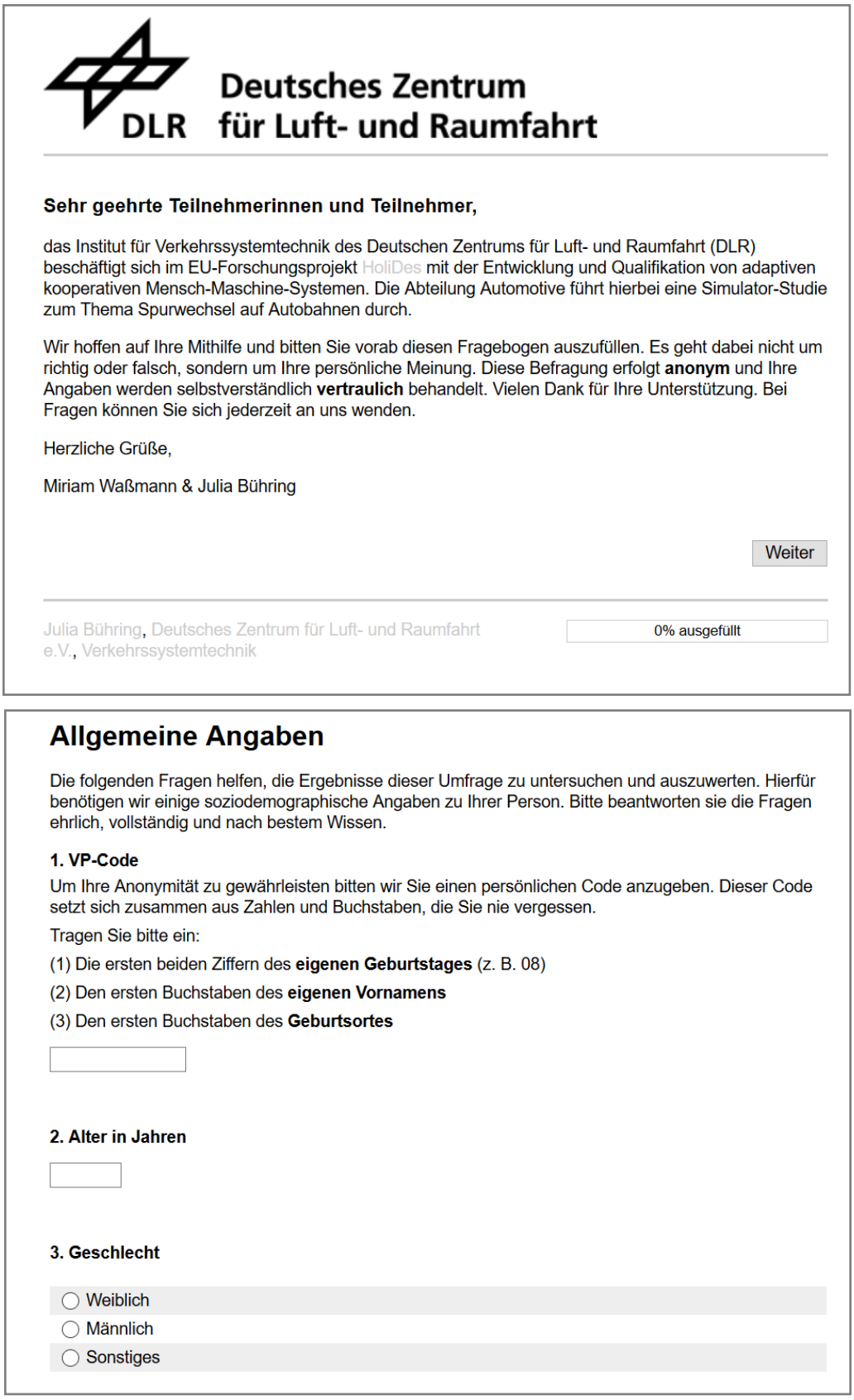
- Zur Kommunikation mit dem Studienleiter sind hier im Simulator-Innenraum ein Mikrofon und Lautsprecher verbaut. So können Sie jederzeit mit dem Studienleiter in Verbindung treten.
- Ebenso gibt es Kameras im Fahrzeuginnenraum und außen. So kann der Versuchsleiter schnell feststellen, ob es möglicherweise Probleme gibt.
- Im Fahrzeug selbst sind aktive Stellteile verbaut. Das bedeutet, dass hinter dem Lenkrad und den Pedalen Motoren verbaut sind, um Kräfte auf diese Stellteile geben zu können. Fassen Sie nicht mit der Hand durchs Lenkrad, und stellen Sie Ihre Füße nicht unter die Pedalen. Fassen Sie das Lenkrad erst an, wenn der Versuchsleiter Sie zum Losfahren auffordert.

Ablauf

1. Gesamtdauer der Studie ist voraussichtlich 1,5 Stunden.
2. Ausfüllen und Unterschreiben der notwendigen Formulare
3. Informationen zum Versuch
4. Kalibrierung des Blickerfassungssystems
5. 10 minütiges Training zur Gewöhnung an den Simulator
6. Versuchsfahrten verschiedener Länge
7. Aufwandsentschädigung von 25 €

Abbildung A.3. Instruktion zum Versuchsablauf (Teil 2).

B Online-Befragung



DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Sehr geehrte Teilnehmerinnen und Teilnehmer,

das Institut für Verkehrssystemtechnik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) beschäftigt sich im EU-Forschungsprojekt HoliDes mit der Entwicklung und Qualifikation von adaptiven kooperativen Mensch-Maschine-Systemen. Die Abteilung Automotive führt hierbei eine Simulator-Studie zum Thema Spurwechsel auf Autobahnen durch.

Wir hoffen auf Ihre Mithilfe und bitten Sie vorab diesen Fragebogen auszufüllen. Es geht dabei nicht um richtig oder falsch, sondern um Ihre persönliche Meinung. Diese Befragung erfolgt **anonym** und Ihre Angaben werden selbstverständlich **vertraulich** behandelt. Vielen Dank für Ihre Unterstützung. Bei Fragen können Sie sich jederzeit an uns wenden.

Herzliche Grüße,

Miriam Waßmann & Julia Bühring

Weiter

Julia Bühring, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Verkehrssystemtechnik

0% ausgefüllt

Allgemeine Angaben

Die folgenden Fragen helfen, die Ergebnisse dieser Umfrage zu untersuchen und auszuwerten. Hierfür benötigen wir einige soziodemographische Angaben zu Ihrer Person. Bitte beantworten sie die Fragen ehrlich, vollständig und nach bestem Wissen.

1. VP-Code

Um Ihre Anonymität zu gewährleisten bitten wir Sie einen persönlichen Code anzugeben. Dieser Code setzt sich zusammen aus Zahlen und Buchstaben, die Sie nie vergessen.

Tragen Sie bitte ein:

(1) Die ersten beiden Ziffern des **eigenen Geburtstages** (z. B. 08)

(2) Den ersten Buchstaben des **eigenen Vornamens**

(3) Den ersten Buchstaben des **Geburtsortes**

2. Alter in Jahren

3. Geschlecht

- Weiblich
- Männlich
- Sonstiges

Abbildung B.1. Online-Fragebogen zur Studie DriveGOMS2.

4. Höchster (Hoch-) Schulabschluss

- ◯ Volks-, Hauptschulabschluss, Quali
- ◯ Mittlere Reife, Realschul- oder gleichwertiger Abschluss
- ◯ Abgeschlossene Lehre
- ◯ Fachabitur, Fachhochschulreife
- ◯ Abitur, Hochschulreife
- ◯ Fachhochschul-/Hochschulabschluss
- ◯ Andere, und zwar: [ ]

5. Beruf

[ ]

6. Tragen Sie eine Sehhilfe? Wenn ja, welche?

- ☐ Keine
- ☐ Brille
- ☐ Kontaktlinsen
- ☐ Sonstiges: [ ]

Zurück | Weiter

Julia Bühring, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Verkehrssystemtechnik — 33% ausgefüllt

Fahrbezogene Angaben

Dieser Abschnitt bezieht sich auf Ihr bisheriges Fahrverhalten. Bitte kreuzen Sie stets die Antwortoption an, die am besten auf Sie persönlich zutrifft.

Nur wenn Sie eine Frage tatsächlich nicht beantworten können (z. B. weil Sie keinen Führerschein besitzen), oder die Antwort nicht wissen, können Sie die Option „keine Angabe“ ankreuzen.

7. Besitzen Sie einen Führerschein der Klasse B?

- ◯ Ja, seit: [ ]
- ◯ Nein

8. Wie viele Kilometer fahren Sie durchschnittlich im Jahr?

Wenn Sie in einer Woche ca. 20km (z.B. zum Einkaufen) fahren, ergibt das im Jahr 1040km.

Wenn Sie in einer Woche ca. 800km (z.B. zur Arbeit) fahren, ergibt das im Jahr 41600km.

[ ] km

9. Wie regelmäßig sind Sie im letzten halben Jahr mit dem Auto gefahren?

- ◯ mehrmals täglich
- ◯ täglich
- ◯ wöchentlich
- ◯ monatlich
- ◯ nie
- ◯ Sonstiges: [ ]

Abbildung B.2. Online-Fragebogen zur Studie DriveGOMS2.

10. Typischerweise fahre ich ...

- [ ] % Landstraße
- [ ] % Autobahn
- [ ] % Stadt

11. Mit welcher Geschwindigkeit würden Sie auf einer freien Autobahn fahren?

- ○ 100-120 km/h
- ○ 120-140 km/h
- ○ 140-160 km/h
- ○ 160-180 km/h
- ○ 180-200 km/h
- ○ Sonstiges: [ ]

12. Im Folgenden interessieren wir uns für Ihre individuelle Meinung bezogen auf das Fahren auf Autobahnen.

	trifft überhaupt nicht zu				trifft voll und ganz zu
Ich fühle mich beim Fahren auf der Autobahn unwohl.	○	○	○	○	○
Ich habe Spaß am Autobahnfahren.	○	○	○	○	○
Ich habe einen dynamischen Fahrstil beim Fahren auf der Autobahn.	○	○	○	○	○

13. Haben Sie schon an einer Simulator-Studie teilgenommen?

- [ ] Ja
- [ ] Nein
- [ ] Keine Angabe

Zurück Weiter

Julia Bühring, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Verkehrssystemtechnik

67% ausgefüllt

Danke für Ihre Teilnahme!

Wir möchten uns ganz herzlich für Ihre Mithilfe bedanken.

Fenster schließen

Julia Bühring, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Verkehrssystemtechnik

Abbildung B.3. Online-Fragebogen zur Studie DriveGOMS2.

C Instruktion zum Lauten Denken

Institut für Verkehrssystemtechnik

Instruktion

Lautes Denken

Im zweiten Teil des Versuchs sollen Sie während der Fahraufgabe „laut denken“. Lautes Denken bedeutet, dass Sie alles was Sie tun und denken laut aussprechen. Das Sprechen über Absichten, Empfindungen und Gedankengänge ist für uns genauso relevant wie die Fahraufgabe selbst. Sie werden dazu im Fahrsimulator wieder nacheinander einzelne Autobahnabschnitte entlang fahren. Vor dem eigentlichen Versuch haben Sie die Möglichkeit eine Testfahrt zu machen. Während dieser Probefahrt können Sie sich schon mal an das laute Denken gewöhnen.

Im folgenden Video sehen Sie die Anwendung der Thinking Aloud Technik am Beispiel „Kaffee kochen“. Die Person in dem Video wurde instruiert Kaffee zu kochen und dabei laut zu denken. Sie sollen diese Technik im Simulator beim Fahren auf der Autobahn anwenden. Stellen Sie sich dazu vor, Sie erzählen einem neugierigen Kind, ganz genau, was Sie gerade tun und warum Sie tun, was Sie tun. Es geht hierbei um Ihr Verständnis über die Spurwechselaufgabe, also was alles beim Spurwechsel relevant ist, wann und warum Sie sich für einen Spurwechsel entscheiden, was nötig ist um den Spurwechsel durchzuführen und was Ihre Gedanken während der einzelnen Tätigkeiten sind.

Die wichtigsten Punkte:

1. Wir möchten wissen, was Sie denken, während Sie fahren.
2. Erzählen Sie uns alles, was Sie in Bezug auf die aktuelle Fahrsituation denken.
3. Stellen Sie sich dazu vor, Sie erzählen das einem neugierigen Kind, das ganz genau wissen möchte, was Sie gerade tun.

Wenn Sie über längere Zeit still sind (also so 15 Sekunden) werden Sie an das weiterreden mit den Worten „Bitte reden Sie weiter“ erinnert. Wenn Sie noch Fragen haben können Sie diese jetzt, nach der Probefahrt oder nach dem Versuch stellen. Während des Versuchs kann es jedoch sein, dass diese nicht direkt beantwortet werden.

Beispielsätze: Sie könnten zum Beispiel etwas sagen wie:

„Ich werde jetzt stark beschleunigen“

„Schaffe ich es noch rechtzeitig rüber zu ziehen?“

„Ständig ist die Spur belegt und ich finde keine Lücke.“

„Durch das schnelle Auto nach mir bin ich verunsichert!“

„Warum der vor mir so langsam fährt ist mir ein Rätsel.“

„Wenn ich jetzt blinke, weiß jeder das ich rüber ziehen will“

„Wo ist eigentlich…“

„…jetzt überlege ich gerade, wie…“

„Den lass ich noch durch, weil…“

„Ich überprüfe jetzt noch…“

Abbildung C. Instruktion zum Lauten Denken.

D Darstellung kognitiver Operatoren und Ziele

Tabelle D.1

Operatoren der Gedächtnisprozesse (G) und Beispielaussagen während des TA

Prozess	Index	Operator	Beispielaussagen
Abruf von Informationen aus dem LZG	G_{1R}	Erinnern von Regeln	„wegen des Rechtsfahrgebotes“, „eigentlich muss ich wieder nach rechts rüber“, „auch wenn es erlaubt wäre“, „die Geschwindigkeit muss bei 120 km/h bleiben“, „sodass ich bei der Richtgeschwindigkeit 120 km/h bin“, „das habe ich in der Fahrschule gelernt“; „es ist nicht verboten von rechts zu überholen“ bei Stau
	G_{1P}	Erinnern von Prozeduren	„den Schulterblick habe ich jetzt vergessen“
Einlesen von Informationen ins AG	G_{2P}	Phonologische Schleife	„z. B. die Motorbremse“
Abruf von Inhalten aus dem AG	G_{3P}	Phonologisch	„sieht wie ein Corsa aus“, „der VW kommt aus äh, München“, „jetzt wiederholt sich, glaube ich, dieselbe Situation“
	G_{3Z}	Zeitlich-räumlich	„ich weiß es gerade nicht“, „das Fahrzeug war schon immer vor/hinter mir“, „sie fahren langsamer/schneller als am Anfang“ nach Erinnern der Verkehrslage auf der linken/rechten Spur

Tabelle D.2

Operatoren der Gedächtnisprozesse und ihre Beschreibungen (in Anlehnung an Fastenmeier & Gstalter, 2002)

Operator	Beschreibung
G_{1R}	Abruf einer Regel aus dem LZG (z. B. beim Spurwechsel ist zu blinken)
G_{1P}	Abruf einer Prozedur aus dem LZG (z. B. Wie wird beim Spurwechselprozess mit anderen Verkehrsteilnehmern interagiert?)
G_{2P}	Einlesen und Behalten einer Information im AG (z. B. Memorieren der Reihenfolge von Aktionen beim Spurwechsel)
G_{3P}	Abruf einer Information aus dem AG (phonologisch) (z. B. Wie hieß die Ausfahrt, bei der ich abfahren muss?)
G_{3Z}	Abruf einer Information aus dem AG (zeitlich-räumlich) (z. B. Erinnern der vorderen/hinteren Verkehrslage kurz vor dem Ausscheren auf die Zielspur)

Tabelle D.3

Operatoren der Entscheidungen (E) und Beispielaussagen während des TA

Index	Operator	Beispielaussagen
$E_{1EGü}$	Entscheiden absolute Geschwindigkeit zu überprüfen	„und dabei muss ich immer auf meine Geschwindigkeit achten“, „ich gucke erstmal aufs Tacho“, „ich kontrolliere die Geschwindigkeit“
E_{1Br}	Entscheiden zu bremsen	„ich bremse/trete auf die Bremse“
E_{1Ve}	Entscheiden zu verlangsamen	„ich muss langsamer werden“, „ich gehe vom Gas“
E_{1Be}	Entscheiden zu beschleunigen	„ich werde Gas geben/versuche Gas zu geben“, „deswegen kann ich auch beschleunigen“, „ich beschleunige (etwas/jetzt auf…km/h)“, „ich kann auf …km/h gehen, was ich jetzt auch mache“, bei der Aussage „ich muss meine Geschwindigkeit anpassen“ und anschließender Beschleunigung
E_{1EGb}	Entscheiden Geschwindigkeit beizubehalten	„also bleibe ich lieber bei 115 km/h“
E_{1EGe}	Entscheiden Geschwindigkeit einzuhalten	„versuche die 120km/h zu halten“, „damit ich dabei bleibe“
E_{2B}	Entscheiden zu blinken	„ich blinke (wieder)“, „ich drücke den Blinker“
E_{2Ba}	Entscheiden Blinker auszuschalten	„ich mache den Blinker wieder aus“
E_{3L}	Entscheiden zu lenken	„ich fahre/lenke auf die rechte/linke Spur“
E_{3Z}	Entscheiden zurückzulenken	„ich mache das Lenkrad wieder gerade“, „ich drehe das Lenkrad wieder zurück/nach links/rechts“
E_{4W}	Entscheiden Spur zu wechseln	„ich werde/möchte/fahre die Spur wechseln/nach links/rechts rüber/ein/ausscheren/rüberfahren“
$E_{4Ü}$	Entscheiden zu überholen	„ich werde/möchte/kann überholen/vorbei fahren“
E_{4H}	Entscheiden Spur zu halten	„Spurwechsel geht gerade nicht/wäre nicht sinnvoll“, „ich bleibe auf der Spur“
E_{4F}	Entscheiden zu folgen	„ich fahre jetzt dem Fahrzeug hinterher“, „ich folge dem Fahrzeug vor mir“
E_{5SB}	Entscheiden Schulterblick auszuführen	„ich mache einen Schulterblick“
E_{5SSB}	Entscheiden Seitenspiegelblick auszuführen	„ich gucke in den Seitenspiegel“
E_{5RSB}	Entscheiden Rückspiegelblick auszuführen	„ich gucke in den Rückspiegel“, „ich habe den Rückspiegel im Blick“
E_{5SFB}	Entscheiden Seitenfensterblick auszuführen	„ich gucke nach links/rechts“
E_{6Vb}	Entscheiden vorderes/n Fahrzeug/Verkehr zu beobachten	„ich behalte das Fahrzeug vor mir im Blick“, „ich beobachte/sehe das Fahrzeug vor mir“, „ich konzentriere mich wieder auf das Fahrzeug vor mir“
E_{6Sb}	Entscheiden seitliches/n Fahrzeug/Verkehr zu beobachten	„ich beobachte die linke Spur“
E_{6Hb}	Entscheiden hinteres/n Fahrzeug/Verkehr zu beobachten	„ich gucke, was hinter mir los ist“
E_{7HAb}	Entscheiden Abstand zum hinteren Fahrzeug zu bewerten	„um noch vor dem Mini (einzuscheren)…“

Tabelle D.4

Operatoren der Entscheidungen und ihre Einsatzregelungen (in Anlehnung an Andree, 2015)

Index	Einsatzregelung
$E_{1EGü}$	Vor dem Überprüfen der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs
E_{1Br}	Vor der Betätigung des Bremspedals
E_{1Ve}	Vor Druckabnahme vom Gaspedal
E_{1Be}	Vor der Betätigung des Gaspedals
E_{1EGb}	Vor gleichmäßigen Druck auf Gaspedal halten
E_{1EGe}	Nach dem Erinnern der Regel „Richtgeschwindigkeit einhalten“
E_{2B}	Vor der Betätigung des Blinkers
E_{2Ba}	Vor dem Zurückbewegen des Blinkers
E_{3L}	Vor dem Einschlagen des Lenkrads
E_{3Z}	Vor dem Zurückdrehen des Lenkrads
E_{4W}	Vor dem Spurwechsel
$E_{4Ü}$	Vor dem Überholen
E_{4H}	Vor/während des Spurhaltens
E_{4F}	Vor/während des Folgens des Vorderfahrzeugs
E_{5SB}	Vor dem Schulterblick
E_{5SSB}	Vor dem Seitenspiegelblick
E_{5RSB}	Vor dem Rückspiegelblick
E_{5SFB}	Vor dem Seitenfensterblick
E_{6Vb}	Vor/während des Frontscheibenblicks
E_{6Sb}	Vor/während des Seitenspiegel-, Seitenfensterblicks
E_{6Hb}	Vor/während des Rückspiegelblicks
E_{7HAb}	Vor dem Bewerten des Abstands zum hinteren Fahrzeug

Tabelle D.5

Operatoren der Überprüfungen (Ü) und Beispielaussagen während des TA

Index	Operator	Beispielaussagen
$Ü_{1EG}$	Absolute Geschwindigkeit überprüfen	„ich gucke auf meine Geschwindigkeit“, ich fahre/bin bei …km/h“
$Ü_{1VG}$	Geschwindigkeit des vorderen Fahrzeugs überprüfen	„der LKW da vorne fährt eh langsam“
$Ü_{2EP}$	Position des Ego-Fahrzeugs überprüfen	„jetzt muss ich aufpassen, dass ich hier in der Mitte der Spur bleibe“
$Ü_{3VS}$	Spurbelegung des vorderen Fahrzeugs/Verkehrs überprüfen	„um zu gucken wie viele Autos vor mir sind/wie die Lage aussieht“, „ich sehe dass ein Fahrzeug vor mir/einem anderen Fahrzeug nach/von rechts/links ein-/ausschert“
$Ü_{3SS}$	Spurbelegung des seitlichen Fahrzeugs/Verkehrs überprüfen	„ich warte, dass/bis ich das Fahrzeug im Seitenspiegel sehe“, „ich kontrolliere“ während dessen aus dem Seitenfenster und/oder in den Seitenspiegel geschaut wurde
$Ü_{3HS}$	Spurbelegung des hinteren Fahrzeugs/Verkehrs überprüfen	„um zu gucken, wie viele Autos hinter mir sind“
$Ü_{4SA}$	Abstand zum seitlichen Fahrzeug/Verkehr überprüfen	„ob das (seitliche) Fahrzeug (neben mir) weit genug entfernt ist“
$Ü_{4HA}$	Abstand zum hinteren Fahrzeug/Verkehr überprüfen	„ich überprüfe/schaue, ob der Abstand zum hinteren Verkehr groß genug/in Ordnung ist“
$Ü_{5SF}$	Fahrverhalten des seitlichen Fahrzeugs überprüfen	„sieht er das auch rechtzeitig“
$Ü_{6Lü}$	Lückengröße für eventuellen Spurwechsel überprüfen	„oha, vor dem LKW ist jetzt eine Lücke frei geworden“

Tabelle D.6

Operatoren der Überprüfungen und ihre Beschreibungen

Operator	Beschreibung
$Ü_{1EG}$	Ist-Soll-Vergleich der angezeigten Geschwindigkeit bei Blick auf den Tachometer
$Ü_{1VG}$	Ist-Soll-Vergleich der eigenen Geschwindigkeit mit Geschwindigkeit des vorderen Fahrzeugs bei Blick auf den Tachometer
$Ü_{2EP}$	Ist-Soll-Vergleich der Querlage des Ego-Fahrzeugs
$Ü_{3VS}$	Ist-Soll-Vergleich der Lage der Fahrzeuge auf der vorderen Spur bei Blick durch die Frontscheibe
$Ü_{3SS}$	Ist-Soll-Vergleich der Lage der Fahrzeuge auf der seitlichen Spur bei Seitenspiegel-, Seitenfenster- oder Schulterblick
$Ü_{3HS}$	Ist-Soll-Vergleich der Lage der Fahrzeuge auf der hinteren Spur bei Rückspiegel- oder Schulterblick
$Ü_{4SA}$	Ist-Soll-Vergleich des Abstandes zu seitlichen Fahrzeugen bei Seitenfensterblick
$Ü_{4HA}$	Ist-Soll-Vergleich des Abstandes zu hinteren Fahrzeugen bei Rückspiegelblick
$Ü_{5SF}$	Ist-Soll-Vergleich des Fahrverhaltens des seitlichen Fahrzeugs mit vorherigem, eigenem Fahrverhalten oder Fahrverhalten anderer Fahrzeuge bei Seitenspiegelblick
$Ü_{6Lü}$	Ist-Soll-Vergleich der vorherigen und aktuellen Spurbelegung des seitlichen Verkehrs bei Frontscheiben-, oder Seitenspiegelblick

Tabelle D.7

Operatoren der Bewertungen (B) und Beispielaussagen während des TA (Teil 1)

Index	Operator	Beispielaussagen
B_{1EP}	Bewegungsbahn/Position des Ego-Fahrzeugs bewerten	„und dann überhole ich den“, „das war zu weit rechts/links“
B_{1VP}	Bewegungsbahn/Position des vorderen Fahrzeugs/Verkehrs bewerten	„das vordere Fahrzeug bleibt auf seiner Spur“, „das vordere Fahrzeug fährt wieder rechts/links auf die Spur“, das vordere Fahrzeug ist jetzt vorbei“, „das vordere Fahrzeug fährt ein bisschen weit nach rechts links“
B_{1SP}	Bewegungsbahn/Position des seitlichen Fahrzeugs/Verkehrs bewerten	„das seitliche Fahrzeug überholt mich“, „das seitliche Fahrzeug hat mich überholt“, „links/rechts von mir fährt ein Fahrzeug vorbei“, „jetzt ist es vorbei“
$B_{2Lü}$	Lückengröße für eventuellen Spurwechsel bewerten	„das ist noch Platz/kein Platz“, „die Lücke ist groß genug/zu klein“, „das schaffe ich vorher noch“ und „es lohnt sich/lohnt sich nicht die Spur zu wechseln“; wenn nach der Spurwechselentscheidung die Aussage „auf der linken/rechten Spur ist ein Fahrzeug gekommen“; bei der Aussage „ich sehe, dass mich das Fahrzeug von hinten überholt, deswegen kann ich nicht überholen“
B_{3VA}	Abstand zum vorderen Fahrzeug/Verkehr bewerten	„vorderes Fahrzeug/Verkehr ist nah dran/weit entfernt“ „der Abstand zum vorderen Fahrzeug/Verkehr ist groß genug/zu klein, „ich fahre wieder nah auf das Auto auf“
B_{3SA}	Abstand zum seitlichen Fahrzeug/Verkehr bewerten	„das Fahrzeug kommt herangefahren“„ das (seitliche) Fahrzeug ist nah dran/(noch) weit weg“, „mit genug Platz überhole ich“; bei der Aussage „das war knapp“ beim/ Überholen des Fahrzeugs, „aber noch völlig in Ordnung"
B_{3HA}	Abstand zum hinteren Fahrzeug/Verkehr bewerten	„hinteres Fahrzeug/Verkehr ist nah dran/weit entfernt/weg“, „der Abstand zum hinteres Fahrzeug/Verkehr ist groß genug/zu klein; wenn Aussage „das passt alles/alles in Ordnung“ nach Spiegelkontrolle und/oder Schulterblick erfolgt
B_{4VS}	Spurbelegung des vorderen Fahrzeugs/Verkehrs bewerten	„ich sehe vor mir (kein/e) Fahrzeug/e“, „da kommt/kommen ein/ mehrere Fahrzeug/e“, „auf der rechten/linken Seite vor/ hinter dem Fahrzeug ist ein Weiteres“
B_{4SS}	Spurbelegung des seitlichen Fahrzeugs/Verkehrs bewerten	„ich sehe neben mir (im Seitenspiegel) (kein/e) Fahrzeug/e“, „da kommt/kommen ein/ mehrere Fahrzeug/e (von der linken Seite) (herangefahren)“
B_{4HS}	Spurbelegung des hinteren Fahrzeugs/Verkehrs bewerten	„ich sehe hinter mir (im Rückspiegel) (kein/e) Fahrzeug/e“, „da kommt/kommen ein/ mehrere Fahrzeug/e“
B_{5VF}	Fahrverhalten des vorderen Fahrzeugs/Verkehrs bewerten	„jetzt macht der Vordere das“
B_{5SF}	Fahrverhalten des seitlichen Fahrzeugs/Verkehrs bewerten	„das (seitliche) Fahrzeug macht auch nichts“
B_{5HF}	Fahrverhalten des hinteren Fahrzeugs/Verkehrs bewerten	„die Fahrzeuge folgen“
B_{6EG}	Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs bewerten	„ich bin zu schnell/langsam/im Rahmen/keine Verände-rung“, „meine Geschwindigkeit passt/ist in Ordnung…“
B_{6VG}	Geschwindigkeit des vorderen Fahrzeugs/Verkehrs bewerten	„Fahrzeug kommt mir langsam/schnell vor“, „der Verkehr rollt auf der rechten/linken Spur schneller/langsamer“, auf der rechten/linken Spur bin ich schneller/langsamer“

Tabelle D.8

Operatoren der Bewertungen (B) und Beispielaussagen während des TA (Teil 2)

Index	Operator	Beispielaussagen
B_{6SG}	Geschwindigkeit des seitlichen Fahrzeugs/Verkehrs bewerten	„Das (seitliche) Fahrzeug (rechts/links neben mir) wirkt/fährt/ist schnell/langsam“
B_{6HG}	Geschwindigkeit des hinteren Fahrzeugs/Verkehrs bewerten	„ich sehe jetzt, dass der Citroen (hinter mir) aber nicht viel schneller fahren möchte“, „außerdem könnte der Opel (hinter mir) sowieso nicht viel schneller fahren“
B_{7S}	Situation bewerten	„Sonst tut sich gerade nichts“, „alles unverändert“, „es ist alles gut/nicht so gut“, „das geht auch“, „es hat sich entspannt“, „das hat auf mich keinen Einfluss“
B_{8V}	Verkehrsfülle bewerten	„bisschen voller dieser Autobahnabschnitt“

Tabelle D.9

Operatoren der Bewertungen und ihre Beschreibungen

Index	Beschreibung
B_{1EP}	Beurteilen, wo sich Ego-Fahrzeug befindet bzw. hinbewegt, nach Umgebungsbeobachtung
B_{1VP}	Beurteilen, wo sich vorderes Fahrzeug befindet bzw. hinbewegt, nach Frontscheibenblick
B_{1SP}	Beurteilen, wo sich seitliches Fahrzeug befindet bzw. hinbewegt, nach Seitenspiegelblick
$B_{2Lü}$	Beurteilen, ob Lücke der Zielspur groß genug ist, bzw. sich dort Fahrzeuge befinden, nach Seitenspiegelblick
B_{3VA}	Beurteilen, ob Abstand zu groß/groß genug/zu klein ist, nach Frontscheibenblick
B_{3SA}	Beurteilen, ob Abstand zu groß/groß genug/zu klein ist, nach Seitenspiegelblick
B_{3HA}	Beurteilen, ob Abstand zu groß/groß genug/zu klein ist, nach Blick in den Rückspiegelblick
B_{4VS}	Beurteilen der Lage der Fahrzeuge auf der vorderen Spur nach Frontscheibenblick
B_{4SS}	Beurteilen der Lage der Fahrzeuge auf der seitlichen Spur nach Seitenspiegel-, Seitenfenster- oder Schulterblick
B_{4HS}	Beurteilen der Lage der Fahrzeuge auf der hinteren Spur nach Rückspiegel- oder Schulterblick
B_{5VF}	Beurteilen des Fahrverhaltens des Vorderfahrzeugs mit vorherigem, eigenem Fahrverhalten oder Fahrverhalten anderer Fahrzeuge nach Frontscheiben- oder Seitenspiegelblick
B_{5SF}	Beurteilen des Fahrverhaltens des seitlichen Fahrzeugs mit vorherigem, eigenem Fahrverhalten oder Fahrverhalten anderer Fahrzeuge nach Seitenspiegelblick
B_{5HF}	Beurteilen des Fahrverhaltens des hinteren Fahrzeugs mit vorherigem, eigenem Fahrverhalten oder Fahrverhalten anderer Fahrzeuge nach Rückspiegelblick
B_{6EG}	Beurteilen der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs nach Blick auf den Tachometer
B_{6VG}	Beurteilen der eigenen mit Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs nach Tachometerblick
B_{6SG}	Beurteilen der eigenen mit Geschwindigkeit des seitlichen Fahrzeugs nach Tachometerblick
B_{6HG}	Beurteilen der eigenen mit Geschwindigkeit des hinteren Fahrzeugs nach Tachometerblick
B_{7S}	Beurteilen von schwierigen, aufmerksamkeitsfordernden oder riskanten Situationen
B_{8V}	Beurteilen der Menge und Verteilung anderer Verkehrsteilnehmer

Tabelle D.10

Operatoren der Antizipationen (A) und Beispielaussagen während des TA

Index	Operator	Beispielaussagen
A_{1Vw}	Antizipieren, dass vorderes Fahrzeug/Verkehr die Spur wechselt (nach rechts/ links)	„das vordere Fahrzeug wird die Spur wechseln“, „will das Fahrzeug nach rechts/links fahren?“
A_{1Sw}	Antizipieren, dass seitliches Fahrzeug die Spur wechselt	„es wird mich gleich überholen“ „wir überholen, bevor es vorbei fährt“
$A_{2Vü}$	Antizipieren, dass vorderes Fahrzeug überholt	„wenn das Auto vor uns überholt“
$A_{2Sü}$	Antizipieren, dass seitliches Fahrzeug überholt	„das Fahrzeug (links) wird mich überholen“, „ich denke es überholt mich gleich“
A_{3Sa}	Antizipieren, dass sich seitliches Fahrzeug annähert	„das nächste Auto nähert sich“
A_{4SRS}	Antizipieren, dass Fahrzeug im Rückspiegel erscheint	„sobald ich das Fahrzeug ganz im Rückspiegel sehe“
A_{5VG}	Geschwindigkeit des vorderen Fahrzeugs/Verkehrs antizipieren	„ich hoffe, dass der vor mir langsam ein bisschen mehr Gas gibt“
A_{5HG}	Geschwindigkeit des hinteren Fahrzeugs/Verkehrs antizipieren	„sobald die hinten langsam fahren“
A_{6Z}	Antizipieren des Verkehrsflusses (zeitlich)	„weil es sich staut“, „bis sich die Situation auflöst“; bei den Aussagen (nach Stauung) „gleich geht’s weiter“, der Verkehr wird wieder fließen“
A_{6R}	Antizipieren der Verkehrskonstellation (räumlich)	„nicht, dass die Gefahr kommt, dass ich zwischen den Autos eingeklemmt werde“

Tabelle D.11

Operatoren der Antizipationen und ihre Inhalte (in Anlehnung an Sommer, 2012)

Operator	Antizipationsrelevantes Merkmal	Ziele
A_{1Vw}	Spurwechsel des Vorderfahrzeugs	Warten auf Lücke, Spurwechsel, Überholen
A_{1Sw}	Spurwechsel des Nebenfahrzeugs	Warten auf Lücke, Spurwechsel, Überholen
$A_{2Vü}$	Überholvorgang des Vorderfahrzeugs	Warten auf Lücke, Spurwechsel, Überholen
$A_{2Sü}$	Überholvorgang des Nebenfahrzeugs	Warten auf Lücke, Spurwechsel, Überholen
A_{3Sa}	Annäherung des Nebenfahrzeugs	Warten auf Lücke, Spurwechsel, Überholen
A_{4SRS}	Erscheinen des Überholobjektes im Rückspiegel	Spurwechsel
A_{5VG}	Geschwindigkeit des Vorderfahrzeugs	Geschwindigkeitsanpassung
A_{5HG}	Geschwindigkeit des hinteren Fahrzeugs	Geschwindigkeitsanpassung
A_{6Z}	Geschwindigkeit des umliegenden Verkehrs	Geschwindigkeitsanpassung
A_{6R}	Positionen der umliegenden Fahrzeuge	Spurwechsel, Überholen, Spurhalten, Folgefahrt

Anmerkungen. In Tabelle D.11 sind die, für die Antizipationsoperatoren, bedeutsamen Stimuli abgebildet sowie die Ziele, welche mithilfe der Antizipation erreicht werden sollen.

Tabelle D.12

Unterziele und mögliche kognitive Operatoren der Entscheidungsphase (in Anlehnung an Fastenmeier et al., 2001; Richard et al., 2006)

Ziele und Unterziele	Kognitive Operatoren	
1.1. **Entscheidungsphase (E)**		
1.1.1 Entschluss zum **Spurwechsel/Überholen** (subjektive Gründe, z. B. langsam fahrendes Vorderfahrzeug)	Entscheiden Antizipieren	Spur zu wechseln, zu überholen Spurwechsel/Überholvorgang des Vorder- oder Nebenfahrzeugs, Verkehrskonstellation, Erscheinen des Fahrzeugs im Rückspiegel
1.1.2 Prüfung der Spurwechsellegalität **(Befolgen von Regeln)**	Überprüfen Bewerten Gedächtnis-prozesse	Geschwindigkeit (Ego) (Richtgeschwindigkeit ja/ nein), Position (Ego) (Rechtsüberholverbot) Geschwindigkeit/ Position des Ego Erinnern von Regeln
1.1.3 Prüfung der Spurwechseldurchführbarkeit		
1.1.3.1 **Warten auf Lücke** im Verkehr	Überprüfen Bewerten	Lückengröße, Geschwindigkeit/ Spurbelegung seitlicher Fahrzeuge Lückengröße, Geschwindigkeit/ Spurbelegung seitlicher Fahrzeuge
1.1.3.2 Kontrolle der Fahrzeugumgebung (Beobachten des Verkehrs) bzw. **Sicherung**	Entscheiden Überprüfen Bewerten Antizipieren	Verkehr zu beobachten Geschwindigkeit, Abstand, Beschleunigung, Lückengröße Geschwindigkeit, Beschleunigung, Lückengröße, Fahrverhalten Annäherung/Überholen des seitlichen Fahrzeugs
1.1.3.3 **Sicherung** bzw. Konfliktvermeidung (Start- und Zielspur des heran- nahenden Verkehrs überprüfen)	Entscheiden Überprüfen Bewerten	Schulter-, Seiten(fenster)-, Rückspiegelblick auszuführen, Abstand zu bewerten Abstand/Position/Spurbelegung der Anderen Abstand/Position/Spurbelegung der Anderen

Anmerkungen. fett = Bezeichnung der aufgetretenen Ziele.

Tabelle D.13

Unterziele und mögliche kognitive Operatoren der Vorbereitungs-, Durchführung- und Schlussphase (in Anlehnung an Fastenmeier et al., 2001; Richard et al., 2006)

Unterziele	Kognitive Operatoren	
1.2 Vorbereitungsphase (V)		
1.2.1 **Spurwechselabsicht signalisieren**	Entscheiden	Zu blinken
1.2.2 Vorbereitung der notwendigen Geschwindigkeit (**Geschwindigkeitsanpassung**)	Entscheiden	Zu beschleunigen, verlangsamen, bremsen, Geschwindigkeit halten, Ego-Geschwindigkeit überprüfen
	Überprüfen	Geschwindigkeit (Ego/Andere)
	Bewerten	Geschwindigkeit (Ego/Andere)
1.3 Durchführungsphase (D)		
1.3.1 Gefahrenabsicherung (**Sicherung**)	Entscheiden	Schulter-, Seiten(fenster)-, Rückspiegelblick auszuführen
	Überprüfen	Spurbelegung, Fahrverhalten
	Bewerten	Spurbelegung, Fahrverhalten
1.3.2 Lenkeinstellung auf Zielspur (**Spurwechseldurchführung**)	Entscheiden	Zu lenken
	Überprüfen	Spurbelegung, Fahrzeugposition
	Bewerten	Spurbelegung, Fahrzeugposition
1.3.3 Beschleunigung um Spurwechsel einzuleiten (**Geschwindigkeitsanpassung**)	Entscheiden	Zu beschleunigen, verlangsamen, bremsen, Geschwindigkeit halten Ego-Geschwindigkeit überprüfen
	Überprüfen	Geschwindigkeit (Ego/Andere)
	Bewerten	Geschwindigkeit (Ego/Andere)
	Antizipieren	Geschwindigkeit des Vorder-/ Hinterfahrzeugs, Verkehrsfluss
1.3.4 Konfliktvermeidung (**Sicherung**)	Überprüfen	Spurbelegung,Fahrzeugposition (Andere)
	Bewerten	Spurbelegung,Fahrzeugposition (Andere)
1.3.5 Übersetzen	Überprüfen	Position des Ego
	Bewerten	Position des Ego
1.4 Schlussphase (S)		
1.4.1 Neupositionierung des Ego-Fahrzeugs in die Mitte der Zielspur (**Einordnen**)	Entscheiden	Zurück zu lenken
	Überprüfen	Position des Ego
	Bewerten	Position des Ego
1.4.2 **Blinksignal beenden**	Entscheiden	Blinker zurück zu setzen
1.4.3 **Geschwindigkeitsanpassung**	Entscheiden	Zu beschleunigen,verlangsamen, bremsen, Geschwindigkeit halten, Ego-Geschwindigkeit überprüfen
	Überprüfen	Geschwindigkeit (Ego/Andere)
	Bewerten	Geschwindigkeit (Ego/Andere)
	Antizipieren	Geschwindigkeit des Vorder-/ Hinterfahrzeugs, Verkehrsfluss
1.4.4 Einleiten des neuen Fahrmanövers **(Spurwechsel, Spurhalten, Folgefahrt, Überholen)**	Entscheiden	Spur zu wechseln, Spur zu halten, zu folgen, zu überholen
	Antizipieren	Verkehrsfluss

Anmerkungen. fett = Bezeichnung der aufgetretenen Ziele, Ego = Ego-Fahrzeug, Andere = andere Verkehrsteilnehmer.

E Statistiken und Tabellen

Tabelle E.1

Auswertung der Fahrerbeanspruchungsmaße nach Messzeitpunkt

Proband	Messzeitpunkt	st_wheel_pos				gas_pedal			brake_pedal		
		Min	*Max*	*M*	*SD*	*Max*	*M*	*SD*	*Max*	*M*	*SD*
5	CS-nTA	-.03	.04	-.00	.01	.51	.26	.10	.33	.01	.04
	RS-nTA	-.07	.04	-.00	.01	.78	.35	.16	.28	.00	.03
	CS-TA	-.05	.04	.00	.01	.57	.23	.13	.29	.01	.03
	RS-TA	-.04	.04	.00	.01	.84	.34	.20	.38	.01	.05
6	CS-nTA	-.02	.02	-.00	.01	.50	.26	.10	.19	.01	.03
	RS-nTA	-.03	.03	-.00	.01	.76	.37	.18	.23	.00	.03
	CS-TA	-.03	.03	-.00	.01	.75	.25	.15	.24	.00	.03
	RS-TA	-.03	.03	.00	.00	.91	.26	.18	.26	.01	.04
8	CS-nTA	-.02	.02	-.00	.00	.73	.27	.10	.18	.00	.02
	RS-nTA	-.02	.02	-.00	.00	.61	.21	.17	.25	.00	.02
	CS-TA	-.05	.04	-.00	.01	.60	.24	.14	.32	.01	.04
	RS-TA	-.02	.02	-.00	.00	.72	.27	.18	.29	.00	.02
11	CS-nTA	-.08	.10	-.00	.02	.68	.27	.12	.44	.01	.04
	RS-nTA	-.10	.08	-.00	.03	.85	.35	.08	.32	.00	.01
	CS-TA	-.09	.09	-.00	.02	.89	.22	.20	.49	.01	.05
	RS-TA	-.09	.08	-.00	.01	.95	.30	.19	.46	.01	.04
12	CS-nTA	-.03	.03	-.00	.01	.52	.27	.11	.03	.00	.00
	RS-nTA	-.03	.02	-.00	.00	.66	.37	.15	.18	.00	.02
	CS-TA	-.05	.05	-.00	.01	.70	.28	.12	.43	.01	.04
	RS-TA	-.04	.03	-.00	.01	.91	.39	.20	.12	.00	.01
14	CS-nTA	-.12	.19	.00	.01	.79	.28	.14	.27	.01	.03
	RS-nTA	-.07	.08	.00	.01	1.00	.26	.21	.33	.01	.04
	CS-TA	-.12	.09	.00	.01	.67	.27	.13	.39	.01	.04
	RS-TA	-.18	.07	-.00	.01	1.00	.38	.18	.42	.01	.05
17	CS-nTA	-.04	.05	.00	.01	.70	.18	.18	.34	.01	.04
	RS-nTA	-.05	.05	-.00	.01	.96	.41	.26	.44	.01	.06
	CS-TA	-.04	.04	.00	.01	.44	.18	.14	.36	.01	.04
	RS-TA	-.04	.03	.00	.01	.83	.26	.21	.37	.01	.03
20	CS-nTA	-.03	.03	.00	.01	.57	.27	.17	.19	.00	.03
	RS-nTA	n. A.	n. A.	n. A.	n. A.	n. A.	n. A.	n. A.	n. A.	n. A.	n. A.
	CS-TA	-.03	.03	-.00	.01	.65	.09	.16	.16	.00	.02
	RS-TA	.-06	.04	.000	.01	.72	.29	.19	.195	.01	.02
21	CS-nTA	-.04	.04	.00	.01	.50	.24	.13	.25	.01	.04
	RS-nTA	-.04	.04	-.00	.01	.50	.29	.13	.31	.01	.03
	CS-TA	-.05	.05	-.00	.01	.47	.25	.14	.25	.01	.03
	RS-TA	-.06	.05	-.00	.01	.55	.25	.15	.31	.01	.04

Anmerkungen. st_wheel_pos = Lenkradposition, gas_pedal = Gaspedalstellung, brake_pedal = Bremspedalstellung.

Tabelle E.2

Tests auf Normalverteilung der Variablen st_wheel_pos, gas_pedal, brake_pedal getrennt nach Messzeitpunkt

		K-S-Test[a]			Shapiro-Wilk-Test		
Variable	Messzeitpunkt	Statistik	*df*	*p*	Statistik	*df*	*p*
st_wheel_pos	CS-nTA	.254	8	.138	.917	8	.403
	RS-nTA	.355	8	.004[b]	.656	8	.001[b]
	CS-TA	.189	8	.200[a]	.878	8	.179
	RS-TA	.217	8	.200[a]	.898	8	.279
gas_pedal	CS-nTA	.195	8	.200a	.846	8	.087
	RS-nTA	.176	8	.200	.980	8	.962
	CS-TA	.281	8	.063	.774	8	.015[b]
	RS-TA	.187	8	.200	.948	8	.690
brake_pedal	CS-nTA	.244	8	.176	.848	8	.091
	RS-nTA	.198	8	.200	.917	8	.407
	CS-TA	.191	8	.200	.944	8	.655
	RS-TA	.252	8	.145	.862	8	.127

Anmerkungen. [a]Signifikanzkorrektur nach Lilliefors, [b]keine Normalverteilung.

Tabelle E.3

Spurwechselhäufigkeit getrennt nach Spurwechselart und Messzeitpunkt

Proband	*n**					
	CS-TA			RS-TA		
	gesamt	LC l2r	LC r2l	gesamt	LC l2r	LC r2l
05	29 (29)	15 (15)	14 (14)	18 (18)	9 (9)	9 (9)
06	29 (29)	15 (15)	14 (14)	16 (16)	8 (8)	8 (8)
08	25 (24)	13 (12)	12 (12)	8 (8)	4 (4)	4 (4)
11	25 (25)	13 (13)	12 (12)	14 (14)	7 (7)	7 (7)
12	33 (32)	17 (16)	16 (16)	12 (12)	6 (6)	6 (6)
14	31 (30)	16 (15)	15 (15)	24 (24)	12 (12)	12 (12)
17	25 (24)	13 (12)	12 (12)	11 (9)	5 (4)	6 (5)
20	31 (31)	16 (16)	15 (15)	26 (12)	13 (6)	13 (6)
21	25 (24)	13 (12)	12 (12)	10 (9)	5 (4)	5 (5)
gesamt	253 (248)	131 (126)	122 (122)	139 (122)	69 (60)	70 (62)

Anmerkungen. *Anzahl der Spurwechselmanöver, ( ) = auswertbare Spurwechselmanöver.

Tabelle E.4

Häufigkeitsverteilung der Gedächtnisprozess-Operatoren getrennt nach Spurwechselphase, Spurwechselart und Messzeitpunkt

Operator	CS-TA								RS-TA								gesamt
	LC r2l				LC l2r				LC r2l				LC l2r				
	E	V	D	S	E	V	D	S	E	V	D	S	E	V	D	S	
G_{1R}	1	0	3	4	3	3	6	7	1	0	1	2	5	1	0	0	37
G_{1P}	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3
G_{2P}	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
G_{3P}	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	5
G_{3Z}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Anmerkungen. LC r2l = Spurwechsel von rechts nach links, LC l2r = Spurwechsel von links nach rechts, E = Entscheidungsphase; V = Vorbereitungsphase; D = Durchführungsphase; S = Schlussphase.

Tabelle E.5

Häufigkeitsverteilung der Entscheidungs-Operatoren getrennt nach Spurwechselphase, Spurwechselart und Messzeitpunkt

Operator	CS-TA								RS-TA								gesamt
	LC r2l				LC l2r				LC r2l				LC l2r				
	E	V	D	S	E	V	D	S	E	V	D	S	E	V	D	S	
$E_{1EGü}$	0	0	0	1	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1	7
E_{1Br}	3	0	0	0	0	0	0	1	2	2	1	1	0	1	2	1	14
E_{1Ve}	2	0	0	0	0	0	0	8	1	0	0	1	2	0	1	0	15
E_{1Be}	10	4	6	12	3	0	4	8	3	2	4	1	0	1	2	2	62
E_{1EGb}	2	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	2	1	9
E_{1EGe}	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
E_{2B}	7	36	7	4	14	12	6	0	3	14	1	1	4	6	1	0	116
E_{2Ba}	0	1	4	0	0	0	9	1	0	0	5	1	0	0	5	0	26
E_{3L}	1	22	21	0	6	16	24	0	1	15	6	2	3	8	12	4	141
E_{3Z}	0	0	7	2	0	0	5	1	0	0	2	0	0	0	3	0	20
E_{4W}	24	12	5	10	36	16	5	0	11	5	3	5	22	5	4	1	164
$E_{4Ü}$	24	9	16	10	20	2	3	0	13	3	4	4	5	2	0	1	116
E_{4H}	7	0	2	9	3	0	9	4	2	0	6	3	0	2	1	4	52
E_{4F}	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	4	5	0	0	2	0	14
E_{5SB}	2	8	8	1	3	18	5	0	3	5	1	0	2	8	3	0	67
E_{5SSB}	9	16	3	1	6	19	2	0	7	5	2	3	5	7	9	1	95
E_{5RSB}	4	5	3	2	8	9	2	0	3	2	1	3	6	7	5	1	61
E_{5SFB}	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
E_{6Vb}	0	0	1	0	0	1	0	2	1	1	0	0	1	0	0	0	7
E_{6Sb}	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	4
E_{6Hb}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
E_{7HAb}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

Anmerkungen. LC r2l = Spurwechsel von rechts nach links, LC l2r = Spurwechsel von links nach rechts, E = Entscheidungsphase; V = Vorbereitungsphase; D = Durchführungsphase; S = Schlussphase.

Tabelle E.6

Häufigkeitsverteilung der Bewertungs-Operatoren getrennt Spurwechselphase, Spurwechselart und Messzeitpunkt

Operator	CS-TA								RS-TA								gesamt
	LC r2l				LC l2r				LC r2l				LC l2r				
	E	V	D	S	E	V	D	S	E	V	D	S	E	V	D	S	
B_{1EP}	5	1	3	3	7	3	4	0	0	2	0	0	5	0	0	0	33
B_{1VP}	0	1	0	0	1	0	0	0	2	1	2	0	0	0	2	1	10
B_{1SP}	9	4	0	1	1	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	20
$B_{2Lü}$	7	2	4	0	3	1	3	1	5	3	2	1	3	4	1	0	40
B_{3VA}	12	1	2	2	1	1	1	2	2	2	3	1	1	3	0	0	34
B_{3SA}	1	0	3	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
B_{3HA}	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	1	1	0	0	1	6
B_{4VS}	1	1	1	0	0	0	2	0	2	0	1	1	0	2	2	3	16
B_{4SS}	7	9	4	0	1	8	6	1	3	1	0	0	6	0	2	1	49
B_{4HS}	1	0	2	1	2	2	4	3	2	3	0	1	2	0	1	0	24
B_{5VF}	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	2	2	4	1	1	1	15
B_{5SF}	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
B_{5HF}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
B_{6EG}	9	1	0	6	12	1	8	10	2	0	2	5	1	0	2	4	63
B_{6VG}	3	1	4	2	3	1	0	2	2	3	6	1	4	0	1	4	37
B_{6SG}	9	3	0	0	2	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	17
B_{6HG}	0	0	0	1	0	0	0	0	4	0	0	2	1	1	0	1	10
B_{7S}	1	0	2	0	0	0	1	3	0	0	0	0	2	0	2	0	11
B_{8V}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1

Anmerkungen. LC r2l = Spurwechsel von rechts nach links, LC l2r = Spurwechsel von links nach rechts, E = Entscheidungsphase; V = Vorbereitungsphase; D = Durchführungsphase; S = Schlussphase.

Tabelle E.7

Häufigkeitsverteilung der Überprüfungs-Operatoren getrennt nach Spurwechselphase, Spurwechselart und Messzeitpunkt

Operator	CS-TA								RS-TA								gesamt
	LC r2l				LC l2r				LC r2l				LC l2r				
	E	V	D	S	E	V	D	S	E	V	D	S	E	V	D	S	
$Ü_{1EG}$	3	0	5	12	10	0	11	12	3	2	2	3	4	2	10	6	85
$Ü_{1VG}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	2
$Ü_{2EP}$	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
$Ü_{3VS}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	0	3
$Ü_{3SS}$	4	8	8	0	4	12	2	0	4	2	0	0	1	0	0	0	45
$Ü_{3HS}$	2	3	2	0	5	4	2	2	1	1	1	2	1	1	1	0	28
$Ü_{4SA}$	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$Ü_{4HA}$	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
$Ü_{5SF}$	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$Ü_{6Lü}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1

Anmerkungen. LC r2l = Spurwechsel von rechts nach links, LC l2r = Spurwechsel von links nach rechts, E = Entscheidungsphase; V = Vorbereitungsphase; D = Durchführungsphase; S = Schlussphase.

Tabelle E.8

Häufigkeitsverteilung der Antizipations-Operatoren getrennt nach Spurwechselphase, Spurwechselart und Messzeitpunkt

Operator	CS-TA								RS-TA								gesamt
	LC r2l				LC l2r				LC r2l				LC l2r				
	E	V	D	S	E	V	D	S	E	V	D	S	E	V	D	S	
A_{1Vw}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
A_{1Sw}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
$A_{2Vü}$	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
$A_{2Sü}$	6	3	3	1	3	0	0	1	2	1	1	0	1	1	1	0	24
A_{3Sa}	2	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	6
A_{4SRS}	0	0	0	2	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
A_{5VG}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
A_{5HG}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2
A_{6Z}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
A_{6R}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1

Anmerkungen. LC r2l = Spurwechsel von rechts nach links, LC l2r = Spurwechsel von links nach rechts, E = Entscheidungsphase; V = Vorbereitungsphase; D = Durchführungsphase; S = Schlussphase.

Tabelle E.9

Häufigkeitsverteilung der Fahrerziele pro Spurwechselphase, je Spurwechselart, beim CS-TA

Ziele	LC r2l				LC l2r				gesamt
	E	V	D	S	E	V	D	S	
Spurwechsel	27	15	7	13	36	19	7	2	126
Spurhalten	2	0	2	6	3	0	9	3	25
Überholen	22	9	18	13	20	2	3	0	87
Folgefahrt	0	0	0	0	0	0	2	1	3
Auf Lücke warten	23	1	2	0	4	2	1	1	34
Regeln befolgen	1	0	3	4	3	3	7	7	28
Geschwindigkeitsanpassung	31	7	15	37	30	2	22	41	185
Sicherung	63	62	42	17	50	76	42	17	369
Spurwechselsicht signalisieren	8	35	7	4	14	13	8	0	89
Spurwechseldurchführung	1	22	22	0	6	15	25	0	91
Einordnen	0	0	8	3	0	0	5	1	17
Blinksignal beenden	0	1	4	0	0	0	8	2	15

Anmerkungen. LC r2l = Spurwechsel von rechts nach links, LC l2r = Spurwechsel von links nach rechts, E = Entscheidungsphase; V = Vorbereitungsphase; D = Durchführungsphase; S = Schlussphase.

Tabelle E.10

Häufigkeitsverteilung der Fahrerziele pro Spurwechselphase, je Spurwechselart, beim RS-TA

Ziele	LC r2l				LC l2r				gesamt
	E	V	D	S	E	V	D	S	
Spurwechsel	11	9	2	3	27	6	4	2	64
Spurhalten	2	0	6	3	0	2	1	4	18
Überholen	13	5	3	6	5	2	0	1	35
Folgefahrt	0	0	4	5	0	0	2	0	11
Auf Lücke warten	8	2	1	0	3	4	1	0	19
Regeln befolgen	1	0	1	3	4	1	0	0	10
Geschwindigkeitsanpassung	10	7	12	14	9	4	20	14	90
Sicherung	44	34	26	13	36	32	32	15	232
Spurwechselsicht signalisieren	3	13	1	1	5	6	1	0	30
Spurwechseldurchführung	2	17	8	0	3	9	12	5	56
Einordnen	0	0	3	0	0	0	3	0	6
Blinksignal beenden	0	0	5	1	0	0	5	0	11

Anmerkungen. LC r2l = Spurwechsel von rechts nach links, LC l2r = Spurwechsel von links nach rechts, E = Entscheidungsphase; V = Vorbereitungsphase; D = Durchführungsphase; S = Schlussphase.

Eigenständigkeitserklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die Masterarbeit mit dem Thema „Realisierung einer Aufgabenanalyse unter simulierten Spurwechselbedingungen - Erfassung kognitiver Fahranforderungen“ selbstständig, ohne Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Alle den benutzten Quellen wörtlich oder sinngemäß entnommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.
Diese Arbeit ist bislang keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt worden und auch nicht veröffentlicht worden. Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Magdeburg, 24.08.2017