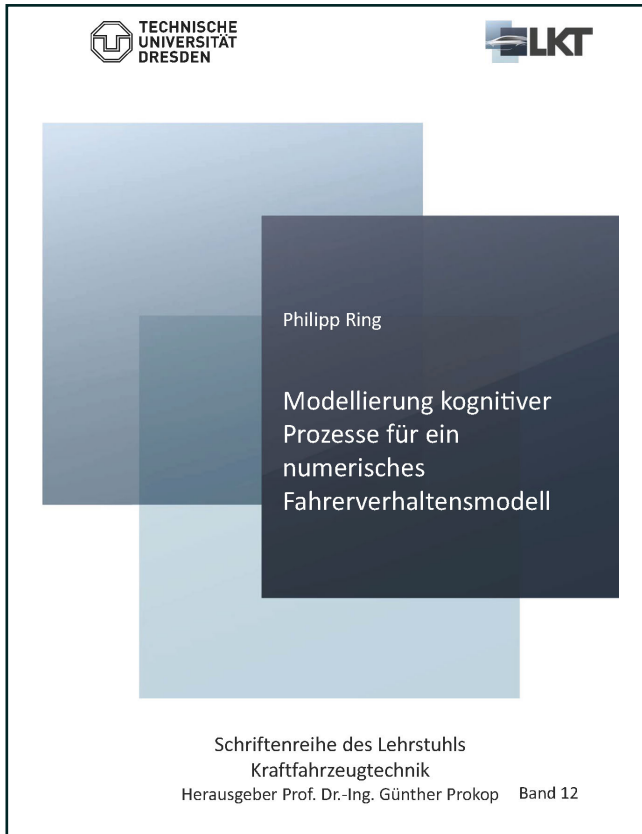




Philipp Ring (Autor)  
**Modellierung kognitiver Prozesse für ein numerisches  
Fahrerverhaltensmodell**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8261>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

# 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 Verkehrssimulationmethode 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.

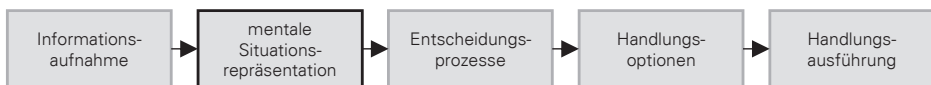


Abbildung 1.1: Menschliche Hauptprozesse der Fahraufgabe

Was die beschriebenen Fahrermodelle nicht oder nur in rudimentärer Ausprägung betrachten, sind menschliche Prozesse der höheren Kognition innerhalb der *mentalen 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.

das Teilmodell höherer Kognition nur diese Verkehrssituationen (Annäherung normal/salient, Fahrfahrt normal/salient) erkennen und ein *Situationsverständnis* für diese entwickeln kann. Alle anderen, wahrgenommenen Situationen verarbeitet *SCM* nach den bereits vorhandenen Regeln und Prozessen. Bei der Implementierung des Teilmodells höherer Kognition in *SCM* wird diese Einschränkung berücksichtigt, sodass das Gesamtmodellverhalten des Fahrermodells nicht nachteilig verändert wird.

Weiterhin ist das Teilmodell zur Abbildung höherer Kognition nur für Geschwindigkeiten größer 60 km/h des EGO-Fahrers und der wahrgenommenen Verkehrsteilnehmer anzuwenden. Hintergrund ist, dass das Verkehrsverhalten bei Geschwindigkeiten kleiner 60 km/h einem Stauverhalten gleichkommt. Dieses Stauverhalten unterscheidet sich maßgeblich von normalem Verkehrsverhalten (z.B. im Abstandsverhalten der Fahrer), weshalb es gesondert für die Modellierung des Fahrerhaltens zu betrachten ist, jedoch nicht in dieser Arbeit behandelt wird.

Schließlich werden in dieser Arbeit ausschließlich kognitive Prozesse des Fahrers im Zustand des manuellen Fahrens modelliert. Das bedeutet, dass die entwickelten Modelle der Kognition den Fahrer ohne etwaige Einflüsse von Assistenzsystemen und automatisierten Fahrfunktionen repräsentieren.



## 2 Wissenschaftlicher Hintergrund

Das nachfolgende Kapitel stellt, neben der theoretischen Beschreibung menschlichen Verhaltens und kognitiver Prozesse<sup>5</sup> (Kapitel 2.2), den Stand der Technik zur Modellierung des Fahrerhaltens (Kapitel 2.3) exemplarisch für eine Auswahl von Fahrerhaltensmodellen dar. Eingangs werden dafür in Kapitel 2.1 Definitionen etablierter Begriffen im Rahmen des Verkehrskontexts aufgegriffen und in einen nutzbringenden Zusammenhang für die weitere Anwendungen in dieser Arbeit gebracht. In Kapitel 2.4 wird abschließend der Forschungsbedarf für die vorliegende Arbeit anhand der Erläuterungen aus den vorhergehenden Kapiteln zusammengefasst. Dabei ist anzumerken, dass in Kapitel 4 zudem weiterführende, spezifische Grundlagen für die jeweiligen Modellierungsschwerpunkte angeführt werden.

Ziel dieses Kapitels ist es, eine wissenschaftliche Grundlage für die Modellierung kognitiver Prozesse zu schaffen und den theoretischen Rahmen der vorliegenden Arbeit aufzuspannen. Zudem dient dieses Kapitel zur Ableitung der Forschungshypothesen und als Einleitung des Forschungsansatzes in Kapitel 3.

### 2.1 Begriffsdefinitionen im Verkehrskontext

Für diese Arbeit ist die Definition kontextrelevanter Begriffe von großer Bedeutung, da so ein einheitliches Verständnis für nachfolgende Begriffsverwendungen geschaffen wird. In diesem Kapitel werden verschiedene Begriffsdefinitionen aus der Verkehrsforschung vorgestellt. Dabei wird deutlich, dass keine einheitliche Meinung zu den Begriffen „Verkehrssituation“, „Fahrsituation“ und „Fahrersituation“ existiert (wie in den nachfolgenden Kapiteln 2.1.1 bis 2.1.3 ersichtlich). Zudem werden die Begriffe „Szenario“, „Szene“ und „Situation“ in einen Zusammenhang gebracht. Dieses Kapitel dient nur dem Aufzeigen aktueller Definitionen sowie dem Festlegen der für diese Arbeit relevanten Begriffe. In Kapitel 4.2 werden diese Definitionen nochmals aufgegriffen und in den Kontext der nachfolgenden Modellierungsarbeiten *höherer kognitiver Prozesse* gebracht.

Der Begriff „Situation“ wird in der Psychologie weitestgehend einheitlich betrachtet. So definiert Fröhlich (1994) die räumlichen und zeitlichen äußeren Bedingungen des menschlichen Verhaltens als „Situation“. Diese Definition bezieht sich auf das subjektiv Erlebte des Menschen. Reichart (2000) liefert den Denkanstoß, auf Basis der Definitionen von Zimbardo & Ruch (1978), dass verschiedene Menschen objektiv gleiche Situationen aufgrund ihrer Persönlichkeit, Erfahrung usw., subjektiv und damit unterschiedlich erleben und wahrnehmen. Daraufhin schlägt Reichart vor, zwischen objektiv vorliegenden Situationen und subjektiv erlebten Situationen zu unterscheiden. Diese Unterscheidungen werden in den Beschreibungen in Kapitel 2.1.1, 2.1.2 und 2.1.3 deutlich.

Vorerst wird aber der Begriff „Situation“ im Kontext der Verkehrsforschung erörtert. Nach Geyer et al. (2014) umfasst eine „Situation“ die Elemente „Szenerie“ (z.B. der Straßenverlauf), „Szene“ (z.B. das Fahrverhalten verschiedener Fahrzeuge in einer Szenerie), die „Situation“ direkt (z.B. Warten hinter einem Hindernis) und das „Szenario“ (z.B. Kreuzungsszenario mit verschiedenen Fahrmöglichkeiten an einer Kreuzung). Darüber hinaus kann eine „Szene“, insbesondere eine „subjektive Szene“, als eine Momentaufnahme definiert werden, die (in Bezug auf Fehler und Unvollständigkeit) Umwelt, dynamische Elemente, Selbstrepräsentation sowie die Verbindungen zwischen allen wahrnehmbaren Akteuren enthält (Ulbrich et al., 2015). Weiterhin beschreiben Ulbrich et al. (2015) eine „Situation“ als eine subjektive Ableitung einer „Szene“ basierend auf der menschlichen Informationsauswahl, die benötigt wird, um ein adäquates Aktionsmuster zu wählen und zu handeln. Darüber hinaus stellt ein „Szenario“ eine zeitliche Entwicklung mehrerer Szenelemente dar (Ulbrich et al.,

---

<sup>5</sup> Nach dem Lexikon der Psychologie von Wirtz (2017) repräsentiert die Kognition alle bewussten und unbewussten mentalen Prozesse, von der Wahrnehmung bis zum Denken. Weitere Erläuterungen werden in Kapitel 2.2.7 gegeben.



2015). Aufbauend darauf führen Roesener et al. (2016) den Begriff „Fahrszenario“ ein, der als eine Abstraktion und allgemeine Beschreibung einer „Fahrsituation“ verstanden wird.

### 2.1.1 Verkehrssituation

Nach Reichart (2000) ist eine „Verkehrssituation“ eine objektiv beschreibbare Konstellation aus zeitlichen und räumlichen verkehrsbezogenen Einflussgrößen, die die Arbeitsumgebung der Verkehrsteilnehmer darstellt. Diese Einflussgrößen beinhalten zudem Größen, die vom Fahrer (bzw. Verkehrsteilnehmer dieser Situation) nicht direkt wahrgenommen werden können. Fastenmeier (1995; 2001) und v. Benda (1983) gehen davon aus, dass die Handlung Fahren eine Kette von Interaktionen zwischen dem Mensch-Fahrzeug-System und seiner Umwelt ist. Durch die Teilung dieser Kette ergeben sich abgegrenzte „Verkehrssituationen“. Darauf basierend definieren sie „Verkehrssituation“ als die Umgebung des Fahrer-Maschinen-Systems aus der Fahrersicht. Somit stellt die „Verkehrssituation“ einen begrenzten Teil des Verkehrs dar. Im Gegensatz zu Reicharts Definition der „Verkehrssituation“, aber ähnlich seiner Definition zur „Fahrersituation“, sehen Fastenmeier und v. Benda die „Verkehrssituation“ nicht nur als verkehrsbezogenes Konstrukt, sondern als subjektive Situation einschließlich der Fahrersicht sowie räumlicher und physikalischer Gegebenheiten.

### 2.1.2 Fahrsituation

Eine „Fahrsituation“ ist nach Reichart (2000) ein prinzipiell wahrnehmbarer Ausschnitt einer „Verkehrssituation“ aus der Fahrersicht. Sie stellt eine Teilmenge der „Verkehrssituation“ dar und wird als reine verkehrstechnische Klassifikation verstanden, in der der Fahrer nicht direkt berücksichtigt wird (Schneider, 2009). Um den Fahrer von einer „Fahrsituation“ in eine andere Situation zu überführen, sind Fahreraktionen („Manöver“) notwendig (Domsch & Negele, 2008). Schneider et al. (2008) stimmen Reichart bezüglich der Definition zur „Fahrsituation“ zu. Sie beschreiben zudem ein Fahrmanöver als eine Aktion oder eine Abfolge einer Aktion, die den Fahrer von einer „Fahrsituation“ in eine andere versetzt.

### 2.1.3 Fahrersituation

Die „Fahrersituation“ definiert Reichart (2000) als die tatsächlich vom Fahrer wahrgenommene Situation. Bei der Wahrnehmung einer „Fahrersituation“ spielen psychische und physische Eigenschaften eine zentrale Rolle. Als „Fahrersituation“ lässt sich auch der Begriff „Situation“ nach Reichel et al. (2010) einordnen. Reichel et al. (2010) definieren die „Situation“ als eine „... Zusammenstellung relevanter Daten und ihrer Interpretationen aus einer egozentrischen Perspektive...“ (Reichel et al., 2010).

Die hier vorgestellten Definitionen stellen lediglich eine Auswahl an Begriffsdefinitionen aus der Literatur dar. Mit dieser Aufstellung wird unterstrichen, dass in der Literatur Inkonsistenz herrscht, was das Verständnis und die Definitionen dieser Begriffe angeht. Weitere Arbeiten zu diesem Thema sind zum Beispiel Haag (1998), Maurer (2000), Mock-Hecker (1994) und Pellkofer (2003).

Für die weiterführende Arbeit werden die Begriffsdefinitionen von Reichart für „Verkehrssituation“, „Fahrsituation“ und „Fahrersituation“ als bindend angesehen.

## 2.2 Theoretische Beschreibungen des Fahrerhaltens

Die systematische Beschreibung menschlichen Verhaltens findet in zahlreichen Modellen unterschiedlicher Detailtiefe und in verschiedensten Einsatzbereichen Anwendung. Vor der nachfolgenden Vorstellung ausgewählter Modellbeispiele wird in Kapitel 2.2.1 einleitend dazu vorausschauendes Verhalten anhand des Begriffs *Antizipation* erklärt. Dieses Kapitel kann als Zusammenfassung verschiedener Literaturquellen für weitergehende Recherchen herangezogen werden. Es spielt aber für die Modellierungsansätze in der vorliegenden Arbeit eine untergeordnete Rolle. In Kapitel 2.2.2 wird anschließend das Drei-Ebenen-Modell von Rasmussen beschrieben. Ein weiteres Modell

ist das Stufenmodell der Gefahrenkognition nach Schlag in Kapitel 2.2.3, das konkrete Gefahrensituationen adressiert. Zudem wird in Kapitel 2.2.4 die  $\tau$ -Theorie nach Lee dargestellt. Sie erläutert, wie visuell wahrgenommene Umgebungsinformationen die Handlung des Menschen beeinflussen. Weitere etablierte Ansätze, wie zum Beispiel das Modell zu *Situationsbewusstsein* nach Endsley sowie das Informationsverarbeitungsmodell nach Wickens werden in Kapitel 2.2.5 vorgestellt.

Diese Modelle und Ansätze von Rasmussen, Schlag, Lee, Endsley und Wickens dienen zum einen als theoretische Einleitung in die Thematik; zum anderen bilden sie die Grundlage der phänomenologischen Struktur des zu entwickelnden Teilmodells höherer Kognition und werden in diesem in Teilen direkt umgesetzt.

Als Vorbereitung auf die Modellierung in Kapitel 4 und als Hilfestellung für die Auswahl geeigneter methodischer Ansätze beschreibt zudem Kapitel 2.2.6 etablierte Modellierungsansätze zur Abbildung vorausschauender Fähigkeiten des Menschen. Aufbauend auf diesen theoretischen Inhalten wird in Kapitel 2.2.7 abschließend eine Arbeitsdefinition und Unterteilung des Begriffs „Kognition“ in niedrige Kognition und höhere Kognition aufgestellt.

### 2.2.1 Vorausschauende Fähigkeiten – Der Begriff „Antizipation“

Nachfolgend wird der Begriff *Antizipation* (im Sinne vorausschauenden Handelns) im Allgemeinen und im Fahr- und Verkehrskontext erläutert. Die Struktur des Kapitels orientiert sich dabei an der Arbeit von Rauch (2009). Rauch behandelt den Antizipationsbegriff ausschließlich im psychologischen (oder menschlichen) Sinne, was für die Modellierung antizipativer Fähigkeiten aber nur unzureichend detaillierte Informationen liefert, da die Beschreibungen oftmals einen zu generischen Charakter aufweisen. Konkrete Modellierungsansätze aus bisherigen Forschungsarbeiten zum Thema *Antizipation* werden deshalb in Kapitel 2.2.6 aufgezeigt.

#### Antizipation im Allgemeinen

*Antizipation* steht nach den Arbeiten von Endsley (1995b, 2015b) und Wickens (2012) mit informationsverarbeitenden Prozessen und Fähigkeiten des Situationsbewusstseins unabdingbar in Verbindung. Hoffmann (1993) beschreibt *Antizipation* in seiner Arbeit als eine Art (teils historischer) Ansätze und Zusammenhänge zwischen Wahrnehmung und Verhalten. So erklärt Wundt (1907) *Antizipation* als einen Vorgang von Willkürhandlungen, die unter Einwirkung von Sinnesreizen (und auf Grundlage der dominierenden Vorstellung über die Umwelt) eine Handlung vorbereitet. Auch Ach (1935) sieht die Dominanz eines Konstruktes aus der Umwelt als maßgebend für die Auswahl einer zielgerichteten Handlung und einer Beeinflussung der Wahrnehmung durch dieses Handlungsziel. Anfängliche Erläuterungen von Hofmann (1993) zu *Antizipation* definieren nicht eindeutig, ob es um eine Projektion von Handlungen in die Zukunft bezugnehmend auf sich, als eigenes Objekt, oder auf Projektionen anderer Objekte geht. In Hoffmanns erweiterten Erläuterungen zur *antizipativen Verhaltenssteuerung* beschreibt er das Wissen über die Konsequenzen einer bestimmten Handlung als Voraussetzung einer vorausschauenden Verhaltenssteuerung. Hier kann angenommen werden, dass dieses Wissen sich nicht nur explizit auf das eigene Objekt bezieht, sondern durchaus diese Überlegungen für andere wahrgenommene Objekte – welche Verhaltensweisen, unter welcher Bedingung, zu welcher Konsequenz führen – durchgeführt werden. (Hoffmann, 1993; Rauch, 2009)

Etwas konkreter beschreiben Dorsch et al. (2004) *Antizipation* als „...gedankliche Vorwegnahme [...]“. Jedes Denken ist mit einer „Zielvorstellung“ verbunden, die antizipiert wird. *Antizipation* bezeichnet auch die prospektive Komponente jedes Erlebens und Verhaltens...“ (Dorsch et al., 2004). Nach Deutsche (2005) ist *Antizipation* die Fähigkeit, Änderungen in der Umwelt vorherzusehen und Zustände dieser Umwelt fortzuschreiben.

Im Hinblick auf antizipatives Verhalten im Fahrkontext werden nachfolgend Ergebnisse aus verschiedenen Veröffentlichungen zusammengefasst.

## Antizipation im Fahr- und Verkehrskontext

Der Antizipationsprozess beim Fahren findet vorrangig auf der Grundlage visueller Informationen (Objekte, Ereignisse, Zustände, Straßenverlauf) über das Fahrerumfeld statt (Cohen, 1976). Um sich in diesem komplexen Umfeld sicher und konfliktfrei zu bewegen, beschreibt *Antizipation* einen zentralen Schwerpunkt der Fahraufgabe, in dem Situationsentwicklungen (Veränderungen von Bedingungen in der Umwelt) analysiert und kritische Situationen rechtzeitig erkannt werden (van der Hulst, Meijman & Rothengatter, 1999). Rauch (2009) ordnet antizipative Steuerungsprozesse des Fahrers in das hierarchische Modell der Fahrhandlung nach Donges (1978) (Navigation – Führung – Stabilisierung) in die Führungsebene mit überlagernden (kompensatorischen) Regelungen der Stabilisierungsebene ein. Als Beispiel für diese Einordnung gibt Rauch die Auswahl eines Kurses auf einem unmittelbar vorausliegenden Streckenabschnitt an, auf dem die Schritte der Handlungen geplant werden, um Konflikte zu vermeiden und frühzeitig auf veränderte Bedingungen reagieren zu können (Rauch, 2009). Zeitliche Aspekte von *Antizipation*, d.h. wie weit Handlungen in der Zukunft vorhergesagt werden, um ein sicheres Fahrerverhalten zu ermöglichen, werden (auch aufgrund der zahlreichen Einflussfaktoren) in Studien unterschiedlich diskutiert. Nachfolgend werden Ergebnisse aus solchen Untersuchungen vorgestellt:

*Antizipation* im Fahrerverhalten wird nicht ausschließlich mit Verhaltensprojektion anderer Verkehrsteilnehmer in Verbindung gebracht. Eine Anwendung antizipativer Fähigkeiten ist zum Beispiel das Abschätzen des weiteren Straßenverlaufs (Reichart, 2000). Untersuchungen von Blickabwendungszeiten von Reichart (2000) haben ergeben, dass Fahrer bis zu 4,5 s auf Autobahnen den Blick von der geraden Straße abwenden können, ohne die Spurhaltung zu verletzen. Weitere Untersuchungen des Blickverhaltens haben gezeigt, dass der fahrende Mensch bei dem Folgen einer geraden Straße über die Fixation des Fluchtpunktes (auf den er 2/3 der Zeit schaut) peripher die Spur erfasst, den Verlauf abschätzt und gleichzeitig das zeitliche und räumliche Verkehrsgeschehen antizipiert (Underwood, Chapman, Bowden & Crundall, 2002). Boer und Hildreth (1999) definieren als maximal vorausschauenden Zeitabstand für den Straßenverlauf 4 s. Untersuchungen von Mortimer und Jorgenson (1975) hinsichtlich der Blickfixation vor dem eigenen Fahrzeug haben gezeigt, dass Probanden einen vorausschauenden Horizont von ca. 3 s wählten, auf den sie den Blick fixierten. Zumindest im Hinblick auf antizipatives Verhalten bei Kurvenfahrten und Spurkontrollen konnten Cavallo et al. (1988) feststellen, dass höhere Fahrerfahrung der Probanden zu einer Erhöhung der Spurkontrolle führte. Für Fahrspurwechsel haben Salvucci und Liu (2002) antizipatives Verhalten (antizipative Steuerungsprozesse) nachgewiesen, wodurch die Probanden vor dem eigentlichen Spurwechsel bereits Handlungen, wie frühzeitiges Verzögern oder frühzeitiges Einstellen eines Lenkwinkels zum Erreichen des Zielfahrestreifens zeigten.

Im Kontext eines vorausfahrenden Fahrzeugs nutzt der Mensch zur Wahrnehmung von Geschwindigkeitsänderungen Hinweise, wie zum Beispiel Bremslichter oder zeitliche Veränderungen der visuellen Informationen (siehe  $\tau$ -Theorie, Kapitel 2.2.3) (van der Hulst et al., 1999). Van der Hulst et al. (1999) beschreiben einen zeitlichen Mindestabstand von Fahrern hinter einem vorausfahrenden Fahrzeug von ca. 1,5-3 s. Dies entspricht einer Reaktionszeit des Fahrers auf antizipationsrelevante Merkmale wie Beschleunigen, Verzögern oder Lenken des Vorderfahrzeugs. Diese Zeiten entsprechen auch den Erkenntnissen von Braess und Donges (2006). Offensichtlich antizipieren Fahrer diesen zeitlichen Mindestabstand für ein sicheres Folgefahrverhalten ihrerseits. Tanida und Pöppel (2006) haben in ihren Studien ein ähnliches Zeitfenster von 2-3 s Zeitabstand herausgefunden. Diese Zeit kann als eine Art „vergangene Zeit vom Jetzt bis zum vorherigen Update“ gesehen werden, die Fahrer nutzen, um mögliche eigene Handlungen zu koordinieren.

Der Einfluss von Ablenkung auf die Prozesse der Wahrnehmung (mit anschließenden antizipativen Handlungen) wird zum Beispiel in Reichart (2000), Zheng et al. (2004) und Lee et al. (2005) untersucht, wird hier aber nicht weiter betrachtet, da dieses Thema nicht Schwerpunkt der Arbeit ist.

*Antizipation* in Zusammenhang mit Gefahrensituationen wurde zum Beispiel von Velichkovsky et al. (2002) untersucht. Dabei lag das Blickverhalten, speziell Fixationsdauern und Fixationshäufigkeiten, im Vordergrund der Studien. Bei potentiellen Gefahren war ein signifikanter Anstieg der Fixationshäufigkeit auf die potentielle Gefahrensituation sowie eine Zunahme der Fixationsdauer zu verzeichnen. Im Rahmen der Studien von Velichkovsky et al. (2002) wurde zudem antizipatives Bremsverhalten untersucht. So zeigten Probanden ca. 3 s vor der eigentlichen Reaktion des Vorderfahrzeuges auf ein einsicherendes Fahrzeug Reaktionen, indem sie den Abstand zu dem Vorderfahrzeug vergrößerten. (Velichkovsky et al., 2002)

**2.2.2 Modell menschlichen Verhaltens nach Rasmussen**

Für ein erstes Verständnis und Beitrag leistend für den Aufbau der Grundstruktur des Teilmodells zur Abbildung mentaler und *höherer kognitiver Prozesse* liefert das Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen (1983) eine solide Grundlage, weshalb es im Folgenden vorgestellt wird. Gerade die Darstellungen auf den Ebenen des *Regelbasierten Verhaltens* und des *Wissensbasierten Verhaltens* stärken die Bedeutung, menschliche Kognition zu verstehen und ihr in der Modellierung menschlichen (Fahrer-) Verhaltens unbedingt Rechnung zu tragen. Die Anwendung einer spezifischen Ebene des Drei-Ebenen-Modells auf die Problemstellung dieser Arbeit ist nicht direkt möglich, da Rasmussen zum einen ausschließlich allgemeine Erläuterungen zu den einzelnen Ebenen anbringt, das Modell zudem ausschließlich Informationsaufnahme und Handlung abbildet (ohne die Zwischenprozesse näher zu erläutern) und die Betrachtung von intraindividuellen Fähigkeiten, wie zum Beispiel Fahrerfahrung ausgespart wird. Aus diesem Grund werden in den Kapiteln 2.2.3 bis 2.2.5 weitere Modelle vorgestellt, die ausschlaggebend für diese Arbeit und den abgeleiteten Aufbau des zu entwickelnden Teilmodells sind.

Das Drei-Ebenen-Modell menschlichen Verhaltens nach Rasmussen stellt einen qualitativen und allgemeingültigen Blick auf unterschiedliche kognitive Fähigkeiten des Menschen im Zusammenhang mit zielgerichteten Tätigkeiten dar. Es wurde von Rasmussen nicht explizit für den Fahrkontext entwickelt, kann aber durch seinen generischen Charakter gut auf das Problem des Fahrens übertragen werden. Die Darstellung der drei hierarchischen Ebenen nach Rasmussen (1983) veranschaulicht Abbildung 2.1.

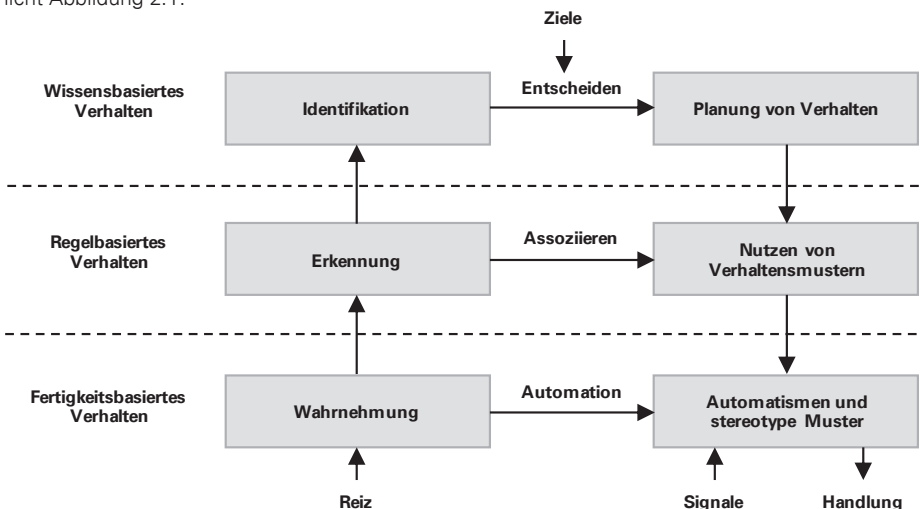


Abbildung 2.1: Drei-Ebenen-Modell nach Rasmussen (1983)

Die Modellebene *Fertigkeitsbasiertes Verhalten* repräsentiert sensomotorische Fähigkeiten des Menschen, ohne direkte Kontrolle. Das Verhalten ist reflexartig und besitzt einen geschmeidigen und automatisierten Charakter. Der Grad der Geübtheit, den der Mensch bei der Ausführung der Aufgabe besitzt, hat dabei direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit und den Erfolg der Erfüllung der Aufgabe. Gleichzeitig steigt dadurch die Unbewusstheit der Kontrolle bei der Ausführung der Tätigkeit und diese daraus resultierende Routine wiederkehrender Handlungsabläufe führt zur zeitlich effektivsten Form menschlichen Verhaltens. Das interne Modell über die Umgebung des Menschen ist in dieser Ebene sehr flexibel und effizient dynamisch. Zudem arbeitet der Körper als multivariables System, der sein Verhalten mit dem der Umgebung zu synchronisieren versucht. Typische Beispiele für *Fertigkeitsbasiertes Verhalten* sind zum Beispiel Fahrradfahren oder das Spielen eines Musikinstruments. Im Fahrkontext kann hier das Reagieren auf plötzlich auftretenden Seitenwind oder das Gegenlenken bei einem unvorhersehbaren Fahrzeugverhalten eingeordnet werden.

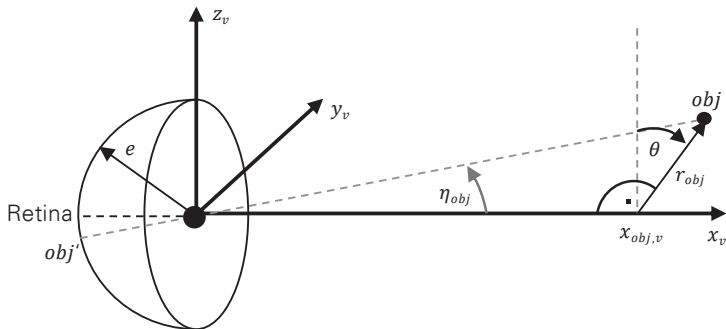
Die mittlere Modellebene *Regelbasiertes Verhalten* nutzt der Mensch bei Situationen, in denen er nicht auf eine effiziente Konditionierung einer fertigkeitbasierten Ausführung einer Aufgabe zurückgreifen kann. Dazu bedient sich der Mensch einer Sammlung an gespeicherten Verhaltensmustern (Regeln), die ihm zum Beispiel Sequenzen von Handlungsabläufen in einem bereits erlernten (ähnlichen/bekanntem) Gebiet zur Verfügung stehen. Hier spielen Erfahrungen eine wichtige Rolle, wobei ein häufiges Nutzen einer bestimmten Regel eine Überführung dieser von *Regelbasiertem Verhalten* in *Fertigkeitsbasiertes Verhalten* zur Folge haben kann. Aus diesem Grund ist zwischen diesen beiden Ebenen nur schwer eine strikte Unterscheidung möglich. Ein wichtiges Merkmal dieser Modellebene ist die Zielorientierung der Handlung. Das Ziel muss jedoch oft nicht explizit formuliert sein, sondern ist häufig implizit in dem sich durch die Situation ergebendem Verhaltensmuster verankert. Beispiele *Regelbasiertes Verhalten* sind Kochen nach Rezept oder Montage nach Anleitung. Die Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern oder Elementen der Verkehrsführung nach der Straßenverkehrsordnung lassen sich hier im Fahrkontext anführen.

Die dritte Modellebene *Wissensbasiertes Verhalten* nutzt der Mensch in Situationen, in denen er keine Regeln oder Verhaltensmuster besitzt, auf die er zurückgreifen kann. Dies sind in der Regel Handlungen, die ihn unvorbereitet und in einem untrainierten Zustand begegnen. Heuristiken sind jedoch vorhanden. In diesen Situationen wird ein explizites Ziel formuliert, für deren Lösung verschiedenen Handlungen analysiert und miteinander für das beste Resultat verglichen werden. Eine solche aufwendige Analyse fordert ein mentales Modell der Situation, das unterschiedlich detailliert ausgeprägt sein kann. Beispiele für *Wissensbasiertes Verhalten* sind komplexe und unbekannte Entwicklungsaufgaben sowie das Fahren in einem dem Fahrer neuen Gebiet ohne Hilfsmittel, wie ein Navigationssystem. (Donges, 2015; Rasmussen, 1983, 1986)

Für die vorliegende Arbeit sind besonders die Erläuterungen von Rasmussen hinsichtlich regelbasiertem und wissensbasiertem Verhalten relevant.

### 2.2.3 $\tau$ -Theorie nach Lee

Der Kern der von Lee entwickelten  $\tau$ -Theorie besagt, dass der Mensch auf Grundlage der physiologischen Wahrnehmung zeitlicher Parameter wie Time-To-Collision (*TTC*) Handlungen direkt fertigkeitbasiert ausführen kann. Diese menschliche Koordination visuell-motorischer Aufgaben basiert nach Lee (1976) ausschließlich auf der Veränderung des retinalen Umgebungsabbildes. Die Theorie fußt darauf, dass Objekte (beziehungsweise die projizierten Oberflächenelemente der Objekte) als deren monokulare, optische Abbildungen durch eine Lochblende (Pupille) auf der Retina (Innenseite einer Kugel mit Einheitsradius  $e$ ) entstehen. Abbildung 2.2 zeigt eine vereinfachte Darstellung von Lees Überlegungen.



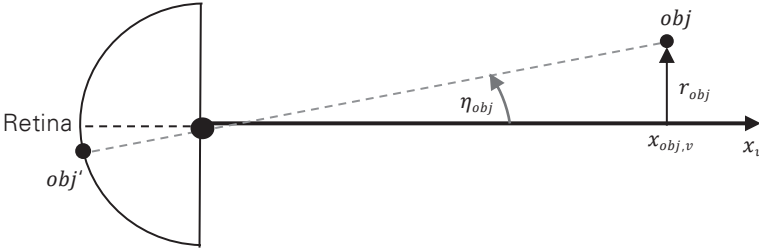
**Abbildung 2.2: Projektion eines punktförmigen Objektes auf der Retina nach Lee (1976)**

Im Zuge der entwickelten Theorie sind zudem folgende Vereinfachungen zu beachten (aus Mai (2017) nach Lee (1976)):

- Die Objektprojektion erfolgt durch den Linsenmittelpunkt.
- Im Ursprung der Projektionsfläche liegt die Lochblende.
- Die Retina bildet die Form einer Halbkugel ab.
- Der Innenradius des Auges wird als vernachlässigbar klein gegenüber der Entfernung des zu projizierenden Objektes angesehen.

Die  $\tau$ -Theorie bildet eine wichtige Grundlage für die Modellierungen und Berechnungsgrundlagen kognitiver Prozesse in dieser Arbeit, sodass sie nachfolgend detailliert erläutert wird. Da diese Arbeit als eine Weiterentwicklung des SCM mit der Dissertation von Mai (Mai, 2017) eng zusammenhängt, werden für die nachfolgenden Erläuterungen zur  $\tau$ -Theorie nach Lee (1976) die mathematischen Größenbeschreibungen und Teile der Herleitungsschritte nach Mai (2017) vorgestellt. Zunächst werden die Beschreibungen und Herleitungen für ein punktförmiges Objekt  $obj$  beschrieben. Da im realen Verkehr natürlich Objekte keine Punkte repräsentieren, wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels eine Erweiterung erläutert, die Objekte mit einer Breite und einer Höhe umfassen.

Das Blickkoordinatensystem  $v$  der zu betrachtenden Größen liegt im Ursprung der kugelförmigen Retina. In Abhängigkeit dieses Koordinatensystems lässt sich das abzubildende, punktförmige Objekt  $obj$  durch die Größen  $x_{obj,v}$  (Objektabstand auf der Sehachse  $x_v$  zur Pupille),  $r_{obj}$  (radialer Abstand zwischen Sehachse  $x_v$  und Objekt auf Höhe von  $x_{obj,v}$ ) sowie  $\theta$  (Verdrehung von  $r_{obj}$  gegenüber der Vertikalachse  $z_v$ ) definieren. Dabei wird für diese Darstellung als Sehachse  $x_v$  und  $z_v$  als Vertikalachse definiert. Die Projektion des Objektes  $obj$  auf der Retina wird durch des Projektionsobjekt  $obj'$  repräsentiert. Für die weiteren Betrachtungen ist die Definition des Längengrades  $\eta_{obj}$  und des Breitengrades  $\theta_{obj}$  notwendig. Die Beschreibung von  $\eta_{obj}$  wird durch Abbildung 2.3 deutlicher, wobei die  $x_v r_{obj}$ -Ebene dargestellt ist. Das Projektionssystem des Objektes  $obj$  ist durch den Einheitsradius  $e$  definiert. Somit erfolgt die Beschreibung der Abbildung  $obj'$  auf der Retina ausschließlich durch Längen- und den Breitengrad der kugelförmigen Retina.



**Abbildung 2.3:** Darstellung des Projektionsobjekts  $obj'$  in der  $x_v$ - $r_{obj}$ -Ebene zur Ermittlung des Längengrades  $\eta_{obj}$  nach Lee (1976)

G.2.1 stellt die Zusammenhänge der abgebildeten Größen dar:

$$\eta_{obj} = \text{atan} \frac{r_{obj}}{x_{obj,v}} \quad \text{G.2.1}$$

Die Blickfixation (Durchstoßpunkt der Sehachse  $x_v$ ) eines objektnahen Punktes führt dazu, dass  $r_{obj}$  viel kleiner als  $x_{obj,v}$  ist und somit G.2.1 wie folgt vereinfacht werden kann:

$$\eta_{obj} \approx \frac{r_{obj}}{x_{obj,v}} \quad \text{G.2.2}$$

Zur Herleitung des Breitengrades  $\theta_{obj}$  wird an dieser Stelle auf die Veröffentlichung von Lee (1976) verwiesen.

Lee trifft zudem die Vereinfachung, dass die Relativbewegung eines Objektes ausschließlich entlang der Längsrichtung (der Sehachse  $x_v$ ) oder parallel dazu stattfindet. Daraus folgt, dass der radiale Abstand  $r_{obj}$  und der Winkel  $\theta$  (resultierend Breitengrad  $\theta_{obj}$ ) auf der Retina konstant bleiben.

Um von statischen zu dynamischen Betrachtungen zu gelangen, ist es notwendig, die zeitlichen Ableitungen von Längengrad  $\eta_{obj}$  ( $\dot{\eta}_{obj}$ ) und Breitengrad  $\theta_{obj}$  ( $\dot{\theta}_{obj}$ ) zu beschreiben:

Für die dynamische Betrachtung folgt aus den oben genannten Vereinfachungen, dass  $d\theta/dt$  gleich Null ist, wenn  $\theta_{obj}$  konstant ist und dass  $r_{obj}$  für die Betrachtung des Längengrades  $\eta_{obj}$  als konstant betrachtet werden kann. Bezugnehmend auf G.2.2 folgt somit:

$$\eta_{obj(t)} = \frac{r_{obj}}{x_{obj,v}(t)} \rightarrow \dot{\eta}_{obj} = \frac{0 \cdot x_{obj,v} - r_{obj} \cdot \dot{x}_{obj,v}}{(x_{obj,v})^2}$$

$$\dot{\eta}_{obj} = -\frac{r_{obj} \cdot \dot{x}_{obj,v}}{(x_{obj,v})^2} \quad \text{G.2.3}$$