



Philipp Ring

Modellierung kognitiver  
Prozesse für ein  
numerisches  
Fahrerverhaltensmodell

Schriftenreihe des Lehrstuhls  
Kraftfahrzeugtechnik

Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop Band 12



Schriftenreihe des Lehrstuhls  
Kraftfahrzeugtechnik

Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

Band 12

ISSN 2509-694X





# DISSERTATION

Zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

*Thema*

**Modellierung kognitiver Prozesse für ein numerisches  
Fahrerverhaltensmodell**

*Bearbeiter*

Dipl.-Ing. Philipp Ring

geb. am 23.10.1989 in Rodewisch

*Gutachter*

Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

Professur für Kraftfahrzeugtechnik  
Technische Universität Dresden

Prof. Dr. rer. nat. habil., Dipl.-Psych. Tibor Petzoldt

Professur für Verkehrspsychologie  
Technische Universität Dresden

Tag der Einreichung:

11.10.2019



### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2020

Zugl.: (TU) Dresden, Univ., Diss., 2020

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2020

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2020

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-7238-4

eISBN 978-3-7369-6238-5



## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als Teilnehmer des Promotionsprogramms der BMW AG unter der Betreuung des Lehrstuhls für Kraftfahrzeugtechnik der TU Dresden. Nachfolgend möchte ich den Personen explizit danken, die zu einem erfolgreichen Ende dieser Arbeit maßgeblich beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop für die Übernahme der Betreuung und die Begutachtung dieser Arbeit. Sein Vertrauen in einen erfolgreichen Ausgang dieser Arbeit war stets ein starker Motivator und hat mich auch in manch schwierigen Situationen immer nach vorn blicken lassen. Auch waren die zahlreichen Wissenschaftsbesprechungen verbunden mit den konstruktiven Anmerkungen wichtige Wegbegleiter dieser Arbeit. Auch in Zukunft wird so die TU Dresden für mich immer eine Reise wert sein.

Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr. rer. nat. habil., Dipl.-Psych. Tibor Petzoldt für die Übernahme der Zweitbegutachtung und den etwas anderen Blickwinkel auf diese Arbeit bedanken.

Für die unzähligen und immer wieder erfrischenden Gespräche gilt mein ganz besonderer Dank Dr. Marcus Mai. Er hat maßgeblich dazu beigetragen, dass das interdisziplinäre Thema der Fahrermodellierung ein Teil meiner Ausbildung geworden ist, der wirklich Spaß gemacht hat. Auf sein offenes Ohr war stets Verlass. Außerdem bedanke ich mich bei ihm für die Durchsicht der Arbeit. Gleiches gilt für Dr. Thomas Tüschen. Ihm danke ich als langen Wegbegleiter für die Durchsicht dieser Arbeit und für die konstruktiven Anmerkungen.

Ein besonderes Dankeschön geht an meinen ehemaligen Abteilungsleiter Robert Martinez von Bülow und meine ehemaligen Gruppenleiter Olaf Jung und Dr. Florian Raisch. Den Raum und die Mittel für die Bearbeitung dieser Arbeit sehe ich nicht als Selbstverständlichkeit, weshalb ich ihnen hier explizit danken möchte. Des Weiteren gilt mein aufrichtiger Dank Dr. Lei Wang. Mit seiner Betreuung und den zahlreichen Denkanstößen aus den verschiedensten Richtungen hat er für mich das Doktorandendasein zu einer sehr wertigen und lehrreichen Zeit gemacht. Und ich bin froh, in ihm einen sehr geschätzten Kollegen und Freund gewonnen zu haben. In diesem Atemzug möchte ich ebenfalls Dr. Felix Fahrenkrog für die Unterstützung während der Bearbeitung dieser Arbeit danken. Er war stets ein zuverlässiger Diskussionspartner und hat mit seinen Erfahrungen und Ratschlägen den Weg aus so mancher Sackgasse aufgezeigt.

Nicht vergessen möchte ich die zahlreichen studentischen Unterstützungen. Ohne sie hätte diese Arbeit kein erfolgreiches Ende gefunden. Deshalb bedanke ich mich bei Maximilian Muraier, Manel Hammouda, Daniel Stichling und Florian Nittke für die ausdauernde Hilfe.

Nun zu dem wichtigsten Teil dieser Zeilen; den Worten für meine Familie. Das Fundament dieser Arbeit ist zum einen meine Ausbildung an der TU Dresden, aber zum anderen sind es vor allem Werte, an denen ich täglich mein Handeln gemessen habe und messen werde. Sie waren und sind wichtige Wegbegleiter, die ich meinen Eltern zu verdanken habe. Sie sind das Licht in den dunkelsten Zeiten und dafür danke ich ihnen. Zum Schluss danke ich Dir, Nicola. Du musstest für die zahlreichen Büro- und Schreibtischabende oft zurückstecken. Für Deine unermüdliche Geduld, Deine Wärme und Deine aufrichtige Unterstützung zu jeder Zeit danke ich Dir. Du bist mein Halt und mein Rückzugsort.



## Kurzfassung

Mithilfe medienwirksamer Ankündigungen bereiten heutige Automobilhersteller die Gesellschaft auf die Einführung automatisierter Fahrfunktionen in ihren Produkten vor. Diese Fahrfunktionen sollen die, noch weitestgehend vom Menschen ausgeübte, Fahraufgabe schrittweise in verschiedenen Automatisierungslevels übernehmen und zu einer Entlastung des Fahrers und einer Erhöhung des Fahrkomforts führen. Einhergehend mit diesen Versprechen entsteht an die Automobilhersteller der Anspruch, durch geeignete Methoden eine positive Sicherheitsbilanz mit dem Einsatz neuartiger Fahrfunktionen vor der Serieneinführung nachzuweisen. Hier bieten multiagentenbasierte Verkehrssimulationen einen etablierten Ansatz für die Analyse der Wirksamkeit automatisierten Fahrens im Vergleich zu menschlichem (manuellem) Fahren.

Einen wichtigen Bestandteil solcher Simulationen stellen Fahrerhaltensmodelle dar. Diese Modelle haben zum Ziel, das menschliche (manuelle) Fahrerhalten durch verschiedene Methoden abzubilden. In Anwendung beeinflusst die Güte der Realitätsnachbildung solcher Modelle die Aussagefähigkeit der Verkehrssimulationen beträchtlich, weshalb ihnen eine entsprechende Bedeutung zukommt. Was diese Modelle eint, ist die fehlende Abbildung *höherer kognitiver Prozesse*, die wiederum einen wichtigen Bestandteil menschlicher Denkprozesse zur Bewältigung der Fahraufgabe darstellen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Entwicklung eines Teilmodells höherer Kognition, das ein bestehendes Fahrerhaltensmodell zur Abbildung *höherer kognitiver Prozesse* befähigt. Konkret werden mit dem neuen Teilmodell komplexe Informationsverarbeitungs- und Denkprozesse wie *Situationsmustererkennung*, *Situationsverständnis*, *Antizipation* und *Prädiktion* modelliert und in die bestehende Struktur eines Fahrerhaltensmodells integriert. So soll ein vorausschauendes und damit realitätsnäheres Modellverhalten erzeugt werden. Die Entwicklung des Teilmodells erfolgt hierbei anhand ausgewählter Verkehrssituationen.

Zunächst werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen, der Stand der Technik heutiger Fahrerhaltensmodelle und der Forschungsbedarf der Arbeit erläutert. Darauf aufbauend folgt in Kapitel 3 die Aufstellung der Forschungshypothesen zur Modellierung *höherer kognitiver Prozesse*. Anschließend dokumentiert Kapitel 4 die jeweiligen Modellierungs- und Validierungsschritte für den Aufbau des Teilmodells. Die Integration des Teilmodells und seiner entwickelten Methoden in das vorhandene Fahrerhaltensmodell wird in Kapitel 5 dargelegt. Abschließend werden in Kapitel 6 die Simulationsergebnisse von zwei *virtuellen Probandenstudien* (für eine Stichprobe mit höherer Kognition und eine Stichprobe ohne höhere Kognition), bestehend aus jeweils 63.783 Probanden, mit realem Fahrerhalten verglichen. Diese Vergleiche werden jeweils für ausgewählte Verkehrssituationen sowie im Gesamtverkehrskontext durchgeführt.

Anhand statistischer Testverfahren werden signifikante Unterschiede im Agentenverhalten zwischen *virtuellen Probandenstudien* in Richtung der formulierten Erwartungen nachgewiesen. So wird ein vorausschauenderes Verhalten mit der Integration *höherer kognitiver Prozesse* bestätigt, indem die Agenten beispielsweise größere Zeitlücken oder geringere Geschwindigkeiten im Fahrerhalten zeigen. Weiterhin wird hinsichtlich des Gesamtverkehrskontexts zum Beispiel die Anzahl der Kollisionen um mindestens 5 % reduziert oder die gefahrene Strecke zwischen zwei Kollisionen um 3,89 % erhöht, was eine Wirksamkeit des entwickelten Teilmodells zum ursprünglichen Modellstand belegt. Trotz dieser positiven Effekte weisen statistische Testverfahren jedoch immer noch einen signifikanten Unterschied zu realem Fahrerhalten nach. Ein Grund hierfür sind negative Einflüsse,erbeigeführt durch den Entwicklungsstand des zur Verfügung stehenden Fahrerhaltensmodells.

## Abstract

Today's automobile manufacturers are using media-friendly announcements to prepare the general public for the introduction of automated driving functions in their products. These driving functions are intended to take over the driving task, which is still performed by humans today, step by step in different automation levels and thus serve to relieve the driver and increase driving comfort. This means, that automobile manufacturers now have to demonstrate a positive safety balance by using suitable methods and innovative driving functions before series production is introduced. Thereto, multi-agent-based traffic simulations offer an established approach for the analysis of the effectiveness of automated driving in comparison to manual, human driving.

Driver behavior models represent an important component of such simulations. The aim of these models is to model human, manual driver behavior by using different methods. In application, the quality of the closeness to reality of such models considerably influences the informative value of the traffic simulations, which is why they are corresponding important. What unites these models is the lack of mapping of higher cognitive processes, which in turn represent an important component of human thought processes for mastering the driving task.

Therefore, the aim of the present work is the development of a partial model of higher cognition that enables an existing driver behavior model to map higher cognitive processes. Specifically, the new submodel represent complex information processing and thinking processes such as situation pattern recognition, situation understanding, anticipation and prediction, and integrates it into the existing structure of a driver behavioral model. Thus, a more foresighted and thus more realistic model behavior is to be generated. The development of the new submodel is based on selected traffic situations.

In Chapter 2, the theoretical principles, the state of the art of today's driver behavior models and the research needs of the work are explained. Based on this, two research hypotheses for the modeling of higher cognition are presented in Chapter 3. Chapter 4 then documents the respective modelling steps for the construction of the sub model of higher cognition. The integration of the developed submodel and its developed methods into the existing driver behavior model is described in Chapter 5. Finally, chapter 6 compares the simulation results of two virtual test subjects (agents with and without higher cognition), each consisting of 63,783 test subjects, with real driver behavior. These comparisons are carried out for selected traffic situations and in the overall traffic context.

Statistical test procedures are used to demonstrate significant differences in agent behavior between the virtual studies in the direction of the formulated expectations. A more predictive behavior because of the integration of higher cognitive processes is confirmed, the agents show larger time gaps or lower speeds in driving behavior. Furthermore, with regard to the overall traffic context, the number of collisions is reduced by at least 5 % or the distance driven between two collisions is increased by 3.89 %, which proves the effectiveness of the developed partial model compared to the original model. However, despite these positive effects, statistical testing still shows a significant difference from real driver behavior. One reason for this is negative influences brought about by the state of development of the available driver behavior model.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Verwendete Formelzeichen</b> .....	<b>I</b>
<b>Notationsschlüssel</b> .....	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Grundlagen .....	2
1.3 Zielsetzung und Struktur .....	3
1.4 Grenzen der Arbeit .....	4
<b>2 Wissenschaftlicher Hintergrund</b> .....	<b>7</b>
2.1 Begriffsdefinitionen im Verkehrskontext .....	7
2.1.1 Verkehrssituation .....	8
2.1.2 Fahrsituation .....	8
2.1.3 Fahrersituation .....	8
2.2 Theoretische Beschreibungen des Fahrerhaltens .....	8
2.2.1 Vorausschauende Fähigkeiten – Der Begriff „Antizipation“ .....	9
2.2.2 Modell menschlichen Verhaltens nach Rasmussen .....	11
2.2.3 $\tau$ -Theorie nach Lee .....	12
2.2.4 Stufenmodell der Gefahrenkognition nach Schlag .....	18
2.2.5 Modelle kognitiver Prozesse .....	19
2.2.6 Modellierung von vorausschauenden Fähigkeiten .....	24
2.2.7 Ableitung einer Arbeitsdefinition für den Begriff „Kognition“ .....	25
2.3 Stand der Technik: Fahrerhaltensmodelle und kognitive Architekturen .....	27
2.3.1 Ansätze zur Klassifizierung von Fahrermodellen .....	27
2.3.2 Fahrerhaltensmodelle in der Fahrzeugtechnik .....	29
2.3.3 Funktionale Modelle nach Engström und Hollnagel .....	30
2.3.4 ACT-R .....	31
2.3.5 COSMODRIVE .....	34
2.3.6 ACME .....	35
2.3.7 SCM .....	37
2.4 Zusammenfassung des Forschungsbedarfs .....	39
<b>3 Forschungshypothesen und -ansatz</b> .....	<b>43</b>
3.1 Forschungshypothesen und Anforderungen .....	43
3.2 Ableitung einer Modellstruktur des Teilmodells höherer Kognition .....	46
3.3 Studien als Datengrundlage .....	48

<b>4</b>	<b>Modellbildung und -validierung .....</b>	<b>53</b>
4.1	Teilmodell höherer Kognition: Aufbau und Untermodelle .....	53
4.2	Ermittlung kognitiv relevanter Situationsmuster .....	54
4.2.1	Objektive Verkehrssituationsmuster .....	55
4.2.2	Situationen basierend auf GIDAS .....	56
4.2.3	Verkehrssituationsmuster für die Modellierung höherer kognitiver Prozesse .....	58
4.3	Situationsmustererkennung .....	62
4.3.1	Zielgerichtete Datenanalyse .....	62
4.3.2	Modellierung .....	67
4.3.3	Validierung, Bewertung sowie Auswahl des finalen Ansatzes .....	72
4.4	Situationsverständnis und Parametrierung von situationsabhängigem Blickverhalten .....	76
4.5	Antizipation .....	79
4.5.1	Ansatz mit Bayes'schem Netz: Modellierung und Validierung .....	82
4.5.2	Ansatz mit Logistischer Regression: Modellierung und Validierung .....	85
4.5.3	Finaler Ansatz mit kombiniertem Modell: Modellierung und Validierung .....	86
4.6	Prädiktion .....	88
4.6.1	Situationsabhängige Kritikalitätsbewertung .....	88
4.6.2	Berechnung bedingter Kollisionswahrscheinlichkeit .....	90
<b>5</b>	<b>Integration und prototypische Umsetzung im Stochastic Cognitive Model .....</b>	<b>96</b>
5.1	Teilmodell höherer Kognition: Klassen- und Funktionsstruktur .....	96
5.2	Situationsmustererkennung .....	98
5.3	Situationsverständnis und situationsabhängiges Blickverhalten .....	98
5.4	Antizipation .....	99
5.5	Prädiktion .....	99
<b>6</b>	<b>Ergebnisse des Gesamtmodellverhaltens des Stochastic Cognitive Model nach der Integration höherer Kognition .....</b>	<b>102</b>
6.1	Methodisches Vorgehen .....	102
6.2	Modellverhalten im Vergleich mit Realfahrdaten .....	106
6.2.1	Vergleich: SCM ohne höhere Kognition und Realfahrverhalten .....	107
6.2.2	Vergleich: SCM mit höherer Kognition und Realfahrverhalten .....	109
6.2.3	Vergleich: SCM ohne höhere Kognition und SCM mit höherer Kognition .....	112
6.2.4	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	115
6.3	Modellverhalten in der Gesamtverkehrssimulation .....	116
6.3.1	Einfluss auf die Anzahl der Kollisionen .....	116
6.3.2	Einfluss auf mesoskopische Verhaltensgrößen .....	118
6.3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	121



<b>7 Zusammenfassung</b> .....	<b>123</b>
<b>8 Ausblick</b> .....	<b>127</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>i</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>xiii</b>
A.1 Tabellarische Aufstellung der Situationen aus GIDAS .....	xiii
A.2 Herleitung einer Mindestzeitlücke für sicheres Folgefahrtverhalten .....	xv
A.3 Vergleich der Häufigkeitsverteilung von $TTC_{E1,E2}$ und der inversen $TTC_{E1,E2}$ .....	xvii
A.4 Testergebnis der trainierten Klassifizierer für Multi-Klassen-Problem .....	xviii
A.5 Testergebnis der trainierten Klassifizierer für Klassifizierer 1 .....	xxi
A.6 Testergebnis der trainierten Klassifizierer für Klassifizierer 2 .....	xxiii
A.7 Testergebnis der trainierten Klassifizierer für Klassifizierer 3 .....	xxvi
A.8 Ergebnisse der Realfahrtstudie zur Untersuchung des situationsabhängigen Blickverhaltens .....	xxix
A.9 Methodisches Vorgehen zur Identifikation der relevanten Parameter für die Berechnung der Spurwechselwahrscheinlichkeit .....	xliv
A.10 UML-Diagramm des Teilmodells höherer Kognition integriert in SCM .....	xlvi
A.11 Statistische Testverfahren zur Überprüfung des Modellverhaltens .....	xlviii
A.12 Ergänzungen zur Überprüfung des Modellverhaltens .....	li
A.13 Auswahl relevanter Klassifikationsmethoden und Bewertungskriterien .....	lxiii
A.14 Übersicht zur Erfüllung der aufgestellten Anforderungen .....	lxxi
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>lxxiii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>lxxvi</b>



# Verwendete Formelzeichen

## Lateinische Größen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$1/TTC$	Inverse TTC	1/s
$1/TTC_{E1,E2}$	Inverse TTC zwischen Element $E_1$ und Element $E_2$	1/s
$1/TTC_{EGO,E1}$	Inverse TTC zwischen EGO-Fahrer und Element $E_1$	1/s
$1/TTC_{EGO,E2}$	Inverse TTC zwischen EGO-Fahrer und Element $E_2$	1/s
$d/dt(1/TTC_{E1,E2})$	Zeitliche Ableitung der Inverse TTC zwischen Element $E_1$ und Element $E_2$	1/s <sup>2</sup>
$d/dt(1/TTC_{EGO,E1})$	Zeitliche Ableitung der Inverse TTC zwischen EGO-Fahrer und Element $E_1$	1/s <sup>2</sup>
$d/dt(1/TTC_{EGO,E2})$	Zeitliche Ableitung der Inverse TTC zwischen EGO-Fahrer und Element $E_2$	1/s <sup>2</sup>
$A_x$	Parameter A einer gammaverteilten Zufallsvariable $x$	-
$a_{FRONT}$	Vorderfahrzeugbeschleunigung	m/s <sup>2</sup>
$a_{max,EGO}$	Maximale EGO-Verzögerung	m/s <sup>2</sup>
$a_{max,FRONT}$	Maximale Frontfahrzeug-Verzögerung	m/s <sup>2</sup>
$B_x$	Parameter B einer gammaverteilten Zufallsvariable $x$	-
$crit$	Kritikalität	-
$d$	Cohen's $d$	-
$d/dt(1/TTC_{E1,E2})$	Zeitliche Ableitung der Inverse TTC zwischen Element $E_1$ und Element $E_2$	1/s <sup>2</sup>
$d/dt(1/TTC_{EGO,E1})$	Zeitliche Ableitung der Inverse TTC zwischen EGO-Fahrer und Element $E_1$	1/s <sup>2</sup>
$d/dt(1/TTC_{EGO,E2})$	Zeitliche Ableitung der Inverse TTC zwischen EGO-Fahrer und Element $E_2$	1/s <sup>2</sup>
$d/dt(THW_{E1,E2})$	Zeitliche Ableitung der THW zwischen Element $E_1$ und Element $E_2$	-
$d/dt(THW_{EGO,E1})$	Zeitliche Ableitung der THW zwischen Ego-Fahrer und Element $E_1$	-
$d/dt(THW_{EGO,E2})$	Zeitliche Ableitung der THW zwischen Ego-Fahrer und Element $E_2$	-
$d/dt(TTC_{E1,E2})$	Zeitliche Ableitung der TTC zwischen Element $E_1$ und Element $E_2$	-
$d/dt(TTC_{EGO,E1})$	Zeitliche Ableitung der TTC zwischen Ego-Fahrer und Element $E_1$	-
$d/dt(TTC_{EGO,E2})$	Zeitliche Ableitung der TTC zwischen Ego-Fahrer und Element $E_2$	-
$H_0$	Nullhypothese	-
$H_1$	Alternativhypothese	-
$h_{obj}$	Maximale Höhe eines Objekts $obj$ (Lee)	m
$I_c(\tilde{x}_{EGO}, \tilde{x}_{E1})$	Kollisionsindikator zwischen EGO- und $E_1$ -Trajektorie	-
$lat_{EGO,E1}$	Lateraler Abstand zwischen EGO-Fahrer und Element $E_1$	m



Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$M_x$	Populationsmittelwert der Zufallsvariable $x$	[x]
$m_x$	Parameter $m$ einer logarithmisch normalverteilten Zufallsvariable $x$	[x]
$N$	<u>Mehrfachnennung:</u> Anzahl Trajektorienbeispiele Optimaler Stichprobenumfang Stichprobenbezeichnung	- - -
$n_{real}$	Gesamtanzahl der $x$ - und $y$ -Punkte der realen Trajektorie	-
$n_{gen}$	Gesamtanzahl der $x$ - und $y$ -Punkte der neu generierten, normierten Trajektorie	-
$opt\_Wahrn_{EGO,E1}$	Optische Wahrnehmungsgrößen bezugnehmend auf EGO-Fahrer und Element $E_1$	s
$opt\_Wahrn_{E1,E2}$	Optische Wahrnehmungsgrößen bezugnehmend auf Element $E_1$ und Element $E_2$	s
$opt\_Wahrn_{EGO,E3}$	Optische Wahrnehmungsgrößen bezugnehmend auf EGO-Fahrer und Element $E_3$	s
$p$	Beobachtetes Signifikanzniveau	-
$p(SW)$	Spurwechselwahrscheinlichkeit	-
$p(SW_{BN})$	vorläufige Spurwechselwahrscheinlichkeit	-
$p(SW_i)$	Vertrauenswert	-
$p(K SW)$	Bedingte Kollisionswahrscheinlichkeit	-
$p(Evidenz_i)$	Eintrittswahrscheinlichkeit des Feature (Evidenzvektor) $i$	-
$p(H Evidenz)$	die bedingte Wahrscheinlichkeit der Hypothese $H$	-
$p(Evidenz H)$	die bedingte Wahrscheinlichkeit des gesamten Evidenzvektors	-
$p(\tilde{x}_{E1})$	Verteilungsdichtefunktion Element $E_1$	-
$p(\tilde{x}_{EGO}, \tilde{x}_{E1})$	gemeinsame Verteilungsdichtefunktion für die $x$ - und $y$ -Parameter der EGO- und $E_1$ -Trajektorien	-
$Pr(H x)$	posteriori Wahrscheinlichkeit einer Hypothese in Abhängigkeit der Evidenzvektoren $x$	-
$p(H_i)$	Eintrittswahrscheinlichkeit von $H_i$	-
$r_{obj}$	Radialer Abstand zwischen Sehachse und Objekt auf Höhe von $x_{obj}$ (Lee)	m
$S_{Car}$	Angenommene Fahrzeuglänge	m
$S_{EGO}$	Zurückgelegte Gesamtstrecke des EGO-Fahrers im Falle einer Verzögerung mit $a_{EGO}$ .	m
$S_{E1,E1}$	Longitudinaler Abstand zwischen Element $E_1$ und Element $E_2$	m
$S_{EGO,E1}$	Longitudinaler Abstand zwischen EGO-Fahrer und Element $E_2$	m
$S_{EGO,FRONT}$	Longitudinaler Abstand zwischen EGO-Fahrer und Vorderfahrzeug	m
$S_{Stau}$	Stauabstand	m
$s_x$	Parameter $s$ einer logarithmisch normalverteilten Zufallsvariable $x$	[x]
$sit$	Wert für die ausgewählte Situation	-
$T$	Rangsumme	-
$t_R$	Reaktionszeit	s

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$t_{stop,EGO}$	Zeit, die der EGO-Fahrer bis zum Stillstand benötigt	s
$t_{stop,FRONT}$	Zeit, die das Vorderfahrzeug bis zum Stillstand benötigt	s
$THW$	Time headway (Zeitlücke)	s
$THW_{E1,E2}$	THW zwischen Element $E_1$ und Element $E_2$	s
$THW_{EGO,E1}$	THW zwischen Ego-Fahrer und Element $E_1$	s
$THW_{EGO,E2}$	THW zwischen Ego-Fahrer und Element $E_2$	s
$THW_{min}$	wahrgenommene Mindestzeitlücke eines folgefahrenden Fahrers	s
$TTC$	Time-To-Collision	s
$TTC_{E1,E2}$	TTC zwischen Element $E_1$ und Element $E_2$	s
$TTC_{EGO,E1}$	TTC zwischen EGO-Fahrer und Element $E_1$	s
$TTC_{EGO,E2}$	TTC zwischen Ego-Fahrer und Element $E_2$	s
$pdf_{sit\_blickp}$	situationsabhängige Verteilungsdichtefunktion	-
$v_{E1}$	Geschwindigkeit Objekt $E_1$	m/s
$v_{E2}$	Geschwindigkeit Objekt $E_2$	m/s
$v_{EGO}$	EGO-Geschwindigkeit	m/s
$v_{rel,E1,E2}$	Relativgeschwindigkeit zwischen Element $E_1$ und Element $E_2$	m/s
$w_{obj}$	Maximale Breite eines Objekts $obj$ (Lee)	m
$\chi^2$	Charakteristische Größe des $\chi^2$ -Unabhängigkeitstest	
$X$	Evidenzvektor	-
$\tilde{X}_{EGO}$	projizierte EGO-Trajektorie	-
$\tilde{X}_{E1}$	projizierte $E_1$ -Spurwechseltrajektorie	-
$x_{obj,v}$	Objektabstand auf der Sehachse zur Pupille (und Objekt $obj$ ) (Lee)	m
$\dot{x}_{obj,v}$	Relativgeschwindigkeit zwischen Auge und Objekt $obj$ (Lee)	m/s
$x_{gen}$	Generierte und normierte x-Komponente der Trajektorie	m
$x_{real}$	Laterale Komponente der realen Trajektorie	m
$y_{gen}$	Generierte und normierte x-Komponente der Trajektorie	m
$y_{real}$	Laterale Komponente der realen Trajektorie	m



## Griechische Größen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$\alpha$	Signifikanzniveau	-
$\beta$	Koeffizienten der LR	-
$\beta^T$	Koeffizientenvektor	-
$\Delta_t$	Zeitdauer einer Longitudinale Strecke einer Trajektorie	s
$\Delta_x$	Longitudinale Strecke einer Trajektorie	m
$\eta_{obj}$	Längengrad der retinalen Projektion <i>obj'</i> (Lee)	rad
$\dot{\eta}_{obj}$	Zeitliche Ableitung von Längengraden der retinalen Projektion <i>obj'</i> (Lee)	rad/s
$\theta_{obj}$	Breitengrad der retinalen Projektion <i>obj'</i> (Lee)	rad
$\dot{\theta}_{obj}$	Zeitliche Ableitung von Breitengraden der retinalen Projektion <i>obj'</i> (Lee)	rad/s
$\mu_x$	Mittelwert einer Zufallsvariable x	[x]
$\sigma_x$	Standardabweichung einer Zufallsvariable x	[x]
$\tau$	Optische Wahrnehmungsgröße Tau (Lee)	s
$\dot{\tau}$	Zeitliche Ableitung der optischen Wahrnehmungsgröße Tau (Lee)	-
$\tau_{thr,H}$	Wahrnehmungsschwelle von $\tau$ in horizontaler Richtung	s

## Notationsschlüssel

Index	Bedeutung	abgeleitet von
1	Element 1	-
2	Element 2	-
3	Element 3	-
A,B,C,D	Zufallsvariablen	-
EGO	EGO-Perspektive	ego
$E_x$	Element E mit Nummerierung x	Element EX
H	Horizontaler Blickwinkel	Horizontal
thr	Wahrnehmungsschwelle	threshold
<i>obj</i>	Objekt	object
<i>obj'</i>	Projektionsobjekt	object
v	Blickkoordinatensystem (Lee)	view
$V_1 \dots V_n$	Zufallsvariablen	-



## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abkürzung</b>	<b>Bedeutung</b>
ACME Driver	A common mental environment Driver
ACT-R	Adaptive Control of Thought-Rational
AOI	Areas Of Interest
AF	Automatisierte Fahrfunktion
AOI-AR	AOI – Attention ratio
BIC	Bayesian Information Criterion
BN	Bayes'sches Netz
COSMODRIVE	Cognitive Simulation Model of the Driver
DLR	Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt
DT	Decision Tree
FAS	Fahrerassistenzsystem
FN	False negative – Rate
FOT	Field Operational Test
FP	False positive – Rate
GIDAS	German In-Depth Accident Study
GLP	Glance location probability
GMM	Gauß'sches Mischmodell
GNB	Gaussian Naive Bayes
HMM	Hidden Markov Modell
IHT	Instance Hardness Thresholding
k-NN	K-Nearest-Neighbor
LR	Logistische Regression
MDF	Measurement Data Format
MGD	Mean glance duration
MLE	Maximum-Likelihood-Estimation
MPS	Modellprädiktive Steuerung
PELOPS	Programm zur Entwicklung Längsdynamischer, mikroskopischer Verkehrsprozesse in systemrelevanter Umgebung
PFSM	Probabilistic Finite-State Machines
QN-MHP	Queueing Network-Model Human Processor
RF	Random Forest
RVM	Relevanz-Vektor-Maschine
SCM	Stochastic Cognitive Model
SiL	Software-in-the-Loop
SOAR DRIVER	State, operator and result DRIVER
STSS	Short Term Sensory Store (sensorischer Kurzzeitspeicher)
SVM	Support Vector Machine
TLC	Time to Line Crossing
TN	True negative – Rate
TTC	Time-To-Collision
TP	True positive – Rate
VSM	Verkehrssituationsmuster

# 1 Einleitung

„Sie können das Auto als eine Arbeitswelt, als eine Entertainmentwelt oder als Ruhezone erleben – Sie als Kunde können entscheiden.“ Elmar Frickenstein (BMW AG, 2018)

## 1.1 Motivation

Die fortschreitende Digitalisierung und Vernetzung der Gesellschaft ermöglichen es dem Menschen heute neue Wege hinsichtlich Kommunikation, Bildung, Arbeitszeiten und Unterhaltung zu beschreiben und die tägliche Zeit entsprechend mit neuen Technologien effektiv zu füllen. Um das Potential dieses technischen Fortschritts in Zukunft auch während des Fahrens von Automobilen heben zu können, müssen Systeme entwickelt werden, die es technisch, rechtlich und auch ethisch ermöglichen, den menschlichen Fahrer von der eigentlichen Fahraufgabe teilweise oder sogar ganz zu befreien. Der resultierende Komfortgewinn für den Automobilkunden, der die Symbiose aus Fortbewegung und den neuen Möglichkeiten der Zeitgestaltung darstellt, ist nur eines von vielen Argumenten, die heutige Automobilhersteller im Zuge der Ankündigung sogenannter „Automatisierter Fahrfunktionen“ (AF) heranziehen, wie Elmar Frickenstein betont (ehem. Bereichsleiter „Vollautomatisiertes Fahren und Fahrerassistenz“ BMW AG).

Angesichts dieser Bekanntmachungen hat die Entwicklung von AF sowie die Weiterentwicklung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) ein hohes Maß an Bedeutung im Entwicklungsprozess heutiger Automobile erreicht (Aeberhard et al., 2015; Bahram et al., 2014). Die Integration dieser Funktionen und Systeme in die Fahrzeuge hat also zum Ziel, den menschlichen Fahrer schrittweise von der Fahraufgabe abzulösen und so das Fahrererlebnis um die Möglichkeiten der Digitalisierung und Vernetzung zu erweitern. Im Gegensatz zu bisherigen Assistenzsystemen, wie zum Beispiel Notbremsysteme oder Abstandhaltesysteme, führen diese neuen Systeme damit zu einer Erhöhung der Fahrerassistenz bei komplexen Situationen hin zur vollständigen Übernahme der Fahraufgabe. Um diese Schritte des Übergangs der Verantwortlichkeit vom menschlichen Fahrer zur automatisierten Funktion klar zu definieren, hat die SAE (Society of Automotive Engineers) sechs Automationslevels vorgeschlagen (von Level 0 *No Automation* bis Level 5 *Full Automation*), die als maßgeblich akzeptiert gelten (SAE, 2016).

Diese zunehmende Automatisierung des Automobilverkehrs wird zwangsläufig einen erheblichen Einfluss auf verschiedene sozioökonomische Faktoren darstellen. So wird allgemein erwartet, dass AF und FAS neben der neuartigen Zeitgestaltung des Fahrers zu einer Verbesserung des Verkehrsflusses, einer Senkung des Energieverbrauchs sowie einer Erhöhung der Verkehrssicherheit beitragen (Etemad & Arne, 2014). Insbesondere die annoncierte Erhöhung der Verkehrssicherheit erfordert eine zuverlässige und ganzheitliche Betrachtung der tatsächlichen Auswirkungen von AF und FAS auf das Verkehrsgeschehen, wie in Winner et al. (2015) und Wachenfeld & Winner (2015) dargelegt. Neben diesen Stimmen aus der Wissenschaft fordert zugleich die Politik, wie die Ethik-Kommission des deutschen Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur in ihrem Bericht zum automatisierten und vernetzten Fahren (Ethik-Kommission, 2017), einen Nachweis für eine positive Risikobilanz im Kontext der Verkehrssicherheit vor der Serieneinführung von AF und erweiterten FAS.

Diese Anforderungen führen nach Winner et al. (2015) zwangsläufig zur Wahl simulativer Methoden, um eine holistische Betrachtung des Verkehrs zu ermöglichen und prospektive Aussagen über den Einfluss von AF und FAS treffen zu können. In diesem Zusammenhang beschreiben Kompass et al. (2015) und Helmer et al. (2015) eine stochastische Methode zur Simulation von Verkehr, die eine solche Quantifizierung der Auswirkungen von AF und FAS ermöglicht. Eine ähnliche, szenariobasierte Methode, die sich auf Faktoren wie Akzeptanz und Systemeffektivität fokussiert, stellen Eck-



stein et al. (2013) vor. Zudem zeigen weitere Ansätze, wie die Nutzung einer automatisierten Fahr-funktion als „Trojanisches Pferd“ in einer virtuellen Dauerlaufsimulation (Wachenfeld & Winner, 2015) oder die Verwendung eines SiL-Frameworks (Software-in-the-Loop) von Stellet et al. (2015), die Relevanz und die Nachfrage nach ausgereiften Bewertungsmethoden. Innerhalb der Vielfalt dieser Methoden scheint der Ansatz von Wang et al. (2017), der auf den Arbeiten von Kompass et al. (2015) und Helmer et al. (2015) aufbaut, vielversprechend zur Begegnung der angesprochenen Herausforderungen der ganzheitlichen und prospektiven Betrachtung hinsichtlich der Einführung automatisierter und assistierender Fahr-funktionen. Diese prospektive Wirksamkeitsbewertungsmethode quantifiziert einen möglichen Unterschied in der Sicherheitsleistung zwischen automatisiertem und manuellem Fahren durch die Simulation von Verkehrsverhalten. Angewendete Methoden sind stochastische Parametervariationen und die Verwendung einer Multi-Agenten-Simulation mit *Monte Carlo* Prinzip.

Im Kontext der angesprochenen simulativen Ansätze, die alle ein realistisches Verkehrsverhalten anstreben, stellt vor allem die Modellierung des menschlichen (manuellen) Fahrers Wissenschaft und Industrie vor große Herausforderungen. Besonders die Effizienz und Souveränität, die der Mensch durch Kognition bei der Beherrschung verschiedener Verkehrssituationen unterschiedlichster Komplexität zeigt, verlangt auch in Zukunft weitere Forschungsaktivitäten im Bereich der Fahrermodellierung. Denn Zuverlässigkeit und Ergebnisqualität der Verkehrssimulationen werden erheblich durch die Realitätsabbildung der Fahrermodelle beeinflusst. Für eine ganzheitliche Simulation von Verkehr muss demnach das jeweilige integrierte Fahrermodell dazu befähigt werden, alle relevanten sowie komplexen und weniger komplexen Prozesse des menschlichen Denkens, Entscheidens und Handelns zur Bewältigung der Fahraufgabe abzubilden.

## 1.2 Grundlagen

Der Forschungsbereich zur Fahrermodellierung hat bereits zahlreiche Modelle aus unterschiedlichen Institutionen hervorgebracht, wobei eine Auswahl nachfolgend vorgestellt wird: So besteht beispielsweise das Fahrermodell der kognitiven Architektur *ACT-R (Adaptive Control of Thought-Rational)* aus drei Hauptmodulen – Steuerungsprozesse, Überwachungsprozesse und Entscheidungsprozesse – die die Prozesse der Fahraufgabe über entsprechende Modelle abbilden sollen (Salvucci, 2011). Ein weiterer Ansatz zur Modellierung des menschlichen Fahrers ist die kognitive Architektur *COSMODRIVE (COgnitive Simulation MOdel of the DRIVEr)*, die bereits seit über zehn Jahren von Bellet und Kollegen (beispielsweise Bellet et al., 2018) stetig weiterentwickelt wird. *COSMODRIVE* simuliert ebenfalls drei Hauptprozesse der Fahraufgabe – Wahrnehmung, Kognition und Aktion – und liefert einen effizienten und umfangreichen Modellierungsansatz für das Fahrerverhalten. Das Fahrerverhaltensmodell *SCM (Stochastic Cognitive Model)*, das die Agenten (virtuellen Fahrer) aus der angesprochenen Verkehrssimulationemethode von Wang et al. (2017) steuert, stellt einen weiteren Versuch eines gesamtheitlichen Modellierungsansatzes dar. Durch das Repräsentieren der in Abbildung 1.1 dargestellten Hauptprozesse *Informationsaufnahme*, *mentale Situationsrepräsentation*, *Entscheidungsfindung*, Wahl der *Handlungsoptionen* und *Handlungsauswahl* liefert *SCM* damit einen aussichtsreichen Ansatz zur Modellierung des Fahrerhaltens.

Abbildung 1.1 zeigt hierbei nur eine vereinfachte Darstellung der relevanten Hauptprozesse der Fahraufgabe. Bei einer detaillierten Betrachtung der gesamten Prozesskette müssen interne Rückkopplungen zwischen den jeweiligen Prozessschritten berücksichtigt werden.



Abbildung 1.1: Menschliche Hauptprozesse der Fahraufgabe

Was die beschriebenen Fahrermodelle nicht oder nur in rudimentärer Ausprägung betrachten, sind menschliche Prozesse der höheren Kognition innerhalb der *mental*en *Situationsrepräsentation*. Hierzu zählen komplexe Denk- und Informationsverarbeitungsprozesse, die zu Entscheidungen und Handlungen führen (Wirtz, 2017). Im Speziellen besteht höhere Kognition in Anlehnung an die Theorie zu *Situationsbewusstsein* von Endsley (Endsley, 2015a) oder nach dem Modell der Informationsverarbeitung von Wickens (Wickens et al., 2016) aus vier Teilprozessen: *Situationsmustererkennung*, *Situationsverständnis*, *Antizipation* und *Prädiktion*<sup>1</sup> (wobei *Antizipation* und *Prädiktion* zu vorausschauenden Fähigkeiten zählen). Diese vier Teilprozesse werden in der nachfolgenden Arbeit im Allgemeinen als *höhere kognitive Prozesse* bezeichnet. Besonders die realistische Vorausschau/Vorhersage und Bewertung zukünftiger Handlungen wahrgenommener Verkehrsteilnehmer stellt die Entwickler der Fahrermodelle vor große Herausforderungen. Dies liegt zum Beispiel an der fehlenden Messbarkeit<sup>2</sup> und Objektivierung sowie der hohen Komplexität der Prozesse. Folglich sind diese Fähigkeiten nur stark vereinfacht in heutigen Fahrermodellen zu finden und zudem nicht in Bezug auf das reale Fahrerverhalten validiert.

Die fehlende, aber zwingend notwendige Integration und Validierung der Prozesse höherer Kognition in heutigen Fahrerverhaltensmodellen wird daher als Forschungsschwerpunkt für die vorliegende Arbeit definiert. Perspektivisch soll damit die Qualität und Aussagegüte von Verkehrssimulationen hin zu realem Verkehrsverhalten weiter erhöht werden.

### 1.3 Zielsetzung und Struktur

Das Ziel dieser Arbeit ist demnach die Entwicklung eines neuen Teilmodells. Dieses soll mithilfe etablierter Modellierungsmethoden und basierend auf bewährten Theorien aus der Kognitionspsychologie ein aktuelles Fahrerverhaltensmodell zur Abbildung *höherer kognitiver Prozesse* befähigen. Konkret sollen Entscheidungen und Handlungen des bestehenden Fahrerverhaltensmodells beeinflusst und ein vorausschauenderes Verhalten erzeugt werden. Ferner soll die Realitätsabbildung des Fahrerverhaltensmodells erhöht werden.

Als Fahrerverhaltensmodell steht *SCM* bereits fest, da sowohl dieses Fahrerverhaltensmodell als auch die vorliegende Arbeit im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen der BMW AG und dem Lehrstuhl für Kraftfahrzeugtechnik der TU Dresden entsteht. Zudem zeigt eine Analyse des aktuellen Entwicklungsstandes von *SCM* großes Weiterentwicklungspotential, besonders im Bereich der Abbildung höherer Kognition.

Zur Bearbeitung der Zielstellung werden in Kapitel 2 zunächst der wissenschaftliche Hintergrund zur theoretischen Beschreibung des Fahrerverhaltens anhand verschiedener Ansätze und etablierte Modelle zur Beschreibung kognitiver Prozesse vorgestellt. Neben unterschiedlichen Klassifikationsansätzen von Fahrermodellen aus der Wissenschaft wird der Stand der Technik aktueller Fahrerverhaltensmodelle an vier Modellansätzen beispielhaft erläutert. Diese Modelle werden im Anschluss für die Ableitung des Forschungsbedarfs herangezogen.

Auf dessen Grundlage und anhand des erklärten Ziels der Arbeit werden die Forschungshypothesen in Kapitel 3 erarbeitet. Darauf bezugnehmend erfolgen eine Darlegung der methodischen Ansätze

---

<sup>1</sup> Für diese Arbeit werden folgende Definitionen nach Pezzulo et al. (2008) festgelegt (Erläuterungen siehe Kapitel 2.2.6): *Antizipation* ist die Ermittlung der Wahrscheinlichkeit einer potentiellen Handlung eines anderen Verkehrsteilnehmers (bspw. eines Spurwechsels).

*Prädiktion* ist die Bewertung einer potentiellen Handlung, auf Grundlage der Ermittlung der Wahrscheinlichkeit und der Projektion einer potentiellen Handlung (bspw. einer Spurwechseltrajektorie).

<sup>2</sup> Andere Teilprozesse, wie das Blickverhalten im Rahmen der Informationsaufnahme, können beispielsweise mithilfe von Blickbewegungsmesstechnik erfasst und Handlungsoptionen sowie die Handlungsausführung anhand von physikalischen Messgrößen, wie Beschleunigung oder Lenkwinkel gemessen werden.



sowie eine Aufführung der an die Modellierung gestellten Anforderungen und Rahmenbedingungen. Weiterhin werden die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten und durchgeführten Probandenstudien beschrieben.

Kapitel 4 bildet den Hauptteil der Arbeit und dokumentiert die gesamte Modellierung sowie Validierung der einzelnen Teilprozesse höherer Kognition *Situationsmustererkennung*, *Situationsverständnis*, *Antizipation* und *Prädiktion*, aus denen sich das zu entwickelnde Teilmodell zusammensetzt. Ebenfalls Bestandteil dieses Kapitels sind die Ableitung der phänomenologischen Struktur des Teilmodells sowie die Herleitung der relevanten Verkehrssituationen.

Die Integration des Teilmodells inklusive der Kernprozesse in das ausgewählte Fahrerhaltensmodell *SCM* wird in Kapitel 5 beschrieben. Dies geschieht anhand einzelner Erläuterungen zu den entwickelten Klassen und Funktionen. Ein zugehöriges UML-Diagramm (Unified Modeling Language) befindet sich im Anhang.

Kapitel 6 dokumentiert abschließend die Wirksamkeit des in *SCM* integrierten Teilmodells höherer Kognition. Anhand *virtueller Probandenstudien* wird untersucht, inwieweit sich das Agenten- und Verkehrsverhalten nach der Integration höherer Kognition von dem ursprünglichen *SCM*-Zustand unterscheiden. In diesem Zuge werden zudem Ergebnisse eines Vergleichs zwischen simuliertem Agentenverhalten und realem Fahrverhalten geliefert.

## 1.4 Grenzen der Arbeit

Für die Entwicklung des Teilmodells höherer Kognition mit seinen Teilprozessen *Situationsmustererkennung*, *Situationsverständnis*, *Antizipation* und *Prädiktion* werden Einschränkungen definiert, da eine vollumfängliche Betrachtung des gesamten Verkehrs in seiner Komplexität und der hohen Variation an Situationen den Umfang dieser Arbeit übersteigen würde. Diese Vereinfachungen und Grenzen werden anschließend aufgeführt, in Kapitel 8 (Ausblick) aber nochmals aufgegriffen und Vorschläge zur Erweiterung aufgezeigt.

Die für diese Arbeit relevanten Verkehrssituationen<sup>3</sup> (Annäherung normal/salient, Folgefahrt normal/salient) bilden einen Anteil der gesamten im Verkehrsgeschehen vorkommenden Situationen ab. Mithilfe erarbeiteter Definitionen und der Analyse einer Unfalldatenbank wird die Bedeutung dieser Situationsauswahl für den zugrunde liegenden Forschungsschwerpunkt nachgewiesen. Diese Auswahl bezieht sich ausschließlich auf Autobahnsituationen bei Tag.

Ableitend aus dieser Situationsauswahl werden die Modelle der *Antizipation* und *Prädiktion* ausschließlich für Vorhersagen von potentiellen Spurwechseln wahrgenommener Verkehrsteilnehmer von dem rechten Fahrstreifen hin auf den EGO-Fahrstreifen erstellt. Diese Manöver zeigen nicht nur eine hohe Relevanz bei verkehrssicherheitskritischen Fragestellungen, sondern liefern auch eine hervorragende Grundlage zur Modellierung vorausschauenden Handelns. Zudem beschränkt sich die Modellierung der *Prädiktion* ausschließlich auf die *proaktive Prädiktion*<sup>4</sup>. Die hier verwendete Spurwechseldatenbank für die Trajektorienprädiktion repräsentiert dabei eine Stichprobe aus allen Spurwechseln des Verkehrsgeschehens.

Im Hinblick auf die maschinell lernenden Verfahren zur Modellierung der *Situationsmustererkennung* wird ebenfalls lediglich die erwähnte Situationsauswahl herangezogen. Das hat zur Folge, dass

<sup>3</sup> An dieser Stelle werden die relevanten Verkehrssituationen lediglich erwähnt. Eine ausführliche Beschreibung kann Kapitel 4.2 entnommen werden.

<sup>4</sup> *Proaktive Prädiktion* betrachtet zeitlich gesehen den situativen Kontext am weitesten vor dem eigentlichen vorhergesagten Ereignis (Reher et al. 2016). Wegen ihrer hohen Komplexität fehlt sie in den heutigen Fahrerhaltensmodellen und ist deshalb besonders interessant für diese Arbeit. Für weitere Informationen sei an dieser Stelle auf Kapitel 3.1 verwiesen.