

Modellierung menschähnlichen Fahrerverhaltens

vorgelegt von
Dipl.-Ing.
Stefan Kupschick

an der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Steffen Müller

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Matthias Rötting

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Jürgensohn

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 28. Oktober 2020

Berlin 2021

Für Hanna und meine Eltern

Vorwort

Die vorliegende Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter der HFC Human-Factors-Consult GmbH entstanden. In dieser Zeit hatte ich die Möglichkeit, in einer Vielzahl interessanter Forschungsprojekte mit Bezug zur Thematik der Modellierung menschlichen Verhaltens mitwirken zu dürfen. Diese und vor allem Professor Dr. Thomas Jürgensohn haben in mir die Faszination für die Thematik der „menschähnlichen“ Fahrermodelle geweckt. Da ohne ihn diese Arbeit nicht denkbar gewesen wäre, möchte ich mich ganz besonders für die ausgiebigen Diskussionen, die konstruktiven Ratschläge und die manchmal unorthodoxen Methoden zur „Messung“ menschlichen Verhaltens bedanken.

Für das freundliche Interesse und die Übernahme der Doktorvaterschaft bedanke ich mich bei Prof. Dr. Matthias Rötting. Ebenfalls möchte ich mich bei Prof. Dr. Steffen Müller für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken. Ich danke ebenso der Geschäftsführung der HFC für das mir entgegengebrachte Vertrauen und die gewährten Freiräume während der Entstehung dieser Arbeit. Den Kollegen der HFC, insbesondere Dr. Astrid Oehme, die vor allem am Anfang der Promotionszeit eine wichtige Ratgeberin war, sowie nicht zuletzt Robert Alms und Philipp Kotsch danke ich für die vielen interessanten Gespräche, die zum Gelingen der Arbeit wesentlich beigetragen haben.

Des Weiteren möchte ich mich bei meiner Familie, insbesondere meinen Eltern Brigitte und Werner bedanken, die – vor allem letzterer – den Grundstein für meinen Berufsweg und somit auch für diese Arbeit gelegt haben. Für die akribische Durchsicht, die unendliche Geduld und die vielen wertvollen Anregungen während der Entstehung dieser Arbeit danke ich ganz besonders Birgit Schuster.

Kurzfassung

Fahrermodelle haben in den letzten Jahrzehnten einen bemerkenswerten Fortschritt erlebt. Ausgehend von einfachen technischen Reglern für singuläre Aufgabenstellungen (Längs- bzw. Querregelung) sind sowohl Anforderungen als auch Komplexität stetig gewachsen. Ansätze aus der Psychologie beeinflussen die Fahrermodellentwicklung nachhaltig und führten zur Entwicklung von hybriden Modellen, die Methoden aus unterschiedlichen Arbeitsgebieten vereinen. Die Anwendungsszenarien menschähnlicher Fahrermodelle sind ebenso breit gefächert und reichen von Fahrdynamiksimulationen über den Test von Fahrerassistenzsystemen, der Simulation von Fremdverkehr in Fahrsimulatoren bis hin zur Erzeugung von Trainingsdaten für autonome Fahrzeuge. Nichtsdestoweniger ist eine konkrete Implementierung spezifisch menschähnlichen Fahrerverhaltens bisher kaum zu finden.

Diese Arbeit widmet sich daher dieser Thematik. Anhand einer dreistufigen Taxonomie werden zunächst unterschiedliche Modellierungsansätze bezüglich ihrer Menschähnlichkeitskategorie verglichen sowie Vor- und Nachteile des entsprechenden Ansatzes herausgearbeitet. Weiterhin werden allgemeine Erkenntnisse über die Modellierung physiologischer sowie psychologischer Aspekte im Kontext der Fahrzeugführung analysiert und bewertet.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wird ein Fahrermodell vorgestellt, das spezifisch menschähnliches Verhalten für Längs- und Querführung abbildet. Die Grundlage hierfür bildet das Konzept der Fahrzustände: Es wird angenommen, dass sich ein Fahrer abwechselnd entweder im Fahrzustand *Homöostase* oder *Manöver* befindet. Auf diese Art und Weise lassen sich bestimmte menschliche Verhaltensweisen bei der Fahrzeugführung – vor allem in Situationen geringer Aufgabenschwierigkeit – besonders realitätsnah nachbilden.

Weiterhin wird die Entwicklung eines Rahmenmodells für die Modellierung menschähnlichen Fahrerverhaltens beschrieben, mit dessen Hilfe anwendungsspezifische Fahrermodelle erstellt werden können. Das Gerüst für die Modellierung orientiert sich an der menschlichen Informationsverarbeitung. Es beinhaltet die Hauptelemente „Wahrnehmen von Informationen“, „Erkennen von Situationen“, „Auswahl von Handlungen“ und „Durchführung von Handlungen“, welche sequentiell durchlaufen werden. Weitere Modellkomponenten sind ein Arbeitsgedächtnis sowie Module, die emotionale bzw. motivationale Zusammenhänge abbilden. Die modular konzipierte Modellstruktur stellt sicher, dass eine effiziente Modellierung erfolgen kann. Grundbausteine des entwickelten Modells sind *Fähigkeiten*. Diese führen bestimmte, möglichst elementar zu definierende Handlungen durch, wobei die Art und Weise der Ausführung durch *Parameter* beeinflusst werden kann. Mit Hilfe dieser Parameter kann eine Vielzahl von Fahrertypen mit spezifischen Eigenschaften definiert werden. Das entstandene Rahmenmodell ermöglicht die Integration unterschiedlicher psychologischer Konzepte in eine simulationsfähige Modellumgebung und kann damit zu einer realistischeren Modellierung menschlichen Fahrerverhaltens beitragen.

Abstract

Driver models have undergone a remarkable progress over the last decades. Starting from simple technical controllers for singular tasks (longitudinal or lateral control), requirements as well as complexity have grown steadily. Approaches from psychology have had a lasting effect on the development of driver models and have led to hybrid models which combine methods from different fields of work. The application scenarios for human-like driver models are just as broad and range from vehicle dynamics simulations to testing of driver assistance systems, the simulation of external traffic in driving simulators up to the generation of training data for autonomous vehicles. Nevertheless, an actual implementation of specific human-like driver behavior is hardly found.

This work is therefore dedicated to human-like driver models. First of all, different modeling approaches are compared with respect to their „human-likeness“ based on a three-level taxonomy of driver models. Advantages and disadvantages of the corresponding approach are elaborated and general findings about the modeling of physiological as well as psychological aspects in the context of vehicle guidance are analyzed and evaluated.

Based on the knowledge gained, a driver model is presented that depicts specific human-like behavior for longitudinal and lateral guidance. The basis for this is the concept of driving states: It is assumed that a driver is alternately either in the driving state *homeostasis* or *maneuver*. In this way, certain human behaviors in vehicle guidance – especially in situations of low task difficulty – can be simulated in a particularly realistic manner.

Furthermore, the development of a framework for the modeling of human-like driving behavior is described, which can be used to create application-specific driver models. The modeling framework is based on human information processing. It includes the main elements „perception of information“, „recognition of situations“, „selection of actions“ and „execution of actions“, which are passed through sequentially. Further modules, such as working memory or emotional and motivational components, influence the overall behavior. The modularly designed model structure ensures an efficient modeling process. The building blocks of the framework are *ability* modules. Each of those conduct elementary actions, which are to be defined as simple as possible, whereby the manner of execution can be influenced by *parameters*. These parameters can be used to define a variety of driver types with specific characteristics. The resulting model framework enables the integration of different psychological concepts into a simulatable model environment and can thus contribute to a more realistic representation of human driver behavior.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xv
1 Einführung	1
1.1 Fahrermodell und Menschähnlichkeit – eine erste Eingrenzung der Thematik . . .	2
1.2 Anwendungsszenarien für menschähnliche Fahrermodelle	3
2 Stand der Technik – Fahraufgabe und Fahrermodelle	9
2.1 Grundsätzliches und Versuche der Kategorisierung der Fahraufgabe	9
2.1.1 Fahraufgabe	11
2.1.2 Ebenenmodelle	12
2.2 Fahrermodelle: Unde Venis? – Quo Vadis?	20
2.2.1 Regelungstechnische Ansätze	25
2.2.1.1 Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Regelverhaltens . . .	29
2.2.1.2 Erweitertes Reglermodell des Fahrers nach Bösch	31
2.2.1.3 Zusammenfassung	33
2.2.2 Ansätze aus der Verkehrssimulation	34
2.2.2.1 ACME	37
2.2.2.2 PELOPS	38
2.2.2.3 Zusammenfassung	39
2.2.3 Probabilistische Ansätze	39
2.2.3.1 BAD-Modelle	41
2.2.3.2 Zusammenfassung	42
2.2.4 Psychologische Ansätze	43
2.2.4.1 ACT-R	44
2.2.4.2 SOAR	46
2.2.4.3 QN-MHP	48
2.2.4.4 Zusammenfassung	50
2.2.5 Hybride Ansätze	51
2.2.5.1 COSMODRIVE	53
2.2.5.2 SSDRIVE	56
2.2.5.3 Hybrides Fahrermodell von Kiencke & Nielsen	58

2.2.5.4	Fahrermodell von Mai	59
2.2.5.5	Zusammenfassung	60
3	Theoretische Grundlagen des menschlichen (Fahr-)Verhaltens	63
3.1	Wahrnehmung	64
3.1.1	Visuelle Wahrnehmung	65
3.1.1.1	Physiologie der visuellen Wahrnehmung	65
3.1.1.2	Gesichtsfeld/Blickfeld/Nutzbares Sehfeld	68
3.1.1.3	Optischer Fluss	70
3.1.1.4	Tiefenwahrnehmung	72
3.1.2	Auditive Wahrnehmung	74
3.1.3	Somatosensorische Wahrnehmung	75
3.1.4	Vestibuläre Wahrnehmung	78
3.1.5	Wahrnehmung relevanter Informationen	78
3.1.5.1	Fahrdynamische Informationen	79
3.1.5.2	Situative Informationen	82
3.2	Informationsverarbeitung	85
3.2.1	Gedächtnis	88
3.2.1.1	Arbeitsgedächtnis	89
3.2.2	Kognitive Prozesse	91
3.2.2.1	Mentale Modellbildung und Antizipation	92
3.2.2.2	Problemlösen und Handlungsplanung	93
3.2.3	Entscheidungsfindung und Risiko	95
3.2.3.1	Entscheidungsmodelle für die Fahrermodellierung	98
3.3	Handlungsausführung	101
3.3.1	Der Handlungsbegriff, Handlungsregulation und Volition	102
3.3.2	Sensumotorik	105
3.3.3	Physiologische Aspekte	106
3.3.4	Handlungsausführung beim Autofahren	109
3.4	Einflussfaktoren	112
3.4.1	Aufmerksamkeit	113
3.4.1.1	Aufmerksamkeit als Ressource	114
3.4.1.2	Visuelle Aufmerksamkeit und Fahrzeugführung	116
3.4.1.3	Modellierung visueller Wahrnehmung	119
3.4.2	Belastung und Beanspruchung	121
3.4.2.1	Müdigkeit	123
3.4.3	Situationsbewusstsein	124
3.4.4	Motivation	126
3.4.4.1	Motivation und Fahrzeugführung	127
3.4.4.2	Modellierung von Motivation	129

3.4.5	Emotion	132
3.4.5.1	Emotion und Fahrzeugführung	135
3.4.5.2	Modellierung von Emotion	136
3.5	Individualität menschlichen Fahrverhaltens	138
3.5.1	Situationen und Manöver	138
3.5.1.1	Variable Situationsmerkmale	139
3.5.1.2	Modi der Längsführung	140
3.5.1.3	Manöver	143
3.5.2	Fehler	145
3.5.3	Lernen	150
3.6	Unterschiede im Fahrverhalten und ihre Ursachen	150
3.6.1	Persönlichkeit	152
3.6.2	Demografie	153
3.6.3	Fahrerfahrung	154
3.6.4	Fahrstile	154
4	Menschähnlichkeit und ihre Modellierung	157
4.1	Modell menschähnlicher Fahrhandlungen	160
4.1.1	Fahrhandlung	161
4.1.2	Homöostase	165
4.1.3	Manöver	170
4.1.4	Fehler	174
4.1.4.1	Fehler während der Homöostase	174
4.1.4.2	Fehler während einer M-Situation	176
4.1.5	Modellierung von Einflussfaktoren	179
4.2	Validierung von Fahrermodellen	182
4.2.1	Validierung und Menschähnlichkeit	186
4.2.2	Validierung und Kalibrierung des Fahrermodells	187
5	Rahmenmodell für die Erzeugung parametrierbarer Fahrermodelle	189
5.1	Aufbau und Struktur des Rahmenmodells	190
5.2	Wahrnehmung	194
5.3	Situationserkennung	196
5.4	Entscheidung	198
5.5	Ausführung	200
5.6	Motivations- und Emotionskomponenten	201
5.7	Arbeitsgedächtnis	204
5.8	Fahrertypen	207
5.9	Validierung des Rahmenmodells	207
5.10	Zusammenfassung & Ausblick	209
	Literaturverzeichnis	211

Abbildungsverzeichnis

1.1	Kategorisierung von Fahrermodellen anhand eines Entscheidungsbaums	4
1.2	Stufen der Menschähnlichkeit eines Fahrermodells	5
2.1	Vereinfachter Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt	9
2.2	Vereinfachter Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt mit FAS	10
2.3	Schema der Fahraufgabe nach Geiser [Gei85]	12
2.4	Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe nach Donges [Don82]	13
2.5	Modelle der Fahraufgabe mit drei bzw. vier Ebenen	14
2.6	Drei-Ebenen-Modell des zielgerichteten Verhaltens aus Rasmussen [Ras83] . .	16
2.7	Fahrverhaltenskollektive und Kraftschlussgrenze nach Braess & Donges [BD06]	17
2.8	Driver-In-Control Modell von Hollnagel [HNL03]	19
2.9	Hierarchische Level des Fahrerhaltens nach Peräaho et al. [PKH03]	20
2.10	Fünf-Ebenen-Modell der Fahraufgabe nach Klimke et al. [KKE15]	21
2.11	Dimensionen von Fahrerhaltensmodellen nach de Winter [DWH12]	24
2.12	Vorschlag einer Kategorisierung von Fahrermodellen	24
2.13	Überführung eines Reglers in ein einfaches Fahrermodell	26
2.14	Fahrermodell nach MacAdam [Mac01] bzw. [Mac03]	27
2.15	Kybernetisches Fahrermodell nach Saleh et al. [SCM ⁺ 11]	29
2.16	Zwei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung nach Donges [Don77]	31
2.17	Vier-Ebenen-Fahrermodell nach Bösch [Bös91]	32
2.18	Zusammenhänge von Verkehrsfluss mit Geschwindigkeit bzw. Verkehrsdichte .	35
2.19	Kognitives Fahrermodell ACME nach Krajzewicz & Wagner [KW02], [KW04]	37
2.20	Struktur des Fahrermodells PELOPS nach Düser [Düs10]	38
2.21	Schema für „Fahren auf Landstraße“ in einem BAD-MoB-Modell [EM10b] . .	42
2.22	Struktur von ACT-R nach Anderson [ABB ⁺ 04]	45
2.23	Fernpunkt und Nahpunkt bei gerader Strecke bzw. Kurve nach Salvucci [Sal06]	46
2.24	Menschliche Motorik im Fahrermodell DRIVER aus Aasman [Aas95]	47
2.25	Struktur und Informationsfluss des QN-MHP aus Tsimhoni & Liu [TL03] . . .	48
2.26	Struktur des QN-Fahrermodells aus Bi et al. [BWWL15]	49
2.27	Informationsfluss in COSMODRIVE nach Bellet et al. [BBMG06]	53
2.28	Struktur des Human Driver Models aus Delorme & Song [DS01]	55
2.29	Taktisches Modul des Human Driver Model aus Delorme & Song [DS01] . . .	56

2.30	Fahrermodell SSDRIVE nach Amantini, Cacciabue & Carsten [AC09] & [CC10]	57
2.31	Hybrides Fahrermodell aus Kiencke & Nielsen [KN05]	58
2.32	Primärebene des Fahrermodells von Mai [Mai17]	59
3.1	Zyklischer Wahrnehmungsprozess nach Goldstein [Gol07]	65
3.2	Verarbeitungskapazitäten der Sinne aus Kupfmüller [Kup59]	66
3.3	Aufbau des menschlichen Sehapparats aus Gegenfurtner [Geg15]	66
3.4	Foveales, parafoveales und peripheres Sehen aus Schweigert [Sch02]	68
3.5	Darstellung des binokularen Gesichtsfelds für weißes Licht aus Negele [Neg07]	69
3.6	Nutzbare Sehfeld abhängig von gefahrener Geschwindigkeit aus Babkov [Bab75]	70
3.7	Optischer Fluss aus Cockpitsicht aus Gibson [Gib50]	71
3.8	Mögliche systematische Gliederung der visuellen Wahrnehmung	74
3.9	Hörfläche des menschlichen Gehörs aus Gegenfurtner [Geg15]	75
3.10	Spreizwinkel von Fahrbahnbegrenzungen	81
3.11	TTC und TLC aus Bubb [BBGV15]	85
3.12	Schema der menschlichen Informationsverarbeitung nach Wickens [WH00]	87
3.13	Integratives Motivation-Emotion-Modell aus Trimmel [Tri15]	88
3.14	Dreistufiges Gedächtnismodell nach Atkinson & Shiffrin [AS68]	89
3.15	Schema des Arbeitsgedächtnisses nach Baddeley & Hitch [BH74] bzw. Baddeley [Bad00]	90
3.16	Prototypischer Ablauf des Problemlösens nach Blech [Ble10]	95
3.17	Entscheidungsmodell nach Wickens & Hollands [WH00]	96
3.18	Modell von Fahrerentscheidungen nach Boer & Hoedemaker [BH98]	99
3.19	Umhüllende Zonen („envelope zones“) im COSMODRIVE-Modell aus Bornard et al. [BSB16]	100
3.20	Entscheidungsprozesse beim Überholen nach Irmscher [Irm01a]	101
3.21	Strukturelle Einordnung von Tätigkeiten, Handlungen und Operationen	102
3.22	Handlungsmodell aus Jürgensohn [Jür97] nach Miller et al. [MGP60]	103
3.23	Hierarchisch-sequentielles Handlungsmodell nach Volpert [Vol83]	103
3.24	Rubikonmodell der Handlungsphasen nach Heckhausen [Hec89]	104
3.25	Minimale Reaktionszeit bei optischer Informationsaufnahme aus Wolf [Wol09]	108
3.26	Motorik des Lenkens aus Pick & Cole [PC06]	109
3.27	Modell des neuromuskulären Systems während des Lenkens aus Pick & Cole [PC03]	110
3.28	Blockschaltbild des Lenkvorgangs aus Wolf [Wol09]	111
3.29	Bremsregelkreis nach Grzesik [Grz09]	112
3.30	Multiples Ressourcenmodell nach Wickens [Wic08] und POC-Kurven	115
3.31	Einflussfaktoren auf das Blickverhalten aus Schweigert [Sch02]	118
3.32	Visuelle Aufgaben nach Miura [Miu86] aus Jürgensohn & Timpe [SRJ01]	120

3.33	Darstellung eines Blickvorgangs mit Hilfe des EMMA-Modells nach Salvucci [Sal01]	121
3.34	Kategorien von Beanspruchung	122
3.35	Zusammenhang zwischen mentaler Belastung und Leistung nach De Waard [DW96]	123
3.36	Schema des Situationsbewusstseins nach Endsley [End95]	126
3.37	Fahrermodell bei einem Überholvorgang auf einer Autobahn nach Irmscher [Irm01b]	131
3.38	Kategorien affektiver Zustände	132
3.39	Die sechs Basisemotionen aus Ekman [Ekm92]	133
3.40	Dimensionales Emotionsmodell aus Russel [Rus80]	133
3.41	Struktur des „Monitor“-Modells nach Vaa [Vaa03]	136
3.42	OCC-Modell nach Ortony, Clore & Collin [OCC90] aus Kraus [Kra12]	138
3.43	Folgemodell aus Wiedemann [Wie74]	143
3.44	Fahrerfähigkeiten nach Siedersberger [Sie03]	145
3.45	Fehlerkategorien von Zimmer [Zim01] nach Rasmussen [Ras82]	147
3.46	Unfallursachen nach einer Untersuchung durch Gründl [Grü05]	147
3.47	Unfälle nach Fehlerkategorien im Jahr 2017 [Bun18]	149
4.1	Modellgrenzen des Fahrermodellansatzes	161
4.2	Darstellung einer Fahrhandlung am Beispiel der Geschwindigkeitsregelung . .	161
4.3	Homöostase und Manöver	162
4.4	Verortung der im Modellierungskonzept beschriebenen Bereiche bzgl. des Wickens'schen Informationsverarbeitungsmodells	164
4.5	Schema Längshomöostase	166
4.6	Implizite Sollwerte während der Längshomöostase (Folgefahrt)	168
4.7	Implizite Sollwerte während der Längshomöostase (Freie Fahrt)	169
4.8	Ablauf Querhomöostase	170
4.9	Implizite Sollwerte während der Querhomöostase	171
4.10	Explizite Sollwerte während eines Quermanövers	173
4.11	Schema Teilmanöver	175
4.12	Modellierung von Fehlern	177
4.13	Statische und Dynamische Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten	179
4.14	Schema Motiv-Handlungs-Kette	181
4.15	Situationsraum mit Kalibriersituation K innerhalb eines Gültigkeitsbereichs und Experimentalsituation E aus Buchholz [Buc19]	185
5.1	Struktur des Rahmenmodells	191
5.2	Struktur einer Fähigkeit	192
5.3	Parametereinfluss anhand der Beispielfähigkeit „Schätzen des Bremswegs“ . .	195

5.4	Exemplarische Struktur der Fähigkeiten des Hauptmoduls „Wahrnehmung“ . . .	196
5.5	Vereinfachte Statechart-Darstellung der Wahrnehmungsfähigkeit „Geschwindigkeitswahrnehmung“	197
5.6	Vereinfachte Statechart-Darstellung der Situationsfähigkeit „Erkennung zu hoher Eigengeschwindigkeit“	198
5.7	Schema Entscheidungsmodul	200
5.8	Vereinfachte Statechart-Darstellung der Manöverfähigkeit „Geschwindigkeitsreduzierung“	201
5.9	Vereinfachte Statechart-Darstellung der Ausführungsfähigkeit „Regelung der Fahrzeuggeschwindigkeit“	202
5.10	Beeinflussung des Fahrermodellverhaltens durch Motivationen/Emotionen . . .	203
5.11	3x3-Matrix des zu beachtenden Fremdverkehrs	204
5.12	Beispiel für den Raum der Performanzparametern	208

Tabellenverzeichnis

1.1	Typen von Menschähnlichkeit	2
2.1	Interaktionen Fahrer-Fahrzeug-Umwelt	10
2.2	Interaktionen FAS zu Fahrer, Fahrzeug und Umwelt	11
2.3	Ranneys [Ran94] Klassifizierung der Fahraufgabe nach Michon [Mic85] und Rasmussen [Ras83]	18
2.4	Typen von Fahrerverhaltensmodellen nach Michon [Mic85]	21
3.1	Formen der menschlichen Tiefenwahrnehmung	73
3.2	Vestibuläre Wahrnehmungsschwellen aus Abendroth & Bruder [AB15] nach Tomaske [Tom83]	78
3.3	Herkunft fahrdynamischer Informationen angelehnt an Zöllner [Zöl15]	79
3.4	Motive und ihre Auswirkungen nach Irmischer [Irm01b]	130
3.5	Wichtige, das Fahren beeinflussende Umweltfaktoren	140
3.6	Psychosoziale Faktoren	141
3.7	Fahrmanöver nach Nagel & Enkelmann [NE91] und Tölle [Töl96]	144
3.8	Fehlerarten nach Reason [Rea90]	148
4.1	Typen von Menschähnlichkeit	158
4.2	Vorschlag einer Situationspriorisierung	174
4.3	Kategorisierung von Manövern bzgl. Fahrzeugdynamik sowie deren Ursachen .	176
4.4	Informationsfehler während der Homöostase und ihre Auswirkung	178
4.5	Diagnosefehler in der Situationserkennung und ihre Auswirkung	178
5.1	Informationen im Arbeitsgedächtnis des Fahrermodells und ihre Gültigkeiten .	206

1 Einführung

„Das Auto ist eine vorübergehende Erscheinung. Ich glaube an das Pferd.“

Kaiser Wilhelm II.

Seit über einem halben Jahrhundert werden Fahrermodelle entwickelt, um die unterschiedlichsten Problemstellungen im Kontext Fahrer-Fahrzeug-Umwelt analysieren und bewältigen zu können. In dieser Zeit haben sich Fahrermodelle von einfachen technischen Reglern für spezifische Aufgaben in einem stark eingeschränkten Kontext zu vielseitig einsetzbaren Werkzeugen für verschiedene Anwendungsszenarien entwickelt. Die Grundaufgabe eines jeden Fahrermodells besteht somit aus der Modellierung des Verhaltens eines Fahrers. Eine möglichst menschähnliche Modellierung, also eine maximale Ähnlichkeit nicht nur des erzeugten Modellverhaltens zu menschlichem Verhalten, sondern auch dessen Zustandekommen, steht jedoch bis dato nicht im Fokus der Modellierung. Durchaus werden – vor allem in ingenieurtechnischen Methoden – punktuell Parameter wie Stellgrößenbeschränkungen oder Totzeiten implementiert, um den Steuergrößen des Modells ein menschliches Antlitz zu verleihen. Diese Modifikationen werden der Komplexität eines wirklich menschähnlichen Fahrermodells jedoch nicht gerecht. Auf der anderen – psychologisch motivierten – Seite existieren zwar kognitive Modellierungsansätze, deren Prämisse – die Nachbildung menschlicher Kognition – theoretisch Abhilfe schaffen könnte, jedoch erscheint der Aufwand, den die Modellierung eines nicht nur einzelne Situationen umfassenden Fahrermodells mit solcherlei Methoden hätte, wirtschaftlich betrachtet als viel zu hoch. Diese Arbeit widmet sich ebendieser Thematik – der Menschähnlichkeit von Fahrermodellen, sowie deren Modellierung.

In Abschnitt 1.1 wird der Begriff Menschähnlichkeit eingeführt und es werden die sich daraus ergebenden Forderungen an die Modellierung formuliert. Folgend werden in Abschnitt 1.2 Szenarien für die Anwendung menschähnlicher Fahrermodelle ausgeführt. Kapitel 2 beschäftigt sich mit dem Stand der Technik: Es werden unterschiedliche Herangehensweisen an die Modellierung der Fahraufgabe betrachtet und eine Vielzahl aktueller, aber auch bedeutsamer historischer Fahrermodelle begutachtet. In Kapitel 3 wird die menschliche Informationsverarbeitung im Kontext der Fahrzeugführung ausführlich betrachtet. In Kapitel 4 wird auf das Thema der Modellierung menschähnlichen Verhaltens näher eingegangen und ein Modell menschähnlicher Fahrhandlungen vorgestellt. In Kapitel 5 wird ein Rahmenmodell für die Erzeugung parametrierbarer menschähnlicher Fahrermodelle vorgestellt.

1.1 Fahrermodell und Menschähnlichkeit – eine erste Eingrenzung der Thematik

Durch die Einführung des Mikroprozessors und die damit einhergehende stetig steigende Rechenleistung entstanden neue Möglichkeiten zur Simulation von komplexen Systemen. Im Bereich der Fahrzeugtechnik entwickelte sich die Simulation dieser Systeme zu einem mächtigen Werkzeug für den technischen Fortschritt dieses Forschungsfelds. Die einer solchen Simulation zugehörigen Teilsysteme können aus verschiedenen Entitäten bestehen:

- Physisch vorhandene technische Systeme (in eine Simulation eingebundene technische Systeme/HiL)
- Virtuelle technische Systeme (Modelle technischer Systeme)
- Reale Personen (in die Simulation eingebundene menschliche Akteure)
- Virtuelle Personen (Modelle menschlicher Akteure)

Diese Arbeit beschäftigt sich mit letzteren, mit der Einschränkung, dass deren Aufgabe das Fahren eines Fahrzeugs beinhaltet, den *Fahrermodellen*. Die Aufgabe eines Fahrermodells ist es, alle für das Führen eines realen oder virtuellen Fahrzeugs notwendigen Handlungen durchzuführen. Es muss also *motorische Aktionen* erzeugen können, um diese Handlungen zu vollstrecken, beispielsweise das Drehen des Lenkrads¹. Diese partikulären Aktionen basieren auf kausalen Ursachen, welche aus der jeweiligen Situation des Fahrer-Fahrzeug-Ensembles in seiner Umwelt hervorgehen. Jedes Fahrermodell lässt sich nun bezüglich seiner Eigenschaft *Menschähnlichkeit* bewerten – eine Begriffsbestimmung sowie eine inhaltliche Auseinandersetzung findet im Kapitel 4 statt. Für den Moment soll angelehnt an den *Turing-Test*² als vereinfachte Arbeitsdefinition gelten: Ein Fahrermodell ist maximal menschähnlich, wenn ein menschlicher Beobachter keinen Hinweis auf nichtmenschliche Elemente im Fahrverhalten zu erkennen vermag. Mit Hilfe dieser Begriffsklärung können Fahrermodelle nun weiter kategorisiert werden, in dem der Kontext, in dem Menschähnlichkeit betrachtet wird, genauer spezifiziert wird (vgl. auch Abbildung 1.2).

Typ 0	Fahrer-Fahrzeug-Ensemble verhält sich nicht menschähnlich
Typ I	Fahrer-Fahrzeug-Ensemble verhält sich menschähnlich
Typ II	motorische Aktionen des Fahrers sind menschähnlich
Typ III	kausale Ursachen der motorischen Aktionen des Fahrers sind menschähnlich

Tabelle 1.1: Typen von Menschähnlichkeit

In Typ 0 werden jene autonom gesteuerten Fahrzeuge zusammengefasst, bei denen kein Zweifel daran besteht, dass sich diese nicht menschähnlich fortbewegen. Eine korrekte Einteilung eines

¹Bei sehr einfachen Fahrzeugmodellen ohne Stellglieder für den Fahrer muss das Fahrermodell in das Fahrzeugmodell integriert werden, das Fahrzeug fährt dann „selbst“.

²Ein menschlicher Beobachter soll in diesem von Alan Turing 1950 formulierten Test entscheiden, ob eine Ausgabe von einem Menschen oder Computer stammt

Fahrer-Fahrzeug-Ensembles in Typ 0 ausschließlich auf Basis des Verhaltens ist schwierig, da ein menschlicher Fahrer in der Lage ist, nichtmenschliches Verhalten zu simulieren. Oftmals ist zusätzliches Wissen notwendig, z. B. dass es sich um ein autonom gesteuertes Fahrzeug handelt, um die aus dem Fahrverhalten gewonnenen Annahmen zu validieren. Typ-I-Modelle sind Fahrer-Fahrzeug-Ensembles, welche menschähnliches Verhalten zeigen, bei denen es jedoch unerheblich bzw. von außen nicht erkennbar ist, wie dieses Verhalten erzeugt worden ist. Zum Beispiel können unrealistische Eingabewerte verwendet werden, also für menschliche Fahrer nicht erreichbare Lenkfrequenzen, negative Totzeiten oder Ähnliches. Fahrermodelle des Typs II erzeugen menschähnliche motorische Aktionen, um ein Fahrzeug zu steuern. Dies impliziert die Miteinbeziehung der physiologischen Einschränkungen des menschlichen Körpers für die Erzeugung der entsprechenden Signale. Die generierten Handlungsmuster sind jedoch nicht menschähnlich erzeugt worden, diese können beispielsweise durch Variation aufgezeichneter Realfahrdaten entstanden sein. Typ-III-Fahrermodelle erzeugen die menschähnlichen Handlungsmuster zusätzlich auf eine menschähnliche Art und Weise: solch ein Fahrermodell besitzt eine dem Menschen ähnlich aufgebaute Kognition, welche die Grundlage für das Verhalten des Fahrermodells darstellt. Eine Kombination von menschähnlich aufgebaute Kognition mit nicht-menschähnlicher Handlungsausführung ist ebenfalls als ein Typ-III-Fahrermodell zu bewerten, da die Modellierung menschlicher Informationsverarbeitung hierzu vonnöten ist. Für die Einschätzung des Beobachters gilt hier die Annahme, dass die Entscheidungen über die Kategorisierung sukzessive getroffen werden, d. h. dass Informationen, die darüber entscheiden können, ob ein Fahrermodell beispielsweise zu Typ II zuzuordnen ist, nicht für die Entscheidung über die Zugehörigkeit zu Typ I verwendet werden. In diesem Beispiel sieht der Bewerter nicht, *wie* gelenkt wird, sondern beurteilt ausschließlich das Fahrverhalten, um ein Typ-I-Modell zu identifizieren. Eine Entscheidungsbaum für die beschriebene Klassifizierung ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

1.2 Anwendungsszenarien für menschähnliche Fahrermodelle

Das Anwendungsgebiet für menschähnliche Fahrermodelle deckt ein weites Spektrum unterschiedlicher Forschungsgebiete der Wissenschaft, aber auch der kommerziellen Entwicklung im Bereich der Fahrzeugtechnik ab. Abhängig vom Anwendungsgebiet liegt das Hauptaugenmerk der Modellierung auf unterschiedlichen Schwerpunkten: Für die Anwendung in bspw. Verkehrssimulationen wird weniger auf die maximale Menschähnlichkeit der Fahrerausgaben geachtet, vielmehr wird hier besonderer Wert auf ein augenscheinlich plausibles Verhalten des Fahrer-Fahrzeug-Ensembles gelegt (Typ I). Möglichst menschähnliche Fahrerausgaben stellen hingegen bei Fahrdynamiksimulationen ein durchaus wichtiges Kriterium dar. Eine besonders menschähnliche Generierung dieser Stellgrößen wird jedoch nicht oder nur sehr eingeschränkt benötigt (Typ II). Fahrermodelle beider beschriebenen Ausprägungen existieren seit langem und befinden sich im kommerziellen Einsatz. Nachfolgend werden diese und weitere Anwendungsfel-

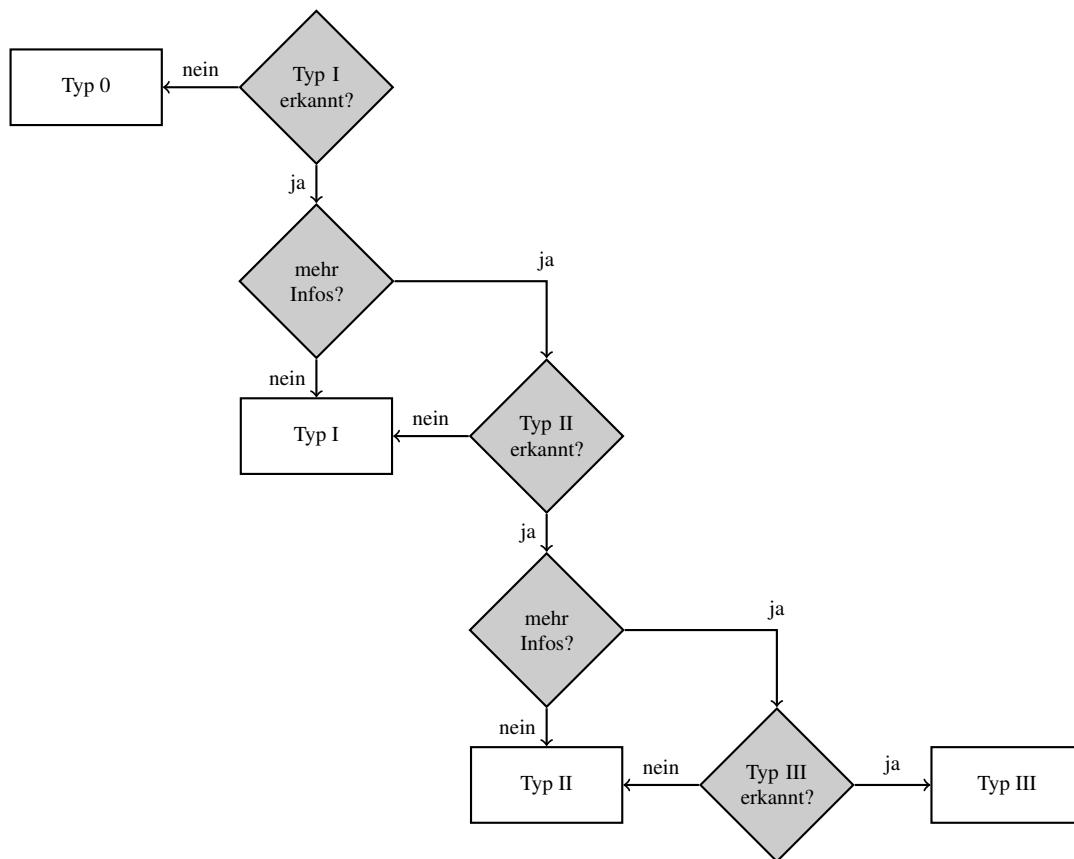


Abbildung 1.1: Entscheidungsbaum für die Kategorisierung von Fahrermodellen: Falls das Modell nicht als Typ N erkannt wird, so gilt es als Modell vom Typ N-1. Falls der Test positiv ausfällt, so wird überprüft, ob weitere Informationen vorhanden sind, um ein Modell des Typs N+1 zu erkennen. Ist dies nicht der Fall, so gilt das Modell als Typ N-Modell, falls doch, wird mit dem Test auf Typ N+1 fortgesetzt usw.

der vorgestellt, in welchen der Einsatz menschenähnlicher Fahrermodelle – auch Typ-III-Modelle – denkbar erscheint.

Fahrerassistenzsysteme In modernen Kfz ist eine Vielzahl unterschiedlicher Fahrerassistenzsysteme implementiert, welche kontinuierlich neu- bzw. weiterentwickelt werden. Für komplette Tests aller möglichen Interaktionen dieser Systeme müssen – schon bei geringen Änderungen – umfangreiche und teure Testfahrten unternommen werden, deren Anzahl und Kosten mit jedem zusätzlichen Gerät weiter steigen. Diese Kosten können bedeutend reduziert werden, falls es möglich wäre, die benötigten Tests zumindest teilweise zu automatisieren. Mit höherer Menschenähnlichkeit der hierbei eingesetzten Fahrermodelle steigt auch die Anzahl der automatisierbaren Tests an: Closed-Loop-Manöver, welche Handlungen eines menschlichen Fahrers bedürfen, können zunehmend durch Fahrermodelle absolviert werden. Des Weiteren benötigen Fahrerassistenzsysteme Fahrermodelle, die Bestandteil des FAS-Algorithmus sind: Das Verhalten des

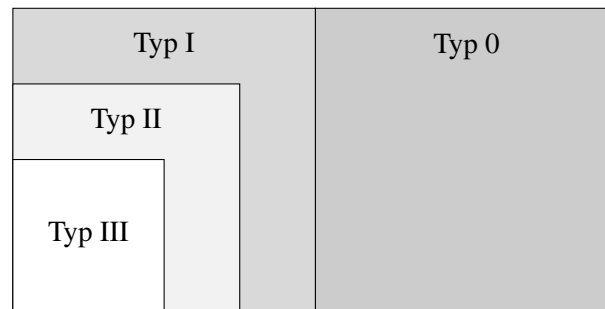


Abbildung 1.2: Stufen der Menschähnlichkeit eines Fahrermodells: $\text{Typ III} \subset \text{Typ II} \subset \text{Typ I}$, sowie $\text{Typ I} \notin \text{Typ 0}$

Fahrers soll antizipiert werden, so dass die Wirksamkeit des FAS maximiert und somit beispielsweise die Ablenkung minimiert werden kann. Bei entsprechend hoher Menschähnlichkeit – und somit höherer ökologischer Validität – des Fahrermodells können sogar Aussagen über mögliche Problemfelder bei der Interaktion von Fahrer und FAS getroffen werden. Möglicherweise können auf diese Art identifizierte Probleme mittels Designanpassungen des FAS schon behoben werden, bevor ein Prototyp an realen Probanden getestet werden kann. Weiterhin ist ein adaptives Design von FAS denkbar, welches mittels Fahrermodellen verschiedener Fahrertypen parametrisiert werden kann. Je nach System und dessen Zielsetzung können Fahrermodelle mit unterschiedlichen Menschähnlichkeitsstufen zum Einsatz kommen. So ist ein hoch menschähnliches Fahrermodell für einen Notbremsassistenten weniger bedeutsam, als beispielsweise für ein System zur Müdigkeitserkennung.

Autonomes Fahren Im Kontext des Autonomen Fahrens und seiner verschiedenen Stufen existieren mehrere Themenfelder, in denen menschähnliche Fahrermodelle zu einer erfolgreichen Weiterentwicklung beitragen können. So muss bis hin zu vollständig fahrerlosem Fahren der menschliche Fahrer zu bestimmten Zeitpunkten in der Lage sein, die Kontrolle über das Fahrzeug vom autonomen System zu übernehmen. Interaktionskonzepte für solche Szenarien können unter Zuhilfenahme menschähnlicher Fahrermodelle entwickelt werden, um diese Art von Übergabesituationen zu untersuchen und besser an den menschlichen Fahrer anzupassen. Solcherlei Modelle können ebenfalls dazu dienen, Vorhersagen über den Fahrer treffen zu können, so dass eine Einschätzung des Situationsbewusstseins und daraus folgend eine sicherere Kontrollübergabe gewährleistet werden kann. Hierfür werden Typ-III-Modelle benötigt, da diese Vorhersagen nicht ohne eine Nachbildung bestimmter kognitiver Aspekte getroffen werden können.

Ein weiterer Aspekt im Kontext des autonomen Fahrens ist die individuelle Anpassung des Fahralgorithmus des autonomen Fahrzeugs. Im Zeitalter der Individualisierung scheint es kaum denkbar, dass *ein* Algorithmus, der ein autonomes Fahrzeug steuert, dies für alle Fahrzeugbesitzer bzw. -fahrer gleich befriedigend bewerkstelligt. Die Anpassung dieses Fahralgorithmus an die

persönlichen Präferenzen des Insassen zum Zwecke der Erhöhung der hedonischen Qualität, aber auch der Akzeptanz, kann mit Hilfe hoch menschähnlicher Fahrermodelle (Typ III) geschehen.

Das Themengebiet des Mischverkehrs von autonomen Fahrzeugen und Fahrzeugen unterschiedlicher Automatisierungsstufe wird die Automobilindustrie sowie verwandte Forschungsbereiche ebenfalls für eine bisher noch nicht absehbare Zeit beschäftigen. In dieser Zeit werden sich autonome Fahrzeuge immer mit von menschlichen Fahrern gesteuerten Fahrzeugen einen Verkehrsraum teilen und somit auf menschliche Verkehrsteilnehmer und deren Handlungen reagieren müssen. Diese Reaktionen müssen reproduzierbar sein, ob aus verkehrsrechtlichen Notwendigkeiten oder aus ingenieurtechnischem Interesse. Für die notwendigen Tests muss somit möglichst „menschlich“ agierender Fremdverkehr in die jeweilige Simulation eingebunden werden. Zwar ist es technisch möglich, auf menschliche Teilnehmer zurückzugreifen, jedoch birgt diese Variante die inhärente Problematik in sich, dass die beim Testen unbedingt notwendige Reproduzierbarkeit mit menschlichen Akteuren a priori unmöglich ist. Bestimmte, psychologisch gut untersuchte menschliche Verhaltensweisen könnten mithilfe menschähnlicher Fahrermodelle implementiert und die Reaktionen autonom gesteuerter Fahrzeuge auf diese untersucht werden.

Zusätzlich kann auch der rechtliche Aspekt der Evaluierung von autonomen Systemen ein Anwendungsgebiet für menschähnliche Fahrermodelle darstellen. Heutzutage vorhandene Freigabe- und Testmethoden sind nicht für autonomes Fahren erdacht worden, mithin sind neuartige Verfahren – beispielsweise unter Zuhilfenahme von menschähnlichen Fahrermodellen – zur Beurteilung eines Fahralgorithmus notwendigerweise zu entwickeln. Diese Problematik – die Messung der Leistungsfähigkeit autonomer Fahrzeuge – kann nach Winner [Win15] sogar als „kritischer Pfad zum autonomen Fahrzeug“ angesehen werden.

Psychologische Untersuchungen Die Untersuchung menschlichen Fahrverhaltens wird trotz der immer weiter voranschreitenden Automatisierung der Fahraufgabe in den nächsten Jahrzehnten eine wichtige Aufgabe der Ingenieur- und Verkehrspsychologie bleiben, beispielsweise wird die Erforschung des Fahrverhaltens älterer Verkehrsteilnehmer aus demographischen Gründen eine größere Rolle spielen. Ein sich möglichst realistisch verhaltener – durch menschähnliche Fahrermodelle simulierter – Fremdverkehr kann die ökologische Validität der Untersuchungen erhöhen, da die Untersuchungsbedingungen realistischer wirken.

Verschleiß und Verbrauch Ein weiteres Einsatzgebiet von menschähnlichen Fahrermodellen ist die Optimierung von Verschleiß- und Verbrauchsberechnungen. Um eine zuverlässige Voraussage beispielsweise über die Lebensdauer einzelner Fahrzeugkomponenten bei unterschiedlichen Fahrweisen treffen zu können, sind möglichst menschähnliche Fahrermodelle notwendig. Ebenfalls kann auf diese Art und Weise unsachgemäße Benutzung des Fahrzeugs untersucht werden: Es ist beispielsweise bekannt, dass sich der Reifenverschleiß bei zu vorsichtiger Fahrweise

erhöhen kann, was sich durch ein entsprechend parametrisiertes menschähnliches Fahrermodell abbilden lässt.

Zusammenfassung Diese Beispiele zeigen, dass ein Bedarf an menschähnlichen Fahrermodellen vorhanden ist und die Anwendungsgebiete von ingenieurtechnischen Feldern wie Forschung und Entwicklung in der Automobilindustrie bis hin zu psychologischen Forschungsfragen reichen. Zu den vergleichsweise älteren Anwendungsfeldern wie FAS, Verbrauchsberechnungen oder Fahrsimulatoren kommen verschiedenste Aspekte im Kontext des autonomen Fahrens hinzu, so dass die Sinnhaftigkeit einer vertieften Beschäftigung mit menschähnlicher Fahrermodellierung, sowohl aus psychologischer, als auch aus technischer und letztendlich auch wirtschaftlicher Sicht gegeben ist.

2 Stand der Technik – Fahraufgabe und Fahrermodelle

„Der Mensch ist das Modell der Welt.“

Leonardo da Vinci

Für die Annäherung an die Thematik der menschähnlichen Fahrermodelle ist es notwendig, für dieses Spezialgebiet grundlegende Vorarbeiten vorzustellen. Hierbei wird die Aufmerksamkeit zunächst auf die Definition der Fahraufgabe gelegt, darauf aufbauend werden unterschiedliche Ansätze der Implementierung von Fahrermodellen vorgestellt und bezüglich ihrer Menschähnlichkeit eingeordnet.

2.1 Grundsätzliches und Versuche der Kategorisierung der Fahraufgabe

In den vergangenen Jahrzehnten hat sich eine Vielzahl von Forschern mit dem Problem auseinandergesetzt, Fahrverhalten nachzubilden bzw. schlussendlich Fahrermodelle zu entwickeln, welche diese Aufgabe erfüllen können. Hierfür existieren mannigfaltige Ansätze mit unterschiedlichen Zielsetzungen aus verschiedensten Forschungsgebieten. Es gibt jedoch Grundannahmen und Gemeinsamkeiten, die zur Modellierung eines Fahrers notwendig sind: Die Simulation von Fahrverhalten geschieht innerhalb eines abgeschlossenen Systems und beinhaltet die Simulationskomponenten *Fahrer*, *Fahrzeug* und *Umwelt* (vgl. Abbildung 2.1).

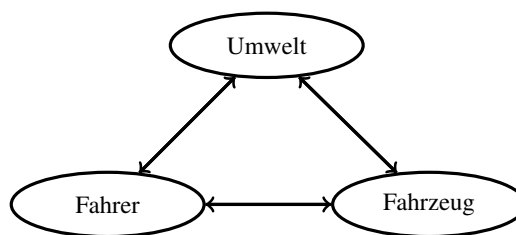


Abbildung 2.1: Vereinfachter Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt

Der *Fahrer* übernimmt in diesem System die Aufgabe, das *Fahrzeug* unter Zuhilfenahme der ihm zur Verfügung stehenden Informationen aus *Umwelt* und *Fahrzeug* zu bedienen. Die bidirektionalen Interaktionen der Systemkomponenten sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Ursprung der Information	Aufnehmer der Information	Wirkzusammenhang zwischen Informationsursprung und Informationsaufnehmer
Umwelt	Fahrer	Informationen über Straße, Verkehr, Umweltbedingungen
Umwelt	Fahrzeug	physikalische Größen (Reibung, Wind, Steigung)
Fahrzeug	Fahrer	Informationen (Geschwindigkeit, Drehzahl, Gang) und physikalische Größen (Beschleunigung, Geräusche)
Fahrzeug	Umwelt	Lichtsignale, physikalisches Vorhandensein (Inanspruchnahme öffentlichen Raumes)
Fahrer	Fahrzeug	Bedienung des Fahrzeugs (Stellgrößen für Längs- und Querverregelung, Signale)
Fahrer	Umwelt	indirekte Wirkung über Fahrzeug sowie direkte Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern (Blickkontakt, Handzeichen, verbale Kommunikation)

Tabelle 2.1: Interaktionen Fahrer-Fahrzeug-Umwelt

Im Laufe der Geschichte der Tätigkeit *Fahren* haben sich die Funktionen der beschriebenen drei Komponenten im Allgemeinen kaum geändert. Das zu lenkende Fahrzeug, sei es ein Pferd¹, eine Kutsche oder ein Automobil, wird über bestimmte Bedienelemente – früher Zügel, Schenkeldruck und Sporen, momentan noch Lenkrad, Pedalerie usw. – so manipuliert, dass es einer gewünschten Trajektorie in der Umwelt folgt. Mit der Entwicklung und Implementierung von Fahrerassistenzsystemen (FAS) ist nun eine vierte Komponente hinzugekommen, die zwar technisch gesehen dem Fahrzeug zuzurechnen ist, welche jedoch auch Aufgaben des Fahrers übernimmt. Dies ist graphisch in Abbildung 2.2 skizziert, in Tabelle 2.2 sind die hinzugekommenen Interaktionen kurz beschrieben. Im Hinblick auf die Entwicklung von Fahrermodellen kann somit gefolgert werden, dass die Fähigkeit zur Interaktion mit Fahrerassistenzsystemen für gegenwärtig und zukünftig einsetzbare Fahrermodelle obligatorisch ist.

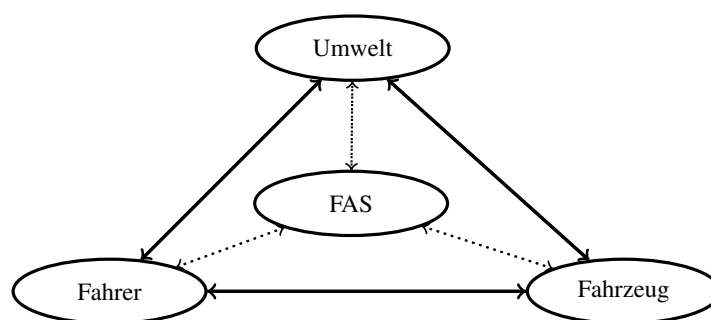


Abbildung 2.2: Vereinfachter Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt mit FAS

¹Ich bitte alle Pferdeliebhaber die Kategorisierung des Pferdes als „Fahrzeug“ zu entschuldigen.

Ursprung der Information	Aufnehmer der Information	Wirkzusammenhang zwischen Informationsursprung und Informationsaufnehmer
FAS	Fahrer	FAS als Schnittstelle zwischen Umwelt+Fahrzeug und Fahrer
FAS	Fahrzeug	Manipulation des Fahrzeugs über spezielle Schnittstellen
FAS	Umwelt	(noch) keine direkte Kommunikation vorhanden
Fahrer	FAS	An- und Abschalten sowie Konfiguration des Systems
Fahrzeug	FAS	Informationen über den Fahrzeugzustand (physikalische Größen)
Umwelt	FAS	dynamische (andere Verkehrsteilnehmer) und statische Umweltinformationen (Straßenschilder, Fahrbahnmarkierungen)

Tabelle 2.2: Interaktionen FAS zu Fahrer, Fahrzeug und Umwelt

2.1.1 Fahraufgabe

Das Führen eines Fahrzeugs setzt sich aus mehreren Teilaufgaben zusammen, welche hierarchisch gegliedert werden können. Geiser [Gei85] beschreibt hierfür drei unterschiedliche Kategorien bezüglich ihrer Wichtigkeit zur Erfüllung der Fahraufgabe (vgl. Abbildung 2.3):

1. Die *primäre Fahraufgabe* entspricht dem eigentlichen Fahrprozess, der in Navigation, Führung und Stabilisierung aufgeteilt werden kann. Darauf wird im folgenden Abschnitt 2.1.2 vertieft eingegangen.
2. Die *sekundäre Fahraufgabe* enthält verkehrs- oder umweltbedingt anfallende Aufgaben, die jedoch nicht direkt sicherheitsrelevant sind. In diese Kategorie fallen einerseits Aktionen des Fahrers, deren Ziel darin besteht, die primäre Aufgabe (für sich oder die andern Verkehrsteilnehmer) zu vereinfachen (z. B. die Betätigung des Scheibenwischers, Betätigen der Lichthupe um z. B. Vorfahrt zu gewähren), als auch jene, die z. B. durch Verkehrsregeln vorgegeben werden (z. B. Blinken, Aktivieren der Nebelschlussleuchte).
3. Die *tertiäre Fahraufgabe* besteht aus einem Sammelsurium an Aufgaben, die weder direkt noch indirekt mit der Fahrtätigkeit in Verbindung stehen. Diese Aufgaben befriedigen Bedürfnisse nach Komfort (z. B. Klimaanlage bzw. Heizung), Information/Unterhaltung (z. B. Nachrichten im Radio, Telefonieren).

Nach Gasser et al. [GAA⁺12] gewinnen Tertiäraufgaben im Zuge der fortschreitenden Automatisierung der Fahraufgabe zunehmend an Bedeutung, da der Fahrer immer weniger Ressourcen auf die eigentliche Hauptaufgabe der Fahrzeugführung aufwenden muss. So werden heute schon große Teile der primären Fahraufgabe, beispielsweise die Navigationsaufgabe, oftmals nicht mehr vom menschlichen Fahrer durchgeführt. Weitere Aufgaben, die heute schon durch Fahrerassistenzsysteme unterstützt bzw. übernommen werden sind z. B. Notbremsassistent (Längsführung) oder ESP (Querführung). Somit ergeben sich neue Anforderungen an das Design von Fahreremo-

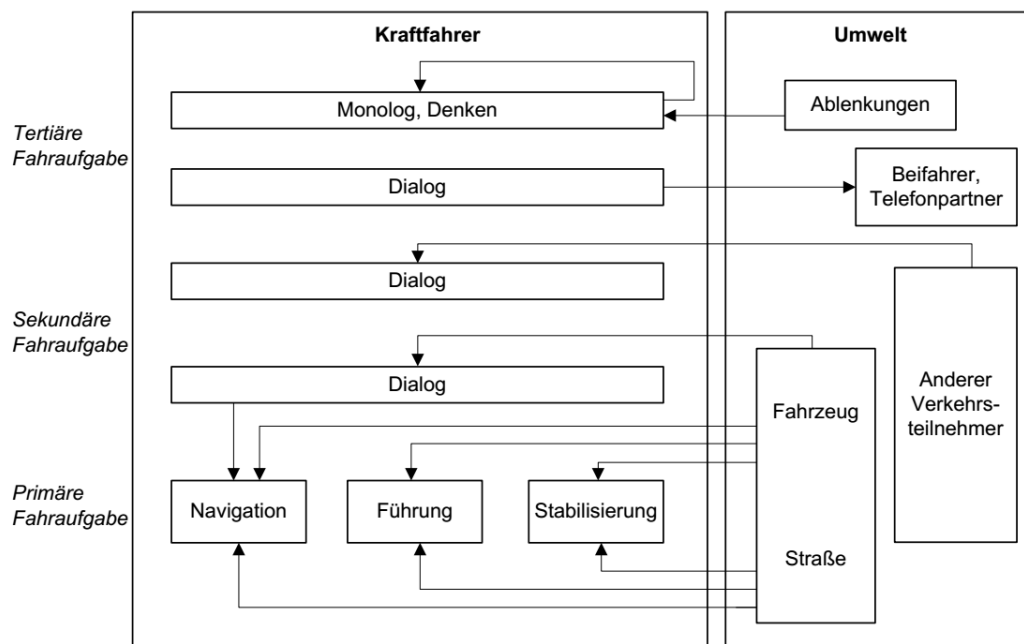


Abbildung 2.3: Schema der Fahraufgabe nach Geiser [Gei85]

dellen – die alleinige Modellierung der primären Fahraufgabe wird für zukünftige Anwendungen, besonders im Bereich des hochautomatisierten Fahrens, nicht ausreichen.

2.1.2 Ebenenmodelle

Während der Bedienung eines Fahrzeugs wird der Fahrer mit unterschiedlichen Aufgaben konfrontiert, welche er zu lösen imstande sein muss, um das Fahrzeug sicher durch den Straßenverkehr zu manövrieren. Diese Aufgaben können verschiedenen Hierarchieebenen zugeordnet werden. Basis für die heute so oft zitierten drei Ebenen der Fahrzeugführung sind u. a. die Arbeiten von Bernotat ([Ber70], vgl. Abbildung 2.5), dort wird die Aufgabe eines „Operators“ (hier: der Pilot eines Flugzeugs) beschrieben, welche aus mehreren „Führungsschleifen“ besteht: Navigation, Lenkung sowie Lage- und Geschwindigkeitsregelung. In all diesen Regelkreisen wird die jeweils nächste Führungsgröße für die darunter liegende Ebene festgelegt, wobei der Mensch (gleichzeitig) in all diesen Ebenen die Funktionen „Messgeber“, „Regler“ sowie „Stellglied“ einnehmen kann. Donges [Don78] adaptierte die Strukturierung an die Problematik der Kraftfahrzeugführung, welche so oder so ähnlich formuliert werden kann:

- 1.) In der *Navigationsebene* entscheidet sich der Fahrer für eine bestimmte Route hinsichtlich verschiedenster Aspekte. Abhängig von persönlichen Präferenzen können für unterschiedliche Fahrer auch verschiedene Routen die jeweilig optimalen sein. Beispielsweise kann für Fahrer A die Minimierung der Fahrtdauer eine besondere Relevanz besitzen, Fahrer B möchte jedoch eine Strecke befahren, welche zu geringstmöglichem Kraftstoffverbrauch

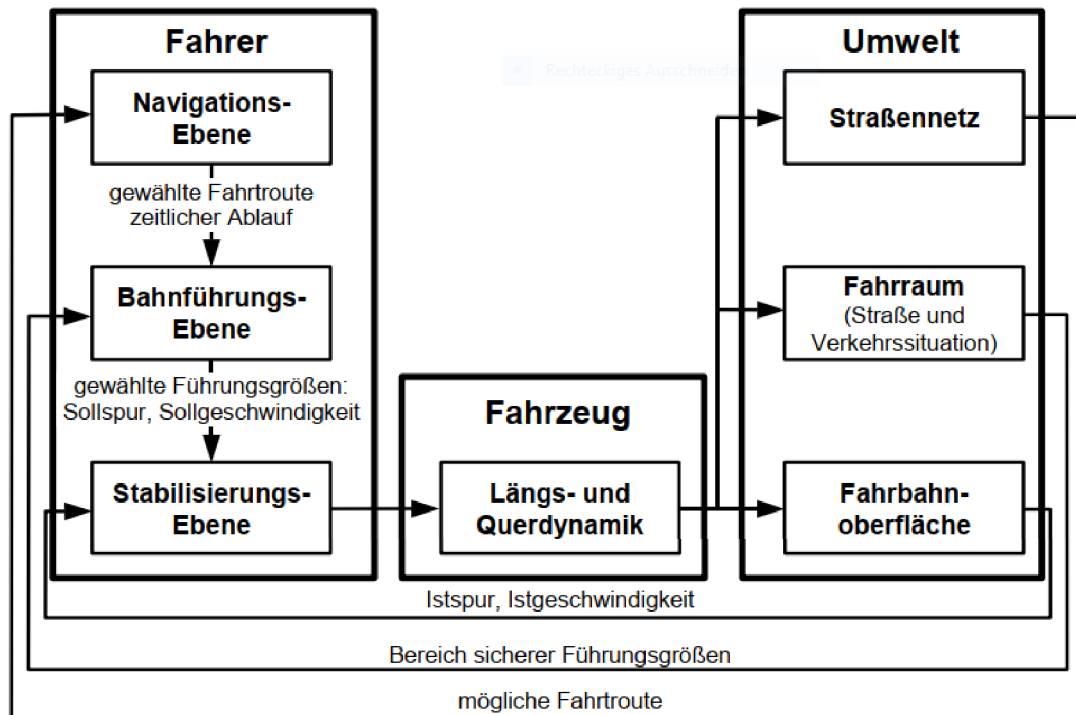
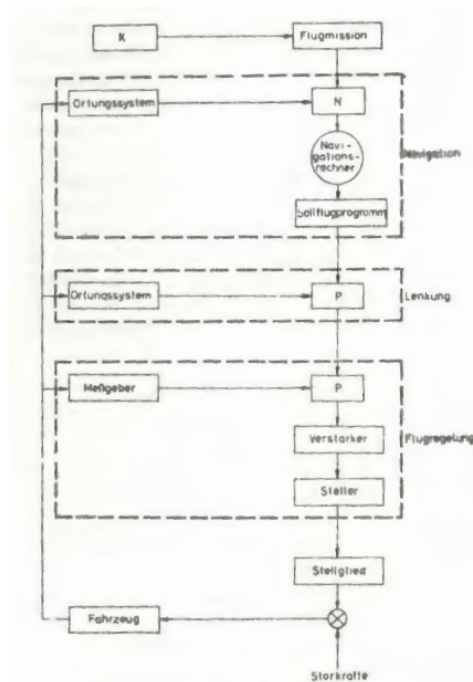


Abbildung 2.4: Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe nach Donges [Don82]

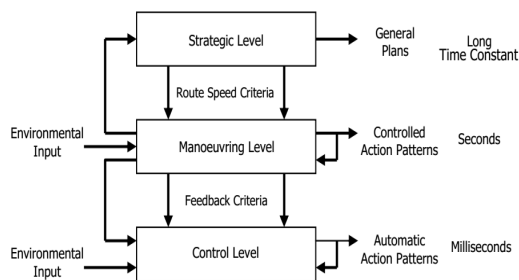
führt. Die Routenwahl geschieht im Allgemeinen vor Fahrtantritt oder bei Fahrtunterbrechungen und wird in den meisten Fahrermodellen nicht berücksichtigt.

- 2.) In der *Bahnführungsebene* bestimmt der Fahrer, basierend auf der vorher gewählten Route und den situativen Gegebenheiten seiner aktuellen Position, seine Sollwerte für Quer- und Längsregelung. Für die Querregelung bedeutet dies zum einen die gewählte Sollspur – falls mehrere zur Auswahl stehen – sowie die Position innerhalb der gewählten Fahrspur. Der Sollwert der Längsregelung besteht aus der gegenwärtigen Wunschgeschwindigkeit. Im Gegensatz zur *Navigationsebene* können bzw. müssen Änderungen der Sollwerte jederzeit vorgenommen werden, da sich das Fahrzeug im Normalfall auf einer Straße mit Fremdverkehr befindet und daher auf das Fahrverhalten anderer Verkehrsteilnehmer reagiert werden muss.
- 3.) In der *Stabilisierungsebene* agiert der Fahrer vor allem als Regler: Seine Aufgabe besteht darin, den in der *Bahnführungsebene* generierten Sollwerten für Längs- und Querregelung des Fahrzeugs zu folgen. Konkret bedeutet dies die Bedienung der als Regelglieder funktionierenden Stellgrößen des Fahrzeugs (Querregelung: Lenkrad, Längsregelung: Gas-/Bremspedal, Kupplung, Schaltung). Die in der *Stabilisierungsebene* durchgeführten, für die Stabilität des Fahrzeugs notwendigen Handlungen, finden kontinuierlich statt.

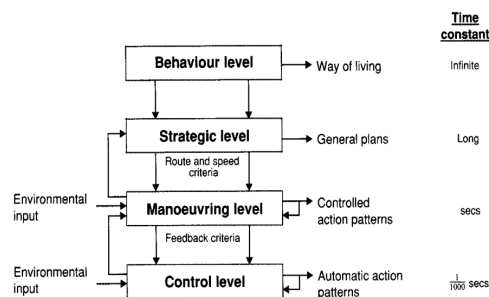
Bei der Interpretation dieses Modells ist jedoch zu beachten, dass die Ebenen *Bahnführung* und *Stabilisierung* eine rein regelungstechnische Beschreibung der Fahraufgabe darstellen: Dies



(a) vereinfachtes Schema der Flugführung aus Bernotat [Ber70]



(b) 3 Ebenen der Fahrzeugführung aus Michon [Mic85] (nach Janssen)



(c) hierarchische Level des Fahrerverhaltens nach Michon [Mic85], modifiziert nach Panou [PBP07]

Abbildung 2.5: Modelle der Fahraufgabe mit drei bzw. vier Ebenen

bedeutet, dass kontinuierlich Sollvorgaben in der Bahnführungsebene sowie Modellausgaben für Längs- und Querverführung aus der Stabilisierungsebene erzeugt werden². Die Sollvorgaben aus der Bahnführungsebene sind dementsprechend eindimensionale Signale und können weder komplexe Manöver noch sonstwie geartete Vorausplanungen beschreiben. Die Navigationsaufgabe hingegen spielt während des Fahrens keine bzw. eine vom „eigentlichen Fahren“ abgekoppelte Rolle und ist im regelungstechnischen Zwei-Ebenen-Modell dementsprechend nicht vorhanden.

Einen etwas anderen Blickwinkel auf die Fahraufgabe nimmt Michon [Mic85] mit seinem Drei-Ebenen-Modell ein: Er beschreibt die Ebenen *strategic/planning level*, *tactical/manoeuvring level* und *operational/control level* etwas abstrakter – ohne genaue Informationen, was die einzelnen Modellebenen exakt hervorbringen. Er definiert jedoch Zeitfenster, in welchen sich die einzelnen Ebenen bewegen: In der Regelungs- bzw. Stabilisierungsebene wird im Millisekundenbereich gehandelt, wobei *automatic action patterns* (automatisierte Handlungssequenzen) ausgeführt werden. In der Manöverebene werden *controlled action patterns* (geregelte Handlungssequenzen), die sich im Sekundenbereich abspielen, ausgeführt. Für die Planungs- bzw. Navigationsebene wird eine „lange“ Zeitkonstante angenommen. Dies zeigt ebenfalls, dass für die konkrete Simulation eine „strategische“ Ebene nicht unbedingt vorhanden sein muss.

²Im „Zwei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung“ von Donges (vgl. Abschnitt 2.2.1.1) wird zusätzlich eine *antizipatorische Steuerung* beschrieben, welche bereits in der Bahnführungsebene einen Lenkwinkel erzeugt.

Vergleicht man das Donges'sche eher die Ingenieursperspektive einnehmende Drei-Ebenen-Modell mit der eher „psychologischen“ Herangehensweise von Michon, so kann das Donges'sche Modell als ein konkreter Anwendungsfall für ein spezifisches Fahrszenario, das Michon'sche Modell jedoch als universeller, da eine Vielzahl von Anwendungsszenarien abgedeckt werden können, betrachtet werden. Die „strategische“ Ebene bei Michon ist etwas umfassender angelegt und beinhaltet ebenfalls Entscheidungen wie „Wahl des Verkehrsmittels“ oder eine „Evaluation der Kosten und Risiken der Fahrt“ – im Donges'schen Modell wird eine Fahrt mit einem Automobil angenommen und die Route vor der Fahrt festgelegt, welche sich jedoch auch während der Fahrt ändern kann. Die „Manöver-“ oder „taktische“ Ebene entspricht jedoch keinesfalls der Donges'schen „Bahnführungsebene“. Ein „Manöver“ beschreibt bei Michon eine komplexe Handlung mit einem definierten Ziel (vgl. auch Abschnitt 4.1), dessen Erzeugung kognitive Vorgänge miteinbezieht. Im Donges'schen Modell leiten sich die Sollvorgaben hingegen direkt aus den Routeneigenschaften her – eine diskrete, komplexe Planung ist nicht vorgesehen. Die unterste Ebene wird bei Michon nicht weiter beschrieben, es ist jedoch anzunehmen, dass diese ähnlich der Donges'schen „Stabilisierungsebene“ zu interpretieren ist. Interessant ist, dass bei Michon sowohl die „taktische“ als auch die „Regelungsebene“ Modellausgaben erzeugen – ob dies jedoch gleichzeitig oder wechselseitig geschieht, lässt der Autor offen.

Eine allgemeinere Möglichkeit, zielgerichtetes Verhalten eines Menschen – also auch das Führen eines Fahrzeugs – in einem Modell abzubilden, wurde 1983 von Rasmussen vorgestellt [Ras83]. Er unterscheidet dabei zwischen drei Verhaltensebenen der Handlungsregulation bzw. kognitiver Prozesse:

- 1.) *Wissensbasiertes Verhalten* (knowledge-based behaviour) tritt in komplexen Anforderungssituationen auf, die den Menschen dazu zwingen, untrainierte Handlungsweisen zu verwenden, um Lösungen für Probleme zu generieren. Die Ergebnisse dieses Prozesses sind Regeln, die in die zweite Ebene übertragen werden.
- 2.) Die Ebene des *regelbasierten Verhaltens* (rule-based behaviour) beinhaltet Situationen, welche dem Menschen bekannt sind und an deren Lösungsschemata eine Erinnerung besteht. Er kann hier aus einem Repertoire verschiedener Verhaltensmuster das subjektiv optimale auswählen. In dieser Ebene werden Regeln ausgewählt, die ein bestimmtes, automatisiertes Verhalten auslösen.
- 3.) In der Ebene des *fertigkeitsbasierten Verhaltens* (skill-based behaviour) erfolgen Verhaltensweisen, welche vom Menschen nicht bewusst kontrolliert werden können. Dies können sowohl Reiz-Reaktions-Mechanismen als auch kontinuierliche Handlungssequenzen sein. Erstere sind zumeist angelegt, letztere oft erlernt; beide werden unbewusst abgerufen.

Donges [Don15] stellt das Rasmussen'sche Modell seinem Drei-Ebenen-Modell gegenüber und findet gewisse Zusammenhänge: Er ordnet Entscheidungen der Navigationsebene überwiegend dem wissensbasierten Verhalten zu, da diesen üblicherweise bewusste Planungen zu Grunde liegen – dies gilt allerdings nur für unbekannte Umgebungen. Inwiefern sich Bahnführungs- und

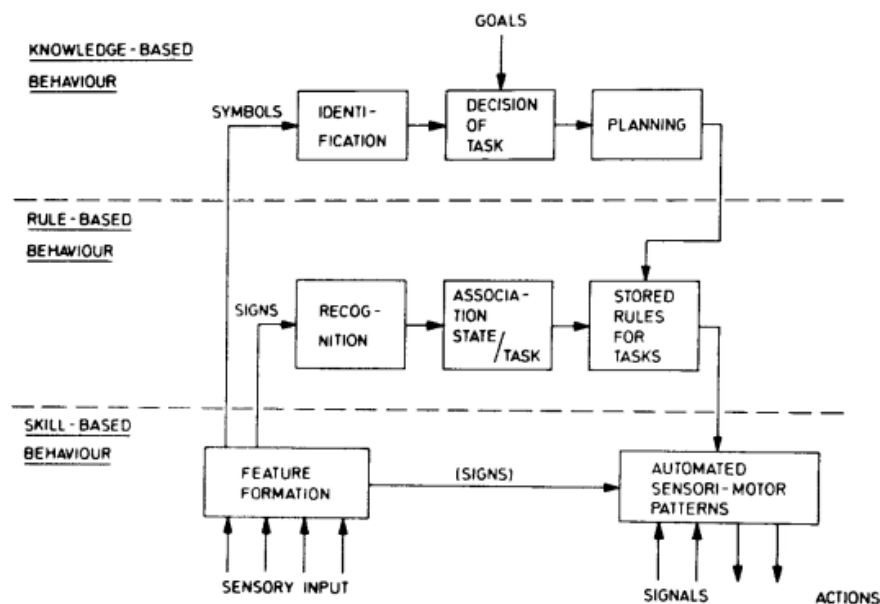


Abbildung 2.6: Drei-Ebenen-Modell des zielgerichteten Verhaltens aus Rasmussen [Ras83]

Stabilisierungsaufgaben auf der Ebene des wissens-, regel- oder fertigkeitsbasierten Verhalten befinden, hängt nach Donges vor allem von der Erfahrung des Fahrers ab. Mit zunehmender Routine werden mehr und mehr unbewusst ablaufende Fertigkeiten entwickelt, so dass sich das Fahrverhalten auf die fertigkeitsbasierte Verhaltensebene verlagert. Beispielsweise werden sich routinierte Fahrer auf ihrem täglichen Weg zur Arbeit im Allgemeinen ausschließlich auf ebendieser Ebene bewegen. Tritt jedoch eine kritische Situation auf, so wird die fertigkeitsbasierte Ebene verlassen und das vorhandene Problem muss entweder mit Hilfe bekannter Regeln oder – noch anspruchsvoller – mit wissensbasiertem Verhalten (und damit einhergehend der Erzeugung neuer Regeln) gelöst werden. Vor allem letzteres kann zu gefährlichen Situationen führen, da oftmals nicht genügend Zeit für komplexere Denkvorgänge und das Durchspielen von Handlungsalternativen zur Verfügung steht.

Diesen Gedanken führen Braess & Donges [BD06] weiter aus: Untersuchungen von mehreren Fahrern ergaben unterschiedliche g-g-Diagramme³ für verschiedene Fahrertypen. Nun kann man den Umhüllenden bestimmter Perzentile eines solchen g-g-Diagramms eine bestimmte Verhaltenskategorie zuordnen: Beschleunigungen über dem 95-Prozent-Perzentil wurde wissensbasiertes Verhalten zugeordnet, dem 80-Prozent-Perzentil regelbasiertes Verhalten und dem „inneren“ Rest fertigkeitsbasiertes Verhalten. Die Autoren betonen, dass die Zahlen willkürlich gewählt sind, der Gedanke dahinter ist jedoch folgender: Je höher die gemessenen Beschleunigungen, desto seltener wird ein Manöver mit entsprechenden physikalischen Rahmenbedingungen vom Fahrer gefahren, somit ist a) wenig Erfahrung vorhanden und b) sind entsprechend dynamische

³Ein g-g-Diagramm stellt Längs- und Querbeschleunigungen einer Fahrt grafisch in einem Diagramm dar.

Manöver per se riskanter und somit seltener und höchstwahrscheinlich nicht fertigkeitsbasiert abzufahren.

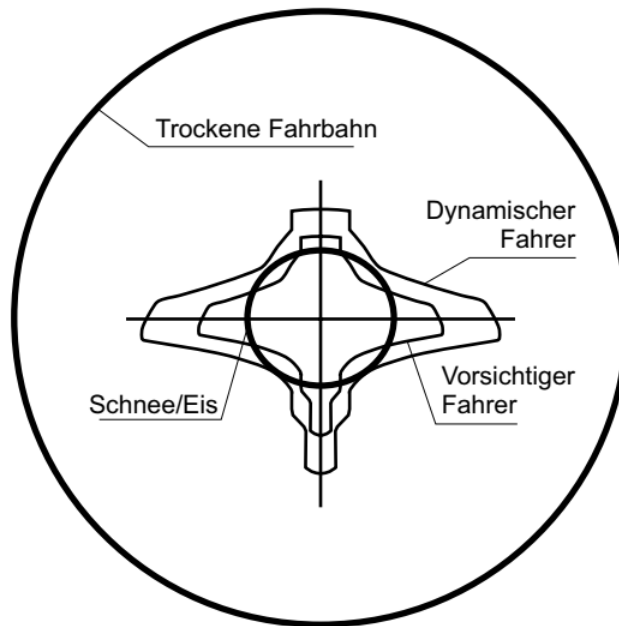


Abbildung 2.7: Fahrverhaltenskollektive und Kraftschlussgrenze nach Braess & Donges [BD06]

Die Adaptierung des Modells von Rasmussen an die Fahraufgabe kann jedoch auch kritisch betrachtet werden. Zum einen besteht die Fahrhandlung selbst zu einem Großteil aus sensumotorischen Aktionen – Rasmussen selbst nennt das Beispiel „Fahrradfahren“ für fertigkeitsbasiertes Verhalten. Regelbasiertes Verhalten, also das Abarbeiten bestimmter Handlungen wie in einem „Kochbuch“, kommt beim Autofahren nur in sehr wenigen Situationen (z. B. bei der Generierung von Vorfahrtreihenfolgen bei komplexen Kreuzungen) oder beim Fehlen jeglicher Fahrerfahrung (Reihenfolge der Pedale beim Anfahren, Spiegel-Spiegel-Schulterblick beim Abbiegen usw.) vor. Zum anderen ist es fraglich, ob – gerade bei hochdynamischen Problemstellungen wie bei Braess & Donges [BD06] beschrieben – die sehr kurze Zeitspanne, in der das aktuelle Problem gelöst werden kann, ausreicht, um regel- oder wissensbasierte Handlungen durchführen zu können.

Ranney [Ran94] klassifizierte bestimmte Fahrhandlungen mit Hilfe einer Matrix aus auf der einen Seite Michons hierarchischer Modellstruktur [Mic85] sowie auf der anderen Seite Rasmussens Modell [Ras83] (vgl. Tabelle 2.3). Er betont dabei, dass sich die Vielzahl der Fahrhandlungen auf der in der Grafik markierten Diagonale befänden. Es scheint auch hier schwer, Beispiele für wissens- oder regelbasierte (Regelungs-)Handlungen zu finden, die nicht nach einer kurzen Lernphase zu fertigkeitsbasiertem Handeln übergehen. Die Manöverzuordnung erscheint ebenfalls teilweise arbiträr (das Kontrollieren eines schleudernden Fahrzeugs („controlling skid“) mag für wenige, blutige Anfänger im ersten Augenblick eine wissensbasierte Handlung darstellen, realistisch betrachtet ist dieses Szenario für eben beschriebenen Fahrertyp bereits beendet, bevor

eine aus Wissen abgeleitete Handlung eingeleitet wird). Ebenso fragwürdig ist die regel- oder fertigkeitsbasierte Routenwahl.

	Strategisch	Taktisch/Manöver	Ausführung/Regelung
Wissensbasiert	Navigation in unbekannter Umgebung	Ausregeln von Schleudern	Fahranfänger in erster Fahrstunde
Regelbasiert	Auswahl zwischen bekannten Routen	Überholen anderer Fahrzeuge	Fahren eines unbekannten Fahrzeugs
Fertigkeitsbasiert	Tägliche Pendlerroute	Verhalten an bekannter Kreuzung	Fahrzeugsteuerung in Kurven

Tabelle 2.3: Ranneys [Ran94] Klassifizierung der Fahraufgabe nach Michon [Mic85] und Rasmussen [Ras83]

Hollnagel betont ebenso, dass die Fahraufgabe nicht als eine lose Kombination von Aufgaben beschrieben werden kann [HNL03]. Vielmehr wird ein Grundsatz bzw. eine Regel um diese Aufgaben anzuordnen, also eine Hierarchie von Aufgaben oder Handlungen, benötigt. Er beschreibt zwei Kriterien, die ein solches Modell erfüllen muss: Erstens muss die Kontrolle der verschiedenen Ebenen *gleichzeitig* möglich sein. Dies ist darauf zurückzuführen, dass Menschen (und auch Maschinen) normalerweise dazu in der Lage sind, mehrere Ziele gleichzeitig zu verfolgen. Zweitens müssen Fahrer und Fahrzeug *gemeinsam* beschrieben werden, was Hollnagel damit begründet, dass in modernen Fahrzeugen eine Vielzahl von automatisierten Funktionen vorhanden sind, welche die Kontrolle vom Fahrer übernehmen können.

Hollnagel definiert in seinem Modell folgende vier Ebenen:

- 1.) *Tracking*: Diese Ebene beschreibt die grundlegenden Fahreraktivitäten, um das Fahrzeug auf der Straße zu halten.
- 2.) *Regulating*: In dieser Ebene werden die Ziele für die *Tracking*-Ebene erzeugt, also Sollgeschwindigkeit, gewünschte Position und Relativgeschwindigkeit gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern.
- 3.) *Monitoring*: Hier wird sich mit der Beziehung des Fahrer-Fahrzeug-Verbunds mit seiner Umgebung auseinandergesetzt und entsprechende Pläne generiert, falls nötig.
- 4.) *Targeting*: Es werden globale Ziele und Parameter für die Fahrt festgelegt.

Die erste und letzte Ebene ähneln den entsprechenden Ebenen aus dem Drei-Ebenen-Modell. Interessant erscheint die Aufteilung der *Bahnführungsebene* in eine Beobachtungs- sowie eine Regulationsebene.

Brezillon & Tijus [BT07] beschreiben einen hierarchischen Ansatz des Fahrens basierend auf der von Peräaho et al. [PKH03] vorgestellten GDE-Matrix⁴ (vgl. Abbildung 2.9). Das im Rahmen des EU-Projekts GADGET⁵ entwickelte Modell unterteilt die Fahraufgabe ebenso in drei Ebenen:

⁴Goals for Driver Education

⁵Guarding Automobile Drivers through Guidance Education and Technology

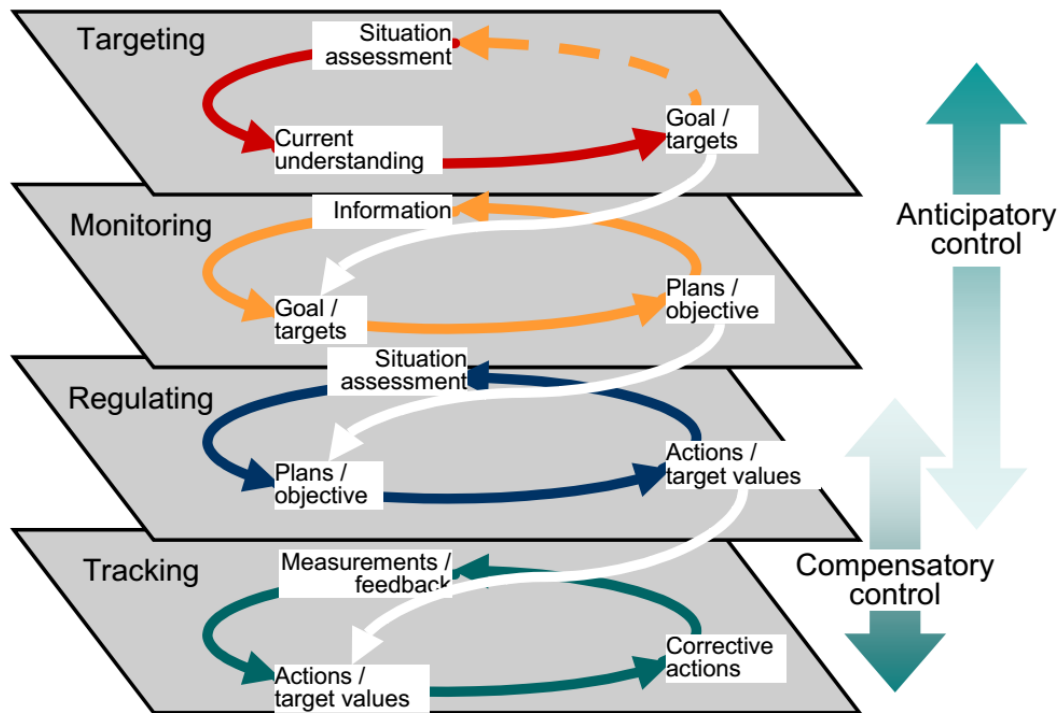


Abbildung 2.8: Driver-In-Control Modell von Hollnagel [HNL03]

eine strategische, eine taktische sowie eine operationale. Über diese drei Ebenen wurde im GDE-Modell eine vierte gestellt: „goals for life and skills for living“, in welcher keine direkt mit dem Fahren zusammenhängenden Eigenschaften vorkommen, jedoch die Persönlichkeit des Fahrers mit seinem Fahrverhalten verknüpft wird. Als Beispiele für die Anwendung konkreter Situationen auf das Modell werden folgende genannt: In der höchsten Ebene kann eine sich oft riskant verhaltende Person als nicht optimal für die Verkehrssicherheit betrachtet werden. Auf der strategischen Ebene wird eine betrunkene Person zu einem Sicherheitsrisiko. Zu schnelles Fahren wird als Beispiel für eine schlechte Entscheidung auf der taktischen Ebene genannt, fehlende technische Fähigkeiten zum Führen eines Fahrzeugs sind auf der operationalen Ebene anzusiedeln.

Innerhalb des EU-Projekts DESERVE⁶ wurde sich ebenfalls der Thematik gewidmet. Die Autoren unterschieden zwischen qualitativen und quantitativen Fahrermodellen, wobei erstere psychologisch fundiert sind und die kognitiven Prozesse während des Fahrens abzubilden versuchen, ohne jedoch konkretes Fahrverhalten zu simulieren. Letztere hingegen tun genau dies auf mathematischer Basis, in dem das Fahren als Reaktion auf äußere Reize interpretiert wird. Basierend auf den Modellüberlegungen von Donges [Don78] und Rasmussen [RL82] entwickelten Klimke et al. [KKE15] eine Modellstruktur, welche einen einheitlichen Ansatz zur Kombination qualitativer und quantitativer Modellierungsansätze bietet (vgl. Abbildung 2.10). Es wird eine

⁶Development Platform for Safe and Efficient Drive

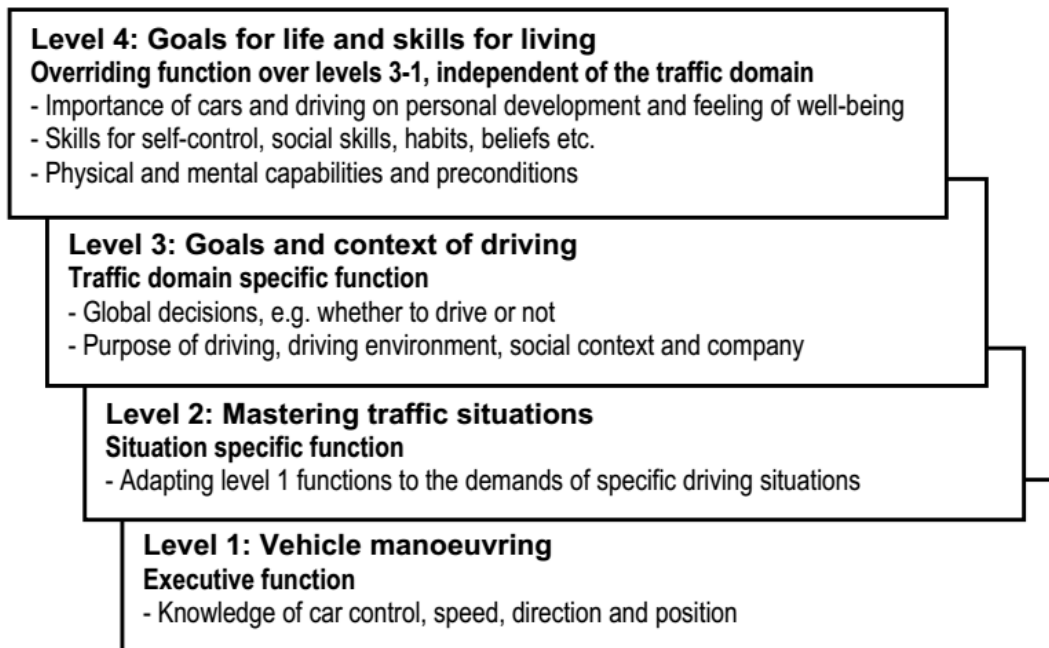


Abbildung 2.9: Hierarchische Level des Fahrerverhaltens nach Peräaho et al. [PKH03]

aus fünf Ebenen bestehende Struktur vorgeschlagen: Routenplanung, Manöverentscheidung, bewusste Bestimmung der Wunschgröße, unterbewusste Überführung in eine Führungsgröße sowie Umsetzung durch Fahrzeugeingaben. Es wird die Ebene der „unterbewussten Fahrzeugführung“ eingeführt, welche die bewusste Bestimmung einer Wunschgröße (z. B. einer Sollgeschwindigkeit) mit der Ausführungsebene verbindet. Als Beispiel wird für die Geschwindigkeitsregelung eine unbewusste Beschleunigungsregelung angenommen (der Fahrer bestimmt durch den Druck auf das Gaspedal unbewusst eine Beschleunigung).

Fazit Es gibt – je nach Zielsetzung bzw. Anwendungsbereich – unterschiedliche Ansätze bzw. Herangehensweisen zur Beschreibung der Fahraufgabe. So konzentrieren sich beispielsweise Bernotat, Donges und Michon eher auf die (regelungs-)technischen Thematiken der Fahrzeugführung und unterscheiden hier drei voneinander getrennte Bereiche. Geiser ergänzt die (primäre) Fahraufgabe um Nebentätigkeiten. Rasmussen beschreibt allgemeiner unterschiedliche Typen von Verhalten, welche sich auch im Fahrkontext wiederfinden. Im Bezugsrahmen dieser Arbeit hat jede der Beschreibungen – je nach Modellierungskontext – ihre Legitimation.

2.2 Fahrermodelle: Unde Venis? – Quo Vadis?

Ziel der Fahrermodellierung ist ein intelligentes, wissens- und regelbasiertes Modell, welches eine Vielzahl von komplexen, möglichst realistischen Situationen bewältigen kann – oder anders

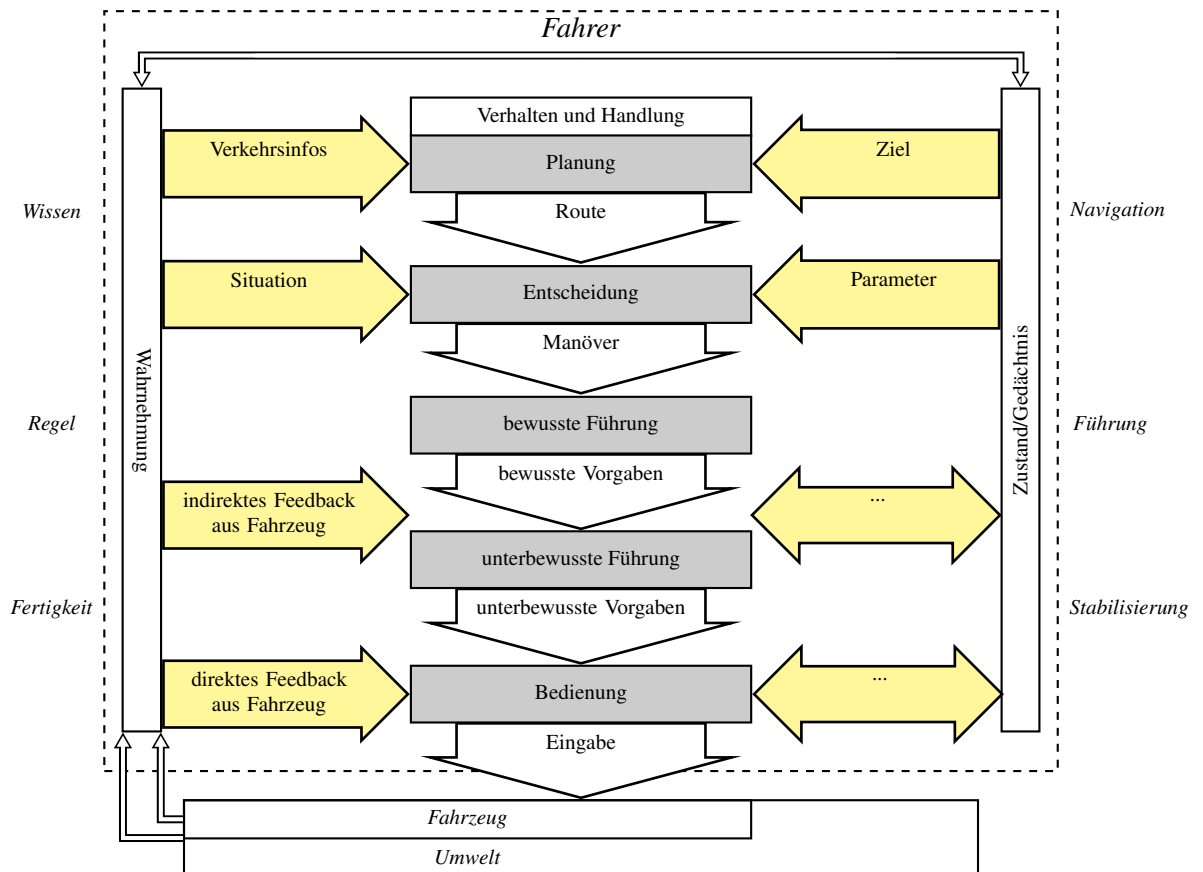


Abbildung 2.10: Fünf-Ebenen-Modell der Fahraufgabe nach Klimke et al. [KKE15]

ausgedrückt: ein psychologisch plausibles Expertensystem. Michon definiert es folgendermaßen:

„A comprehensive model of driver behavior should not only take the various levels into account, but should also provide an information flow control structure that enables control to switch from one level to the other at the appropriate points in time.“ Michon [Mic85]

Er unterteilt Fahrermodelle in zwei Kategorien mit jeweils zwei Ausprägungen: *funktionale* und *taxonomische* Modelle sowie *behavioristische* und *psychologische* Modelle (vgl. Tabelle 2.4).

	taxonomische Modelle	funktionale Modelle
Eingabe-Ausgabe-Modelle (behavioristisch)	Aufgabenanalysemodelle	mechanistische Modelle, adaptive Regelungsmodelle
interne Zustandsmodelle (psychologisch)	Trait-Modelle	motivationale Modelle, kognitive (Prozess-)Modelle

Tabelle 2.4: Typen von Fahrerverhaltensmodellen nach Michon [Mic85]

Taxonomische Modelle sind demnach ein reines „Fakteninventar“, innerhalb dessen nicht dynamische, bestenfalls korrelative Relationen zwischen verschiedenen Sets dieses Inventars vorhanden sind. Ein Aufgabenanalysemodell der Fahraufgabe besteht aus Anforderungen an die Fahraufgabe, Performanzziele und Fähigkeitsanforderungen, siehe Kapitel 2.1. Als Beispiel für eine umfassende Aufgabenanalyse der Fahraufgabe gelten die Arbeiten von McKnight aus den 1970er Jahren ([MA70a], [MA70b], [MH71a] und [MH71b]), die Fahraufgabe wird dort in 45 Hauptaufgaben und 1700 Elementaraufgaben heruntergebrochen. Einen umfänglichen Überblick über Aufgabenanalyse im Fahrzeugführungskontext liefern Fastenmeier & Gstalter [FG92]. Trait-Modelle⁷ hingegen beschreiben Zusammenhänge von Persönlichkeitsmerkmalen der Fahrer basierend auf statistischen Methoden.

Im Gegensatz zu taxonomischen Modellen sind funktionale Modelle dynamisch und somit tatsächlich für die (Echtzeit-)Simulation eines Fahrers zu verwenden. Mechanistische Modelle versuchen hingegen, bestimmte physikalische Gesetzmäßigkeiten auf eine meist größere Menge an Fahrzeugen anzuwenden, Verkehrsflussmodelle seien als Beispiel genannt. Adaptive Reglermodelle sind beispielsweise Servo-Regelungsmodelle, welche die Fahraufgabe analog zu einer kontinuierlichen Tracking-Aufgabe behandeln. Motivationale Modelle hingegen treffen Annahmen über interne Zustände des Fahrers, um darauf basierend, mit Hilfe bestimmter Regeln Fahrerverhalten zu erzeugen. Hierzu gehören beispielsweise Kompensationsmodelle nach Taylor [Tay64] oder auch die Risiko-Homöostase-Theorie von Wilde [Wil82].

Zusammenfassungen über die regelungstechnischen Fahrermodelle bis zum Anfang der 80er Jahre finden sich u.a. in den Arbeiten von Reid et al. [RSB81], [Rei83] und Michon [Mic85]. Willemitt & Jürgensohn [WJ97] begutachten – und kritisieren – die wichtigsten bis zum Jahre 1997 veröffentlichten Fahrermodelle. Basierend auf der Klassifikation von Michon wird allgemein zwischen Dynamikmodellen (unterteilt in Längs- und Querdynamikmodelle) und Verkehrsflussmodellen unterschieden, wobei bei letzteren zwischen makroskopisch und mikroskopisch aufgebauten unterschieden wird (vgl. Abschnitt 2.2.2). Ranney [Ran94] fasst die Fahrermodellentwicklung im englischsprachigen Raum bis zum Anfang der 90er Jahre zusammen und sieht in der Modellierung visueller Suchmuster sowie kognitiver Modellierung wichtige zukünftige Entwicklungen.

Ein kompletter Überblick über unterschiedlichste Ansätze, einen Fahrer zu modellieren, findet sich in der Dissertation Jürgensohns [Jür97]. Die Entwicklungsgeschichte der menschlichen Reglermodelle wird bis zu ihren Anfängen, welche vor allem im militärischen Bereich in den 40er Jahren des vergangenen Jahrhunderts liegen, zurückverfolgt. Wichtige Konzepte, z. B. das quasilineare Modell von Tustin [Tus47], das Crossover-Modell von McRuer et al. [MG65] sowie optimaltheoretische Ansätze bis hin zu weiteren, die den Pfad des linearen kontinuierlichen Systems verlassen (Schaltmodelle, Bang-Bang-Modelle⁸), werden beschrieben und bezüglich

⁷Trait: engl. für Merkmal/Eigenschaft

⁸Eine Stellgröße eines Bang-Bang-Reglers bzw. Zweipunktreglers kann nur zwischen zwei Zuständen, zumeist an/aus wechseln.

ihrer Einsetzbarkeit kritisiert. Eines der Hauptprobleme der regelungstechnischen Ansätze ergibt sich laut Jürgensohn dadurch, dass „*die Fahraufgabe zwar unbestritten ohne Regeltätigkeit nicht zu bewältigen ist, dass das Regeln in vielen Fahrsituationen aber nur einen Bruchteil der Fahrerhandlungen umfasst*“. Als Lösung werden hybride Modellansätze vorgestellt, auf welche im Kapitel 2.2.5 vertieft eingegangen wird.

Eine weitere Zusammenfassung, die viele Fahrermodelle bis zum Jahre 2006 beinhaltet, haben Plöchl & Edelmann veröffentlicht [Plö07]. Die Autoren kommen ebenfalls zu dem Schluss, dass das Verständnis bezüglich des menschlichen Fahrens nicht annähernd dem des theoretischen Wissens über das Fahrzeug entspricht und leiten daher die Notwendigkeit ab, das menschliche Fahrverhalten weiter zu untersuchen, um bessere – und allgemeinere – Fahrermodelle entwickeln zu können. Eine weitere, aktuellere Zusammenfassung unterschiedlicher Fahrermodelle findet sich in Oppenheim et al. [OSC⁺10].

Henze [Hen04] unterteilt Fahrermodelle in quantitative und qualitative Modelle. Qualitative Modelle basieren auf verkehrspsychologischen Ansätzen und können daher nur theoretisch, aber nicht mathematisch beschrieben werden. Im Gegensatz dazu stehen quantitative Fahrermodelle, welche mathematisch beschrieben werden können und somit für die Industrie interessanter erscheinen, da diese für Simulationen genutzt werden können.

Carsten [Car07] unterscheidet zwei Modellierungsansätze. Ersteren bezeichnet er als *deskriptiv*, d.h. die Fahraufgabe wird bezüglich dem, „was der Fahrer zu tun hat“, beschrieben. Obwohl dies der bisher gebräuchlichste Ansatz wäre, kritisiert er vor allem die beschränkte Vorhersagequalität, da die verschiedenen Verhalten von Fahrern (Motivationen, Fähigkeiten, Beschränkungen) nicht genügend beachtet würden. Er unterteilt deskriptive Modelle noch einmal in Aufgabenanalysemodelle, adaptive Reglermodelle (analog zu Michon, vgl. Tabelle 2.4), sowie Produktionsmodelle, welche er zwar als nützlich, um etwas zu beschreiben, jedoch, nutzlos, um zu verstehen, *wie* etwas funktioniert, bezeichnet. Den zweiten Ansatz benennt er als *motivational*, hier wird der Fahrer eher als aktiv handelnder Protagonist in einer bestimmten Situation betrachtet. Er ist „aktiver Entscheider“ und „Informationssucher“, er beschäftigt sich mit Risiko und Aufgabenschwierigkeiten. Motivationale Modelle versuchen konkret zu beschreiben, *warum* der Fahrer in einer bestimmten Situation die von ihm gewählte Handlung einer alternativen Handlung vorgezogen hat.

Cacciabue & Carsten [CC10] trennen prinzipiell zwischen *bottom-up*- und *top-down*- Ansätzen. Einem mittels *bottom-up*-Methodik erzeugten Fahrermodell wird nach und nach die Bewältigung einzelner grundlegender Fahraufgaben antrainiert, welche durch Beobachtung von menschlichen Fahrern definiert werden könnten (vgl. beispielsweise Salvuccis Modell [SL02]). Im Gegensatz dazu wird bei einem *top-down*-Ansatz zuerst die Fahraufgabe theoretisch beschrieben, um dann einzelne Komponenten des so entwickelten Fahrermodells zu spezifizieren.

Eine weitere Möglichkeit zur Kategorisierung verschiedener Modellierungsansätze bietet De Winter [DWH12]. Er unterscheidet zwischen „spezifischen“ und „unspezifischen“ Modellen (vgl.

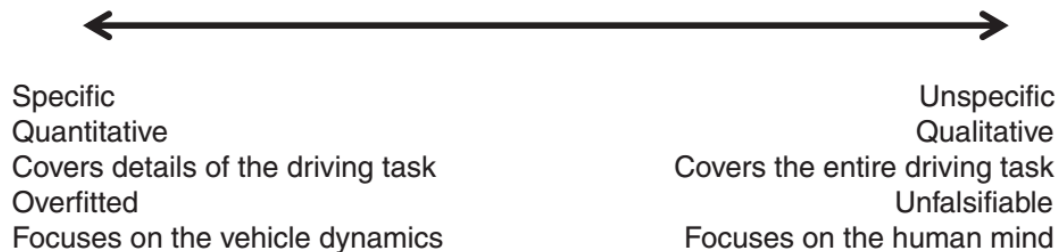


Abbildung 2.11: Dimensionen von Fahrerhaltensmodellen nach de Winter [DWH12]

Abbildung 2.11), wobei motivationale Modelle eher als unspezifisch kategorisiert werden, da diese oft an einer Vagheit leiden, welche eine Falsifizierung des Modells unmöglich macht. Laut De Winter tendieren adaptive Reglermodelle im Gegensatz dazu zu einer Überspezifizierung, einer überbordenden Detailgenauigkeit, weshalb eine psychologisch plausible Vorhersage des Fahrerhaltens nur schwer zu realisieren ist. De Winter sieht Trait-Modelle als intelligenten Kompromiss aus globalen, eher unspezifischen motivationalen Modellen und den im Detail sehr genauen, aber rein deterministisch funktionierenden adaptiven Reglermodellen. Er propagiert multivariate statistische Modelle als möglichen Treffpunkt der psychologischen und ingenieurtechnischen Herangehensweise.

AbuAli [AAz16] beschäftigt sich mit aktuellen Entwicklungen, fokussiert dabei auf Fahrermodelle mit dem Zweck der Vorhersage des Fahrverhaltens für Fahrerassistenzsysteme. Er identifiziert vier Modellierungsziele: Spurwechsel, Kreuzungsverhalten, Parametrierung von Fahrertypen sowie fahrertypabhängige Navigation.

Im Rahmen dieser Arbeit werden nichtfunktionale Modellierungsansätze nicht als Fahrermodelle im eigentlichen Sinn betrachtet, sondern als Hilfsmittel, um die tieferen Gründe für das Verhalten des Fahrers untersuchen, modellieren und in ein funktionales Modell übertragen zu können. Ein Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt somit in dem Versuch, relevante Erkenntnisse aus taxonomischen bzw. beschreibenden Modellierungsansätzen in einen funktionalen Modellierungsansatz einfließen zu lassen. Eine an diesen Kontext angepasste Kategorisierung von Fahrermodellen ist in Abbildung 2.12 dargestellt.

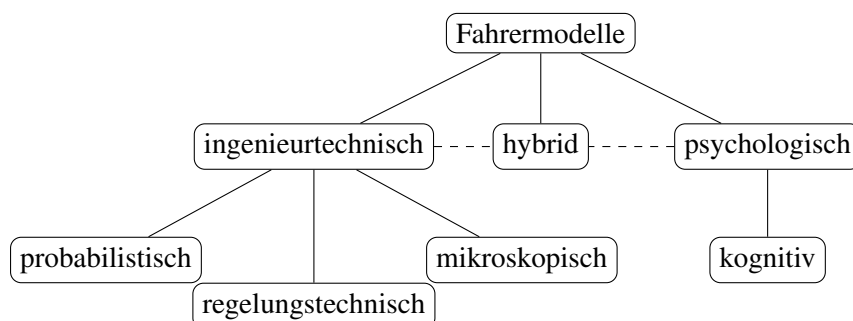


Abbildung 2.12: Vorschlag einer Kategorisierung von Fahrermodellen

2.2.1 Regelungstechnische Ansätze

Eine für einen ingenieurtechnischen Ansatz naheliegende Interpretation der Fahraufgabe ist die des Haltens des Fahrzeugs auf einem vorgegebenen Kurs mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit. Somit kann die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug als eine Überwachungs- und Regelungsaufgabe angesehen werden. Eine mathematische Modellierung der Fahraufgabe ist möglich, in dem die Elemente des Systems Fahrer-Fahrzeug-Umwelt (vgl. Abbildung 2.1) in einen Regelkreis überführt werden. Der Fahrer übernimmt die Aufgabe des Reglers und ist dafür verantwortlich, die Differenz zwischen Führungsgröße und gemessener und zurückgeführter Regelgröße zu bestimmen und diese zu minimieren. Als Stellgrößen dienen dem Fahrer hierfür – je nachdem, ob Längs- oder Querverführung abgebildet werden soll – Gas- und Bremspedal bzw. Lenkrad. Die Regelstrecke wird in diesem System durch das Fahrzeug dargestellt, die Störgrößen haben ihren Ursprung in der Umwelt und wirken auf das Fahrzeug. Der Platz des Sensors, welcher den aktuellen Istwert der Regelgröße zu bestimmen hat, wird im Fahrermodell durch die menschliche Kognition eingenommen, aufgrund ihrer Komplexität wird diese jedoch in vielen Fällen nicht implementiert – der Fahrer „kennt“ den Wert der entsprechenden Regelgröße, was im Sinne einer Maximierung der Menschähnlichkeit einen wesentlichen Kritikpunkt darstellt.

Für eine möglichst realistische Simulation von Fahrverhalten ist das Vorhandensein realitätsgetreuer Fahrzeug- und Umweltmodelle notwendig, weiterhin muss der Informationsaustausch zwischen den drei Komponenten modelliert werden. Die mathematische Darstellung von (einfachen) Umweltumgebungen, beispielsweise einer Straße in einer ebenen Umgebung ist unschwer umzusetzen und für grundlegende Untersuchungen meist ausreichend. Ein der realen Fahrdynamik in vielen Situationen entsprechendes Fahrzeugmodell existiert jedoch erst seit der Entwicklung des *Einspurmodells* im Jahre 1940 von Rieker & Schunck [RS40]. Unter Zuhilfenahme dieses Fahrzeugmodells entstanden Anfang der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts die ersten – meist regelungstechnisch inspirierten – Fahrermodelle (Kondo [Kon53], Enke [Enk66], Weir & McRuer [WM70] und viele andere). Eine umfassende Beschreibung regelungstechnischer Fahrermodelle liefert Jürgensohn [Jür07].

Ein Modell, dass in vielen – auch aktuellen – Publikationen als Grundlage für ein regelungstechnisches Fahrermodell erwähnt wird, ist das Zwei-Ebenen-Modell von Donges aus dem Jahre 1977 [Don77]. Daher wird dieses, zusammen mit der auf diesem Modell aufbauenden Erweiterung von Bösch aus dem Jahre 1991 [Bös91], in den Abschnitten 2.2.1.1 bzw. 2.2.1.2 beispielhaft für die eingangs beschriebene – ingenieurtechnische – Herangehensweise an die Fahrermodellierung näher erläutert.

Erwähnenswert für regelungstechnische Ansätze nach 2000 sind sicherlich die Arbeiten von MacAdam [Mac01], [Mac03]. Dieser unterscheidet zunächst ebenso zwischen klassischen und optimaltheoretischen Reglermodellen sowie KI-Ansätzen (KNN, Fuzzy, genetische Algorithmen) und erweitert ein lineares Fahrermodell u. a. um eine interne Repräsentation des Fahrzeugs sowie eine neuromuskuläre Filterung des Lenkverhaltens (vgl. Abbildung 2.14). Modelleingabe

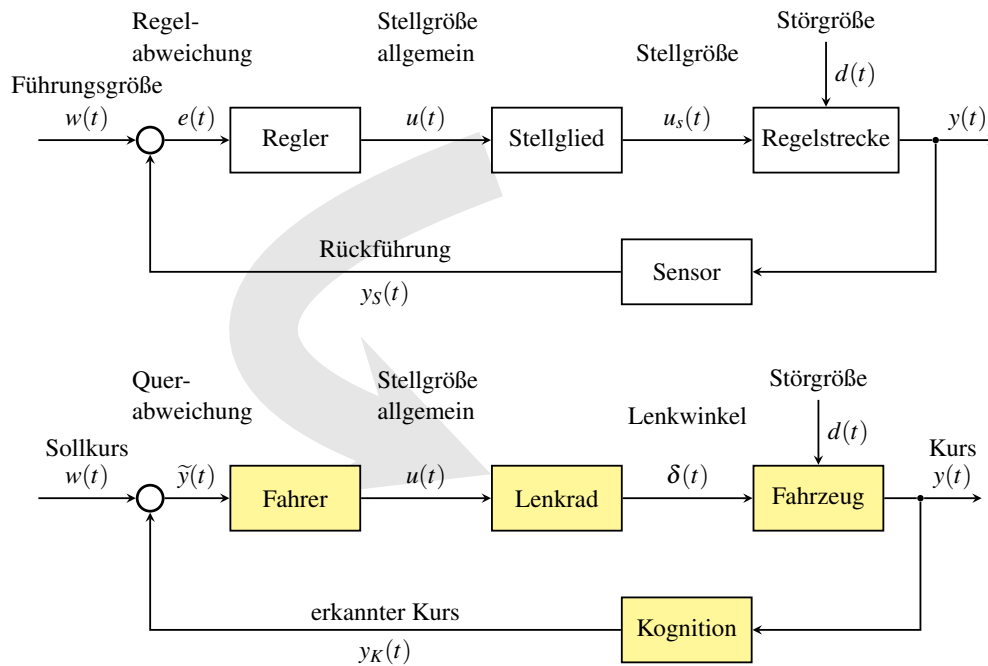


Abbildung 2.13: Überführung eines Reglers in ein einfaches Fahrermodell

ben sind die Mittellinie der Straße sowie deren äußere Begrenzungen. Die für die Regelung verwendeten Informationen über das eigene Fahrzeug werden verzögert, gefiltert und mit einem Rauschen versehen, so dass die darauf basierenden Vorausschauberechnungen des internen Fahrzeugmodells von den Fähigkeiten des Fahrers abhängen können. Der berechnete optimale Lenkwinkel wird mit Hilfe einer Kostenfunktion erzeugt und – ähnlich zu den Modelleingaben – „physiologisch und ergonomisch“ gefiltert. Die Vorausschauweite des Fahrers ist variabel und wird beispielsweise beim Erkennen von Hindernissen entsprechend verringert. Ungoren & Peng [UP05] haben das MacAdam’sche Modell weiterentwickelt und generalisiert, z. B. indem sie weitere Variablen (Gierwinkelfehler, Krümmungsfehler usw.) der Kostenfunktion hinzufügen, um ein differenzierteres Fahrverhalten erzeugen zu können.

Weitere „konservative“ Ansätze zur Querregelung beschreiben Wu & Chang [WC05], Boros [Bor07] sowie von Vietinghoff [von08]. König [Kön08] verglich in seiner Arbeit 25 regelungstechnische Fahrermodelle und stellte fest, dass der Fokus in diesen Konzeptionen zumeist auf der Optimierung des Reglers hinsichtlich der Robustheit – also vor allem auf einer Minimierung der maximalen Querabweichung des Fahrzeugs von der Solltrajektorie – lag. Er kritisierte dabei die Nichtberücksichtigung des Fahrverhaltens im Grenzbereich, was sich durch die oft unrealistisch geringen Querbeschleunigungen in den Simulationen im Vergleich zu realen Fahrsituationen und die viel zu einfachen Streckenmodelle widerspiegelt. Keen & Cole verwendeten in [KC06] und [Kee08] eine modellprädiktive Regelung für ein nichtlineares Querführungsmodell. Eigel imple-

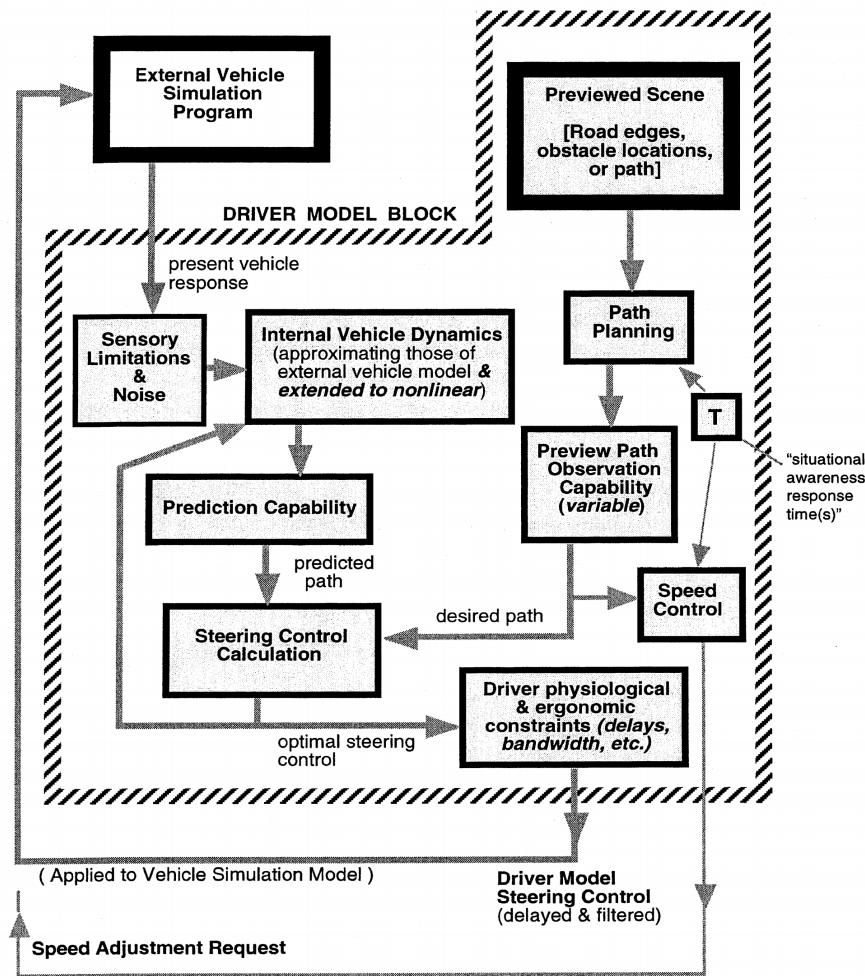


Abbildung 2.14: Fahrermodell nach MacAdam [Mac01] bzw. [Mac03]

mentierte eine *Sliding-Mode-Regelung*⁹ für parallele, kombinierte oder integrierte Längs- und Querverführung durch ein Fahrermodell [Eig10]. Werling entwickelte eine *Bi-Level-Stabilisierung* für die Regelung autonomer Fahrzeuge in zeitkritischen Straßenszenarien und bei hohen Geschwindigkeiten [Wer10]. Diese Methode verbindet *High-level-* und *Low-level-Stabilisierung*¹⁰. Konzeptionell handelt es sich hierbei ebenso um eine unterlagerte Regelung, welche mit einer schwellwertbasierten Reinitialisierung auf Planungsebene kombiniert wird. Als ein Ziel dieses Modells wird „unauffälliges, menschenähnliches Verhalten im Verkehr“ genannt. Hiesgen [Hie11] verwendet einen potentialfeldbasierten Bahnfolgeregler sowie eine kaskadierte Regelung für einen Bahnführungsassistenten, welche kombiniert mit den implementierten Fahrermodellen von Iguchi [Igu59], Renski [Ren01] sowie Donges & Naab [DN96] evaluiert wurden. Verglichen wurden die Modelle bezüglich eines Spurwechselmanövers, wobei die Untersuchungen ergaben,

⁹*Sliding-mode-Regelung* ist eine *strukturvariable* Regelung, bei der in die Rückführstruktur des Regelkreises gezielt nichtlineare Funktionen integriert werden, zwischen denen dann zustandsabhängig umgeschaltet wird

¹⁰High-level-Stabilisierung (HLS) steht hier für Änderungen auf der Planungsebene, Low-level-Stabilisierung (LLS) bezeichnet Rückführungen auf niederer (Regler-)Ebene

dass die laterale Abweichung vom Sollkurs mit der Menschähnlichkeit des verwendeten Modells zunahm.

Vor allem für das Lenken in Kurven existiert eine Vielzahl von Modellen, in denen das Lenkverhalten direkt mit dem Blickverhalten verknüpft wird. Lappi [Lap14] verglich Modelle aus den letzten 20 Jahren und stellte eine zweidimensionale Kategorisierung auf: Auf der einen Seite unterscheidet er zwischen Modellen, die den Tangentenpunkt als visuellen Bezugspunkt verwenden, auf anderen Seite beschreibt er Modelle, welche sich visuell an einem Sollkurs orientieren (vgl. Abschnitt 3.1.5.1). Die zweite Dimension unterscheidet, ob anhand der Richtung hin zu einem bestimmten Punkt oder mittels des optischen Flusses (vgl. auch Abschnitt 3.1.1.3) gelenkt wird. Modelle basierend auf Tangentenpunkt sind von Land & Lee [LL94], Wilkie & Wann [WW03], Salvucci & Gray [SG04] sowie – bei Miteinbeziehung des optischen Flusses – von Authié & Mestre [AM11] erschienen. Modelle, die sich an einem Sollpfad orientieren, finden sich ebenso bei Wilkie & Wann [WW03], Salvucci & Gray [SG04], sowie bei Wann & Land [WL00], bei Miteinbeziehung des retinalen Flusses u. a. bei Kim & Turvey [KT99] bzw. Wann & Swapp [WS00].

Jiang et al. [JWSD11] unterscheiden Querreglermodelle in Kompensations- und Vorausschauregelungsmodelle. Letztere werden als überlegen beurteilt, ein mathematischer Ansatz basierend auf einer optimaltheoretischen Regelung mit Vorausschau wird als neue Lösung vorgestellt. Saleh et al. entwickelten ein „kybernetisches“ und „menschähnliches (*human-like*)“ Fahrermodell [SCM⁺11], dessen Fahrregler – ähnlich dem Donges’schen Modell – sich aus einem kompensatorischen und einem antizipatorischen Anteil zusammensetzt. Die Führungsgröße des antizipatorischen Teils entspricht hier dem Winkel zwischen der Fahrzeugrichtung und dem Tangentenpunkt der Kurve, im kompensatorischen Zweig wird der Winkel zwischen Fahrzeug und einem Nahpunkt 5 m vor dem Fahrzeug verwendet. Die Menschähnlichkeit dieses Modells besteht im Wesentlichen aus einem Modul zur Simulation des neuromuskulären Systems (NMS), welches dafür zuständig ist, den aus dem Regler generierten Wunschlenkwinkel in ein Lenkmoment umzuwandeln (vgl. Abbildung 2.15). Wang et al. [WXC14] fassten eine Vielzahl von aktuellen regelungstechnischen Modellen zusammen, welche mittels aufgezeichneter Fahrzeugdaten Parameter identifizieren, um diese an unterschiedlichste regelungstechnische Modelle anzupassen (u. a. Burnham et al. [BSB74], Hermannstädter & Yang [HY12] und Tokutake et al. [TSS13]).

Im folgenden Kapitel wird das Zwei-Ebenen-Modell von Donges exemplarisch für ein regelungstechnisches Fahrermodell näher beschrieben, da dieses Modell als repräsentativ für viele ingenieurtechnische Ansätze gelten kann. Es verwendet die gängigen Konzepte einer Vorausschau sowie eines vorhandenen Sollkurses, welcher durch den Regler Mensch abgefahren werden soll.

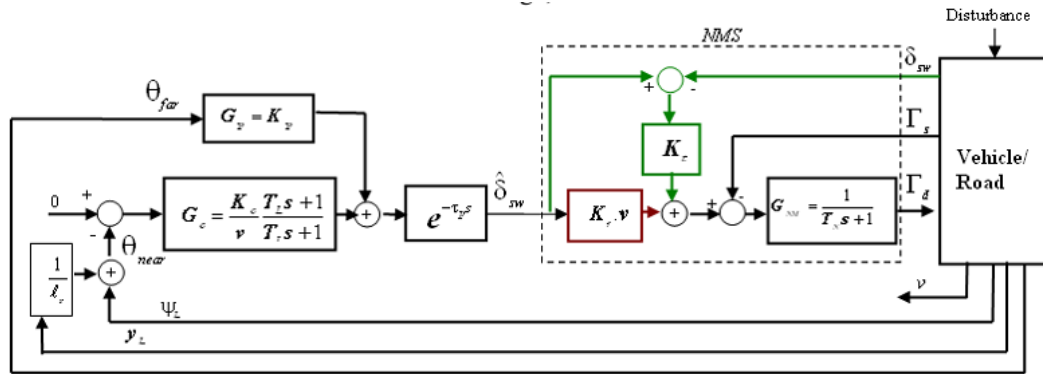


Abbildung 2.15: Kybernetisches Fahrermodell nach Saleh et al. [SCM⁺11]

2.2.1.1 Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Regelverhaltens nach Donges

Basierend auf den Forschungsarbeiten der Fahrermodellierung der 50er und 60er Jahre des vergangenen Jahrhunderts z. B. von Fiala [Fia67] und der daraus bekannten Unterscheidung zwischen *kompensatorischem* und *antizipatorischem* Verhalten und den Ergebnissen einer Simulatorstudie entwickelte Donges in den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts eine formalisierte Beschreibung menschlichen Lenkverhaltens. Unter anderem werden die Verhaltensweisen des Regelverhaltens von Donges [Don77] näher erläutert:

Bei der *kompensatorischen* Regelung erhält der Mensch als Information nur die Regelabweichungen, welche er auszugleichen hat. Der aktuelle Wert der zu regelnden Sollgröße ist ihm jedoch unbekannt. Regelungstechnisch impliziert dies das Fehlen eines Sensors sowie das Wissen um die Führungsgröße¹¹.

Eine *Nachfolgeregelung* tritt auf, wenn dem Fahrer sowohl Führungs- als auch Regelgrößen bekannt sind. In diesem Fall ist er in der Lage, Änderungen der Führungsgröße wahrzunehmen und die Regelabweichungen aus den bekannten Größen selbst zu berechnen. *Kompensatorische* und *Nachfolgeregelung* können inhaltlich zusammengefasst werden, da sie sich nur in der Auslegung der Systemgrenzen des Systems Fahrer unterscheiden.

Antizipatorisches Verhalten kann der Fahrer zeigen, wenn ihm zusätzlich zur aktuellen Situation die Information über den zukünftigen Wert der Führungsgrößen bekannt ist. Somit ist es ihm möglich, noch vor dem Eintreten der Veränderungen, auf diese reagieren. Hierbei wird die Zeitspanne, um welche die Information der Führungsgrößen der aktuellen Zeit vorausseilt, *sensorische Antizipationszeit* genannt. Eine solche antizipatorische Fahraktion ist demnach ein Steuervorgang, da kein instantaner Abgleich zwischen Soll- und Istgröße vorgenommen wird. Dieser wird durch einen kompensatorischen Regelvorgang übernommen.

¹¹ Solch ein rein kompensatorisch fahrendes Modell wäre somit auf eine externe Intelligenz angewiesen, die Führungs- und Regelgrößen erkennt und die entsprechenden Differenzen berechnet.

Basierend auf den beschriebenen Verhaltensformen entwickelte Donges am Beispiel des Fahrerlenkverhaltens ein Fahrermodell mit zwei Ebenen: *Bahnführung* und *Stabilisierung*. Die *Navigationsebene* wird hier explizit nicht berücksichtigt.

Das in diesem Modell der *Bahnführungsebene* entsprechende Element ist die *antizipatorische Steuerung*: Der Fahrer erkennt den aktuellen sowie zukünftigen Verlauf der Sollspur und leitet daraus einen Teil seines Lenkwinkels her. Im Donges'schen Fahrermodell werden Soll- und Istspur als Kehrwerte der jeweiligen Kurvenradien R_S (Radius der Sollspur) und R_I (Radius der Istspur), also als Krümmungen $K_S = \frac{1}{R_S}$ und $K_I = \frac{1}{R_I}$ interpretiert.

Die *Stabilisierungsebene* wird durch die *kompensatorische Regelung* repräsentiert: Die vom Fahrer beobachteten Abweichungen des Fahrzeugs vom Sollkurs werden durch entsprechende Lenkhandlungen kompensiert. Hierbei handelt es sich – im Gegensatz zur *antizipatorischen Steuerung* – um eine Regelung, da ein geschlossener Wirkungskreislauf vorhanden ist (vgl. Abbildung 2.16)¹². Die für den Fahrer zu beachtenden Regelgrößen sind folgende: die Querabweichung y_Δ zwischen der aktuellen Fahrzeugposition und der gewünschten Sollspur, der Gierwinkelfehler im Schwerpunkt ψ_Δ (Winkel zwischen der Ist- und Sollspurtangente) sowie die Krümmungsdifferenz κ_Δ (Differenz der Krümmungen von Ist- und Sollspur). Interessant ist die von Donges angeführte Erkenntnis, dass die in den Fahrversuchen beobachteten Beiträge von Krümmungsdifferenz, Gierwinkelfehler und Querabweichung etwa im Verhältnis 1:4:1 zueinander stehen. Den weitaus wichtigsten Beitrag bei der Querregelung eines Fahrzeugs leistet beim Donges'schen Fahrermodell demnach der Gierwinkelfehler¹³.

Der vom Fahrermodell erzeugte Lenkwinkel λ ergibt sich aus der Summe aller von den Teilmodellen generierten Lenkwinkel: $\lambda = \lambda_S + \lambda_Z + (\lambda_y + \lambda_\psi + \lambda_\kappa)$ (vgl. Abbildung 2.16). Die Restgröße (bzw. *Remnant*) λ_Z ergibt sich aus der Differenz der bei den Simulatorversuchen aufgenommenen und der vom Fahrermodell erzeugten Lenkwinkel. Diese Restgröße betrug in geraden Streckenabschnitten bis zu 52 % des Gesamtlenkwinkels – für Fahrten in realen Umgebungen ist eine weitere Erhöhung anzunehmen. Abschließend kann gesagt werden, dass das Zwei-Ebenen-Modell in bestimmten Szenarien (z. B. Kurvenfahrt) recht realistische Lenkwinkelverläufe erzeugt und somit eine Basis für weitere regelungstechnisch inspirierte Fahrermodelle darstellt.

Fazit Das Donges'sche Zwei-Ebenen-Modell steht beispielhaft für die Klasse der regelungstechnischen Fahrermodelle. Eine vorgeschaltete Vorausschau erlaubt eine Antizipation des Straßenverlaufs, welche anhand des so generierten Sollkurses die Basis für die kompensatorische Regelung der Stabilisierungsebene darstellt. Zum Behufe der Simulation von ausschließlich Lenkverhalten ohne Betrachtung der dahinterliegenden Ursachen kann das Modell realitätsna-

¹²Beispielhaft für ein rein *kompensatorisches* Regelverhalten sei hier die Reaktion des Fahrers auf einen plötzlichen Seitenwindstoß angeführt.

¹³Es werden allerdings nur optische Eingangsinformationen berücksichtigt.

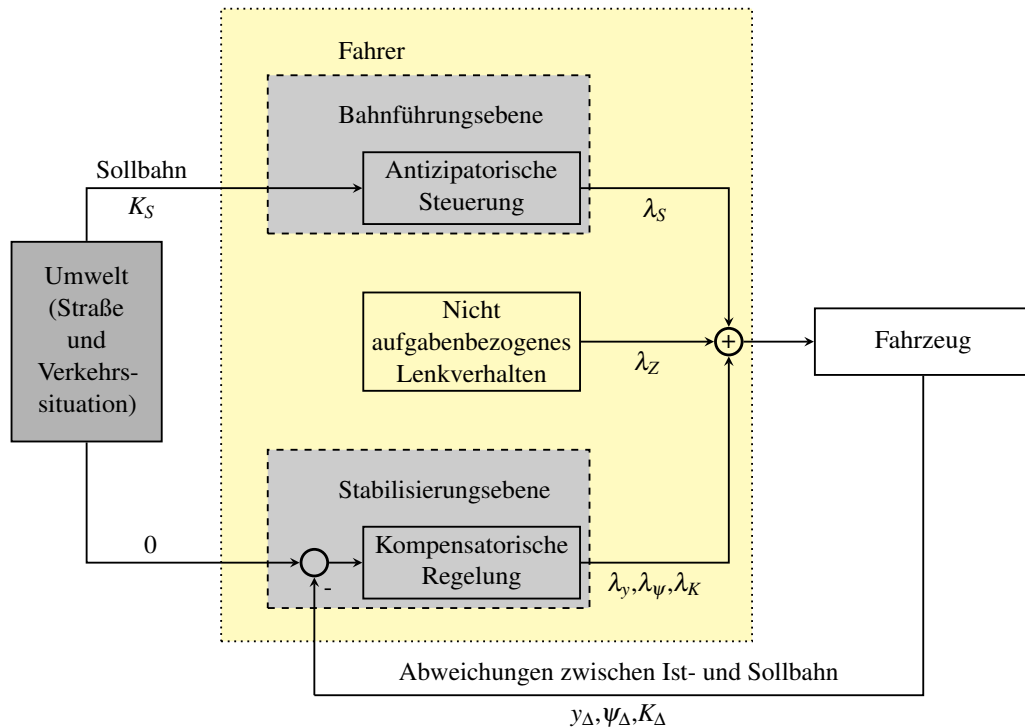


Abbildung 2.16: Zwei-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung nach Donges [Don77]

he Lenkwinkel erzeugen. Die Generierung der Sollwerte allein aus der Streckenarchitektur beschränkt die Anwendungsszenarien jedoch stark.

2.2.1.2 Erweitertes Reglermodell des Fahrers nach Bösch

Einen weiteren Versuch, den Fahrer mathematisch nachzubilden, liefert Bösch 1991 in [Bös91]. Das entwickelte Modell kann als eine Weiterentwicklung des Donges'schen Fahrermodells angesehen werden (vgl. Abschnitt 2.2.1.1) – auch hier wird eine Kombination aus Steuerung und Regelung als die am ehesten realistische Methode favorisiert. Die zwei Ebenen aus dem Donges'schen Fahrermodell (bzw. ähnlich funktionierende zwei Ebenen) werden um zwei weitere Ebenen erweitert: Zum bereits vorhandenen vorausschauenden Element der antizipatorischen Steuerung wird eine prädiktive Regelung hinzugefügt, zusätzlich wird noch eine vierte Ebene, welche „Lenken aus Erfahrung“ genannt wird, addiert. In dieser soll die Fähigkeit des Fahrers implementiert sein, auf unerwartetes Fahrzeugverhalten reagieren zu können. Abschließend ist – sozusagen als fünfte Ebene – ein Fahrerrauschen implementiert, welches ähnlich dem schon

im Donges'schen Modell postulierten *Remnant*¹⁴ die „nicht modellierbaren Verhaltensanteile“ repräsentieren soll.

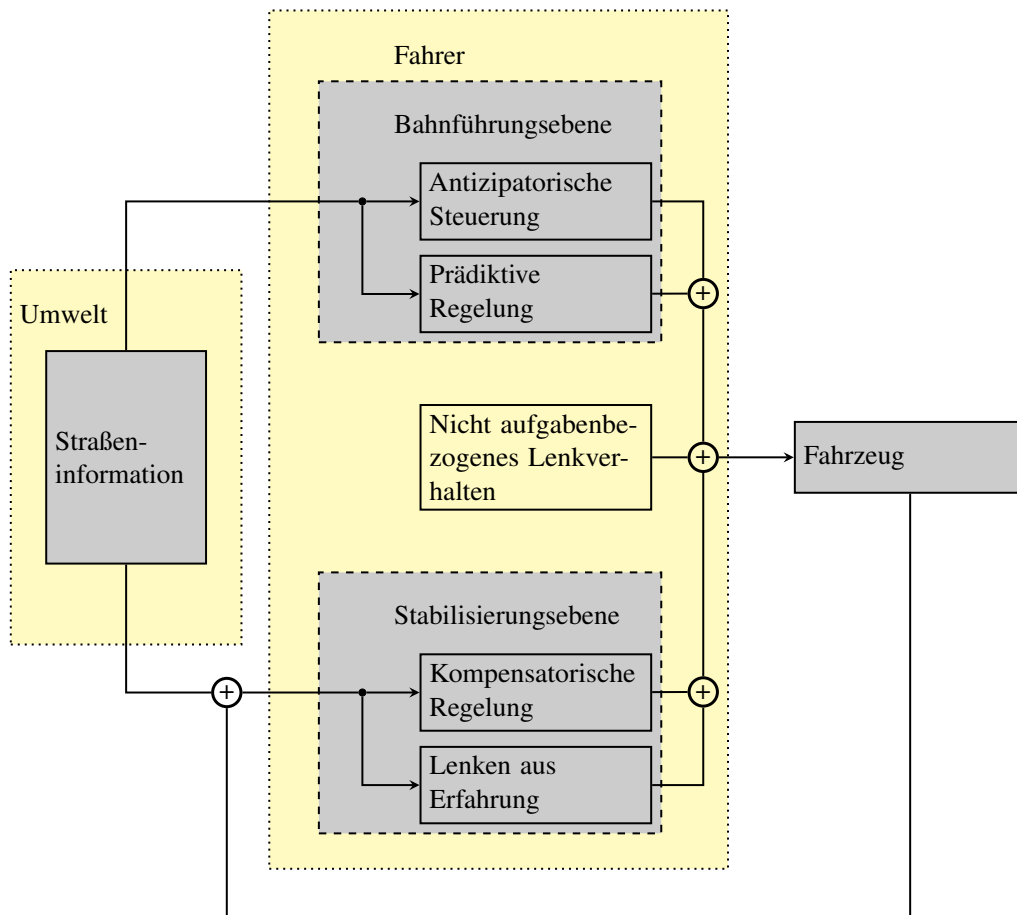


Abbildung 2.17: Vier-Ebenen-Fahrermodell nach Bösch [Bös91]

Die *vorausschauende antizipatorische Steuerung* erzeugt – ähnlich dem Donges’schen Modell – einen gesteuerten mittleren Lenkwinkel a^δ aus der Kurvenkrümmung. Dieser Lenkwinkel soll den ungefähren Spurverlauf einstellen.

Für die *vorausschauende Regelung* werden folgende vier Kennwerte berechnet:

- der Weg bis zur Überschreitung der Fahrbahnbegrenzung SLC (space to line crossing)
- die Zeit bis zur Überschreitung der Fahrbahnbegrenzung TLC (time to line crossing)
- die voraussichtliche seitliche Abweichung in der Vorausschau e_v
- der voraussichtliche Gierwinkelfehler in der Vorausschau ψ_v

¹⁴Treffender könnte man den Remnant auch als „nicht *regelungstechnisch* modellierbares Verhalten“ beschreiben. Die Vereinfachung als „Rauschen“ oder „nicht aufgabenbezogenes Verhalten“ erzeugt eine Vorstellung einer reinen Zufallsgröße, die so nicht haltbar ist. Vielmehr sollte der Remnant als „*das Menschliche*“ am Fahrverhalten betrachtet werden – also gerade das, was menschliches von roboterhaftem Fahren unterscheidet: Emotionen, Motivationen, Können, Handicaps und ähnliche typisch menschliche Eigenschaften.

Die *SLC* sowie *TLC* liefern keinen eigenen Lenkwinkelanteil, werden jedoch für die *kompensatorische Regelung* als Schaltkriterien gebraucht. Der Lenkanteil der Prädiktivregelung p^δ ergibt sich aus der Summe der beiden Teillenkwinkel p^{δ_e} und p^{δ_ψ} .

Für die *kompensatorische Regelung* werden proportionale, differenzierende und integrierende Regelungen aggregiert verwendet (PID-Regler). Jedoch wird die komplette Ebene nur dann aktiviert, wenn *SLC* oder *TLC* einen bestimmten Grenzwert unterschreiten. Die Proportionalregelung berücksichtigt die seitliche Abweichung von der Mittellinie, den Gierwinkelfehler gegenüber der Sollbahntangente sowie den seitlichen Abstand vom Fahrbahnrand. Der differenzierende Regelungsanteil nutzt die seitliche Relativbewegung, die Änderung des Gierwinkelfehlers und die Quereschleunigung als Eingangsgrößen. Der integrierende Regler verwendet wiederum die seitliche Abweichung und den Gierwinkelfehler als Eingangsgrößen. Des Weiteren wird noch das Produkt der Bahnkrümmungsdifferenz zwischen Fahrzeug- und Fahrbahnkrümmung und der Fahrgeschwindigkeit verwendet.

Das *Lenken aus Erfahrung* soll die Gewöhnung des Fahrers an das jeweilig verwendete Fahrzeug simulieren, die dafür verwendeten Größen sind Lenkradmoment und Quereschleunigung – jeweils als Vergleich mit Erfahrungswerten. Falls die aktuellen Werte für eine längere Zeit nicht mit den Erfahrungswerten übereinstimmen, so können die entsprechenden Parameter geändert werden, um die Abweichungen zu minimieren.

Als letzter Wert wird der Regelung noch ein *Remnant* hinzugefügt, welches aus zwei Komponenten besteht. Zum einen Teil sind dies vom Menschen erzeugte, nicht aufgabenbezogene Lenkvorgänge, die willkürliche (also nicht mit den vorhandenen Führungsgrößen zusammenhängende) und unwillkürliche (zufällige, durch die Unzulänglichkeit des menschlichen Fahrers) Reaktionen umfassen. Der zweite Teil besteht aus den durch die Beschränktheit des Modellansatzes nicht reproduzierbaren Anteile des Lenkverhaltens. Letztendlich wurde das Fahrerrauschen durch ein parametrisiertes zufälliges Rauschsignal implementiert.

Fazit Das erweiterte Reglermodell von Bösch fügt den im Donges'schen Ansatz eingeführten zwei Ebenen noch weitere hinzu: eine vorausschauende Regelung sowie eine für Schreckreaktionen. Dies erlaubt realistischere Modellausgaben, das regelungstechnische Grundparadigma scheint jedoch mittlerweile ausgereizt zu sein. Für bestimmte Anwendungen (z. B. Standardmanöver für Fahrdynamikuntersuchungen) ist das Modell gut geeignet, der kognitive Überbau, welcher für die Anwendung in komplexeren Umgebungen z. B. mit Fremdverkehr und Kreuzungsszenarien notwendig ist, existiert bei diesem Ansatz naturgemäß nicht.

2.2.1.3 Zusammenfassung

Regelungstechnische Fahrermodelle sind – definiert man die Fahraufgabe lediglich als aus Längs- und Querverführung bestehend – der naheliegende Ansatz der sich daraus ergebenden Re-

gelungsaufgabe. Aufbau und Funktionsweise eines regelungstechnischen Fahrermodells wurde anhand des Donges'schen bzw. durch Bösch erweiterten Zwei-Ebenen-Modells demonstriert. Generelle Struktur sowie die generierten Modellausgaben ähneln sich bei vielen dieser Modelle. Visuell-getriebene Modelle können für bestimmte Fahraufgaben (Kurvenfahrten) gute Ergebnisse erzielen, sind jedoch ebenfalls auf das traditionelle Reglerparadigma begrenzt. In der Domäne der Fahrermodellierung stellen regelungstechnische Modelle einen vergleichsweise konservativen Ansatz dar. Sie sind reliabel, im Allgemeinen deterministisch und werden in vielen Bereichen eingesetzt, beispielsweise als virtuelle Testfahrer für Standardmanöver. Von Nachteil sind die oftmals engen Systemgrenzen sowie fehlende Generalisierbarkeit des entsprechenden Modellierungsansatzes – regelungstechnische Modelle bieten oft eine optimale Lösung für ein beschränktes Problem, eine hohe ökologische Validität wird jedoch nur für hochspezifische Szenarien erreicht.

Menschähnlichkeit Bezüglich der in Kapitel 1.1 definierten Kategorien der Menschähnlichkeit von Fahrermodellen fallen regelungstechnische Modelle zumeist in Typ 0 – ihr Fahrverhalten kann oft problemlos als nicht-menschlich erkannt werden. Dies fällt vor allem wegen der zumeist nicht vorhandenen Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern auf. Bei entsprechender Parametrierung und komplexeren Modellen kann Typ I, mit an die menschliche Physis angepassten Regelparametern kann für spezielle Manöver Typ II erreicht werden, wenngleich sich technische Regler oft „zu gut für einen menschlichen Fahrer“ verhalten. Dies liegt zum einen an unrealistischen Sollvorgaben¹⁵, die es dem Regler erst ermöglichen, einen optimalen Kurs zu fahren. Diese Problematik, sowie fehlende Kognition und Informationsverarbeitung begrenzen die Menschähnlichkeit dieser Modellkategorie. Als Garant für stabiles Fahrverhalten können technische Regler jedoch ein schnell und vergleichsweise kostengünstig einzusetzendes Werkzeug innerhalb eines größeren Rahmenmodells für menschähnliche Fahrermodellierung darstellen.

2.2.2 Ansätze aus der Verkehrssimulation

Für die Simulation von Verkehr – das kann im Extremfall die Simulation von mehreren Millionen Verkehrsteilnehmern bedeuten – wird der Fokus weg vom einzelnen Fahrzeug verlagert. Für den Modellierer bedeutet dies, dass (vor allem aufgrund von technischen Beschränkungen) die auf einen einzigen Fahrer bzw. Fahrer-Fahrzeug-Verbund angepassten Modellierungsmethoden nicht effektiv einzusetzen sind. Es existieren hierfür unterschiedliche Betrachtungsweisen, welche sich anhand des Detaillevels der Modelle unterscheiden. Grundsätzlich kann nach Gartner et al. zwischen mikroskopischen, mesoskopischen und makroskopischen Simulationsmodellen unterschieden werden [GMR92], wobei die Differenzierung anhand des Detaillevels der Modelle stattfindet.

¹⁵Jürgensohn kritisierte dies bereits u. a. in [Jür97].

Auf der makroskopischen Ebene kann der Verkehr als komprimierbare Flüssigkeit betrachtet werden, somit können Parameter wie Verkehrsfluss und -dichte mit physikalischen Gleichungen modelliert werden. Fahrzeuge werden als Teil einer Menge betrachtet, das zu simulierende Streckennetz wird nicht physikalisch, sondern logisch modelliert. Das Ziel makroskopischer Modellierung des Straßenverkehrs ist die möglichst genaue Simulation bzw. Vorhersage der Auslastung des Straßennetzes. Wichtige Kenngrößen sind in diesem Zusammenhang die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrsstroms, der Verkehrsfluss sowie die Verkehrsdichte, die Beziehungen zwischen diesen Größen lassen sich anschaulich im Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses darstellen (vgl. Abbildung 2.18).

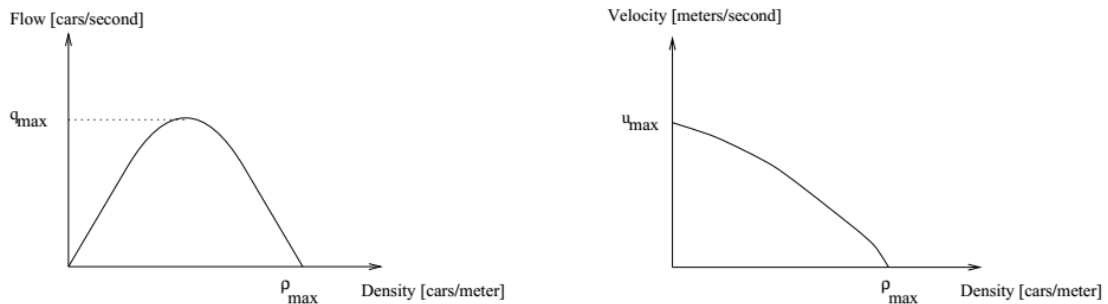


Abbildung 2.18: Links: Zusammenhang zwischen Verkehrsfluss und Verkehrsdichte (Fundamentaldiagramm des Verkehrsflusses); rechts: Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Verkehrsdichte

Im Gegensatz zu makroskopischen Modellen verwenden mesoskopische Modelle zumeist auch komplexere Beschreibungen der einzelnen Fahrzeuge, zusätzlich können einzelne Handlungen (z. B. ein Spurwechsel) simuliert werden, jedoch sind diese Handlungen nicht hochgradig detailliert beschrieben, sodass der eben erwähnte Spurwechsel instantan stattfindet. Ein Beispiel für eine mesoskopische Simulation stellt der zelluläre Automat von Nagel & Schreckenberg [NS92] dar.

Mikroskopische Modelle sind vergleichsweise komplex beschrieben, so werden im Allgemeinen die Handlungen des Fahrer-Fahrzeug-Ensembles modelliert, nicht jedoch die des Fahrzeugführers. Neuere Modelle beziehen jedoch den Fahrer und dessen Kognition mit ein, als Beispiele seien ACME und PELOPS genannt, auf die folgend eingegangen wird. Die Straßen müssen hierfür ebenfalls annähernd realistisch modelliert werden (z. B. müssen Fahrspuren vorhanden sein). Die Modellierung der dynamischen Prozesse der Fahrzeuge beschränkt sich jedoch auf die Längsdynamik.

Noch detailliertere Modellierung wird als submikroskopisch bezeichnet, bei dieser Methodik werden sowohl einzelne Handlungen des Fahrers als auch physikalische Vorgänge innerhalb des Fahrzeugs (Motor, Getriebe, etc.) simuliert.

Erste Beschreibungen des Verkehrsflusses stammen aus den 30er Jahren von Greenshields et al. [GBCM35]. In den 50er Jahren entwickelten Reuschel [Reu50] und Pipes [Pip53] Be-

schreibungen für Fahrzeugfolgemodelle. Harding [Har07] nennt diese Ansätze „deterministische Abstandsmodelle“, da sich alle Fahrer bzw. Fahrzeuge nach identischen mathematischen Regeln verhalten.

Grundlegend für Fahrzeugfolgemodelle ist der Zusammenhang zwischen einem äußeren Reiz und einer daraus resultierenden Reaktion des Fahrers, wobei τ für die Reaktionszeit des Fahrers und α für den Sensitivitätsfaktor des Fahrers stehen:

$$\text{Reaktion}(t + \tau) = \alpha \cdot \text{Reiz}(t)$$

Als äußere Reize kommen beispielsweise der Abstand zum Vorderfahrzeug oder auch die Geschwindigkeitsdifferenz zum Vorderfahrzeug ($\Delta v(t)$) in Betracht. Die Reaktion wird zumeist als Beschleunigung (a) interpretiert. So lässt sich unter Annahme eines konstanten α ein lineares Fahrzeugfolgmodell ableiten:

$$a(t + \tau) = \alpha \Delta v(t)$$

Ein allgemeines und oft verwendetes nichtlineares Modell zur Fahrzeugfolgebewegung ist das GHR-Modell¹⁶ von Gazis et al. [GHR61]. Das lineare Modell wurde durch die aktuell erkannte Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs $v(t + \tau)$ sowie den Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug $\Delta x(t)$ sowie um die Modellkonstanten β und γ ergänzt:

$$a(t + \tau) = \alpha \frac{v(t + \tau)^\beta}{\Delta x(t)^\gamma} \Delta v(t)$$

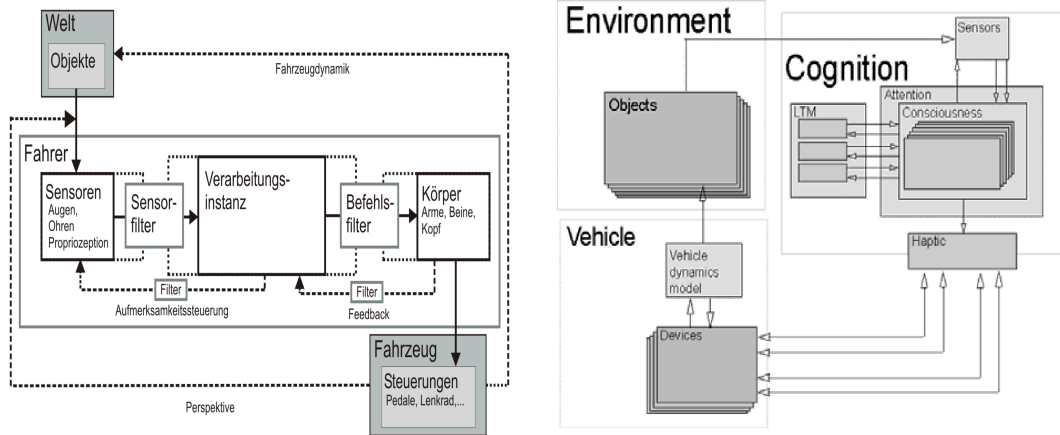
Die Parameter β und γ sind fahrerabhängig anzupassen und führen zu Modellen, die entweder der geschwindigkeitsabhängigen oder der abstandsabhängigen Komponente größeres Gewicht zuweisen. Umfassende Zusammenfassungen von (makroskopischen) Fahrzeugfolgmodellen finden sich in den Arbeiten von Mitschke & Chen [MC91], Rothery [Rot92], Gartner et al. [GMR92], Brackstone & McDonald [BM99] und Toledo et al. [TKBA03].

Es existieren auch mikroskopische Modelle, welche Entscheidungsbäume verwenden, um die Handlungen des Fahrermodells an die spezifischen Gegebenheiten der aktuellen Situation anzupassen (z.B: Barceló et al. [BCC⁺05]). Eine auf Fuzzy-Logik basierende mikroskopische Simulationsumgebung ist das Framework FLOWSIM¹⁷, welches ein Fahrermodell beinhaltet, das den Fahrer mit Hilfe von drei Handlungen beschreibt: Beobachten, Denken und Reagieren. McDonald et al. [MWB97] beschreiben unterschiedliche Fahrertypen als Änderungen in den Verteilungen der Fuzzy-Funktionen. Weitere kommerziell eingesetzte mikroskopische Modelle sind das vor allem in Deutschland verbreitete VISSIM¹⁸, das in den USA gebräuchlichere COR-

¹⁶Gazis-Herman-Rothery-Modell

¹⁷Fuzzy Logic based motorWay SIMulation

¹⁸Verkehr in Städten - Simulation



(a) Informationsfluss beim Führen eines Kraftfahrzeugs nach Krajewicz & Wagner [KW04] (b) Struktur des Fahrermodells ACME nach Krajewicz & Wagner [KW02]

Abbildung 2.19: Kognitives Fahrermodell ACME nach Krajewicz & Wagner [KW02], [KW04]

SIM¹⁹ sowie das aus Japan stammende KAKUMO (Shiraishi et al. [SHK⁺04]). Alle Modelle besitzen Fahrzeugfolge- sowie Spurwechselmodelle. Die Entwicklung geht hin zu immer genauere (submikroskopischer) Modellierung des Fahrers, beispielsweise mittels der mikroskopischen Simulationsumgebung AIMSUN²⁰.

2.2.2.1 ACME

Ein Beispiel für mikroskopische Modellierung ist das ACME²¹-Modell von Krajewicz & Wagner [KW02], [KW04], [Kra05]. Dieses wird als ein „kognitives Fahrermodell“ vorgestellt, welches auf der mikroskopischen Simulationsumgebung SUMO²² aufsetzt. Ziel der Entwicklung war ein Fahrermodell, welches echtzeitfähig ist und unterschiedliche kritische Situationen erzeugen kann. Es betrachtet den Fahrer als Regelschleife zwischen Umwelt und Fahrzeug (vgl. Abbildung 2.19). Ein realistisches Verhalten soll durch die Modellierung der menschlichen Informationsverarbeitung auf einem recht hohen Abstraktionsgrad erreicht werden. Das Modell von Atkinson & Shiffrin [AS68], welches auf den drei Typen des Gedächtnisses (sensorischer Input, Kurzzeitgedächtnis und Langzeitgedächtnis) basiert (vgl. Kapitel 3.2.1), dient hier als Vorlage. Neben einer einfachen Modellierung des sensorischen Inputs wird das Bewusstsein als Container mit bis zu sieben Platzhaltern für relevante Informationen, geplante Handlungen, Erwartungen und ähnliches interpretiert. Des Weiteren beinhaltet das Kognitionsmodell ein Aufmerksamkeits-, Planungs- sowie ein haptisches Modul.

¹⁹Federal Highway Administration Corridor Simulation

²⁰<http://www.aimsun.com>

²¹(„A Common Mental Environment“)

²²„Simulation of Urban MOBility“

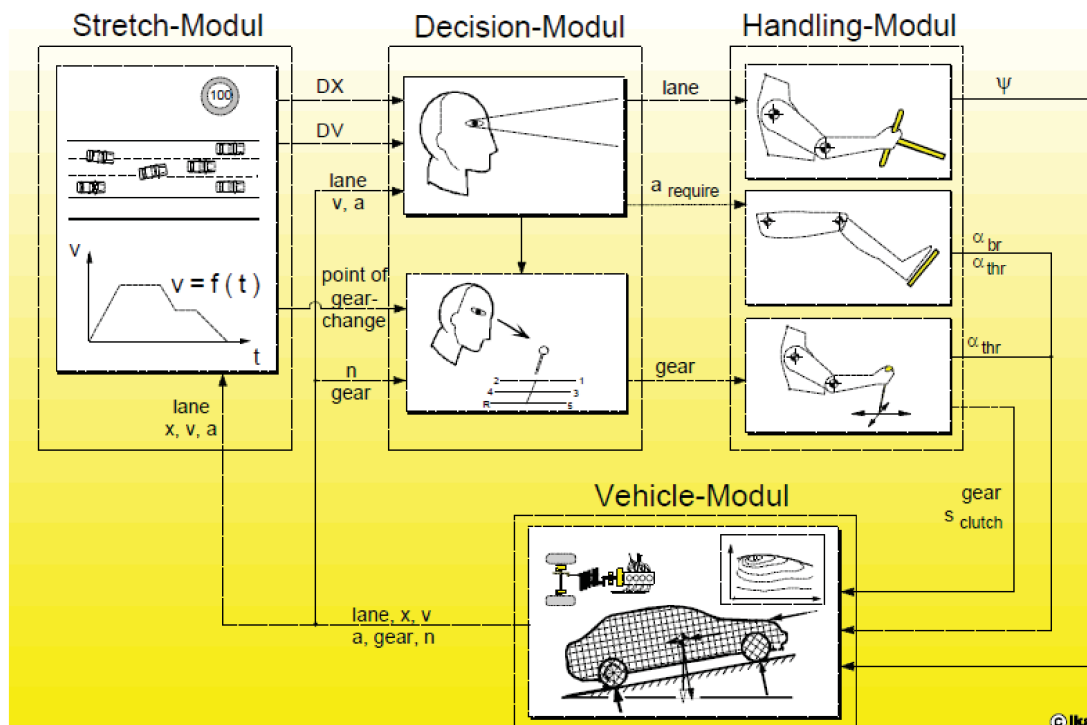


Abbildung 2.20: Struktur des Fahrermodells PELOPS nach Düser [Düs10]

Fazit ACME ist ein Modellansatz, der einem mikroskopischen Fahrermodell eine kognitive Struktur hinzufügt. Eine Einteilung in die Kategorie „hybrides Modell“ wäre daher ebenso zulässig gewesen. Da das Modell nicht öffentlich verfügbar ist, kann eine umfassende kritische Beurteilung nicht vorgenommen werden.

2.2.2.2 PELOPS

Ein weiteres mikroskopisches Fahrermodell ist *PELOPS*²³, welches an der RWTH Aachen in Kooperation mit BMW entwickelt wurde, um die Interaktion von Fahrer, Fahrzeug und Umgebung zu simulieren (Benmimoun [Ben04]). Das implementierte Fahrermodell besteht aus einem Verhaltens- sowie einem Handlungsmodell. Das Verhaltensmodell beschreibt zwei Zustände: Folgen und Spurwechsel. Ersterer ist an das Folgemodell von Wiedemann [Wie74] angelehnt, welches aus den Zuständen unbeeinflusstem Fahren, Annähern, Folgen und Bremsen besteht. Das Spurwechselmodell entscheidet sich für eine Spur mit dem maximalen Zufriedenheitswert des Fahrers und leitet den Spurwechsel ein. Das Handlungsmodell setzt nun die vom Verhaltensmodell initiierte Fahrstrategie um, in dem die entsprechenden Stellgrößen des Fahrzeugs betätigt werden.

²³Programmsystem zur Entwicklung Längsdynamischer mikrOskopischer VerkehrsProzesse in Systemrelevanter Umgebung

Fazit Der größte Nachteil des PELOPS-Modells ist seine starke Fokussierung auf die Längsdynamik. Des Weiteren existieren ausschließlich die Zustände „Folgefahrt“ und „Spurwechsel“, was die Bandbreite an möglichen Verkehrssituationen einschränkt. Im Kontext der Verkehrssimulation stellt das Modell jedoch einen Fortschritt für die Erzeugung von realistischem Verkehr mit einer hohen Anzahl von Verkehrsteilnehmern dar.

2.2.2.3 Zusammenfassung

Die aus den Verkehrsflussmodellen entstandenen Fahrermodelle haben sich mittlerweile zu – im Vergleich zu diesen – hochkomplexen Modellen weiterentwickelt. Die Erzeugung realistischer Fahrerausgaben ist im Allgemeinen für den Anwender eines solchen Modells nicht relevant. Somit liegt der Fokus im Gegensatz zu den regelungstechnischen Modellen nicht auf der Fahrzeug- bzw. Fahrerebene, vielmehr wird der Verkehr als Ganzes betrachtet und analysiert. Eine Komplexisierung der Modelle findet daher in einer Top-Down-Richtung statt, dies zeigt sich beispielsweise in der Implementierung kognitiver Elemente in den in diesem Kapitel beschriebenen Modellen.

Menschähnlichkeit Im Kontext der Menschähnlichkeit sind die Fortschritte ebenso erkennbar; waren die ersten Verkehrsflussmodelle ausnahmslos Typ-0-Modelle, so kann bei aktuellen Modellen zumindest bei entsprechender Distanz ein sich menschähnlich bewegendes Fahrer-Fahrzeug-Ensemble (Typ I) erkannt werden und – wie beispielsweise im Modell ACME – zumindest theoretisch sogar ein Typ-III-Modell erzeugt werden. Hierbei ist jedoch einschränkend zu erwähnen, dass letztere Aussage sich nur auf die Modellstruktur bezieht: Es sind sowohl Module für Kognition als auch für den Körper vorhanden. Aufgrund der aus Rechenzeitgründen begrenzten Komplexität – schon die Anzahl der zu simulierenden Fahrzeuge verhindert eine höhere – sind weder menschähnliche motorische Aktionen (Typ II), noch eine menschähnliche Erzeugung derselben (Typ III) möglich, was sich zukünftig mit entsprechender Rechenleistung der Simulationshardware ändern kann. Nichtsdestoweniger können mikroskopische Fahrermodelle für die Modellierung von bestimmten Aspekten menschlichen Fahrerhaltens, beispielsweise bei Abstandsverhalten oder Spurwechseln, hilfreiche Werkzeuge darstellen. Des Weiteren bieten diese einfach umzusetzende Methoden, um menschähnliche Algorithmen – vor allem im Bereich der Längsführung – validieren zu können.

2.2.3 Probabilistische Ansätze

Die Anforderungen an mikroskopische Verkehrssimulationen zur immer realistischeren Abbildung des Verkehrs bzw. der Simulation der einzelnen Verkehrsteilnehmer führten u. a. zur Anwendung probabilistischer Methoden. Zum einen eignen sich diese Verfahren für die Erzeugung von statistisch verteiltem Verkehr – auch in Verknüpfung mit Realdaten – zum anderen

können probabilistische Ansätze verwendet werden, um Fahrerverhalten vorhersagen zu können. Oftmals werden hierfür Bayes'sche Netze eingesetzt. Ein Bayes'sches Netz besteht aus gerichteten azyklischen Graphen, in denen jeder Knoten eine Zufallsvariable und jede Verknüpfung den kausalen Zusammenhang des Einflusses zweier benachbarter Knoten repräsentiert. Diese werden oft als „Hidden Markov Modell (HMM)“ implementiert. Hierbei wird angenommen, dass das zu modellierende System aus Markov-Ketten besteht (die Wahrscheinlichkeiten der zukünftigen Zustände hängen ausschließlich vom aktuellen Zustand ab) und die Zustände an sich nicht bekannt („hidden“) sind, jedoch geschätzt bzw. beobachtet werden können.

Forbes et al. [FHKR95] entwickelten ein Entscheidungsmodell für ein autonomes Fahrzeug in einer einfachen Umgebung mittels dynamischer probabilistischer Netze. Yang & Koutsopoulos [YK96] implementierten innerhalb des Frameworks MITSIM²⁴ eine einfache probabilistische Routenwahl. Liu & Pentland [LP98] benutzten HMMs zur Fahrerzustandserkennung. Oza [Oza99] verwendete dynamische probabilistische Netze für die Vorhersage von (simuliertem) Fahrverhalten. Ahmed [Ahm99] benutzte ein probabilistisches Modell, um Fahrgelassenheit und freie Fahrt zu unterscheiden. Oliver et al. [OP00] erstellten je Fahreraktion (z. B. Spurwechsel) ein separates HMM. Eine beispielhafte Implementierung eines auf HMM basierenden Modells für die Fahrerzustandserkennung findet sich im Artikel von Kuge et al. [KYSL00]. Liu & Salvucci [LS01] verwendeten dynamische Markov-Modelle ebenfalls für die Erkennung von Fahrerintentionen. Sakaguchi et al. [SOTA03] implementierten eine probabilistische Verteilung der Brems-Onset-Zeit mittels eines statischen Bayes'schen Netzes basierend auf unterschiedlichen Datenquellen.

Dagli & Reichardt [DR02] generierten ein Fahrermodell mit Hilfe von probabilistischen Netzen basierend auf einem Set aus abstrakten Motivationen des Fahrers. Kumagai et al. [KA04] zeichneten Abbiegeverhalten auf und trainierten mittels Bayes'scher Netze Vorhersagemodelle daraus. Rakotonirainy [RM05] entwarf ein kontextsensitives Fahrermodell auf Basis von Bayes'schen Netzen zur Vorhersage von Fahrverhalten. Krumm et al. [Kru08] verwendeten ein Markov-Modell zur Erkennung von Abbiegeverhalten. Gindele et al. [GBD10] nutzten ein Dynamisches Bayes'sches Netz zur Fahrerintentionserkennung sowie zur Trajektorienschätzung. Boerger [Bör13] implementierte mit Random Forest²⁵-Algorithmen kombinierte HMMs ebenfalls zur Fahrerintentionserkennung.

Sadigh et al. [SDCP⁺14] entwickelten ein probabilistisches Fahrermodell, welches mittels Markov-Ketten basierend auf der Umgebung (bis zu vier Sekunden Vorausschau), dem aktuellen Fahrerzustand (abgelenkt oder aufmerksam) sowie einer Historie bekannter Lenkmanöver des Fahrers die Trajektorie des Fahrzeugs vorhersagt.

²⁴Microscopic Traffic Simulator

²⁵Klassifikationsverfahren, welches aus mehreren unkorrelierten Entscheidungsbäumen besteht

2.2.3.1 BAD-Modelle

Eine weitere – und im Kontext der Fahrermodellierung weitaus interessantere – Einsatzmöglichkeit probabilistischer Methoden ist das Erzeugen von Fahrverhalten basierend auf Realdaten. Kombiniert mit maschinellen Lernverfahren entstehen sog. BAD²⁶-Modelle durch die Schätzung Bayes'scher Modelle aus Verhaltensdaten. BAD-Modelle können komplexes Verhalten durch Mischen und Aneinanderreihen einfacherer Verhaltensweisen erzeugen. Laterale und longitudinale Fahrzeugregelungen wurden von Möbus & Eilers in [ME08] (statische BAD-Modelle) und [MEZG09] (dynamische BAD-Modelle) vorgestellt. BAD-Modelle rekonstruieren die gemeinsamen Verteilungsfunktionen von Zufallsvariablen des Fahrerverhaltens (gewonnen aus Realdaten) mittels einer Verknüpfung der bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Ein großer Vorteil dieser Herangehensweise besteht den Autoren zufolge darin, dass die vorhandenen und letztendlich nie komplett zu verstehenden inter- und intraindividuellen Unterschiede im menschlichen Verhalten sowie der ebenso stochastischen Umwelt simuliert und nachgebildet werden können.

Eilers et al. [EM10a], [EM10b] implementierten ein dynamisch-modulares BAD-MoB-Fahrermodell, welches eine psychologisch motivierte Architektur mit autonomer und zielbasierter Aufmerksamkeitssteuerung beinhaltet. Mittels Zerlegung des gewünschten Gesamtverhaltens in einfache Verhalten (sog. „Mixture of Behaviors“-Modell) kann realistisches Fahrverhalten erzeugt werden, wobei die Modelle möglichst vollständig aus empirischen Daten gelernt werden sollen. Die Verhalten sind innerhalb einer Verhaltensbibliothek hierarchisch in drei Kompetenzlevel strukturiert: es gibt Fahrscenarien, (komplexe) Fahrmanöver sowie (einfaches) Fahrverhalten („Behaviors“). Ein Fahrscenario besteht aus einer Reihe von Fahrmanövern, welche sich ihrerseits wieder in Fahrverhalten untergliedern lassen. Einfaches Fahrverhalten wird „Sensor-Motor-Schema“ genannt. In [EM10b] wurde ein Landstraßenszenario mit den Fahrmanövern „Spurfolgen“, „Fahrzeugfolgen“ und „Überholen“ umgesetzt. Das Fahren in einer Spur wurde in die drei einfachen Verhalten „Gerade“, „leichte Kurve“ und „scharfe Kurve“ unterteilt, ähnlich wurde mit dem Fahrzeugfolgemanöver verfahren. Überholen wurde in „Ausscheren“, „Vorbeifahren“ und „Einscheren“ aufgeteilt (vgl. Abbildung 2.21).

Eilers & Möbus [EM13] haben ein BAD-MoB-Fahrermodell anhand von etwa 550.000 Samples²⁷ einer Person und mehrerer Simulatorversuchen implementiert. Ein Hauptaugenmerk wurde auf die vom Fahrermodell verwendeten Perzepte²⁸ gelegt: Anhand von maschinellen Lernverfahren wurden die für natürliches Fahrverhalten wichtigsten aus ursprünglich über 400 unterschiedlichen Perzepten ausgewählt. Ein BAD-MoB-Fahrermodell wurde mit Hilfe dieser Informationen trainiert, welches auf einer Autobahn autonom zu fahren in der Lage ist und die bereits bekannten Manöver ausführen kann. Die Verhalten „Spurwechsel links“, „Spurwechsel rechts“, „Spurfolgen“

²⁶Bayesian Autonomous Driver

²⁷Ein Sample aus dieser Untersuchung besteht aus einer Menge von Perzepten (z. B. dem *Spreizwinkel*, vgl. auch Abschnitt 3.1.5.1), dem Lenkwinkel sowie einer kombinierten Stellung des Gas- bzw. Bremspedals.

²⁸Ein Perzept beschreibt das Ergebnis eines Wahrnehmungsprozesses.

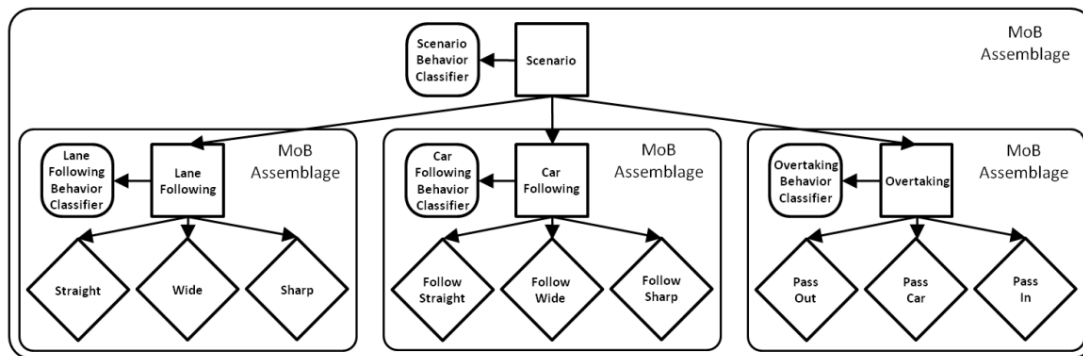


Abbildung 2.21: Schema des Szenarios „Fahren auf Landstraße“ in einem BAD-MoB-Modell [EM10b]

sowie „Fahrzeugfolgen“ mit den jeweils relevanten Perzepte für jedes Verhalten (aufgeteilt in Längs- und Querführung) wurden ebenso implementiert. Abhängig von der aktuellen Fahrspur ermittelt das Verhaltensklassifizierungsmodell das aktuell zu verwendende Verhaltensmodell.

Fazit BAD-Modelle erzeugen realistisches Fahrverhalten basierend auf sehr großen Datensätzen aus echten Verhaltensdaten, kombiniert mit probabilistischen Methoden sowie maschinellen Lernverfahren. Dieser Ansatz eignet sich besonders für die Erzeugung einer großen Anzahl sich realitätsnah bewogender Fahrzeuge, z. B. für Untersuchungen des Verkehrsflusses. Aufgrund des datengetriebenen Ansatzes ist die Modellierung von spezifischem Verhalten nur sehr eingeschränkt möglich, daher kann diese Art von Fahrermodellen nicht oder nur sehr eingeschränkt in entsprechenden Anwendungsszenarien eingesetzt werden.

2.2.3.2 Zusammenfassung

Probabilistische Modelle bieten eine sich von den tradierten Methoden unterscheidende Möglichkeit der Modellierung von Fahrverhalten. Im Gegensatz zu den eingangs beschriebenen Methoden basieren viele der beschriebenen Modelle nicht – oder nur in einem beschränkten Maße – auf den Modellannahmen des jeweiligen Modellierers, sondern auf empirischen Daten des zu modellierenden Subjekts (z. B. beim BAD-Mob-Modell). Ein so generiertes Modell besitzt eine Realitätsnähe, die mit konventionellen Modellierungsmethoden nur schwer zu erreichen ist. Des Weiteren wird das Element des Zufälligen auf eine elegante Art und Weise in den Fahrermodellierungskontext eingebunden. Die mit dieser Methode einhergehenden Nachteile erscheinen offensichtlich: Ein erzeugtes Modell repräsentiert nur den *einen* Fahrer, eine Veränderung des Fahrverhaltens mittels Parametrierung erscheint schwierig, das Erzeugen eines Modells, mit dem unterschiedliche Fahrweisen abgebildet werden können, erscheint aufwändig.

Menschähnlichkeit Für eine menschähnliche Fahrermodellierung kommen probabilistische Modelle bis zu Typ-II-Modellierung (motorische Aktionen des Fahrers sind menschähnlich) in Frage. Aufgrund der Quasi-Unmöglichkeit einer Modellierung der kognitiven Prozesse, welche die zu simulierenden Handlungen anstoßen, kann eine Typ III-Modellierung mittels probabilistischer Modelle nicht gelingen. Selbst bei erfolgreicher Implementierung stände der Modellierer vor dem Problem, dass nur *ein* spezifisches Fahrermodell erzeugt wurde – eine Generalisierung jedoch kaum möglich ist.

2.2.4 Psychologische Ansätze

Es existiert eine Vielzahl von Modellen bzw. Theorien, um menschliches (Fahr-)Verhalten aus psychologischer Sicht zu beschreiben, im Kontext dieser Arbeit werden jedoch nur diejenigen behandelt, für welche funktionale Umsetzungen existieren, die eine echtzeitfähige Simulation des Modells ermöglichen. Nach Byrne [Byr01] müssen in solch einem Modell sowohl *kognitive*, als auch *wahrnehmende* und *motorische* Fähigkeiten implementiert sein („embodied cognition“). Derartige *kognitive* Fahrermodelle lassen sich nach Deml & Neumann [DN09] in *generische* und *aufgabenspezifische* Modellansätze kategorisieren. Erstere basieren auf einer „Unified Theory of Cognition“, wie sie u. a. Newell beschrieben hat [New94] und ermöglichen – zumindest in der Theorie – eine zusammenhängende Beschreibung und Simulation von menschlichen Strukturen, Strategien und Handlungen. Dieser Ansatz erlaubt zwar – theoretisch – die Modellierung aller menschlichen Handlungen innerhalb eines Frameworks, die Implementierung von einzelnen, hochspezifischen Fähigkeiten wie z. B. „Fahren“ ist aufgrund der komplexen Struktur sowie hoher Simulationstiefe der Architektur jedoch nur sehr aufwändig umzusetzen. Folgend werden die kognitiven Architekturen „ACT-R“, „SOAR“ und „QN-MHP“ sowie auf diesen basierende Fahrermodelle vorgestellt. Aufgabenspezifische Modelle basieren ebenso auf psychologisch fundierten Grundannahmen über den Menschen, konzentrieren sich jedoch ausschließlich auf die Erfüllung einer bestimmten Aufgabe. Im Kapitel „Hybride Ansätze“ 2.2.5 wird darauf näher eingegangen.

Kognitive Architekturen Die Basis für ein kognitives Fahrermodell bildet eine kognitive Architektur. Allgemein wird unter diesem Begriff eine Umgebung verstanden, die es ermöglicht, menschliches Denken mittels bestimmter formaler Regeln nachzubilden. Nach Langley [LLR09] stellt eine kognitive Architektur eine grundlegende Infrastruktur für ein intelligentes System dar, innerhalb derer sowohl über die Zeit als auch über verschiedene Anwendungsdomänen hinweg konstante Aspekte eines Agenten vorhanden sein müssen. Typischerweise betrifft dies das Kurz- und das Langzeitgedächtnis, in denen dessen Ziele und Wissen gespeichert sind sowie eine Repräsentation der in diesen Gedächtnissen gespeicherten Elemente und funktionalen Prozesse, die auf den gespeicherten Strukturen operieren (z. B. Lernen). Die Grundlage für viele kognitive Architekturen bilden Produktionensysteme: dies sind aus der theoretischen Informatik bekannte

Symbolsysteme, welche die Informationsverarbeitung einer kognitiven Aufgabe beschreiben können. Produktionensysteme bestehen aus drei Hauptkomponenten: einer Datenbasis, einer Regelbasis und einem Interpreter. Die Produktionen werden über der Datenbasis ausgewertet, die auch als „Arbeitsspeicher“ („working memory“ – WM) oder bei Anwendung in der kognitiven Psychologie als „Kurzzeitgedächtnis“ („short term memory“ – STM) bezeichnet wird. Kognitive Fahrermodelle simulieren mentale Prozesse während des Fahrens und sind daher prinzipiell dazu in der Lage, zu erklären, aufgrund welcher Kausalitäten ein Fahrer bestimmte Handlungen durchführt.

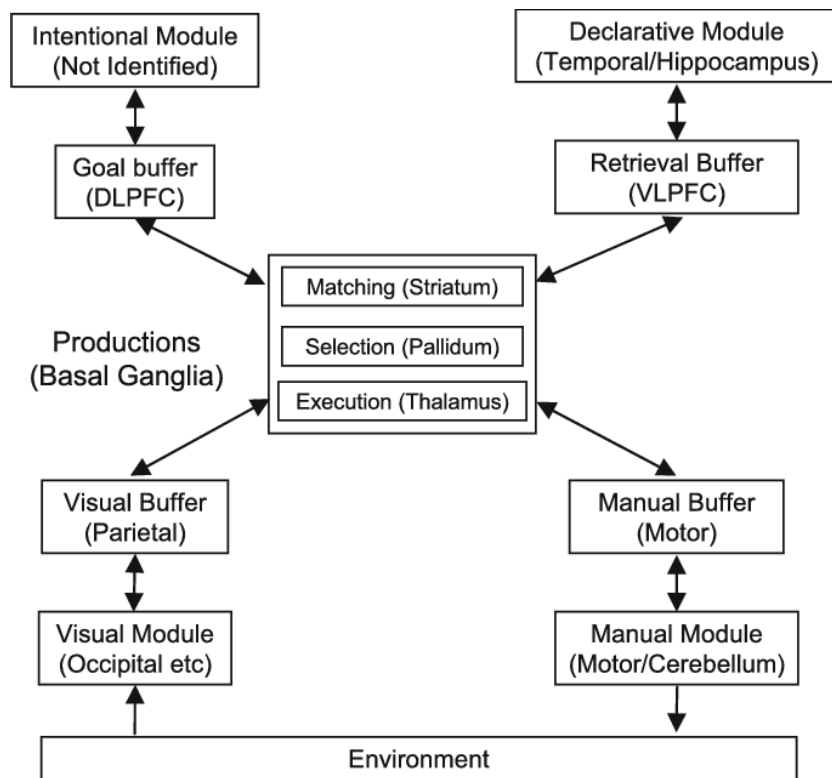
2.2.4.1 ACT-R

Eine der am weitesten verbreiteten kognitiven Architekturen ist *ACT-R* („Adaptive Control of Thought – Rational“), welche u. a. von Anderson an der Carnegie Mellon University entwickelt wurde [AL98]. ACT-R besteht aus drei Komponententypen: Modul, Puffer und Mustererkenner (vgl. Abbildung 2.22). Die Module werden – falls möglich – bestimmten Gehirnarealen zugeordnet und erfüllen unterschiedliche Aufgaben: *Visuelles* sowie *auditives* Modul sind für die Informationsaufnahme zuständig, für die Ausgabe bzw. Handlungen existieren ein *sprachliches* und ein *motorisches* Modul. Zusätzlich gibt es zwei Gedächtnismodule, ein *deklaratives* für Faktenwissen und ein *prozedurales*, welches Handlungswissen speichert. Das deklarative Wissen wird in *Chunks*²⁹ gespeichert. Jedem der Module ist ein Puffer zugeordnet, in dem der aktuelle Status des Moduls gespeichert ist³⁰. Der Mustererkenner überprüft, ob Zustände in den Puffern mit Produktionen im prozeduralen Gedächtnis übereinstimmen und führt jene mit maximaler Übereinstimmung aus. Die Verarbeitungskapazität wird bei ACT-R auf 7 ± 2 Chunks festgelegt (vgl. Kapitel 3.2).

Salvucci et al. ([SBL01], [SG04], [Sal06]) entwickelten basierend auf ACT-R ein einfaches Fahrermodell, welches basierend auf zwei bestimmten Punkten im Raum operiert (vgl. Abbildung 2.23). Der erste der beiden Punkte wird als „Nahpunkt“ bezeichnet, dieser befindet sich in der Mitte der aktuellen Fahrspur, etwa 0,5 Sekunden vor dem eigenen Fahrzeug. Der zweite Punkt – der „Fernpunkt“ – ist der sich in Sehwinkel am nächsten zu einer der folgenden drei Positionen befindende: Horizont, Tangente der aktuellen Kurve oder Mitte des vorher fahrenden Fahrzeugs. Die maximale Vorausschau des ausgewählten Punktes beträgt 4 Sekunden. Die Regelgröße für die Querregelung des Fahrzeugs ist die Winkeldifferenz zwischen Nah- und Fernpunkt, welche mittels PI-Regelung minimiert wird. Die Längsregelung wird bei vorhandenem Vorderfahrzeug über eine gewünschte Zeitlücke, sonst über eine Wunschgeschwindigkeit realisiert, wobei zusätzlich auch weitere Spuren (links und rechts sowie vor als auch hinter dem Ego-Fahrzeug) Beachtung finden. Spurwechsel können initiiert werden, in dem Nah- bzw. Fernpunkt auf die Zielspur verlegt werden. Das Modell wurde u. a. von Neumann & Deml [ND11] in Simulatorun-

²⁹Ein Chunk bezeichnet eine psychologische Repräsentationseinheit von Informationen.

³⁰Die Ausnahme bildet das prozedurale Gedächtnis, es besitzt keinen Puffer.

Abbildung 2.22: Struktur von ACT-R nach Anderson [ABB⁺04]

tersuchungen validiert, die Annahmen über die verwendeten Punkte konnten zum überwiegenden Teil bestätigt werden.

Liu & Wu [LW03] entwickelten ebenfalls eine Methode zur Modellierung des Fahrerverhaltens basierend auf ACT-R. Anhand eines Notbremsmanövers wurde ein Fahrermodell beispielhaft implementiert. Das vorgeschlagene Modell besteht aus den drei Hauptkomponenten „Beobachtung“, „Entscheidung“ und „Regelung“: Die Beobachtungskomponente kann entweder vor oder hinter dem Ego-Fahrzeug fahrende Fremdfahrzeuge wahrnehmen sowie deren Geschwindigkeiten, Spur und Sicherheitsabstand berechnen. Das Entscheidungsmodul urteilt basierend auf den bekannten Informationen, ob eine Notbremsung eingeleitet werden soll oder nicht, während sich die Regelungskomponente für die longitudinale und laterale Regelung des Fahrzeugs verantwortlich zeigt. Das Modell wurde mittels Realfahrten validiert, wobei die vom Modell vorausgesagten Notbremsreaktionen zum großen Teil mit denen der Versuchsteilnehmer übereinstimmten.

Fazit ACT-R ist eine umfangreiche, gut dokumentierte und weit verbreitete kognitive Architektur. Es wurden bereits einige Fahrermodelle basierend auf ACT-R umgesetzt und validiert, jedoch sind diese zumeist auf eine bestimmte Fahrsituation (z. B. „freies Fahren auf einer mehrspurigen Straße“ bei [Sal06]) oder nur auf einen Aspekt der Fahrzeugführung (z. B. „Notbremsassistentz“ bei [LW03]) beschränkt. Dies liegt zum einen an der Komplexität der kognitiven Architek-

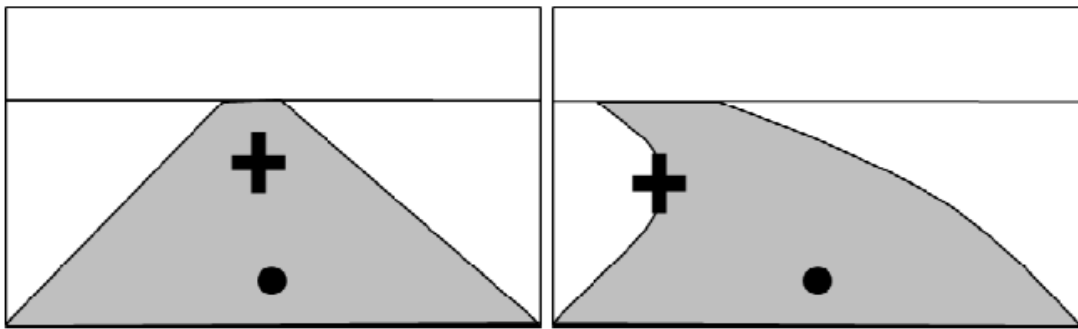


Abbildung 2.23: Fernpunkt (Kreuz) und Nahpunkt (Kreis) bei gerader Strecke (links) bzw. Kurve (rechts) nach Salvucci [Sal06]

tur und dem damit verbundenen Aufwand einer Implementierung, zum anderen an den hohen Rechenanforderungen von ACT-R.

2.2.4.2 SOAR

SOAR³¹ stellt eine weitere kognitive Architektur dar und wurde seit den 80er Jahren an der University of Michigan von u. a. Laird et al. [LNR87], Newell [New94] und Lewis [Lew01] entwickelt. Sie wird von seinen Urhebern als „Problemlösungsarchitektur“ beworben, dies bezieht sich auf die Funktionsweise, dass Problemlösen als eine Suche in einem Problemraum bzw. als schrittweise Transformation von einem Ausgangszustand (Problemerkennung) in einen Zielzustand (Problemlösung) aufgefasst wird (vgl. auch Abschnitt 3.2.2). Analog zu ACT-R gibt es zwei Gedächtnistypen: Im Langzeitgedächtnis bzw. Produktionenspeicher wird prozedurales Wissen in Form von Produktionsregeln gespeichert; temporäres Wissen wird im Kurzzeitgedächtnis bzw. Arbeitsspeicher durch Objekte repräsentiert. Erweiterungen haben das in SOAR implementierte Langzeitgedächtnis um ein mit deklarativem Wissen arbeitenden Speicher ergänzt: ein episodisches Gedächtnis, welches einen Verlauf der vergangenen Zustände beinhaltet, sowie ein semantisches Gedächtnis, welches Fakten speichert. Hauptelemente der SOAR-Struktur sind Problemlösen, Lernen, visuelle Orientierung, Motorik sowie Multitasking, wobei letzteres anfangs ein Alleinstellungsmerkmal von SOAR war.

Aasman beschreibt [Aas95] das in SOAR implementierte Fahrermodell DRIVER, das aus verschiedenen Modulen, wie Visuelle Orientierung, Navigation, Geschwindigkeitskontrolle usw. aufgebaut ist. Neben den kognitiven Prozessen werden innerhalb des Modells auch Körperbewegungen des Fahrers simuliert sowie Bewegungen abgeschätzt. Der Lenkwinkel berechnet sich vor allem aus der TLC, sowie aus dem Gierwinkel und der seitlichen Abweichung von einem intern repräsentierten Idealkurs. Die Längsregelung funktioniert basierend auf Informationen, wie der vom Tachometer abgelesenen Momentangeschwindigkeit, aber auch dem Motorgeräusch,

³¹State, Operate And Result

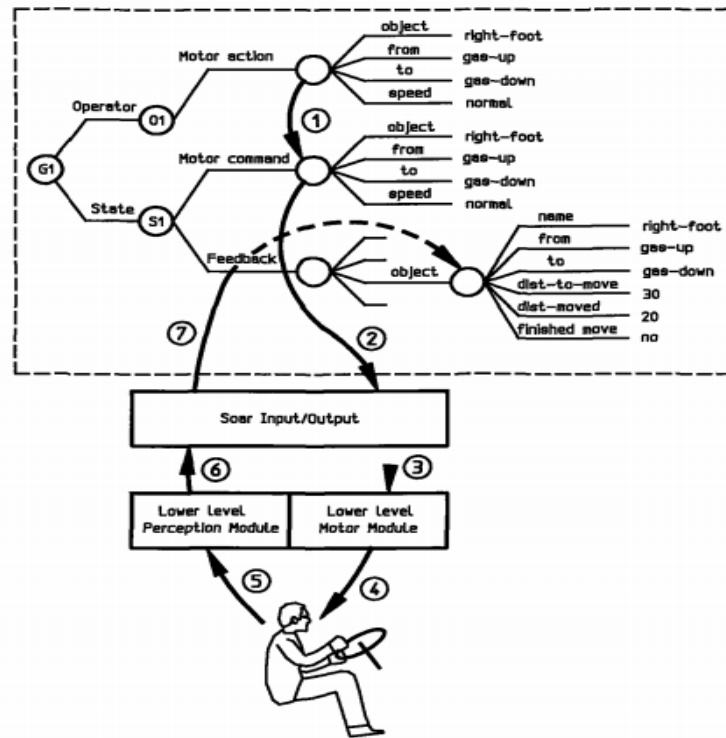


Abbildung 2.24: Menschliche Motorik im Fahrermodell DRIVER aus Aasman [Aas95]

sowie abstrakteren Werten wie beispielsweise der TTI³². Eine hohe Bedeutung besitzt das Modul der Elementarwahrnehmung, mit welchem Objekte erkannt und diesen Attribute zugeordnet werden. Hierbei wird zwischen Funktionellem Gesichtsfeld (Functional Visual Field, FVF), das einen Winkelbereich von ca. 20° umfasst und Peripherem Gesichtsfeld (Peripheral Visual Field, PVF) mit einem Erfassungsbereich von 210° horizontal und 90° vertikal unterschieden (vgl. auch Kapitel 3.1.1.2).

Fazit Eines der ersten kognitiven Fahrermodelle – DRIVER – wurde in SOAR implementiert, die Umsetzung wurde jedoch als durchaus schwierig beschrieben³³. Im Vergleich zu anderen in kognitiven Architekturen implementierten Fahrermodellen ist DRIVER außerordentlich komplex, dies trifft sowohl auf Längs- als auch Querführung zu, und beinhaltet ebenso komplexe Sehorientierungsstrategien. Leider ist seit 1995 keine Weiterentwicklung bzw. zusätzliche Veröffentlichung bekannt.

³²Time to Intersection – Zeit bis zur nächsten Kreuzung.

³³ Aasman beschreibt dies in [Aas95] sinngemäß folgendermaßen: „Is Soar a practical system for modelling driver behaviour? Yes, if you are a happy hacker; No for all others“.

2.2.4.3 QN-MHP

Ein weiterer Ansatz zur Modellierung von Strukturen und Verhaltensweisen des menschlichen Gehirns, basierend auf psychologischen Modellen der menschlichen Informationsverarbeitung, wird mittels QN-MHP³⁴ verfolgt. QN-MHP integriert zwei unterschiedliche Ansätze der kognitiven Modellierung: Den eines Warteschlangennetzwerks sowie den eines Prozessors menschlichen Verhaltens. Ersterer ist vor allem für die Simulation von parallel stattfindenden Handlungen in komplexen Umgebungen nützlich. Der MHP (ähnlich ACT-R, SOAR usw.) basiert auf GOMS³⁵-Aufgabenbeschreibungen und eignet sich in besonderem Maße für die Generierung menschlicher Handlungen in bestimmten Situationen. Insgesamt existieren 20 Prozessoren, die jeweils unterschiedlichen Subnetzen (perzeptuell, kognitiv und motorisch) zugeordnet werden können (vgl. Abbildung 2.25).

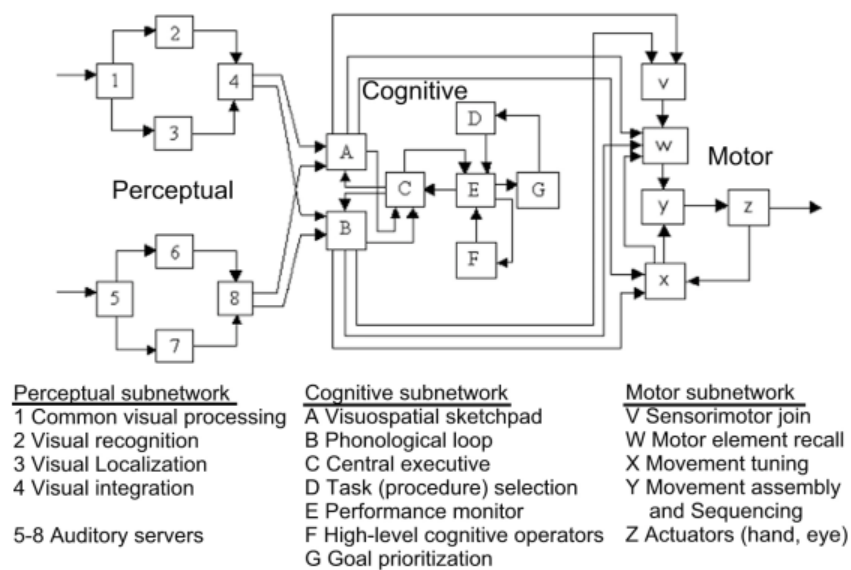


Abbildung 2.25: Layout der einzelnen Server in QN-MHP und deren Informationsfluss aus Tsimhoni & Liu [TL03]

Tsimhoni & Liu [TL03] bzw. [LFT06] beschrieben ein Fahrermodell mittels eines QN-MHP. Es ist hierarchisch strukturiert – angelehnt an die bekannten drei Ebenen – wobei mehrere Teilziele parallel verfolgt werden können. Als Eingabewerte des visuellen Subnetzes werden folgende Parameter berechnet: die laterale Position mittels eines eine Sekunde vor dem Fahrer festgelegten Nahpunktes; der Gierwinkel durch einen sich 2-4 Sekunden vor dem Fahrer befindlichen Fernpunkt sowie die Krümmung der nächsten Kurve, berechnet aus dem Schnittpunkt des angenommenen Blickes des Fahrers mit der Tangente der nächsten Kurve. Das Modell erzeugt

³⁴Queueing Network – Model Human Processor

³⁵GOMS steht für „goals, operators, methods and selection rules“ – Ziele, Operatoren, Methoden und Selektionsregeln; GOMS beschreibt vor allem Mensch-Computer-Interaktion

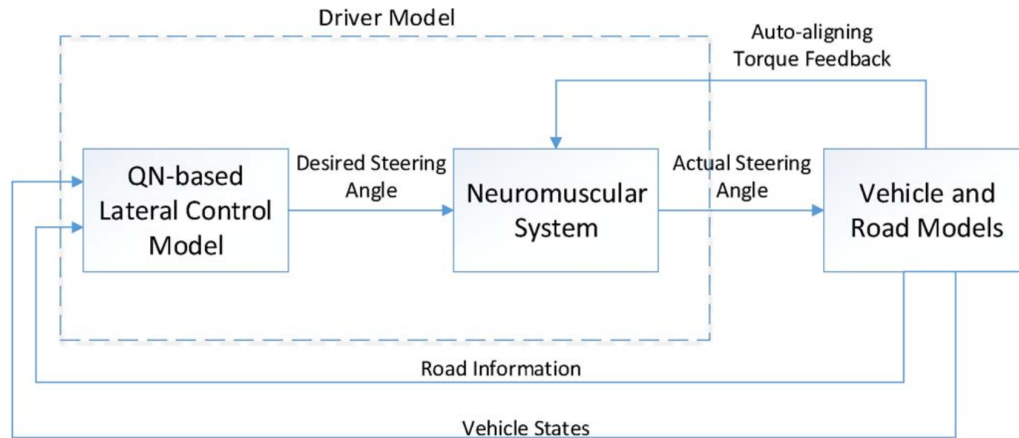


Abbildung 2.26: Struktur des QN-Fahrermodells aus Bi et al. [BWVL15]

Hand- sowie Augenposition. Gelenkt wird mittels Korrekturbewegungen, wobei angenommen wird, dass die grundlegende Einheit des Lenkens aus einer halben Sinusbewegung besteht. Dies wird auf Arbeiten von Hildreth et al. [HBBR00] sowie Wallis et al. [WCB02] begründet. Ein Vorteil des Modells ist seine Fähigkeit, parallel stattfindende Prozesse adäquat modellieren zu können, sowie die (theoretisch) vorhandene Echtzeitfähigkeit. Das Modell wurde in Simulatoruntersuchungen validiert, die Unterschiede im Lenkverhalten sowie lateralem Versatz zwischen den vom Modell generierten und den von den Versuchspersonen erzeugten Daten waren zu erkennen, jedoch nicht signifikant.

Bi et al. [BGSL12] bzw. [BWVL15] implementierten ebenfalls (rein lateraldynamische) Fahrermodelle in ein Warteschlangen-Netzwerk. Als Eingabewerte verwendet das Modell die Straßeninformationen (Straßenmitte, Straßenbreite sowie die aktuelle Position, Beschleunigung und Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs), ausgegeben wird der erzeugte Lenkwinkel, wobei dieser erst durch das neuromuskuläre System (NMS) erzeugt wird. Das NMS ist hierbei angelehnt an Pick & Cole [PC06] außerhalb der QN-Architektur entwickelt worden. Das Modell wurde anhand von Simulatorversuchen in einem Spurwechselszenario validiert. Gegenüber einem Modell ohne NMS erzielte das propagierte Modell vor allem bei höheren Geschwindigkeiten signifikant bessere Ergebnisse und korrelierte besser mit den von menschlichen Fahrern erzeugten Daten.

Fazit Der Ansatz der Warteschlangennetzwerke im Bereich der kognitiven Modellierung hat zur Entwicklung einiger Fahrermodelle geführt. Positiv ist zum Beispiel im Modell von Tsimhoni et al. [TL03] die Möglichkeit der Simulation von Zweitaufgaben zu bewerten. Die Modelle von Bi et al. [BGSL12], [BWVL15] integrieren ein neuromuskuläres System, womit dieses Modell daher durchaus auch als ein *hybrides* Fahrermodell kategorisiert werden kann (vgl. Abschnitt 2.2.5). Die Fähigkeit von QN-MHP zur parallelen Abarbeitung bestimmter Aufgaben stellt ein besonderes Merkmal dieser Architektur da. Mit der an das menschliche

Gehirn angelehnten Netzwerkstruktur von QN-MHP lassen sich kognitive Prozesse schlüssig simulieren. Vorteilhaft ist dies beispielsweise für die Messung mentaler Beanspruchung. QN-MHP wird an der University of Michigan entwickelt und ist nicht öffentlich zugänglich.

2.2.4.4 Zusammenfassung

Kognitive Architekturen ermöglichen es, menschliche Handlungen bzw. die diesen Handlungen zugrunde liegenden Denkprozesse mittels kognitiver Verhaltensmodelle zu simulieren. Das Führen eines Fahrzeugs ist in diesem Zusammenhang nur eine weitere Ausprägung einer solchen simulierbaren Handlung. Diese Herangehensweise hat den systemimmanenten Vorteil einer bewährten und in vielen Experimenten validierten psychologischen und technischen Grundlage. Die Top-Down-Vorgehensweise birgt jedoch die Problematik in sich, dass, um menschähnliches Fahren simulieren zu können, der Mensch bzw. das Menschsein theoretisch und algorithmisch spezifiziert und in eine Programmumgebung überführt werden muss, um daraus auf etwas Spezielles – in diesem Fall Fahrverhalten – schließen zu können. Die damit einhergehende Vereinfachung einzelner Handlungen kann zu einer Überspezifizierung des so generierten Modells führen. Beispielhaft steht dafür das in Abschnitt 2.2.4.1 beschriebene Modell von Salvucci, in dem die ursprünglich komplexe Handlung „Fahren“ auf ein reines Regelungsproblem reduziert wird – die Vorteile einer *kognitiven* Architektur kommen kaum zum Vorschein. Weiterhin kann kritisiert werden, dass sich viele dem Fahrverhalten zugrunde liegenden menschlichen Eigenschaften, wie z. B. Emotionen oder Motivationen (vgl. auch Kapitel 3.4.4) nur sehr aufwändig in die vergleichsweise unflexiblen kognitiven Architekturen implementieren lassen.

Menschähnlichkeit Betrachtet man kognitive Architekturen bezüglich der vorgestellten Kategorisierung von Menschähnlichkeit, so reicht die Bandbreite dieser Modelle – zumindest potentiell – von Typ 0 bis zu Typ III. Ein einfaches kognitives Fahrermodells mag zwar eine dem Menschen ähnlich³⁶ aufgebaute Kognition implementiert haben, der Komplexitätsunterschied zu einem menschlichen Gehirn bleibt jedoch gewaltig. Dementsprechend wurden bisher nur einzelne, klar abgegrenzte Handlungen in Form von kognitiven Fahrermodellen umgesetzt, welche – ähnlich den regelungstechnischen Modellen – aufgrund dieser Abgrenzung oftmals nicht als menschähnlich wahrgenommen werden. Lässt man Effizienz und Komplexität der Implementierung eines maximal menschähnlichen Fahrermodells, welches auf einer kognitiven Architektur basiert, außen vor, so kann davon ausgegangen werden, dass mit entsprechend hohem Aufwand durchaus ein Typ-III-Modell erzeugt werden kann. Der Modellierer würde dann nicht ein Modell eines menschähnlichen Fahrers, sondern das eines „Menschen, der Autofahren kann“ modellieren. Die wenigen bisher mittels kognitiven Architekturen erstellten Fahrermodelle scheinen das Argument der mangelnden Effizienz zu belegen: Keines der beschriebenen Modelle erfüllt die für eine Typ-II-Modellierung beschriebenen Voraussetzungen. Eine umfassende und realistisch

³⁶ „Ähnlich“ steht in diesem Kontext für „weniger nichtmenschlich“.

anmutende Simulation von menschähnlichem Fahren mittels kognitiver Architekturen erscheint daher momentan als wenig aussichtsreich. Ausgewählte Konzepte der kognitiven Modellierung stellen somit sicherlich einen beachtlichen Mehrwert für ein menschähnliches Fahrermodell dar, die damit einhergehende Zunahme der Komplexität des Modells sollte jedoch beachtet werden.

2.2.5 Hybride Ansätze

Die bisher vorgestellten Ansätze zur Fahrermodellierung sind – obwohl sie in Teilaspekten durchaus respektable Ergebnisse vorzuweisen haben – für eine (umfassende) Simulation des menschlichen Fahrverhaltens nicht zielführend. Regelungstechnische Modelle erweisen sich ob ihrer Einfachheit und Beschränkung auf die körperlich agierenden Komponenten des Fahrers als hierfür ungeeignet. Fahrermodelle basierend auf kognitiven Architekturen hingegen mögen in der Lage sein, bestimmte klar umrissene Reiz-Reaktions-Mechanismen in ihrer Gesamtheit abzubilden und zu simulieren, eine Ausweitung auf ein so komplexes Verhalten wie „Fahren“ scheint jedoch zum heutigen Zeitpunkt nicht realisierbar. Sowohl aus der Verkehrssimulation motivierte als auch probabilistische Fahrermodelle stehen etwas außerhalb der Dichotomie „regelungstechnisch“ vs. „psychologisch“. Für erstere gilt, dass diese aufgrund steigender Komplexität und der Integration von psychologischen Elementen in die Modellierung zunehmend menschähnlichere Daten generieren, wobei der Abstraktionsgrad für viele Anwendungen weiterhin zu hoch bleibt. Letztere können zwar realistische Datensätze erzeugen, jedoch fehlt konstruktionsbedingt eine nachvollziehbare, deterministische Interpretation der den Daten zugrunde liegenden Algorithmen.

Eine Möglichkeit zur Lösung der beschriebenen Probleme bietet eine hybride Modellierung: Die Kombinationen von verschiedenen Modellierungskonzepten kann deren Vorteile vereinen, ohne deren Nachteile zu übernehmen. So sollte ein hybrid modelliertes Fahrermodell in der Lage sein, die komplette menschliche Informationsverarbeitungskette, also Wahrnehmung von Informationen, Treffen von Entscheidungen und schlussendlich das Handeln nachzubilden.

Erste Ansätze für eine hybride Modellierung finden sich beispielsweise im Fahrermodell DRI-VEM³⁷ von Wolf & Barrett [WB78], welches elf Standardmanöver mit teilweise unterschiedlichen Modellen (sowohl steuernd als auch regelnd) abfahren kann. Diese Modelle bestehen aus mehreren Modulen, in denen bereits menschliche Informationsverarbeitung – wenn auch recht rudimentär – nachgebildet wurde. Weitere Ansätze bis zur Mitte der 90er Jahre werden von Willumeit & Jürgensohn [WJ97] zusammengefasst. Boyraz et al. [BSHJ09] haben verschiedene Fahrermodelle – insbesondere mit regelungstechnischem Hintergrund – verglichen und entwickeln daraufhin ein hybrides Fahrermodell, das stochastische Modellierung mit regelungstechnischen Modellierungsmethoden verbindet. Die Längsregelung wird hierbei durch Hidden Markov Models abgebildet (vgl. Abschnitt 2.2.3), die Querregelung basiert auf Hess & Modjtahedzadeh [HM90], wobei dem Algorithmus ein *Complacency*-Term hinzugefügt wurde. Dieser

³⁷driver-vehicle effectiveness model

stellt die Selbstzufriedenheit des Fahrers und somit den Wunsch des Fahrers dar, Korrekturen am eigenen Fahrverhalten vornehmen zu wollen.

Kraus [Kra12] verwendet eine situationsadaptive Reglerparametrierung für die Querregelung, für die er einen „Hybrid-Faktor“ einführt, welcher stellvertretend für ein bestimmtes Regelziel steht. So entspricht beispielsweise ein Hybrid-Faktor $H = 1$ einer hohen Sollwertfolgegüte, ein Hybrid-Faktor $H = 0$ hat jedoch ein ruhiges Regelverhalten zur Folge. Auch wenn die verwendete Regelung eher einen ingenieurtechnischen Ansatz verfolgt, so kann diese jedoch aufgrund des Vorhandenseins sowohl kontinuierlicher als auch ereignisdiskreter Regelstrukturen als eine hybride Modellierung verstanden werden.

Jürgensohn [Jür97] unterscheidet prinzipiell zwischen typischen Ingenieursmethoden sowie Methoden der KI und kognitiven Modellierung. Er kritisiert die generelle Fixierung der Fahrermodellierung auf regelungstechnische Methoden ob ihrer Begrenztheit der Simulation der Fahrerhandlungen. Er entwickelt eine Methodologie der hybriden Modellbildung und grenzt hybride Modelle im Gegensatz zu rein mathematischen oder systemtheoretischen Modellierungsansätzen durch folgende drei Merkmale ab:

- 1.) Heterostrukturierung: Eine einzelne quantitative Theorie kann den menschlichen Fahrer nicht umfassend beschreiben, daher sind unterschiedliche Modellierungsmethoden für verschiedene zu modellierende Konstrukte zu verwenden.
- 2.) Fremdstrukturierung: Die verwendeten quantitativen Modelle müssen auf wissenschaftlich abgesicherten Theorien basieren.
- 3.) Anwendungsorientierung: Wegen des Fehlens allgemeingültiger abgesicherter quantitativer Modelle des Menschen sollte sich die Modellstruktur an der Anwendung orientieren.

Im europäischen Forschungsprojekt ITERATE³⁸ wurde eine hybride Modellstruktur entwickelt, die ein realistisches dynamisches Verhalten des Modells basierend auf beobachtbaren Parametern ermöglichen soll. Cacciabue et al. [CEST13] beschreiben das UMD³⁹ genannte Modell basierend auf den Arbeiten von Oppenheim & Shinar [OSC⁺10], [OED⁺10], [SO11]. SiMUD⁴⁰ ist eine Implementierung des UMD, in welcher die fünf Parameter *Attitüde*, *Erfahrung*, *Fahrzustand*, *Aufgabenanforderung* und *Kultur* mit bestimmten messbaren Eigenschaften des Fahrers verknüpft werden. Es wurden umfangreiche Simulationen mit Parametersätzen für verschiedene Fahrertypen durchgeführt. Mittels einer Simulatorstudie auf einem Autobahnscenario konnten die Parametrierungen des UMD validiert werden.

Klimke et al. stellten eine hybride Fünf-Ebenen-Modellstruktur vor ([KKE15], vgl. auch Abschnitt 2.2). Für Längs- und Querführung werden beispielhaft die Modelle von Wiedemann [Wie74] und Salvucci et al. [SG04] verwendet. Eine Integration in PELOPS wurde ebenfalls realisiert [KE17].

³⁸IT for Error Remediation And Trapping Emergencies

³⁹Unified Model of Driver Behaviour

⁴⁰Simulation Model of Universal Driver

Die folgend vorgestellten hybriden Fahrermodelle stehen beispielhaft für die verschiedenen Ansätze zur Implementierung hybrider Fahrermodelle. Zum einen sind dies eigenständige Architekturen, in denen die Entwicklung von kognitiven Fahrermodellen möglich ist. Im Unterschied zu den im Abschnitt über kognitive Architekturen (Abschnitt 2.2.4) beschriebenen Modellen, die Fahrverhalten als eine Ausprägung menschlichen Verhaltens betrachten, sind die aufgeführten Modelle zwar ebenso in der Lage, menschliche Denkprozesse zu beschreiben, jedoch werden ausschließlich die für das Fahren notwendig zu simulierenden Prozesse betrachtet. Welche das im Einzelnen sind, ändert sich je nach Modellierungskontext und Abstraktionsgrad des Modells. Im Allgemeinen wird jedoch der menschliche Informationsfluss (Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung, Handlung) mit entsprechenden Zwischenspeichern modelliert.

2.2.5.1 COSMODRIVE

Das COSMODRIVE-Modell⁴¹ wurde in Frankreich Ende der 90er Jahre entwickelt (Tattegrain-Veste et al. [TVBPC96] bzw. Bellet [Bel98]) und bei INRETS⁴² weiter verbessert (Bellet et al. [BBMG06]). Es basiert auf der Analyse von Realfahrten sowie Laboruntersuchungen und zielt auf die Reproduktion von Fahrerverhalten in unterschiedlichsten Umgebungen ab. Der Schwerpunkt liegt hauptsächlich auf der Möglichkeit, kognitive Prozesse zu simulieren bzw. die Informationsverarbeitung des Fahrers zu erklären (vgl. Abbildung 2.27).

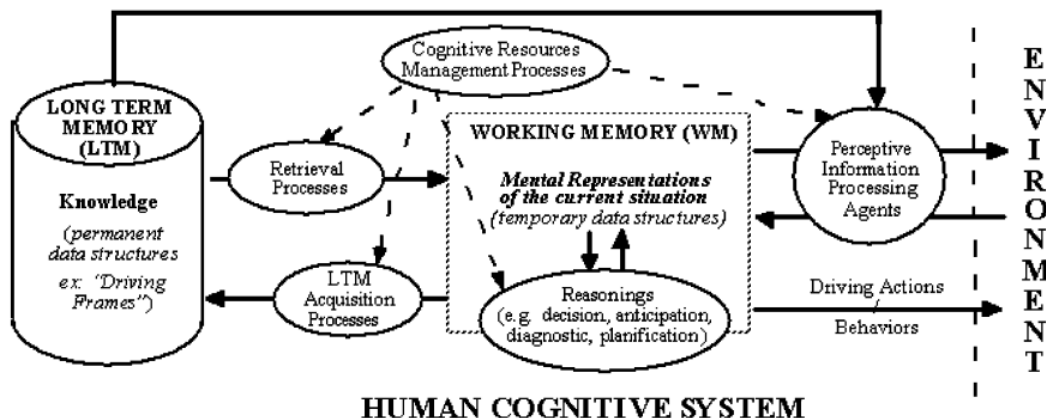


Abbildung 2.27: Informationsfluss innerhalb der kognitiven Architektur von COSMODRIVE nach Bellet et al. [BBMG06]

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen Modellen wurde für COSMODRIVE keine bereits vorhandene kognitive Architektur verwendet, vielmehr wurden Methoden und Vorgehensweisen aus der kognitiven Modellierung für eine eigene, modellspezifische Architektur herangezogen. Das Modell besteht aus einem strategischen Modul für die Routenplanung, einem taktischen

⁴¹Cognitive Simulation Model of the DRIVER

⁴²Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité, ehemaliges staatliches französisches Institut für Verkehrs- und Sicherheitsforschung

Modul, welches mentale Modelle der aktuellen Situation erzeugt, einem operativen Modul für die Auswahl einer adäquaten Handlung sowie einem Notfallmanagement-Modul, welches in Extremsituationen aktiviert wird. Das Ressourcenmanagement-Modul erkennt diese Situationen und ist dafür verantwortlich, das strategische und taktische Modul bei Bedarf durch das Notfallmanagement-Modul zu ersetzen. Die Schnittstellen zur Außenwelt bilden das Perzeptions-Modul, welches die notwendigen Informationen über die Umwelt liefert sowie das Ausführungs-Modul, welches für die Durchführung der ausgewählten Handlung zuständig ist. Das in diesem Modellierungsansatz wohl wichtigste Modul – das taktische – besitzt einige erwähnenswerte Besonderheiten: Innerhalb des Moduls werden – basierend auf der aktuellen Situation – mögliche zukünftige Entwicklungen antizipiert und aus diesen diejenige ausgewählt, welche auf Grundlage von Zeitgewinn und Risiko das bestmögliche Ergebnis liefert. Dieses wird folgend mit dem erwarteten Ergebnis abgeglichen, wobei bei Differenzen neue Verhaltensweisen erzeugt werden können, womit eine Art Lernen innerhalb der Simulation stattfinden kann.

PADRIC Ein auf COSMODRIVE basierendes Fahrermodell ist PADRIC⁴³, welches im Rahmen des kalifornischen PATH-Programms der University of California entstand und in die Mikroverkehrssimulation SmartAHS⁴⁴ implementiert wurde (Song et al. [SDV00] bzw. Delorme & Song [DS01]). Das COSMODRIVE-Modell wurde hierfür auf verschiedenen Ebenen vereinfacht. Die Modellstruktur (vgl. Abbildung 2.28) erlaubt es, sich gleichzeitig mit zeitdiskreten sowie zeitkontinuierlichen Ereignissen zu beschäftigen. Dies bedeutet, dass die Entscheidungslogik, Kategorisierung sowie das Regelverhalten auf diskreten Ereignissen basieren, beim Auslösen des diskreten Ereignisses jedoch die entsprechende zeitkontinuierliche Handlung stattfindet, bis ein weiteres diskretes Ereignis ausgelöst wird. Endliche Automaten steuern diesen Mechanismus.

Die Veränderungen zum Originalmodell finden sich zum größten Teil innerhalb des taktischen Moduls (vgl. Abbildung 2.29). Dieses kann auf zwei Arten mit dem visuellen Modul interagieren: Es reagiert entweder auf bestimmte Ereignisse oder exploriert selbständig die Umgebung, dies erlaubt die Simulation von Verhalten wie Reaktion und Antizipation. Innerhalb des taktischen Moduls können drei Strukturen unterschieden werden: kognitive Prozesse, mentale Repräsentationen sowie eine Wissensbasis. Die kognitiven Prozesse simulieren die Repräsentation der Straßeninformationen, das Mobilisieren des entsprechenden Wissens mittels Kategorisierung und Klassifizierung der Informationen, die Entscheidung über das zu wählende Verhalten sowie das Treffen von Annahmen über zukünftiges Verhalten. Die mentale Repräsentation wird als eine zeitlich begrenzte Struktur beschrieben, in der die vorhandenen Informationen über die aktuelle Situation mit zunehmender Zeit verfallen. In der Wissensbasisdatenbank befindet sich allgemeines Wissen über das Fahren mit weiteren Unterkategorien.

Die kleinste Wissenseinheit wird als „Driving Schema“ bezeichnet, ein solches ist beispielsweise das Auffahren auf eine Autobahn. Ein „Driving Schema“ besteht aus Umfeldinformationen

⁴³PATH DRIVER Cognitive

⁴⁴Smart Automated Highway System.

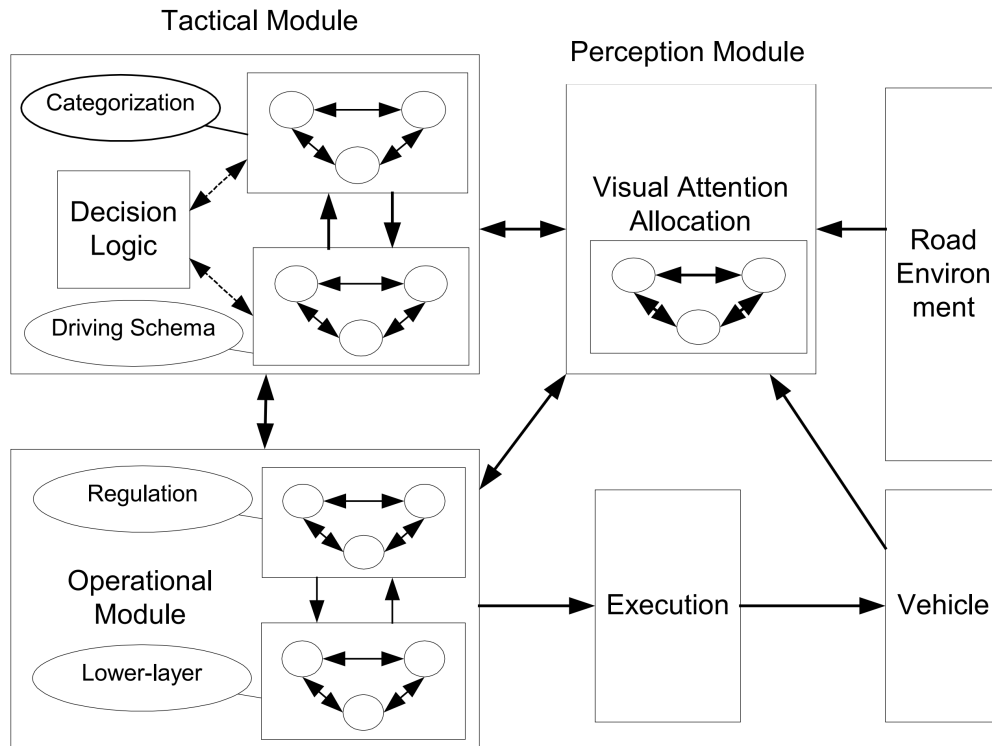


Abbildung 2.28: Struktur des Human Driver Models aus Delorme & Song [DS01]

(Straße), einem lokalen Ziel (z. B. komfortables Fahren während des Schemas „Folgefahrt“), Aktionen und erwarteten Ereignissen. Wenn es durch die Entscheidungslogik – die Schemata sind gleichzeitig Zustände eines endlichen Automaten – aktiviert wird, werden die entsprechend hinterlegten Handlungen bzw. Regelungen, die in diesem „Driving Schema“ hinterlegt sind, im Operations-Modul ausgeführt, welches dann die Handlungsausgaben als Eingaben an das Fahrermodell sendet.

Fazit COSMODRIVE basiert im Gegensatz zu den bisher beschriebenen psychologisch basierten Fahrermodellen auf einer eigenständigen, aufgabenspezifischen Struktur. Diese wurde speziell für die Simulation von Fahrverhalten bzw. den dahinter liegenden kognitiven Prozessen entwickelt. Ein positiv hervorzuhebendes Feature besteht in der Möglichkeit, während der Simulation die aktuell ablaufenden kognitiven Vorgänge grafisch darzustellen. Des Weiteren sind vorhandene Kreuzungsszenarien hervorzuheben, da die Mehrzahl der vorgestellten Fahrermodelle im Vergleich simplere Szenarien verwenden. COSMODRIVE wird aktuell in verschiedenen Projekten verwendet und stetig weiterentwickelt, beispielsweise integrierten Bellet et al. [BMB⁺12] COSMODRIVE in eine Simulationsumgebung. Bornard et al. [BSB16] verwendeten COSMODRIVE, um menschliches Verhalten bei Linksabbiegesituationen vorherzusagen. Das Modell bzw. die kognitive Architektur ist jedoch nicht öffentlich zugänglich, einer Verwendung steht zusätzlich die größtenteils in französischer Sprache vorhandene Dokumentation im Wege.

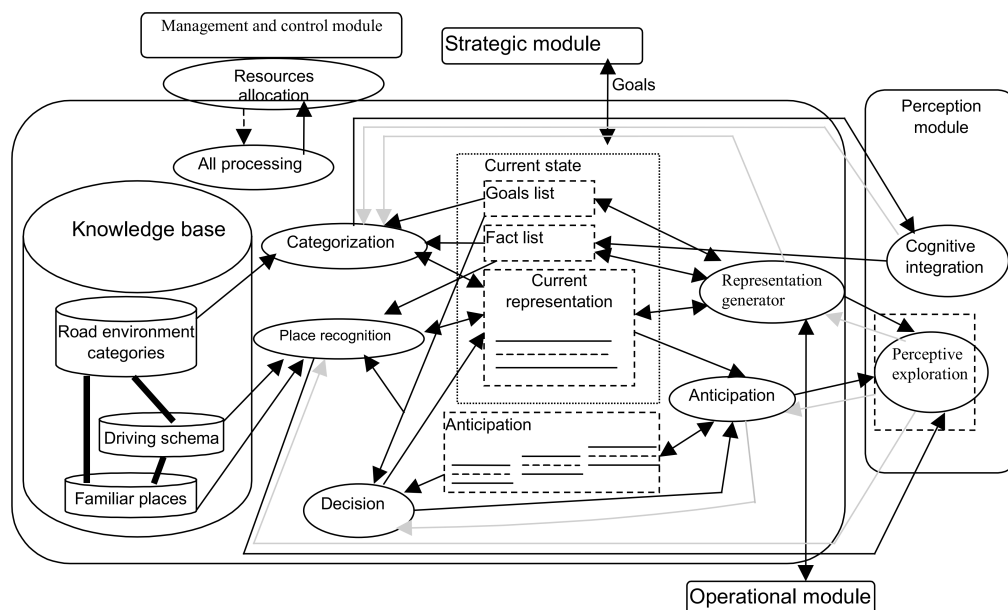


Abbildung 2.29: Aufbau des taktischen Moduls im Human Driver Model aus Delorme & Song [DS01]

Das PADRIC-Modell erweitert das COSMODRIVE-Modell um eine hybride Modellstruktur (vgl. auch folgendes Kapitel). Die Verwendung von „Driving Schemas“ – also Manövern – als kleinste Wissenseinheit des taktischen Moduls stellt einen vielversprechenden Ansatz dar. Zu kritisieren ist der enge Fokus des Modells, da lediglich Fahren auf einer mehrspurigen Straße simuliert werden kann (Folgefahrt und Überholen). Eine tiefer gehende Beurteilung erscheint ob der nicht ausreichenden Faktenlage als schwierig.

2.2.5.2 SSDRIVE

Amantini & Cacciabue [AC09] sowie Cacciabue & Carsten [CC10] beschreiben eine Implementierung des Fahrermodells SSDRIVE⁴⁵. Das Fahren wird innerhalb des Modells als eine Menge von grundlegenden Aufgaben mit sich ständig ändernden Zielen verstanden, wobei es zwei unterschiedliche Aufgabentypen gibt: *permanente* und *reguläre* Aufgaben. Erstere, beispielsweise das Einhalten lateraler Sicherheitsabstände, werden zu jedem Zeitpunkt der Simulation ausgeführt und können laut den Autoren dem fertigkeitbasierten Handeln nach Rasmussen [Ras83] zugeordnet werden. *Reguläre* Aufgaben jedoch sind Resultat eines Entscheidungsprozesses (z. B. Überholen oder Anhalten). Zusätzlich verwendet das Modell Parameter, um das Fahrverhalten zu beeinflussen, diese sind: Attitüde/Persönlichkeit, Erfahrung, Fahrzustand/körperliche Beeinträchtigung, Beanspruchung, sowie Situationsbewusstsein, wobei die ersten beiden während einer Simulation konstant sind – die drei zuletzt genannten können sich während einer Simulation

⁴⁵Simple Simulation of DRIVER Performance.

verändern. Die Parameter werden basierend auf Variablen aus der Fahrer-Fahrzeug-Umgebung bestimmt und beeinflussen das Verhalten des Fahrers (vgl. Abbildung 2.30), beispielsweise ist die gewählte Geschwindigkeit eine Variable für den Parameter „Attitüde“. Das dynamische Fahrverhalten wird durch einfache Regeln, welche auf Aufgabenanalyse beruhen, der Auswertung der fünf Parameter sowie der Informationen aus den kognitiven Prozessen, einschließlich Fehlererzeugung, generiert. Kognitive Funktionen unterscheiden zwischen *normalem* und *deskriptivem* Verhalten. *Normales* Verhalten tritt auf, wenn FAS keinen oder nur geringen Einfluss auf das Fahrverhalten des Modells haben. Normalverhalten wird als „Intention“ formuliert, wobei Kosten/Nutzen verwendet werden, um Fahraufgaben zu priorisieren. Einer Fahraufgabe werden „pre-conditions“ und Ziele zugeordnet, als Beispiele für Fahraufgaben führen Cacciabue et al. Anhalten, Linksabbiegen oder Überholen an [CRM06]. SSDRIVE verwendet das bekannte Informationsverarbeitungs-Paradigma (Perzeption, Informationsverarbeitung, Ziele formulieren, Aufgaben auswählen, Ausführung der Aktionen). Die Längsregelung ist als Beschleunigungsregelung basierend auf Realdaten implementiert. Die Querregelung des Fahrzeugs funktioniert als Regelung der Querabweichung der Mitte der Spur zur Fahrzeugposition in Vorausschau, angelehnt an Ungoren & Peng [UP05].

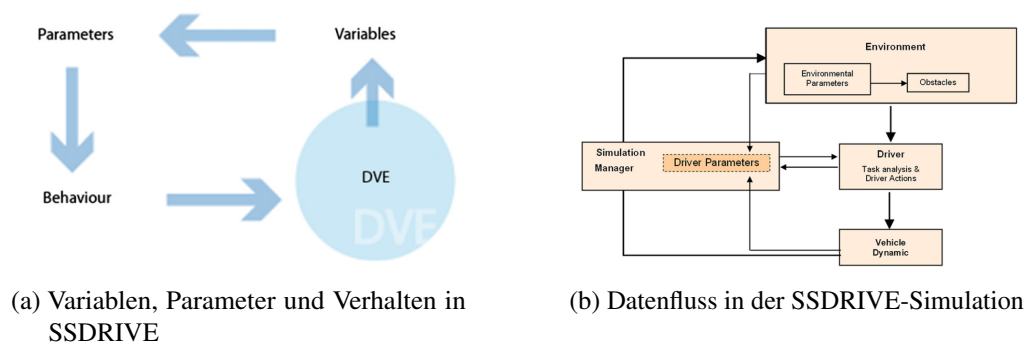


Abbildung 2.30: Das Fahrermodell SSDRIVE nach Amantini & Cacciabue [AC09] sowie Cacciabue & Carsten [CC10]

Fazit Das Fahrermodell SSDRIVE legt den Fokus auf die Generierung menschlichen Fahrverhaltens mit einem Schwerpunkt auf das Erzeugen von Fehlern in einer echtzeitfähigen Modellarchitektur. Das Modell soll sowohl zum Testen von Fahrerassistenzsystemen als auch zur Erstellung eines sog. „Co-Drivers“, welcher ein Modell des Fahrers für ein intelligentes Automobil der Zukunft darstellt, dienen [CC10]. Aufgrund der umfangreichen theoretischen Vorarbeiten stellt es ein vielversprechendes Modellkonzept dar, ist jedoch nicht öffentlich zugänglich und kann daher nicht abschließend bewertet werden.

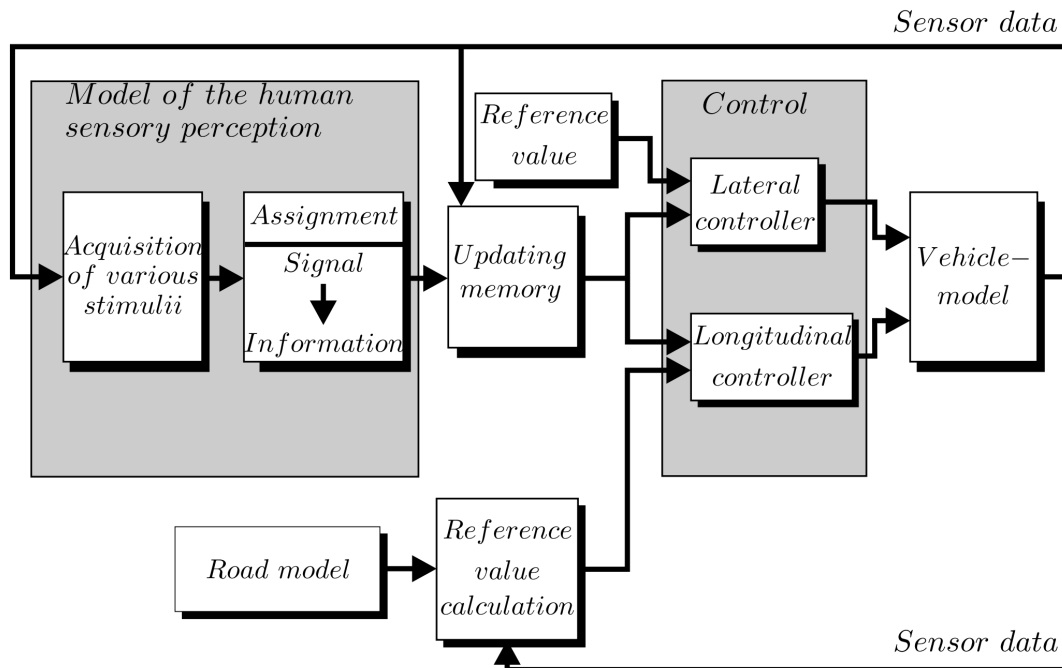


Abbildung 2.31: Hybrides Fahrermodell aus Kiencke & Nielsen [KN05]

2.2.5.3 Hybrides Fahrermodell von Kiencke & Nielsen

Kiencke & Nielsen [KN05] sind ebenfalls der Meinung, dass es nicht möglich ist, jede denkbare Fahrsituation mit einem einzigen Modell beschreiben zu können. Somit muss ein Rahmenmodell in der Lage sein, diverse Aufgaben mittels unterschiedlicher Modelle parallel simulieren zu können. Das vorgeschlagene Modell orientiert sich am Prozess der menschlichen Informationsverarbeitung (vgl. Abschnitte 3.1, 3.2 und 3.3) und kombiniert diskrete Entscheidungen mit klassischen Reglermodellen (vgl. Abbildung 2.31). Die Qualität der Regelung hängt von der Verfügbarkeit der relevanten Informationen ab, sowie von Erfahrung und Persönlichkeitsparametern. Es wird ein Gedächtnis implementiert, welches die aktuellen Zustandsvariablen speichert, auf deren Basis Längs- und Querregler agieren.

Menschähnlichkeit soll durch die Möglichkeit des Verwendens von nicht mehr aktuellen Daten – beispielsweise weil durch zu hohe Belastung des Fahrers Informationen übersehen werden – erreicht werden. Für die Informationsgewinnung verwendet das Modell den visuellen sowie den vestibulären Kanal (vgl. Abschnitte 3.1.1 und 3.1.4). Jeder dieser Kanäle ist als Warteschlange modelliert. Als Hauptstruktur für die verschiedenen Fahrzustände dient ein Mealy-Automat⁴⁶ mit den Zuständen *Geradeausfahrt*, *Annäherung an Kurve*, *Bremsen*, *Kurveneingang*, *Kurve* und *Beschleunigen* und den Ausgabewerten v_{ref} , $a_{y,ref}$ und $a_{x,ref}$. Die Regelung der Längsdynamik wird mittels zweier Regler, einem „Fahrregler“ und einem „Bremsregler“ realisiert, wobei jeweils

⁴⁶Ein Mealy-Automat ist ein endlicher Automat, dessen Ausgabe nur von seinem aktuellen Zustand und seiner Eingabe abhängt.

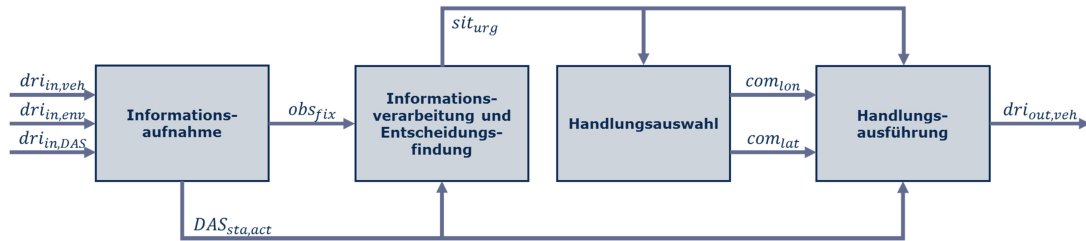


Abbildung 4.1: Oberste Modellebene des Fahrerverhaltensmodells

Abbildung 2.32: Primärebene des Fahrermodells von Mai [Mai17]

nur einer der beiden aktiv sein kann. Der Querregler soll den lateralen Versatz zur Ideallinie minimieren und basiert auf einer Vorausschauregelung.

Fazit Das beschriebene Modell stellt ein prototypisches Beispiel für eine hybride Modellierung dar: Ein Entscheidungsmodell basierend auf der Warteschlangentheorie agiert unabhängig von den für die Fahrzeugführung verantwortlichen Längs- und Querregelungsmodellen. Nachteilig ist die fehlende Möglichkeit der Verwendung von Fremdverkehr, wodurch ein wichtiger Aspekt des menschlichen Verhaltens während des Autofahrens nicht betrachtet wird. Des Weiteren fehlt eine Unterstützung für Sekundäraufgaben, womit eine Verwendung zum Testen von FAS nur eingeschränkt möglich ist. Die Implementierung der Perzeption mittels Warteschlangennetzwerk erlaubt ebenso keine parallele Verarbeitung von gleichzeitig eintreffenden Informationen.

2.2.5.4 Fahrermodell von Mai

Ein Fahrermodell, welches für die prospektive, stochastische Bewertung von FAS im Hinblick auf deren Wirkung auf die Verkehrssicherheit verwendet werden kann, hat Mai [Mai17] vorgestellt. Er ordnet das Modell selbst den prädiktiven Modellen zu, also Modellen, die die Nachbildung menschlichen Verhaltens auf Grundlage empirischer Beobachtungen zum Ziel haben. Das Modell basiert auf Arbeiten von Seidl [Sei12] sowie Prokop et al. [PMS⁺12] und wurde für ein Szenario einer Kollision eines Fahrzeugs mit einem Fußgänger, der bei einer TTC von 4 s für den Fahrer des Ego-Fahrzeugs sichtbar wird, entwickelt. Es wurde die gesamte für dieses Szenario notwendige Informationsverarbeitungskette implementiert, so dass sowohl kognitive als auch rein regelungstechnische Elemente in diesem Modell vorhanden sind (vgl. Abbildung 2.32). Der Fahrer ist in der Lage, vorgegebenen Strecken zu folgen und – bei erkanntem Hindernis – ein Bremsmanöver durchzuführen.

Ein Hauptaugenmerk des Modells liegt auf der Verwendung der τ -Variablen, mit deren Hilfe der Mensch die TTC direkt „ablesen“ kann, ohne die Informationen „Abstand“ und „Relativgeschwindigkeit“ kennen zu müssen (vgl. auch Abschnitt 3.1.5.2). Der Aufbau des Modells ist folgendermaßen gelöst: Es existieren die vier Teilmodelle „Informationsaufnahme“, „Informationsverarbeitung und Entscheidungsfindung“, „Handlungsauswahl“ und „Handlungsausführung“.

Im ersten Teilmodell werden Reize (Objekte im Verkehrsraum) sowie Warnungen (optisch sowie akustisch) im Innenraum des Fahrzeugs abhängig von der Blickrichtung bzw. des Gesichtsfelds detektiert und darauf basierend entsprechende Blickbewegungsmuster initiiert. Ohne einen erkannten Reiz wird eine stochastische Blickbewegung durchgeführt, bei erkanntem Reiz eine reizgesteuerte Blickbewegung. Im nächsten Teilmodell – „Informationsverarbeitung und Entscheidungsfindung“ – wird zum einen eine Reaktionszeit basierend auf einer Verteilungsdichtefunktion berechnet. Des Weiteren erfolgt eine Situationsanalyse sowie eine Situationsbewertung. In ersterer werden Bewertungsmaße (z. B. die bereits erwähnte *tau*-Variable) berechnet, die folgend in einer Situationsbewertung herangezogen werden, um die Notwendigkeit bzw. Dringlichkeit einer Verhaltensanpassung basierend auf einem vierstufigen Dringlichkeitsindex (hoch, gering, unbekannt, normal) zu berechnen. Im nächsten Teilmodell, der „Handlungsauswahl“ werden Führungsgrößen für Längs- und Querführung erzeugt, wobei die Querführung lediglich zur Spurführung dient – Spurwechselmanöver oder Ähnliches sind nicht modelliert. Das Teilmodul „Handlungsausführung“ beinhaltet Längs- und Querregelung (angelehnt an Donges mit einer antizipatorischen Steuerung und einer kompensatorischen Regelung, vgl. Abschnitt 2.2.1.1) sowie ein Modul, welches menschliche Beschränkungen (Umsetzzeit zwischen Pedalen, maximaler Lenkwinkel, Betätigungsgradienten usw.) simuliert.

Fazit Das beschriebene Modell wurde für eine spezielle Situation entwickelt und bildet daher eine abgeschlossene Einheit für einen bestimmten Anwendungszweck. Der Fokus liegt dementsprechend nicht auf der Abbildung allgemeinerer typisch menschlicher Fahreigenschaften sondern in der physikalisch nachvollziehbaren Modellierung der beschriebenen Situation. Menschähnlichkeit ist in Form von physikalischen Beschränkungen sowie der Verwendung der τ -Variablen implementiert. Daher kann das Modell zu einem Typ-II-Modell gezählt werden. Eine Erweiterung zu einem Typ-III-Modell erscheint ob der abgeschlossenen Struktur und bisher nicht verwendeten psychologischen Konzepten nur schwer möglich.

2.2.5.5 Zusammenfassung

Obwohl seit den 80er Jahren der Bedarf nach hybriden Fahrermodellen erkannt worden ist, sind nur eine Handvoll Modelle entstanden, die den von Jürgensohn formulierten Anforderungen entsprechen. Die beiden in der Fahrermodellierung vorherrschenden Denkschulen „ingenieurtechnisch“ und „psychologisch“ bewegen sich zwar aufeinander zu, was entweder zu um kognitive Module erweiterte regelungstechnischen Modellen oder zu immer komplexer werdenden kognitiv modellierten Systemen führt, welche auf vergleichsweise einfache Regelungsmechaniken zurückgreifen. Eine echte *hybride* Modellbildung scheint jedoch nicht stattzufinden. Viele zeitgenössische Fahrermodelle, auch wenn diese nicht explizit als „hybrid“ beschrieben werden, können jedoch implizit als solche betrachtet werden – *reine* kognitive oder regelungstechnische Modellierung ist im Kontext der Fahrermodellierung heute nicht mehr denkbar.

Menschähnlichkeit Eine Bewertung hinsichtlich der Menschähnlichkeit ist bei hybriden Modellen allein auf Basis ihrer Kategoriezugehörigkeit zu diesen nicht möglich. Hybride Modellierung beschreibt im Gegensatz zu den im Vorhinein vorgestellten Methoden keinen inhaltlich zu definierenden Modellierungsansatz. Sie beschreibt ein strukturelles Konzept, innerhalb dessen Ansätze aus unterschiedlichen Domänen integriert werden können. Eine konkrete Aussage wie „Mit hybriden Modelle können Typ-X-Modelle erstellt werden.“ kann somit nicht getätigt werden. Trotzdem – oder gerade deswegen – erscheint eine Typ-III-Modellierung möglich, so denn entsprechende „Typ-III-fähige“ Modellierungsansätze verwendet werden. Im Kapitel 5 wird mit Hilfe hybrider Modellierung ein solcher Ansatz vorgestellt. Aufgabenspezifische kognitive Modelle sind bezüglich ihres Menschähnlichkeitspotentials analog zu kognitiven Modellen zu bewerten. Aufgrund des stärker auf der Fahraufgabe liegenden Fokus stellt sich die Modellierung eines menschähnlichen Systems als weniger komplex dar, daher sind aufgabenspezifische kognitive Fahrermodelle zur Zeit jene, die als am meisten menschähnlich klassifiziert werden können. Eine abschließende Beurteilung kann jedoch nur anhand der Literatur stattfinden, da keines der vorgestellten Modelle frei verfügbar ist.

3 Theoretische Grundlagen des menschlichen (Fahr-)Verhaltens

„Nichts ist im Verstand, was nicht vorher in den Sinnen wäre.“

Thomas von Aquin

Die Simulation von menschähnlichem Fahrverhalten lässt sich ohne tiefere Beschäftigung mit den theoretischen Grundlagen menschlichen Verhaltens im Allgemeinen kaum befriedigend erreichen. Das „Fahren“ an sich ist keine aus dem menschlichen Informationsverarbeitungsapparat entkoppelbare Handlung – vielmehr besteht es aus der Anwendung unterschiedlichster Problemlösungsstrategien, basierend auf Informationen aus verschiedensten Quellen. Die dem Menschen beim Fahren zur Verfügung stehende Aktuatorik stellt hierbei die größte Beschränkung der Handlungsoptionen dar: Obwohl der Mensch zur Durchführung hochkomplexer Bewegungsabläufe imstande ist, werden für das Fahren koordinativ eher simple, eindimensionale Handlungen wie die Handhabung eines Lenkrads, der Pedalerie und anderer Bedienelemente verwendet. Abgesehen von Renn- und Testfahrern stellt das Führen eines Fahrzeug somit vergleichsweise geringe physische Anforderungen an den Fahrer. Die kognitiven Anforderungen hingegen hängen stark von der zu bewältigenden Fahraufgabe ab.

Betrachtet man einfache Fahraufgaben, wie beispielsweise eine Fahrt auf einer Landstraße ohne jeglichen Verkehr, so kann das menschliche Handeln – also das Fahren – für die überwiegende Anzahl an Teilaufgaben als *behavioristisch* beschrieben werden: Der Mensch fungiert als „Black Box“, welche *Reaktionen* generiert, die aufgrund von inneren und äußeren *Reizen* erzeugt werden. Angelehnt an das beschriebene Landstraßenszenario bestünde ein dieser Aufgabe angepasstes Fahrermodell aus einem simplen (Regler-)Modell des Lenkens eines Fahrzeugs basierend auf seiner Querabweichung zur Fahrbahnmitte. In der Realität treten jedoch weitaus komplexere Probleme während der Tätigkeit „Fahren“ auf: Informationen vielfältiger Art müssen wahrgenommen und interpretiert werden, mögliche Probleme müssen erkannt und Entscheidungen zur Behebung dieser getroffen werden. Auf eine Modellierung der inneren Beweggründe für bestimmte Verhaltensweisen des Fahrers kann daher nicht verzichtet werden. Aus dieser Argumentation heraus ergibt sich, dass das behavioristische Paradigma nicht beibehalten werden kann, da zwar konkrete Ein- und Ausgabewerte im Problemkonstrukt „Fahren“ vorliegen, eine – möglichst einfache – Modellierung der informationsverarbeitenden Prozesse des Fahrers

jedoch unumgänglich ist, um möglichst menschenähnliches Verhalten in komplexen Situationen nachbilden zu können.

Basierend auf diesem Paradigma werden folgend die drei Elemente *Reiz* bzw. *Wahrnehmung*, *Informationsverarbeitung* und *Reaktion* bzw. *Handlung* Bezug nehmend auf menschlichen Fahrens untersucht und Bewertungen für die Relevanz innerhalb eines Prozesses zur Erstellung eines möglichst menschenähnlichen Fahrermodells getroffen.

3.1 Wahrnehmung

Das Führen eines Fahrzeugs ist ein hochdynamischer Prozess, innerhalb dessen der Informationsaufnahme eine besondere Bedeutung zukommt. Es stellt im menschlichen Alltag hinsichtlich der Anforderungen an diese eine Ausnahme dar: Aufgrund hoher Geschwindigkeiten – auch der anderen Verkehrsteilnehmer – ergibt sich die Notwendigkeit, in kurzer Zeit kritische Informationen wahrzunehmen und zu verarbeiten. Dies wird zusätzlich dadurch erschwert, dass die menschliche Wahrnehmung evolutionär gesehen nicht auf hohe Geschwindigkeiten hin optimiert wurde und daher der kognitive Aufwand zur Erlangung dieser Informationen vergleichsweise hoch ist.

Nach Goldstein lässt sich der menschliche Wahrnehmungsprozess als eine Folge von Einzelschritten betrachten [Gol07], vgl. auch Abbildung 3.1. Ein *verfügbarer Stimulus* wird durch Aufmerksamkeit auf diesen zu einem *beachteten Stimulus*, welcher dann physisch an den entsprechenden *Rezeptoren* anliegt. Durch *Transduktion* wird der entsprechende Reiz in elektrische Signale umgewandelt, die es der *neuronalen Verarbeitung* erst ermöglichen, die sensorischen Informationen *wahrzunehmen*. Das entsprechend wahrgenommene Objekt wird nun *erkannt* – also einer Kategorie zugeordnet, weitere *Handlungen* (z. B. das Bewegen des Kopfes oder die Bewegung hin zu einem anderen Ort) dienen dazu, neue Informationen aufnehmen zu können.

Inhaltlich kann die menschliche Wahrnehmung in die bekannten fünf Sinne des Menschen unterteilt werden (visuelle, auditive, taktile, olfaktorische sowie gustatorische Wahrnehmung). Im Kontext der Fahrzeugführung wird auf eine tiefer gehende Betrachtung der beiden zuletzt genannten verzichtet, da diese für die menschliche Handlung des Fahrens keine unmittelbare Relevanz besitzen.

Es gab Versuche, den Stellenwert der einzelnen Sinneskanäle zu quantifizieren: Kupfmüller [Kup59] sowie Bhise & Rockwell [BR71] postulierten, dass etwa 87 % aller Informationen über den visuellen Kanal, 10 % über den auditiven Kanal und etwa 3 % somatosensorisch verarbeitet würden. Derart präzise Werte sind mit Vorsicht zu genießen, jedoch bleibt die Hauptaussage unbestritten, dass der visuelle Kanal mit Abstand die wichtigsten für die Fahrzeugführung notwendigen Informationen liefert (vgl. auch Sivak [Siv96]) und bestätigt somit den subjektiven Eindruck eines jeden Fahrers. In bestimmten Situationen (z. B. beim Hören eines Martinshorns

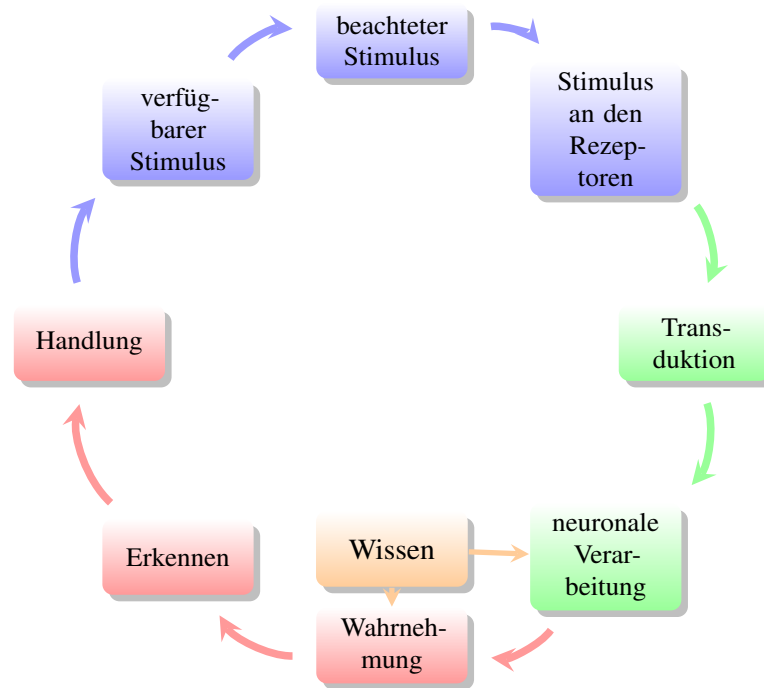


Abbildung 3.1: Zyklischer Wahrnehmungsprozess nach Goldstein [Gol07]

oder dem Erfühlen einer Querbewegung) spielen andere Sinne jedoch ebenfalls eine wichtige Rolle – dies ist jedoch stark situationsabhängig.

Die folgenden Abschnitte widmen sich somit zuerst der visuellen Wahrnehmung (Abschnitt 3.1.1), gefolgt von der auditiven Wahrnehmung (Abschnitt 3.1.2) sowie der Sensibilität, welche die taktile Wahrnehmung noch um weitere „Körpersinne“ ergänzt (Abschnitt 3.1.3).

3.1.1 Visuelle Wahrnehmung

Die visuelle Wahrnehmung ist der mit Abstand wichtigste Sinneskanal für den Menschen, um Informationen aus der Umgebung aufnehmen zu können. So sind die allermeisten für die Fahrzeugführung unbedingt notwendigen Informationen, wie z. B. eine korrekte Verortung des eigenen Fahrzeugs im Raum, das Erkennen von Hindernissen und des Straßenverlaufs etc. nur über die visuelle Wahrnehmung zu erhalten. Für die zeitliche und räumliche Vorausschau bzw. Vorausplanung ist die visuelle Wahrnehmung als „Fernsinn“ – in zunehmendem Maße bei höheren Geschwindigkeiten – besonders wichtig.

3.1.1.1 Physiologie der visuellen Wahrnehmung

Ein Großteil des menschlichen Gehirns ist ständig damit befasst, visuelle Informationen zu verarbeiten, ca. 60 % der Großhirnrinde sind mit der Wahrnehmung, Interpretation und Reaktion auf visuelle Reize verknüpft (Gegenfurtner [Geg15]). Diese Reize (Licht des elektromagneti-

	Rezeptoren	Nervenbahnen	Informationsfluss	Anteil der Aufnahme	Nervenzentrum
Auge	$2 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^8$ b/s	87 %	
Ohr	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$ b/s	10 %	
Geschmack	10^7	$2 \cdot 10^3$	10 b/s	3 %	
Geruch	10^7	$2 \cdot 10^3$	10^2 b/s		
Tast-sinn	Druck	10^6	$8 \cdot 10^8$ b/s		
	Schmerz				
	Wärme				
	Kälte				

Abbildung 3.2: Verarbeitungskapazitäten der Sinne aus Kupfmüller [Kup59])

schen Spektrums von 400 nm bis 700 nm) treffen über die Hornhaut (Kornea), die Pupille sowie durch die Linse hindurch auf die Netzhaut (Retina) und gelangen von dort über den Sehnerv (Nervus opticus) zum Gehirn (vgl. Abbildung 3.3). Alle so aufgenommenen Informationen sind ihrem Wesen nach zuerst rein zweidimensional. Die dritte, für die räumliche Einschätzung der Umgebung unbedingt notwendige Dimension, wird erst im Gehirn vor allem aus der retinalen Disparität – dem seitlichen Versatz der zweidimensionalen Objekte auf den Netzhäuten – erzeugt.

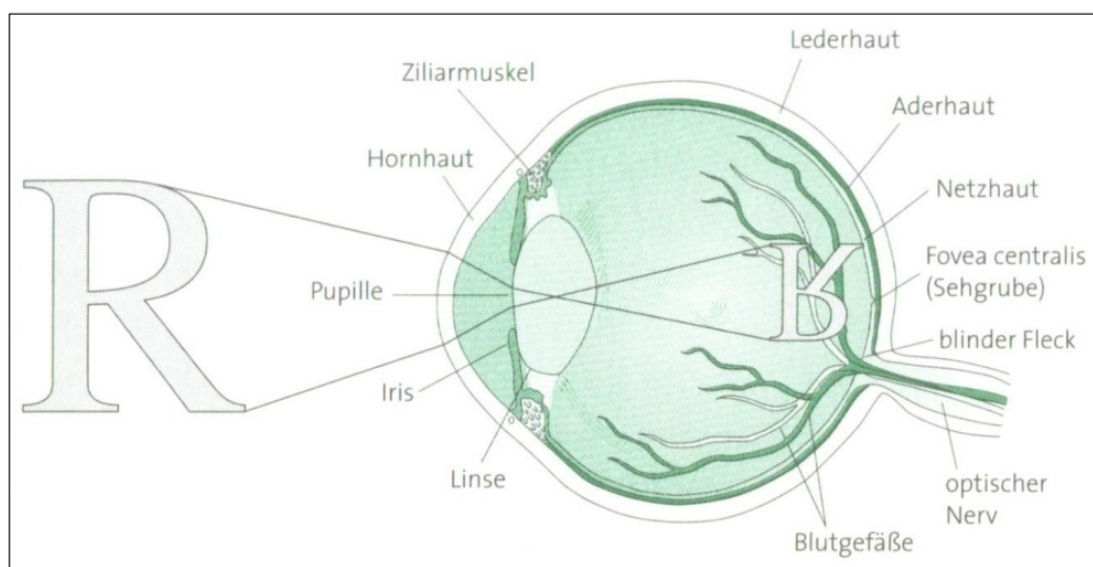


Abbildung 3.3: Aufbau des menschlichen Sehapparats aus Gegenfurtner [Geg15]

Ein detailliertes Bild eines sichtbaren Objektes kann das menschliche Auge nur in einem kleinen, etwa 2° Öffnungswinkel des Blickkegels großen Bereich wahrnehmen. Dieser Bereich des schärfsten Sehens wird als *Fovea Centralis* oder auch „gelber Fleck“ bezeichnet. An diesem Ort auf der Netzhaut ist die Dichte der optischen Rezeptoren, vor allem die der Zäpfchen, welche für Farbsehen und scharfes Sehen verantwortlich sind, am höchsten. Der die *Fovea Centralis* umgebende Bereich, der sich etwas bis 10° erstreckt, wird *Parafovea* genannt. Das parafoveale Sehen besitzt etwa 30 % des Auflösungsvermögens der *Fovea Centralis*, wobei sich jedoch bereits bei einer Entfernung von etwa 3° vom Ort der Fixation die Sehschärfe um etwa die Hälfte verringert (Schmidtke & Bernotat [SB93]), was an der verringerten Dichte der Zäpfchen in diesem Bereich liegt. Alles, was sich zwar außerhalb der beschriebenen Bereiche, jedoch innerhalb des Blickfeldes befindet und somit wahrgenommen werden kann, wird als *periphere Sicht* bezeichnet. Dort befindet sich fast nur noch der zweite im menschlichen Auge vorhandene Rezeptortyp, die Stäbchen, welche vor allem für die Kontrastwahrnehmung verantwortlich sind. Da mittels peripherem Sehen keine Farbwahrnehmung möglich ist und dieses im Vergleich zur fovealen, aber auch zur parafovealen Wahrnehmung sehr unscharf ist, können in der peripheren Sicht vor allem Größe und Bewegung von nicht fixierten Objekten sowie Helligkeitsänderungen erkannt werden.

Nach Vollrath & Krems [VK11] erfüllen sowohl foveales als auch peripheres Sehen für die Fahraufgabe wichtige Funktionen: Das foveale Sehen dient dem Erkennen des Straßenverlaufs und von Hindernissen sowie der Regulation von Geschwindigkeit und Abständen, das periphere Sehen jedoch dazu, Objekte und Veränderungen in der Peripherie zu erkennen und die Aufmerksamkeit darauf zu richten. Die auf diese Art und Weise erkannten Objekte bilden die Grundmenge für eine eventuell folgende Fixation. Um ein Objekt, welches eine größere Fläche einnimmt, komplett und scharf wahrnehmen zu können, muss der Blick nacheinander auf mehrere Stellen des zu betrachtenden Objekts gerichtet werden. Diese „sakkadischen“ Bewegungen (genauer: Rotationsbewegungen des Augapfels) zwischen den einzelnen, zu fixierenden Punkten erreichen Geschwindigkeiten von bis zu $500^\circ/\text{s}$ (Grüsser & Grüsser-Cornehls [GGC87]) bzw. $1000^\circ/\text{s}$ (Boff & Lincoln [BL88]), die Dauer einer Sakkade beträgt meist zwischen 10 ms und 80 ms (Unema [Une95]). Da es sich hierbei um *ballistische Bewegungen* (vgl. auch Abschnitt 3.3.2) handelt, ist eine Korrektur während der Ausführung der Bewegung nicht möglich. Sollte sich das zu fixierende Objekt nach Abschluss der Sakkade nicht in der Fovea Centralis abbilden lassen, ist eine (kleinere) Korrektursakkade notwendig, um eine erfolgreiche Fixation zu erreichen. Während einer Sakkade findet keine Informationsaufnahme statt, diese erfolgt ausschließlich während einer Fixation. Eine Fixation dauert mindestens 100 ms (Young & Sheena [YS75], Karsh & Breitenbach [KB83]). Dies kann physiologisch durch die *saccadic suppression* (Volkman et al. [VRMW78]) begründet werden, welche die Einschränkung des visuellen Wahrnehmungsvermögens in einem Zeitraum vor und nach einer Sakkade erklärt. Eine typische Fixation dauert etwa 200 ms bis 600 ms und kann mehrere Sekunden aufrecht erhalten werden (Joos et al. [JRV03]), wobei jedoch auch extrem kurze „Express-Fixationen“ mit einer Dauer

von etwa 50 ms bis 100 ms nachgewiesen wurden (Velichkovsky et al. [VSP97]). Des Weiteren existieren sog. „Folgebewegungen“: Diese bezeichnen unwillkürlich gesteuerte Augenbewegungen, welche zum Ziel haben, das momentan fixierte Objekt auf der Fovea Centralis zu halten und erreichen Geschwindigkeiten von max. $60^\circ/\text{s}$ [GGC87]. Deren Genauigkeit nimmt jedoch mit zunehmender Geschwindigkeit ab, zusätzlich verengt sich der Bereich, in denen Objekten derart gefolgt werden kann [Une95].

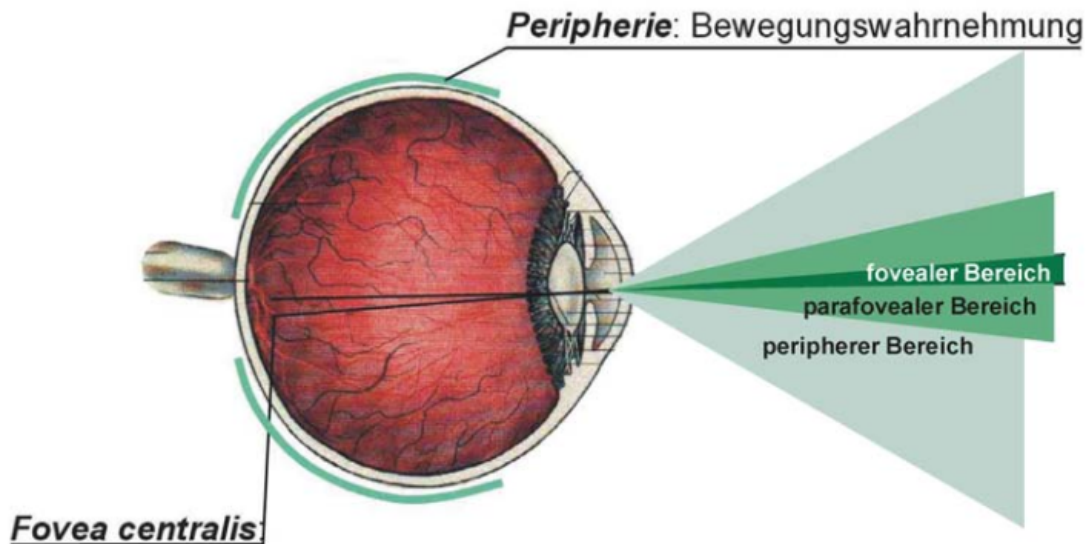


Abbildung 3.4: Foveales, parafoveales und peripheres Sehen aus Schweigert [Sch02]

3.1.1.2 Gesichtsfeld/Blickfeld/Nutzbare Sehfeld

Der geometrische Bereich, in welchem der Mensch mittels seiner Augen Informationen wahrnimmt, kann auf unterschiedliche Art und Weise definiert werden. Physiologisch betrachtet wird zwischen Gesichtsfeld und Blickfeld unterschieden.

Das *Gesichtsfeld* repräsentiert nach Schmidt et al. [SLH07] den für ein unbewegtes Auge (also während einer Fixation) sichtbaren Raum und berücksichtigt auch Objekte, die nicht direkt fixiert werden. Es beträgt in horizontaler Richtung etwa 180° bis zu 220° , in vertikaler Richtung bis zu 130° (Biedermann [Bie84], vgl. auch Abbildung 3.5).

Das *Blickfeld* hingegen kann nach Schweigert [Sch02] als die Gesamtheit aller fixierbaren Punkte bei bewegten Augen und unbewegtem Kopf definiert werden. Da sich die Augen etwa 40° nach oben/unten sowie etwa 60° seitlich bewegen können, ergibt sich ein maximales Blickfeld von vertikal 80° sowie horizontal 120° , in dem Fixationen möglich sind.

Des weiteren existiert das psychologische Konstrukt des *Nutzbaren Sehfeldes*, welches auf der Erkenntnis basiert, dass die rein physiologisch, also durch die Augenbewegungen definierten Begrenzungen des Gesichts- bzw. Blickfeldes nicht identisch mit den psychologisch nachge-

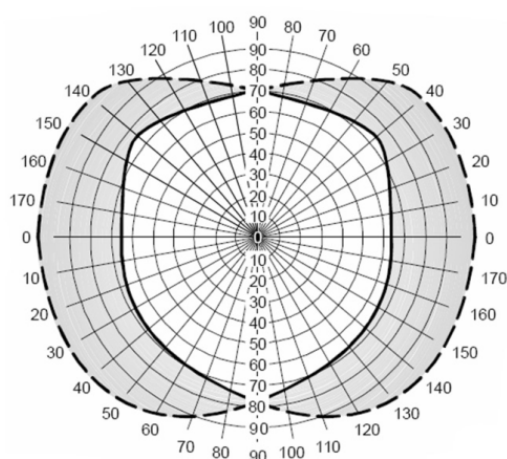


Abbildung 3.5: Darstellung des binokularen Gesichtsfelds für weißes Licht aus Negele [Neg07]: Der helle Bereich kann von beiden Augen abgedeckt werden. In der Ordinate ist der jeweilige Blickwinkel aufgetragen, außen die Blickrichtung.

wiesenen sind. Mackworth [Mac76] definiert dieses (engl. „Useful Field Of View“ – UFOV) folgendermaßen: „Das nutzbare Sehfeld wird als derjenige Bereich um die Fixationsstelle definiert, aus dem Informationen während einer gegebenen visuellen Aufgabe entweder gespeichert oder verwendet werden“. Es liefert somit Erklärungen für Wechselwirkungen zwischen Gesichtsbzw. Blickfeld und Aufmerksamkeit und variiert bei verschiedenen Beobachtern und Situationen (Hristov [Hri09]).

Mackworth [Mac65] vermutete eine mit steigender Geschwindigkeit zunehmende Verengung des nutzbaren Sehfelds, was er als „tunnel vision“ bezeichnete (siehe auch Rantanen & Goldberg [RG99]). Auch Babkov [Bab75] nahm eine geschwindigkeitsabhängige Verengung basierend auf Blickbewegungsmessungen an (vgl. Abbildung 3.6). Verschiedene Studien widerlegten dies und führten die Ergebnisse auf komplexere Verkehrssituationen im Allgemeinen und einer damit einhergehenden tieferen Verarbeitung der einzelnen Fixationen zurück (z. B. Miura [Miu86]). Dies führt nach Schulz [Sch12] zu der Annahme, dass bei höherer Beanspruchung nicht etwa eine Verkleinerung des UFOV stattfindet, sondern eine Aufmerksamkeitsverlagerung innerhalb desselben. Eine Einschränkung des UFOV wird als abnehmende Effizienz beschrieben, mit der jemand Informationen aus einer komplexen visuellen Szene extrahieren, speichern und darauf reagieren kann (Sekuler et al. [SBM00]). In gewissem Maße kann die Größe des UFOV trainiert werden, da es stark vom Fahrer abhängt, ab wann eine Überbeanspruchung vorliegt. Spezifische Angaben über die Größe des UFOV existieren nicht, jedoch ist der Bereich bis etwa 30° Sehwinkel laut Lachenmayr von „kardinaler Bedeutung“ im Verkehr [Lac06].

Es kann zusammenfassend gesagt werden, dass die Fahrgeschwindigkeit einen bedeutenden Einfluss auf das Wahrnehmungsverhalten von Kraftfahrern ausübt. Bei hohen Geschwindigkeiten konzentrieren sich die Häufigkeitsverteilungen der Fixationen verstärkt um den Fixationsschwer-

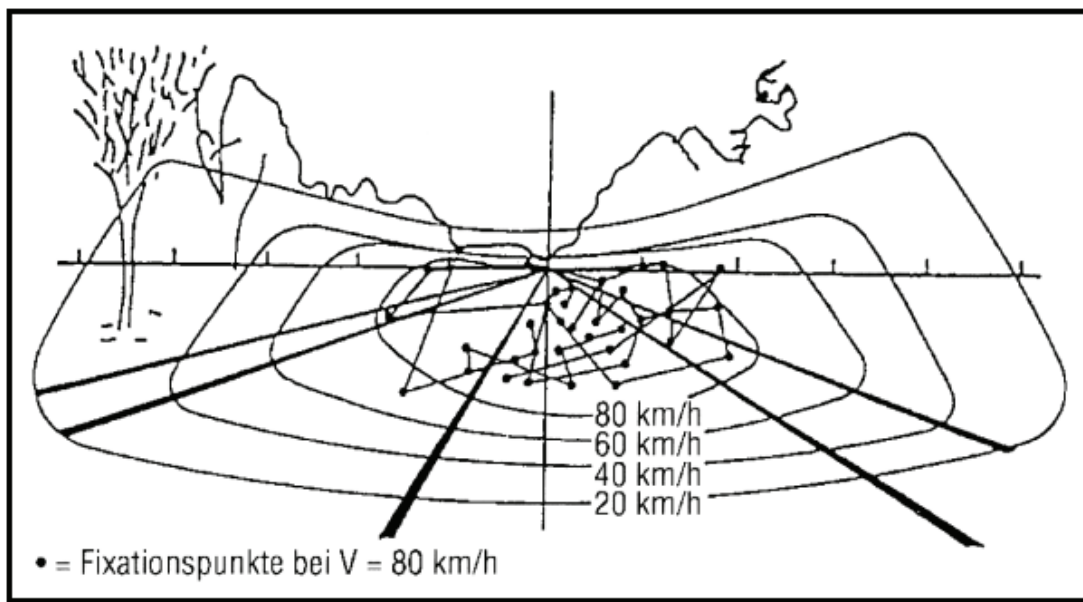


Abbildung 3.6: Nutzbares Sehfeld in Abhängigkeit von gefahrener Geschwindigkeit aus Babkov [Bab75]

punkt – der zeitliche Anteil der Fixation fahraufgabenrelevanter Objekte steigt. Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten findet somit eine deutliche Konzentration des Blicks um den Fluchtpunkt der Straße statt (Hristov [Hri09]). Jedoch ist zu beachten, dass die geschwindigkeitsabhängigen Einflüsse auf die Wahrnehmung nicht den Schluss zulassen, dass diese eine physiologische „Einschränkung des Sehfeldes“ darstellen (Kayser et al. [KSH89]).

3.1.1.3 Optischer Fluss

Während das foveale Sehen primär der Objekterkennung dient, werden Bewegungen größtenteils mittels peripherem Sehen wahrgenommen. Basierend auf der Helmholtz'schen Definition der Bewegungsparallaxe, welche die perspektivische Verschiebung entfernter Objekte in unterschiedlicher Tiefe als Folge einer veränderten Beobachterposition beschreibt, führte Gibson [Gib50] den Begriff des *optischen Flusses* bereits 1950 ein. Der optische Fluss (vgl. Abbildung 3.7) ist demnach das „expandierende oder kontrastierende auf die Bildebene projizierte visuelle Feld auf der Retina, das durch die Eigenbewegung des Beobachters hervorgerufen wird“ (aus Bubb [BBGV15] nach Gibson [Gib50]) oder anders formuliert „die auf die Bildebene projizierte Relativbewegung zwischen dem Beobachter und den sichtbaren Raumpunkten“ (Chatziastros [Cha03]). Er wird durch die Eigenbewegung des Beobachters – oder dessen Bewegung in einem sich bewegenden Objekt, im Allgemeinen ein Fahrzeug – erzeugt. Ohne die Wahrnehmung des optischen Flusses ist es dem Beobachter nur schwer möglich, überhaupt eine Bewegung wahrzunehmen, andererseits ist eine eigene Bewegung Voraussetzung für die Existenz des optischen Flusses.

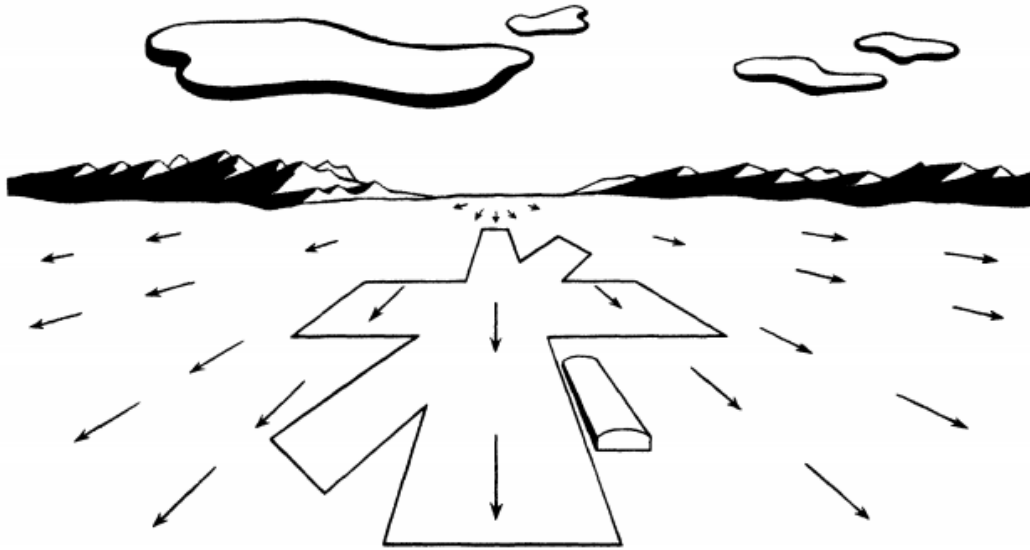


Abbildung 3.7: Optischer Fluss aus Cockpitsicht während eines Horizontalfluges aus Gibson [Gib50]

Im Kontext der Fahrzeugführung spielt der optische Fluss für die Erkennung und Regelung der Bewegungsrichtung eine wichtige Rolle (Lappe et al. [LBv99]). Der zentrale Punkt des Bildes des optischen Flusses, an dem keine Bewegung stattfindet, wird als „Focus of Expansion“ (FoE) oder „singulärer Punkt“ bezeichnet. Genau genommen handelt es sich eher um ein Feld, dessen Größe im umgekehrten Verhältnis zur Bewegungsgeschwindigkeit steht. Mathematisch betrachtet steht der FoE für die Quelle der Geschwindigkeitsvektoren des optischen Flusses. Anhand des optischen Flusses können nach Cavallo & Laurent [CL88] Schätzungen über mögliche Kollisionszeitpunkte zwischen dem Betrachter und einem sich nähernden Objekt getroffen werden. Unter Voraussetzung bestimmter Annahmen kann mittels optischem Fluss der zurückgelegte Weg durch Schätzen und Integrieren der Geschwindigkeit recht genau berechnet werden (Lappe et al. [LGB⁺00] bzw. Frenz & Lappe [FL05]).

Als Messmethode für absolute Entfernungen zu einem bestimmten Objekt oder auch dessen Geschwindigkeit lässt sich der optische Fluss jedoch nicht anwenden (Kemeny & Panerai [KP03]). Problematisch erweist sich die Extraktion der Bewegungsrichtung aus dem optischen Fluss, da dieser als solches nicht beim Menschen existiert. Vielmehr muss er als retinaler Fluss, also als Abbildung des optischen Flusses auf der Retina, interpretiert werden, wobei beachtet werden muss, dass er sich wegen möglicher Augenbewegungen vom optischen Fluss unterscheiden kann. Der retinale Fluss hingegen könnte eine Rolle bei der Detektion von Über- und Untersteuern eines Fahrzeugs spielen, beispielsweise bei einer Kreisfahrt, während der Fahrer seinen Blick auf ein bestimmtes, stationäres Ziel richtet (Wilkie & Wann [WW03], Lappi [Lap14]).

3.1.1.4 Tiefenwahrnehmung

Tiefenwahrnehmung bezeichnet die Fähigkeit des Menschen, mittels der Augen eine Quantifizierung von Abständen vorzunehmen. Für das Erhalten dieser Informationen kann das menschliche Gehirn auf unterschiedliche Interpretationsmechanismen zurückgreifen: Zum einen können die Bildinformationen der Augen verwendet werden, dies kann *monokular*, also sich nur auf die Informationen aus einem einzigen Auge beziehend, oder *binokular*, also sich auf die gekoppelten Bildinformationen aus beiden Augen beziehend, geschehen. Zum anderen können okulomotorische Reize verwendet werden, um, vor allem im Nahbereich – durch Fixierung eines Objektes – Entfernungsinformationen zu erhalten. Dabei kommt der *Naheinstellungstrias* zum Tragen, welcher das gleichzeitige Auftreten von Konvergenz, Akkommodation und Pupillenreflex beschreibt, welche in einem neurophysiologischen Regelkreis gekoppelt sind. Konvergenz beschreibt in diesem Kontext die Rückmeldung der Augenmuskeln an das Gehirn über die Drehung der Augen nach innen. Das Ausmaß dieser Konvergenzbewegung steht hierbei in einem direkten Verhältnis zur Akkommodationsleistung (Sachsenweger [Sac75]).

Für sich nicht in unmittelbarer Nähe befindliche Objekte liefert *binokulares Sehen* Informationen mittels *Querdisparation*: Horizontale Verschiebungen zweier Bilder eines Objektes werden vom Gehirn als Tiefeninformation der dreidimensionalen Umgebung interpretiert. Die Einschätzung von Abständen in größeren Entfernungen ist aufgrund der zu geringen Winkelunterschiede nicht möglich, da die Augen dann schon beinahe parallel ausgerichtet sind, in diesem Fall kommt das *monokulare Sehen* zur Anwendung, welches mittels unterschiedlicher Methodiken Tiefeninformationen liefern kann. Dies kann bewegungsinduziert (während einer Bewegung des Betrachters) oder bildhaft (also aus einem statischen Bild entnommen) geschehen.

Bewegungsinduzierte Maße:

- **Bewegungsparallaxe:** Verschiebung von sich nahe am Beobachter befindenden Objekten bei Kopf- oder Eigenbewegungen des Beobachters
- **Verdeckung und Überlappung:** Verdecktes wird als weiter hinten wahrgenommen

Bildhafte Maße:

- **Relative Höhe im Gesichtsfeld:** mit Horizont: Gegenstände weiter oben sind näher/ ohne Horizont: Gegenstände weiter unten sind näher
- **Relative Größe im Gesichtsfeld:** gleichförmige Gegenstände werden bei im Vergleich zu einem anderen Gegenstand geringerer Fläche als weiter entfernt eingeschätzt
- **Atmosphärische Perspektive:** weiter entfernte Gegenstände sind unscharf („Luftverschmutzung“)
- **Gewohnte Größe von Gegenständen:** semantisches Wissen setzt Größe und Entfernung in einen Zusammenhang

- **Lineare Perspektive:** parallele Linien konvergieren in der Entfernung, stärkere Annäherung entspricht somit größerer Entfernung
- **Texturgradient:** gleichmäßig verteilte Objekte auf einer Fläche erscheinen mit zunehmendem Abstand dichter gepackt

Cutting & Vishton [CV95] identifizieren neun visuelle Informationsquellen für die Generierung von Entfernungsinformationen. Eine Zusammenfassung sowie eine subjektive Bewertung der Relevanz für die Fahraufgabe ist Tabelle 3.1 zu entnehmen.

Name	Typ	Entfernung	Relevanz
Akkommodation	okulomotorisch	< 2 m [CV95] 0 – 6 m [Sil12]	-
Konvergenz	okulomotorisch	< 2 m [CV95] < 3 m [Zim92]	-
Querdissipation	binokular	≈ 10 m [CV95] < 6 m [Sch10] < 30 m [KP03],[PKS14]	o
Bewegungsparallaxe	monokular	≈ 10 m [CV95]	-
Verdeckung und Überlappung	monokular	0,5 – 5000 m [CV95]	+
Relative Höhe im Gesichtsfeld	monokular	> 2 m [Zöl15]	-
Relative/Gewohnte Größe im Gesichtsfeld	monokular	0,5 – 5000 m [CV95]	+
Atmosphärische Perspektive	monokular	> 30 m [Zöl15]	-

Tabelle 3.1: Formen der menschlichen Tiefenwahrnehmung: Werte aus Cutting & Vishton [CV95], Silbernagl [Sil12], Schimmel [Sch10], Kemeny & Panerai [KP03], Pape et al. [PKS14] und Zöller [Zöl15]

Cavallo & Laurent [CL88] schließen aus ihren Experimenten, dass binokulares Sehen nur im Nahbereich bei geringen Geschwindigkeiten eine gewisse Relevanz besitzt. Nach Aasman [Aas95] dominiert das monokulare Sehen während der Fahrzeugführung, die durch Querdissipation gewonnenen Informationen besitzen hingegen keine besondere Relevanz, da einäugige Fahrer keine übermäßigen Schwierigkeiten ob des fehlenden Binokularsehens besitzen.

Für die Modellierung eines menschähnlichen Fahrermodells kann geschlossen werden, dass eine unbedingte Notwendigkeit der Implementierung binokularer Tiefenwahrnehmung nicht von Nöten ist. Eine physiologisch exakte Nachbildung einzelner monokularer Mechanismen erscheint ob der unvollständigen Erkenntnisse bezüglich einzelner Anteile bestimmter Mechanismen an der gewonnenen Tiefeninformation ebenfalls unnötig.

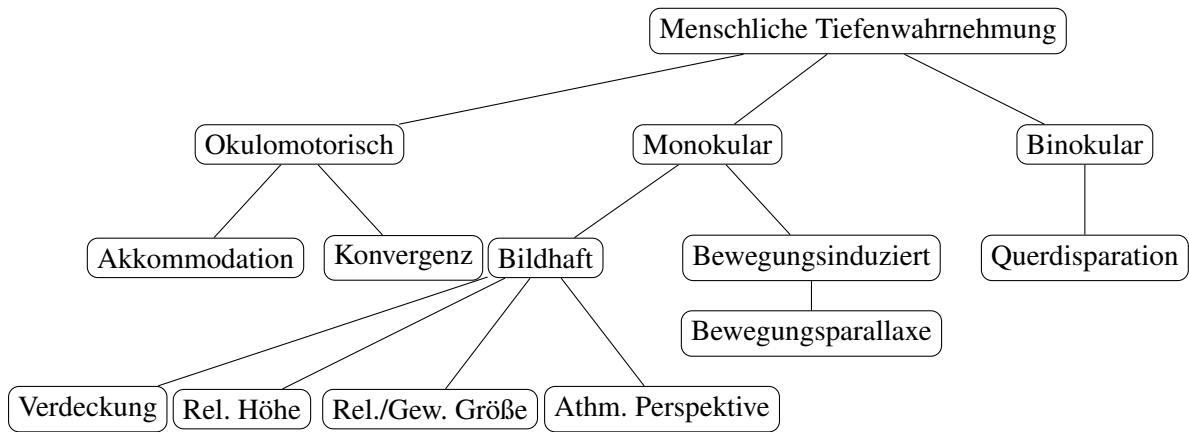


Abbildung 3.8: Mögliche systematische Gliederung der visuellen Wahrnehmung

3.1.2 Auditive Wahrnehmung

Die auditive Wahrnehmung stellt zwar nicht die primäre Informationsquelle im Kontext der Fahrzeugführung dar, jedoch erklärt sich ihre Relevanz in der Unterschiedlichkeit der wahrgenommenen Informationen, sowie der Art ihrer Aufnahme. So ist es fast unmöglich, sich eines bestimmten akustischen Signals durch „Weghören“ zu entziehen, da dieses – unabhängig von der aktuellen Kopfposition und der Aufmerksamkeitssituation und bei entsprechender Lautstärke – zwangsweise wahrgenommen wird, so es denn stark genug ist. Diese Unmittelbarkeit bzw. Instationarität (Transienz) des akustischen Signals birgt jedoch auch den Nachteil in sich, dass bei Nichtbeachtung oder Störung des Signals (z. B. durch Überlagerung) die zu übertragende Information möglicherweise unwiederbringlich verloren ist.

Bis zu 20 Signale pro Sekunde kann der Mensch als einzelne, voneinander getrennte Ereignisse unterscheiden, höhere Frequenzen werden im menschlichen Gehör als zusammenhängende Töne wahrgenommen. Auf diese Art und Weise können Schwingungen mit bis zu 20 kHz erfasst werden, wobei zwischen 2 kHz und 5 kHz die Empfindlichkeit des Ohres am höchsten ist, was bedeutet, dass Signale in diesem Frequenzbereich eine geringere Schallintensität benötigen, um wahrgenommen werden zu können. Mit steigendem Alter steigt die Schwelle des Schalldruckes, bei der ein Signal gerade noch wahrgenommen wird – besonders für hohe Frequenzen – stark an.

Nach Abendroth & Bruder [AB15] existieren drei Grundfunktionen, welche das Ohr bei der Aufnahme auditiver Informationen erfüllt: *Adaption*, also der Anstieg der Hörschwelle zur Differenzierung des Hörvorgangs, *auditorische Mustererkennung* zur Identifizierung des Signaltyps sowie *akustische Raumorientierung*, welche durch binaurales Hören gewährleistet werden kann. Im Kontext der Fahrzeugführung sind besonders die zuletzt aufgezählten wichtig. Beispielsweise kann ein erfahrener bzw. professioneller Fahrer bestimmte Muster erkennen, welche einem ungeübten Fahrer nicht auffallen würden, z. B. Reifengeräusche, welche eine Abnahme der Reifenhaftung andeuten oder auch das Fahren auf partiell nasser Strecke. Die akustische Raum-

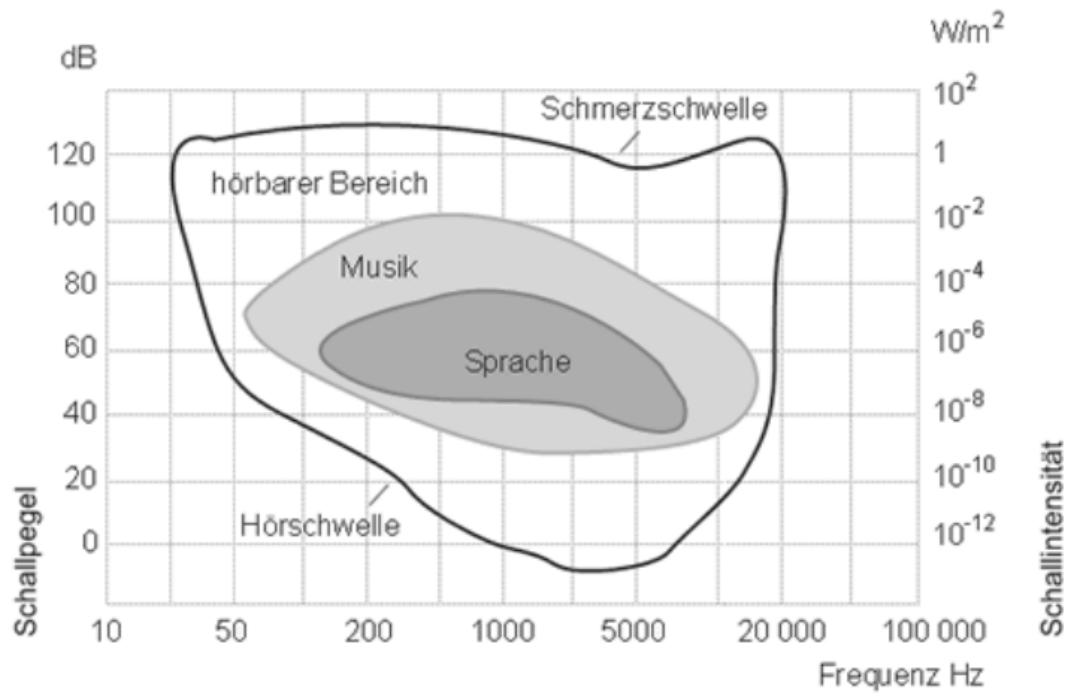


Abbildung 3.9: Hörfläche des menschlichen Gehörs aus Gegenfurtner [Geg15]

orientierung spielt vor allem bei der Einschätzung des (nicht sichtbaren) Fremdverkehrs eine Rolle, so kann ein wahrgenommenes Martinshornsignal über die Richtung eines beispielsweise sich nähernden Rettungswagens Auskunft geben.

Allgemein gehören fahrspezifische Geräusche zum Autofahren dazu, so dass stetig und ohne speziell darauf achten zu müssen, Informationen über Motordrehzahl, Geschwindigkeit sowie Längs- und Querschleunigungen akustisch wahrgenommen werden können. Fahrgeräusche übermitteln dem Fahrer auch eine Vielzahl von handlungsrelevanten Informationen und können den Fahrspaß und die emotionale Stimmungslage in positiver oder negativer Weise beeinflussen. So wird beispielsweise der Gang meist unbewusst auf Grundlage des Frequenzbereichs des Motorgeräuschs gewechselt oder das Fahrverhalten angepasst, wenn die Reifen durch Quietschen das Erreichen der Haftgrenze ankündigen (Fiala [Fia06]). Zu diesen sinnvoll zu interpretierenden Fahrgeräuschen kommen jedoch auch eine ganze Anzahl von Störgeräuschen hinzu, hierbei handelt es sich zum großen Teil um Abrollgeräusche, Windgeräusche, Geräusche von Lüftern und Gebläsen, sowie Knarz- und Klappergeräusche (Heißing & Brandl [HB02]), welche es gilt, während der Fahrt bestmöglich zu ignorieren.

3.1.3 Somatosensorische Wahrnehmung

Die Somatosensorik bzw. Sensibilität beschreibt den „Körpersinn“ oder auch den „fünften Sinn“ und bezeichnet jedwede Empfindung, die aus dem sensorischen System der Nerven resultiert.

Sie lässt sich auf unterschiedliche Weise kategorisieren. Angelehnt an Treede [Tre07] kann diese basierend auf der Art und Weise der wahrgenommenen Informationen in folgende Bereiche untergliedert werden:

- Mechanorezeption (Wahrnehmung mechanischer Kräfte)
- Propriozeption (Wahrnehmung von Körperbewegung und -lage)
- Viszerozeption (Wahrnehmung eigener Organe)
- Thermorezeption (Temperatursinn)
- Nozizeption (Schmerzsinn)

Mechanorezeption stellt hierbei eine durchaus zu berücksichtigende Informationsquelle für die somatosensorische Wahrnehmung dar: im Allgemeinen ist von dieser die Rede, wenn von „Gefühl“ (im Sinne von Empfindlichkeit für mechanische Reize) gesprochen wird. Sie ist von besonderer Bedeutung für die haptische bzw. taktile Wahrnehmung. Propriozeption hingegen ermöglicht das Erkennen wichtiger Informationen wie z. B. Bewegungsrichtungen, darauf wird im Abschnitt über kinästhetische Wahrnehmung näher eingegangen. Im Kontext der Fahrzeugführung spielen Thermorezeption und Nozizeption üblicherweise keine Rolle bzw. sollten keine Rolle spielen, daher wird auf diese nicht weiter eingegangen. Die Viszerozeption kann als sog. „Kinetose“, welche ein bewegungsbedingtes Unwohlsein bezeichnet, einen gewissen Einfluss auf den Fahrer haben, auf diese wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls nicht weiter eingegangen.

Haptische Wahrnehmung Angelehnt an Silbernagl [Sil12] sowie Abendroth & Bruder [AB15] kann haptische Informationsaufnahme über den taktilen und/oder den kinästhetischen Wahrnehmungskanal erfolgen. Die taktile Wahrnehmung bzw. Oberflächensensibilität erkennt Verformungen der Haut, die über durch Rezeptoren vermittelte Druck-, Berührungs- und Vibrationsempfindungen übertragen werden. Die kinästhetische Wahrnehmung bzw. analog Tiefensensibilität nimmt die Dehnung von Muskeln und die Bewegung der Gelenke über unterschiedliche Arten von Rezeptoren, die sich an den Muskelspindeln, im Bereich der Gelenke und der Bänder befinden, wahr. In vielen Publikationen, in denen Haptik im Fahrzeugkontext thematisiert wird, ist zuvorderst taktile Wahrnehmung durch Mechanorezeption gemeint, also Druck, Berührung, Vibration, Oberfläche, Form (Förster [För92], Bubb [Bub01]). Haptische Wahrnehmung funktioniert also vor allem durch die Fusion der Informationen aus den Stellungsrezeptoren der Muskeln und Gelenke, sowie der Mechanorezeptoren der Haut und der Thermorezeptoren (Barthenheier [Bar04]).

Im Bereich der Ergonomie werden manchmal haptische und taktile Wahrnehmung anders, und zwar basierend auf der jeweiligen Zielgerichtetheit definiert, so wird haptische Wahrnehmung oft als für eine aktive Exploration der Umgebung verwendete Art der Informationsaufnahme

bezeichnet, taktile Wahrnehmung hingegen als passives Berühren bzw. Berührtwerden dargestellt.

Da haptische Informationen im Vergleich zu visuellen Informationen wegen ihrer auf unterbewusster Ebene höheren Verarbeitungsgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 3.2) dem Fahrer zeitlich vor visuell wahrnehmbaren Änderungen zur Verfügung stehen, können diese bei entsprechender Fahrerfahrung unterbewusste Reaktionen oder reflexhafte Handlungen auslösen. Dies ist beispielsweise bei der Schwingungswahrnehmung zu beobachten: Andauernd auftretende, harmonische Schwingungen werden nach einer gewissen Zeit nicht weiter beachtet, wohingegen Auffälligkeiten bezüglich Amplitude oder Frequenz vom Fahrer frühzeitig bemerkt werden und ebenso zu den eben erwähnten Reaktionen führen können. Negele [Neg07] führt hier das Beispiel eines erfahrenen Fahrers an, welcher reflexartig seine Geschwindigkeit aufgrund einer am Lenkrad wahrgenommenen Schwingung, die er als Überschreiten der Haftgrenze bei zu schneller Kurvenfahrt interpretiert, reduziert. Bei anspruchsvollen Fahraufgaben, z. B. der Stabilisierung des Fahrzeugs, kann die Bedeutung von haptischen (jedoch auch von akustischen) Informationen weiter zunehmen (Schmidtke & Bernotat [SB93]).

Haptik spielt im Gegensatz zur visuellen Wahrnehmung auch eine bedeutende Rolle als direktes Feedback der Fahrerhandlungen. Haptische Größen nimmt der Fahrer vor allem über die Pedalerie (Pedalweg und Pedalkraft) sowie das Lenkrad (Rückstellmoment) wahr. So wird beispielsweise eine „direkte“ Lenkung gelobt, was nichts anderes heißt, als das ein schnelles haptisches Feedback ohne „Spiel“ vorhanden ist. Auch sind kraft- und wegfremde Stellbewegungen vergleichsweise unpräzise bzw. werden als unpräzise empfunden (Förster [För92]). Im Gegensatz dazu werden weggproportionale Kraftänderungen vom Fahrer positiv bewertet.

Die kinästhetische Wahrnehmung des Menschen, die Propriozeption, bezeichnet die Fähigkeit der Wahrnehmung der Lage des eigenen Körpers im Raum sowie der Stellung der Gliedmaßen, aber auch von Fahrzeugbewegungen, sowie Bewegungen des eigenen Körpers relativ zum Fahrzeug. Die Fähigkeit, Körperbewegungen wahrzunehmen und zu steuern wird auch Kinästhesie genannt. Nach Förster [För92] sind kinästhetische Signale Rückmeldungen aus motorischen Handlungen, die im Fahrzeug über die Stellorgane übertragen werden (bei der Lenkung über das Lenkrad, die Hände und Arme, beim Gasgeben und Bremsen über die Pedale, Füße und Beine). Die so übertragenen Informationen sind schon nach bereits etwa 0,15 s bis 0,2 s vorhanden und stellen somit die wichtigsten Informationen für die Stabilitätskontrolle dar.

Erfahrene Fahrer verwenden zur Wahrnehmung der Fahrzeugbewegung primär haptische, sowie kinästhetische Informationen und können daher schneller auf Veränderungen reagieren (vgl. auch Jürgensohn [JK08]). Laut Schieben et al. [SDK⁺08] bzw. Bolte [Bol91] manifestiert sich dies u.a. in einer im Vergleich zur ausschließlichen Benutzung des visuellen Wahrnehmungskanals nur etwa halb so großen Totzeit bei Regelungsaufgaben im Fahrzeug.

3.1.4 Vestibuläre Wahrnehmung

Die vestibuläre Wahrnehmung ermöglicht dem Menschen die Orientierung im Raum. Die hierfür benötigten Informationen werden aus dem Vestibular- bzw. Gleichgewichtsorgan extrahiert, welches sich im menschlichen Innenohr befindet. Mit dessen Hilfe können Linear- und Winkelbeschleunigungen detektiert werden (Zenner [Zen07]). Diese Informationen werden für die Gleichgewichtserhaltung sowie Auslösungen der Stellreflexe zur Normalhaltung des Kopfes und der Augen verwendet. Beim Autofahren trägt der vestibuläre Sinneskanal zur Wahrnehmung von Geschwindigkeit und Beschleunigung des eigenen Fahrzeugs bei (Abendroth & Bruder [AB15]). Beim Führen eines Fahrzeugs werden üblicherweise anzunehmende Bewegungen des Fahrzeugs und somit auch des Fahrzeugführers durch visuelle Vorausschau antizipiert, somit können Informationen aus der vestibulären Wahrnehmung mit den getroffenen Annahmen entweder übereinstimmen oder diesen widersprechen, was zum Erkennen einer „falschen Bewegung“ führen kann (Förster [För92]). In Tabelle 3.2 sind vestibuläre Wahrnehmungsschwellen für verschiedene fahrdynamische Bewegungsgrößen zusammengefasst.

Bewegungsgröße	Größensymbol	Wahrnehmungsschwelle
Querschleunigung	a_y	$0,18 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
Ruck in Querrichtung	$\ddot{y}$	$0,09 \frac{\text{m}}{\text{s}^3}$
Giergeschwindigkeit	$\dot{\Psi}$	$\frac{5^\circ}{\text{s}}$ bis $\frac{12^\circ}{\text{s}}$
Gierbeschleunigung	$\ddot{\Psi}$	$\frac{2^\circ}{\text{s}^2}$ bis $\frac{6^\circ}{\text{s}^2}$
Gierruck	$\ddot{\ddot{\Psi}}$	$\frac{1^\circ}{\text{s}^3}$ bis $\frac{3^\circ}{\text{s}^3}$

Tabelle 3.2: Vestibuläre Wahrnehmungsschwellen aus Abendroth & Bruder [AB15] nach Tomasko [Tom83]

3.1.5 Wahrnehmung relevanter Informationen

In den vorigen Kapiteln wurden die für der Fahrzeugführung relevanten Informationskanäle beschrieben. Es stellt sich nun die Frage, welche Informationen der menschliche Fahrer mittels dieser Informationskanäle aufnimmt und – noch wichtiger – welche Bedeutung diese für die Bewältigung der Fahraufgabe haben. Durch die Steuerung seines Blickes bzw. Kopfes legt der Fahrer fest, welche visuellen Informationen er potentiell aufnehmen kann. Des Weiteren nimmt der Fahrer fahrdynamische Informationen auf, welche ihm fortwährend Informationen über den Zustand des eigenen Fahrzeugs liefern und unmittelbar für den Menschen zu erfahren sind. Situative Informationen hingegen werden aus der Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern gewonnen.

3.1.5.1 Fahrdynamische Informationen

Für die Bewältigung der Fahraufgabe ist die Information über den aktuellen fahrdynamischen Zustand des eigenen Fahrzeugs unabkömmlich. Diese Informationen werden zu einem großen Teil visuell wahrgenommen – zumeist durch Blicke in die Umgebung, teilweise aber auch über Instrumente im Fahrzeug (vgl. Tabelle 3.3). Einige Informationen können nur auditiv oder vestibulär wahrgenommen werden, oftmals gibt es eine gewisse Redundanz bzw. übernehmen bestimmte Wahrnehmungskanäle eine Art Validierungsfunktion bzw. können bei widersprüchlichen Informationen auf Probleme hindeuten.

	visuell	vestibulär	haptisch	akustisch
Längs-/Quergeschwindigkeit	x			
Längs-/Querbesehleunigung		x	x	
Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug	x			
Fahrtgeräusch				x
Gas-/Bremspedalstellung			x	
Querabweichung	x			
Wank-/Nickwinkel	x	x		
Gierwinkel	x			
Kräfte in Stellgliedern			x	
Lenkradwinkel	x		x	
Giergeschwindigkeit	x	x		
Gierbesehleunigung		x		

Tabelle 3.3: Herkunft fahrdynamischer Informationen angelehnt an Zöllner [Zöl15]

Querabweichung Die laterale Spurposition bzw. Querabweichung y_δ bezeichnet den seitlichen Versatz des Fahrzeugs zu einer Bezugslinie entlang der Fahrbahn. Diese kann die seitliche Markierung des Fahrstreifens oder auch die – geschätzte – Fahrbahnmitte sein. Die Querabweichung wird rein visuell wahrgenommen, wobei das genaue Einschätzen des Abstands zur Grenze des Fahrstreifens Erfahrung und Kenntnis des eigenen Fahrzeugs erfordert, da die Begrenzungen der Fahrbahn oft durch das eigene Fahrzeug verdeckt werden. Der Rückspiegel kann daher dazu dienen, die eigene Position besser wahrnehmen zu können. Die Fahrbahnmitte ist im Gegensatz zur seitlichen Fahrbahnbegrenzung zwar nicht verdeckt, jedoch ist die genaue Positionierung derselben wegen der lateral verschobenen Sitzposition des Fahrers schwierig einzuschätzen.

Geschwindigkeit Die aktuelle Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs kann über verschiedene Informationskanäle wahrgenommen werden. Die einfachste – und genaueste¹ – Möglichkeit ist die visuelle Wahrnehmung über das Tachometer des Fahrzeugs. Des Weiteren kann die Geschwindigkeit über den optischen Fluss (vgl. Abschnitt 3.1.1.3) wahrgenommen werden, in Kurven ist die gefühlte Querbeschleunigung ein weiterer Anhaltspunkt. Über das Motorgeräusch sowie den aktuell eingelegten Gang können ebenso Annahmen über die Fahrgeschwindigkeit getroffen werden. Zusätzlich lassen allgemein Fahrgeräusche (Reifen, Wind) sowie haptische Rückmeldungen aus dem Lenkrad eine grobe Orientierung zu. Die eigene Fahrgeschwindigkeit wird jedoch häufig unterschätzt (Conchillo et al. [CRNR06]).

Beschleunigung Für die Längs-, aber auch für die Querbeschleunigung gilt, dass beide vor allem vestibulär wahrgenommen werden, eine haptische Rückmeldung über das Lenkradrückstellmoment kann jedoch ebenfalls zur Einschätzung der Querbeschleunigung genutzt werden (Tomaske [Tom83]). Die Längsbeschleunigung stellt für den Fahrer im Normalfall eine der weniger relevanten Informationen dar – die Beschleunigungen (es wird besonders stark gebremst oder beschleunigt) resultieren ja aus den vom Fahrer eingeleiteten Veränderungen der Stellungen von Gas- oder Bremspedal. Ein anderes Bild ergibt sich beispielsweise bei einem Auffahrunfall: Hier stellt die Beschleunigung eine wichtige Informationsquelle dar, um das Ausmaß des Aufpralls einschätzen zu können. Bei Kurvendurchfahrten kann die Querbeschleunigung ein wichtiges Kriterium für die Stabilitätssituation des eigenen Fahrzeugs darstellen.

Stellung des Fahrzeugs im Raum und abgeleitete Maße Der *Gierwinkel* ψ bezeichnet die Richtung des eigenen Fahrzeugs, diese ist dem Fahrer bezüglich der Weltkoordinaten zumeist nicht bekannt bzw. stellt keine relevante Information dar. Er dient jedoch als Bezugspunkt für die Wahrnehmung des *Gierwinkelfehlers* $\Delta\psi$, der aus dem Gierwinkel und einer an einem gedachten Sollkurs gebildeten Tangente gebildet wird. Der Gierwinkelfehler stellt nach Donges [Don77] bzw. Negele [Neg07] die bedeutendste² Größe für die Querregelung des Fahrzeugs dar. Davon zu unterscheiden ist der *Kurswinkel* ν – dieser entspricht der Bewegungsrichtung des Fahrzeugs, die Differenz aus Gier- und Kurswinkel ist der *Schwimmwinkel* β . Die Wahrnehmung des Kurswinkels kann zum einen über die Zeit geschehen, des Weiteren kann die Stellung des Lenkrads dabei behilflich sein, die aktuelle Fahrtrichtung zu bestimmen.

Die *Gierwinkelgeschwindigkeit* bzw. Gierrate $\dot{\psi}$ bezeichnet die Drehgeschwindigkeit des Fahrzeugs um die Hochachse und wird vor allem optisch mit Hilfe von Bildverschiebungsvektoren wahrgenommen (Wolf [Wol09]).

¹Hierbei ist zu beachten, dass die angezeigte Geschwindigkeit stets größer als die reale Geschwindigkeit ist, da die angezeigte Geschwindigkeit laut EU-Richtlinie 75/443/EWG nie über der realen Geschwindigkeit liegen darf. Erlaubt sind laut Paragraph 57 StVZO 10 % + 4 km/h Abweichung.

²Es folgen Krümmungsdifferenz $\Delta\kappa$ sowie Querabweichung y_δ .

Die *Gierwinkelbeschleunigung* $\ddot{\psi}$ hingegen wird ausschließlich vestibulär wahrgenommen (Schweigert [Sch02]) und stellt eine wichtige Informationsquelle für die Fahrzeugreaktion dar, da beispielsweise beim Einfahren in eine Kurve die Gierwinkelbeschleunigung früher als die Gierwinkelgeschwindigkeit bzw. der Gierwinkel wahrgenommen werden können.

Wank- und *Nickwinkel* spielen im normalen Straßenverkehr kaum eine Rolle (der *Wankwinkel* evtl. bei zu schnellen Kurvenfahrten, er kann sowohl visuell als auch vestibulär wahrgenommen werden). Bei Bremsmanövern oder starken Beschleunigungen kann sowohl visuell als auch vestibulär ein Nicken des Fahrzeugs wahrgenommen werden. Bei starken Steigungen können die visuell wahrgenommenen Informationen bzgl. des Nickwinkels den vestibulären widersprechen.

Straßenkrümmung Die Straßenkrümmung wird visuell wahrgenommen und ist eine entscheidende Information für die Planung der Geschwindigkeit für eine zu befahrende Kurve. Jürgensohn et al. [JNW89] bzw. Land & Lee [LL94] haben das Blickverhalten bei Kurvenfahrten untersucht und kamen zu dem Schluss, dass die Information über die Kurvenkrümmung mittels des Tangentenpunkts abgeleitet werden kann. Dieser wird etwa 1 s bis 2 s vor Einfahrt in die Kurve fixiert und mit dem aktuellen Gierwinkel des Fahrzeugs verglichen.

Spreizwinkel Ein weiteres Maß für die Orientierung auf der Fahrbahn ist der Spreizwinkel (engl. „splay angle“, Beall & Loomis [BL97]). Dieser beschreibt den Winkel zwischen der Senkrechten und einem ebenfalls linearen Element, zumeist der äußeren Fahrbahn- oder Fahrspurmarkierung, Leitplanken oder andere lineare Reize (z. B. aufgereichte Bäume) können jedoch ebenso als Informationsquelle verwendet werden. Die Größe des Spreizwinkels hängt umgekehrt proportional von der Höhe des Betrachters sowie direkt proportional vom seitlichen Abstand zur äußeren Linie ab. Eine Positionsregelung relativ zur Fahrbahnmitte ist bei geraden Straßen somit mittels Spreizwinkel möglich – eine mittige Position ist dann erreicht, wenn linker und rechter Spreizwinkel etwa gleich groß sind. Jedoch muss beachtet werden, dass ein Offset zwischen Fahrzeugmitte und Fahrerposition vorhanden ist.

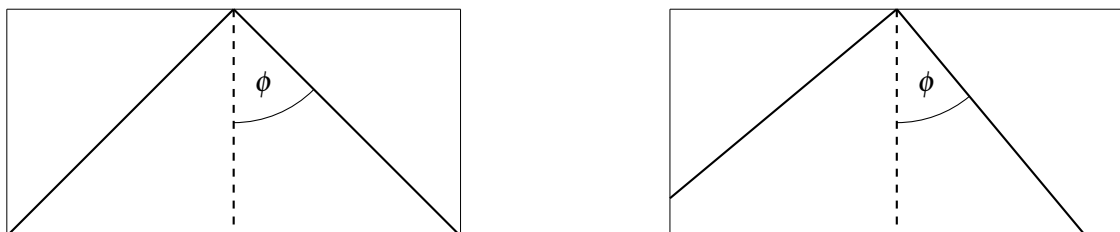


Abbildung 3.10: Spreizwinkel von Fahrbahnbegrenzungen: Bei lateraler Positionsänderung in Richtung des rechten Fahrbahnrandes verringert sich der der Spreizwinkel ϕ .

Solltrajektorie Eine etwas abstraktere – jedoch für Regelungsalgorithmen unverzichtbare – Information bietet die Solltrajektorie³, welche den gedachten zukünftigen Pfad beschreibt, den der Fahrer abzufahren wünscht. Die Existenz einer solchen für den menschlichen Fahrer ist im besten Fall umstritten, in bestimmten Kontexten jedoch nachvollziehbar vorhanden, z. B. bei Rennfahrern, aber auch bei sehr engen Strecken – im letzteren Fall wird diese dann durch die Spurmitte festgelegt und entspricht dann einer Erweiterung des Konzepts der Querabweichung zur Spurmitte um eine Dimension, wobei diese zeitlich oder örtlich (s-Koordinate) interpretiert werden kann.

Eine Art „Minimalsollkurs“ beschreibt das Zwei-Punkt-Modell von Land [Lan01]: Er fasst die unterschiedlichen Beiträge des Fern- und Nahsehens auf das Fahrverhalten folgendermaßen zusammen: Die weit entfernten Regionen der Straße (inklusive des Tangentenpunkts) versorgen den Fahrer mit Informationen über die zukünftige Straßenkrümmung, das nahe Sichtfeld hilft beim Bestimmen der Position innerhalb der Spur (analog zum Zwei-Ebenen-Modell in [Don78]). Salvucci & Gray [SG04] argumentieren ähnlich: Menschliche Autofahrer benötigen mehr als nur die Informationen eines Punktes, sondern zumindest einen Fernpunkt mit einer Zeitlücke von maximal zwei Sekunden sowie einen Nahpunkt, der sich etwa fünf Meter mittig vor dem Fahrzeug befindet.

Informationen aus dem Fahrzeug Die Stellungen bzw. Rückmeldungen der Bedienelemente des Fahrzeugs bilden eine weitere Informationsquelle für den Fahrer. Der *Lenkradwinkel* beschreibt die aktuelle Position des Lenkrads und wird in Grad angegeben. Der Mensch kann diese Information optisch wahrnehmen, die Information verliert mit steigender Geschwindigkeit jedoch an Bedeutung, da der Bereich, in dem sich das Lenkrad befinden kann entsprechend kleiner wird. Bei stehendem Fahrzeug kann über die Information der Stellung des Lenkrads auf die Stellung der Räder geschlossen werden, so kann eine erwartete Fahrrichtung beim Losfahren erzeugt werden. Das Lenkradmoment hingegen gewinnt mit steigenden Geschwindigkeiten als Informationsquelle an Bedeutung, da ein direktes Feedback zum (dynamischen) Fahrverhalten des Fahrzeugs vorhanden ist.

Die *Gaspedalstellung* wird haptisch wahrgenommen, und hilft bei der Einschätzung, ob die aktuelle Geschwindigkeit beibehalten wird oder es zu Beschleunigung bzw. Verzögerung des Fahrzeugs kommen wird. Die Position des Bremspedals – die *Bremspedalstellung* – wird vor allem über den Bremsdruck, jedoch ebenfalls haptisch wahrgenommen. Diese Information dient vor allem der Regelung der Verzögerung.

3.1.5.2 Situative Informationen

Die in diesem Abschnitt zusammengefassten Informationen haben gemeinsam, dass sie relative Kenngrößen darstellen, welche nur bei Vorhandensein weiterer Referenzgrößen – zumeist andere

³Exakt formuliert verwendet ein technischer Regler zumeist nur *einen* aktuellen Sollwert.

Verkehrsteilnehmer – existieren. Diese Informationen werden zum überwiegenden Teil visuell aufgenommen bzw. basieren auf visuell aufgenommenen Informationen. Sie sind teilweise nur indirekt als gelernte bzw. geübte Interpretationen von fahrdynamischen Informationen des eigenen sowie des Bezugsfahrzeugs wahrnehmbar.

Informationen über das vorausfahrende Fahrzeug Eine wichtige Information für die Folgefahrt (vgl. Abschnitt 3.5.1) ist die *longitudinale Distanz* zum vorausfahrenden Fahrzeug. Diese kann zum einen direkt über die menschliche Tiefenwahrnehmung, z. B. anhand bekannter Größenrelationen, oder indirekt, z. B. mit Hilfe der eigenen Geschwindigkeit und den in einer bestimmten Zeit zurückgelegten Weg, abgeschätzt werden.

Es existieren differentielle Wahrnehmungsschwellen für die minimal wahrzunehmenden Änderungen, diese werden als „just noticeable difference“ (JND) bezeichnet. Für die relative Geschwindigkeit, die auch als zeitliche Veränderung des Sehwinkels beschrieben werden kann, liegen die JND-Werte bei etwa $0,003 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ (Hoffman & Mortimer [HM94]). Für die relative Distanz liegt die JND bei etwa 10 % des Abstandes (Brackstone & McDonald [BM99]).

Die *Winkelrichtung* bezüglich eines Objektes kann giewinkelbezogen (also relativ zur Fahrzeuglängsachse) oder kurswinkelbezogen (relativ zur Fahrzeugbewegung) gemessen werden. Bezüglich weiterer wahrgenommener Objekte entspricht die Ableitung der Winkelrichtung der Bewegungsparallaxe (Grzesik [Grz09]).

Aus dem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug sowie den Geschwindigkeiten der Fahrzeuge lassen sich mehrere Maße ableiten:

Änderung des Abstands zum Bezugsfahrzeug Eine Änderung des Abstands zu einem Bezugsfahrzeug wird rein visuell wahrgenommen. Ein negativer Wert – also eine Verringerung des Abstandes – ist für den Fahrer von größerer Bedeutung und wird nach Todosiev [Tod63] auch früher wahrgenommen, da eine potentiell gefährlichere Situation entstehen kann. Daher wird die Wahrnehmung eines hohen negativen Wertes (bei einem vorausfahrenden Fahrzeug) zumeist durch aufleuchtende Bremslichter des Fahrzeugs unterstützt. Abstandsänderungen können nur oberhalb einer bestimmten Wahrnehmungsschwelle erkannt werden, nach Filzek [Fil02] hängt dies bei „größeren“ Relativgeschwindigkeiten nach Untersuchungen von Michaels [Mic63] vom Abstand und der Relativgeschwindigkeit bzgl. des entsprechenden Fahrzeugs ab. Zusätzlich spielt es eine Rolle, inwiefern die Aufmerksamkeit des Fahrers auf das Bezugsfahrzeug gerichtet ist.

Geschwindigkeitsdifferenz Die Geschwindigkeitsdifferenz bzw. Relativgeschwindigkeit bezeichnet die Differenz der Geschwindigkeit eines Bezugsfahrzeugs und der des eigenen Fahrzeugs. Nach Wiedemann [Wie74] stellt die Änderung der Bildgröße, die über die Winkelverhältnisse direkt von der Größe und der Entfernung des beobachteten Objekts abhängt, für

die Relativbewegung den entscheidenden Reiz dar. Die Wahrnehmungsschwelle für negative Relativgeschwindigkeiten liegt nach Todosiev [Tod63] ebenso unter der positiver Relativgeschwindigkeiten. Die Wahrnehmungsschwellen $\Delta v+$ und $\Delta v-$ aus den Simulatorversuchen für die Folgefahrt betragen ca. 2 % bis 10 % der Eigengeschwindigkeit.

Längsbeschleunigungsdifferenz In bestimmten Situationen kann diese Größe zur Konkretisierung der Situation beitragen, sie beschreibt die Differenz der Beschleunigungen eines Fremdfahrzeugs und des eigenen Fahrzeugs. Beispielsweise kann dieser Wert bei einer geringen TTC darüber Auskunft geben, wie sich die TTC in Zukunft entwickeln wird (beispielsweise beim Auffahren auf ein stark bremsendes Fahrzeug).

Zeitlücke Die Zeitlücke (ΔT) in Sekunden, beschreibt die Zeit, welche vergeht, bis das eigene Fahrzeug eine Straßenposition befährt, auf welcher sich das vorausfahrende Fahrzeug noch unlängst befand. Die Zeitlücke kann nicht direkt wahrgenommen werden, da zu mehreren Zeitpunkten bewusst gemessen werden muss. Winner [WBFL03] fasst zusammen, dass bei reinen Folgefahrten Zeitlücken von 1,1 s bis 1,7 s gemessen wurden. Die Bruttozeitlücke ergibt sich mathematisch aus dem Abstand des Vorderfahrzeugs zum Ego-Fahrzeug (Bug-zu-Bug) geteilt durch die Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs. Die Nettozeitlücke kann dementsprechend anhand des Heck-zu-Bug-Abstandes des vorherfahrenden Fahrzeugs bestimmt werden.

$$\Delta T_{Brutto} = \frac{\Delta FFZ_{Bug}}{v_{EGO}} \quad (3.1)$$

$$\Delta T_{Netto} = \frac{\Delta FFZ_{Heck}}{v_{EGO}} \quad (3.2)$$

Time-To-Collision Die Time-To-Collision (TTC, vgl. Abbildung 3.11) gibt die Zeit in Sekunden an, in welcher zwei Verkehrsteilnehmer bei angenommener konstanten Relativgeschwindigkeit und ebenso konstantem Kurs kollidieren, wobei Werte unter 1,5 s als kritisch gelten (Bubb, [BBGV15]). Im Unterschied zur Zeitlücke wird eine – jedoch konstante – Relativgeschwindigkeit verwendet, was die Validität einer Kollisionsvorhersage bedeutend erhöht. Der Mensch nimmt die TTC nach Lee [Lee76] bzw. [Lee80] vor allem über den optischen Fluss wahr: Die τ -Variable beschreibt die reziproke Korrelation der Ausdehnungsgeschwindigkeit eines retinalen Abbilds des betrachteten Objekts und der TTC.

Somit kann der Mensch die TTC direkt „ablesen“ und muss diese nicht aus den Informationen „Abstand“ und „Relativgeschwindigkeit“ herleiten. Diese Fähigkeit ist in mehreren Untersuchungen validiert worden (z. B. von Bootsma [BO93b], Gray & Regan [GR98] sowie von Cavallo & Laurent [CL88]). Ein Ergebnis dieser Untersuchungen ist, dass für eine sinnvolle Schätzung die Winkelgeschwindigkeit des Objekts oberhalb eines Schwellwerts von ca. 0.003 rad/s liegen

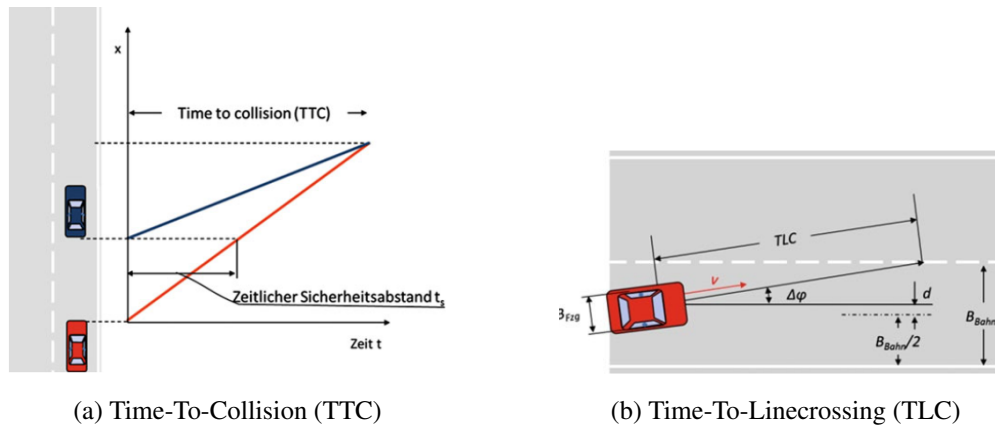


Abbildung 3.11: TTC und TLC aus Bubb [BBGV15]

sollte. Die alleinige Herleitung über die τ -Variable wird jedoch auch kritisiert (z. B. Tresilian [Tre99]), so können situationsspezifisch auch andere Informationen für die TTC verwendet werden. Typisch ist, dass die TTC oft unterschätzt wird (die Werte liegen nach Cavallo & Cohen [CC01] etwa 20 % bis 30 % unter dem realen Wert). Nach Hoffmann & Mortimer [HM94] werden große Werte (über 10 Sekunden) zumeist ungenau geschätzt, kleinere TTC-Werte jedoch recht genau.

$$T_{TC} = \frac{\Delta FFZ}{v_{EGO} - v_{FFZ}} \text{ mit } (v_{EGO} - v_{FFZ}) > 0 \quad (3.3)$$

Time-To-Linecrossing Die Time-To-Linecrossing (TLC, vgl. Abbildung 3.11) umschreibt die Zeit bis zu einem möglichen – seitlichen – Verlassen der aktuellen Fahrspur bei angenommener Unveränderlichkeit bestimmter Fahrzeugzustände. Oft werden Lenkwinkel bzw. Gierwinkel sowie Fahrzeuggeschwindigkeit verwendet, jedoch kann auch die Gierwinkelgeschwindigkeit verwendet werden. Die TLC kann als die Zeit, in der der Fahrer noch die Möglichkeit zur Kurskorrektur besitzt, interpretiert werden. Nach Aasman [Aas95] kann die TLC ähnlich der TTC vom Fahrer visuell wahrgenommen werden, jedoch wird die Wahrnehmung nicht weiter beschrieben. Versuche von Godthelp et al. [GMB84] ergaben, dass Fahrer bei TLCs kleiner 1,3 s anfangen, den Kurs zu korrigieren. Bubb nennt eine mittlere TLC bei Simulatoruntersuchungen von 3,7 s (Bubb [BBGV15]). Ein ähnliches Maß ist die Time-To-Intersection (TTI), also die Zeit bis zur nächsten Kreuzung.

3.2 Informationsverarbeitung

Die menschliche Informationsverarbeitung stellt die Summe der mentalen Prozesse zwischen Informationsaufnahme und Handlung dar. Seit einem guten Jahrhundert wird bereits daran geforscht, diese *kognitiven* Prozesse zu beschreiben und zu verstehen. Im Allgemeinen werden

diesen Begriffe wie *Aufmerksamkeit*, *Problemlösen*, *Gedächtnis* etc. zugeordnet. Dieses Kapitel widmet sich diesen im Kontext des menschlichen Fahrens.

Modell der menschlichen Informationsverarbeitung nach Wickens Die Verarbeitung von Informationen zum Behufe der Generierung von Handlungsanforderungen ist eine der Hauptaufgaben des menschlichen Gehirns. Im Allgemeinen wird diese Verarbeitungskette als eine sequentielle angenommen: Die mittels der dem Menschen zur Verfügung stehenden Sensorik aufgenommenen Stimuli (vgl. Abschnitt 3.1) werden innerhalb des Gehirns in kognitive Repräsentationen umgewandelt, mit deren Hilfe mittels unterschiedlicher Prozesse Vorgaben für die motorischen Prozesse erzeugt werden. Ein einfaches sequentielles Modell der Funktion der menschlichen Informationsverarbeitung wurde bereits 1868 von Donders als Reiz-Reaktionsmodell vorgestellt [Don68]. Er nannte die drei wesentlichen Verarbeitungsstufen „Wahrnehmen“, „Entscheiden“ und „Handeln“. Im in der Ingenieurspsychologie gängigen Vier-Stufen-Modell der menschlichen Informationsverarbeitung nach Wickens [WH00] (vgl. Abbildung 3.12) besteht die serielle Verarbeitungskette aus vier Komponenten:

- 1.) *sensorischer Kurzspeicher*: Die wahrnehmbaren Informationen müssen an den dem Menschen zur Verfügung stehenden Sensoren anliegen, um vom Gehirn weiterverarbeitet werden zu können. Die Signale werden im sensorischen Gedächtnis für wenige Sekunden zwischengespeichert (Abschnitt 3.2.1).
- 2.) *Wahrnehmung*: Vorhandene Informationen aus den Sensoren werden in diese Stufe verarbeitet und interpretiert. Dieses geschieht sehr schnell im Vergleich zu den Operationen, welche kognitive Prozesse benötigen. Zum einen geschieht dies basierend auf den vorhandenen Sensoreingaben („bottom-up“), zum anderen basierend auf Informationen aus dem Langzeitgedächtnis, was einem „top-down“ bzw. erwartungsbasierten Verhalten entspricht (Abschnitt 3.1).
- 3.) *Entscheidung*: Nachdem mittels unterschiedlicher kognitiver Prozesse mehrere Handlungsalternativen generiert wurden, wird sich für eine dieser Handlungen entschieden (Abschnitt 3.2.3).
- 4.) *Handlungsausführung*: Die Ausführung der ausgewählten Handlung (Abschnitt 3.3).

Weitere Komponenten beeinflussen die vier beschriebenen Stufen maßgeblich:

- *Aufmerksamkeit*: Aufmerksamkeitsprozesse bestimmen, welche kognitiven Ressourcen für die Wahrnehmung bzw. Verarbeitung von Informationen verwendet werden (Abschnitt 3.4.1).
- *Gedächtnis*: Unterschiedliche Gedächtnisse existieren für sich unterscheidende Typen von zu speichernder Information. Im *Langzeitgedächtnis* werden dauerhaft Daten gespeichert, während das *Kurzzeitgedächtnis* nur wenige Informationen für kurze Zeitspannen auf-

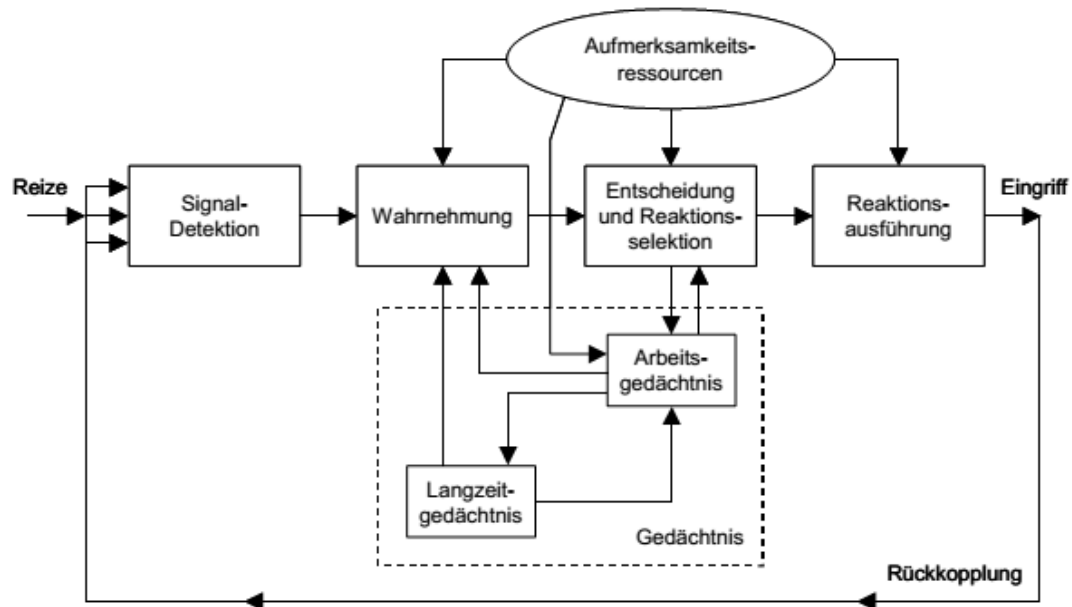


Abbildung 3.12: Schema der menschlichen Informationsverarbeitung nach Wickens [WH00]

rechterhalten kann. Das *Arbeitsgedächtnis* liefert Informationen, die für die momentan stattfindenden kognitiven Prozesse notwendig sind (Abschnitt 3.2.1).

- *Kognition*: Eine Vielzahl von unterschiedlichen Prozessen, die im Gehirn stattfinden, beispielsweise *Kategorisieren*, *Planen*, *Problemlösen* oder *Lernen* werden unter der Kategorie „kognitive Prozesse“ zusammengefasst. Im Hinblick auf die Fahrzeugführung wird auf diese im Abschnitt 3.2.2 vertiefend eingegangen.

Ähnliche Modelle (z. B. COCOM⁴ [Hol93]) verwenden ebenfalls vier Hauptkomponenten, um menschliche Informationsverarbeitung zu beschreiben. Hollnagel kritisiert an einer derartigen Modellstruktur jedoch, dass der Mensch als zu reaktiv im Sinne eines geschlossenen Regelkreises modelliert wird und proaktives, zielorientiertes Verhalten somit keine Beachtung findet [Hol02]. Eine Erweiterung des Wickens'schen Modells um die Einflussgrößen *Motivation* und *Emotion* beschreibt Trimmel (Integratives Motivation-Emotion-Modell (IMEK), [Tri15], vgl. Abbildung 3.13).

Während des Führens eines Fahrzeugs wird mitnichten für jede erzeugte Handlung die komplette Informationsverarbeitungskette durchlaufen. Je nach aktueller Fahraufgabe werden die Informationen wissensbasiert, regelbasiert oder fertigkeitbasiert verarbeitet (Rasmussen [Ras83], vgl. auch Abbildung 2.6). Das Wicken'sche Modell lässt diese „Abkürzungen“ innerhalb des Modells zu: Wird regelbasiert agiert, so müssen weniger kognitive Kapazitäten für eine Planung der Ausführung aufgewendet werden, da auf bekannte Handlungsweisen zurückgegriffen werden

⁴Contextual Control Model

Integratives Motivation-Emotion-Kognition-Modell

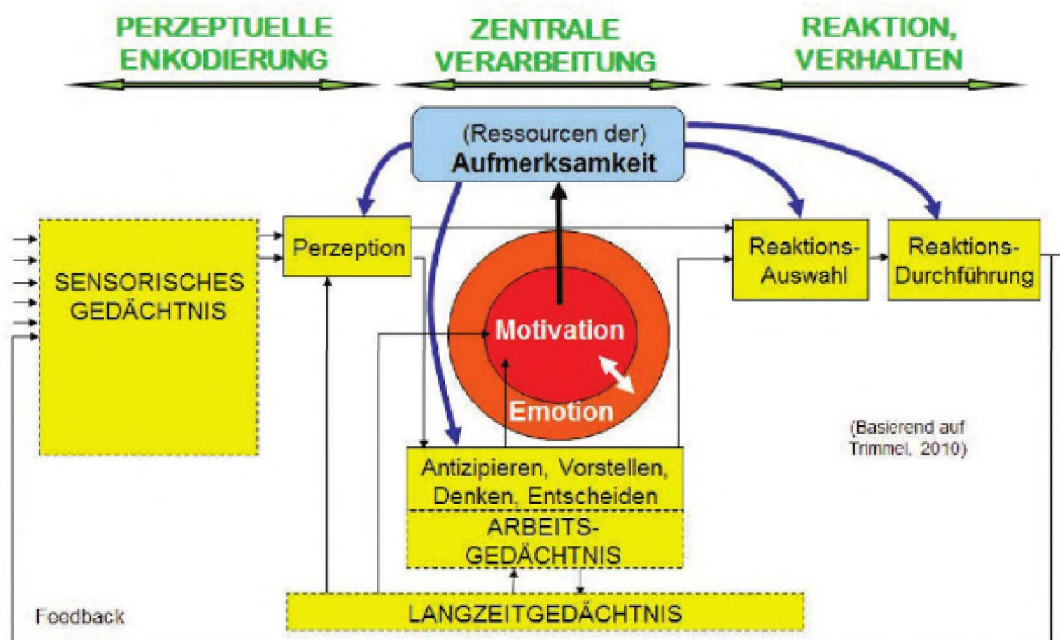


Abbildung 3.13: Integratives Motivation-Emotion-Modell aus Trimel [Tri15]

kann. Auf der Ebene der fertigkeitsbasierten Handlungen – aus denen das Führen eines Fahrzeugs (zumindest für geübte Fahrer) größtenteils besteht – werden die meisten kognitiven Prozesse direkt übersprungen, so dass die Handlungsausführung durch Reiz-Reaktions-Automatismen („automated patterns“) direkt erfolgen kann.

3.2.1 Gedächtnis

Ein elementarer Bestandteil des menschlichen Informationsverarbeitungsapparats ist das menschliche Gedächtnis. Analog zu jedem anderen funktionierenden Datenverarbeitungssystem kommt dieser nicht ohne eine (Zwischen-)Speicherung von Daten aus. Man unterscheidet zwischen *sensorischem Gedächtnis*, *Kurzzeitgedächtnis* und *Langzeitgedächtnis*. Im *sensorischen Gedächtnis* (auch *Ultraschallzeitgedächtnis* genannt) werden Informationen der Sinnesorgane für eine sehr kurze, sinnesmodalitätsspezifische Zeit zwischengespeichert. Beispielsweise können visuelle Signale im sogenannten *ikonografischen Gedächtnis* für wenige 100ms gespeichert werden (Haber & Standing [HS70], Long [Lon80]). Auditive Signale werden im *echoischen Gedächtnis* für etwa 2s zwischengespeichert (Darwin et al. [DTC72]).

Durch Zuwendung von Aufmerksamkeit werden Informationen aus den sensorischen Speichern aufgenommen und an das *Kurzzeitgedächtnis* übertragen. Die grundlegenden Einheiten, auf welche im Kontext des Gedächtnisses immer wieder referenziert wird, ist ein *Chunk*, das Kurz-

zeitgedächtnis kann etwa 7 ± 2 dieser Chunks speichern (Miller et al. [Mil56]), wobei neuere Untersuchungen teilweise geringere Werte ergaben, zumeist im Bereich von 3 – 4 Chunks (Cowan [Cow08]). Die Reihenfolge der im Kurzzeitgedächtnis gespeicherten Informationen entspricht der ihres Eintreffens, neue Informationen ersetzen die zuerst gespeicherten, aus informatischer Sicht kann man sich den Aufbau ähnlich dem eines Ringpuffers vorstellen. Neben der kapazitiven Obergrenze existiert ebenso eine zeitliche: Nach etwa 10 – 15 Sekunden (Wickens & Hollands [WH00]) verfallen Informationen im Kurzzeitgedächtnis (ohne Auffrischen der Informationen). Das *Langzeitgedächtnis*, welches Informationen dauerhaft speichert, kann in das *deklarative* (explizite) sowie das *prozedurale* (implizite) Gedächtnis unterteilt werden. Im *deklarativen* Gedächtnis werden Fakten gespeichert, welche semantischer, also abstrakter und begriffsbezogener Natur oder episodische Fakten, die z. B. autobiographische Informationen sein können. Das *prozedurale* Gedächtnis hingegen speichert Erinnerungen, die beinhalten, *wie* bestimmte Handlungen, beispielsweise das Autofahren durchgeführt werden. Diese Erinnerungen an Fertigkeiten werden nicht bewusst abgerufen.

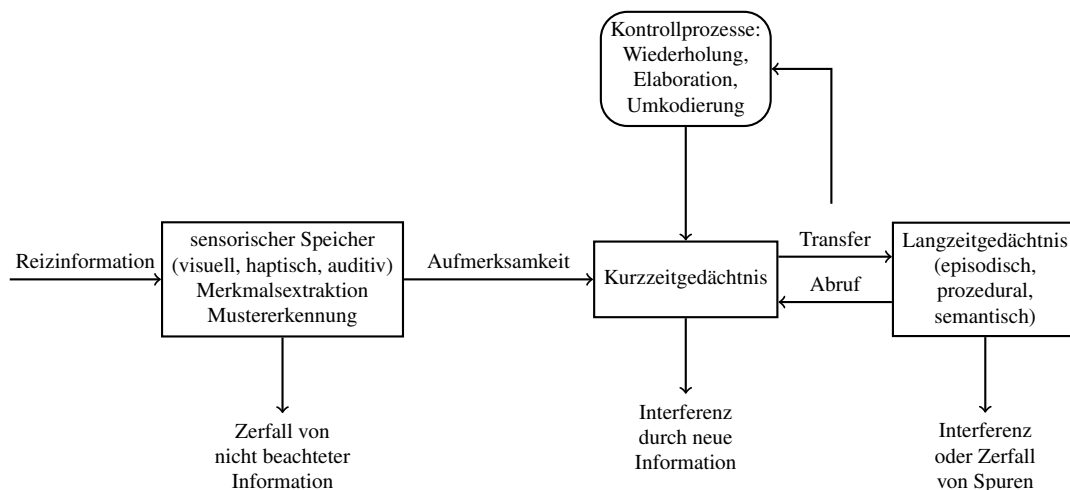


Abbildung 3.14: Dreistufiges Gedächtnismodell nach Atkinson & Shiffrin [AS68]

3.2.1.1 Arbeitsgedächtnis

Das Konzept des *Arbeitsgedächtnisses* ist im Kontext der kognitiven Modellierung von besonderer Relevanz. Es unterscheidet sich von dem des Kurzzeitgedächtnisses vor allem darin, dass im Gegensatz zu diesem die Möglichkeit zur Manipulation und Verarbeitung der gespeicherten Informationen besteht. Wickens & Hollands [WH00] fassen daher Arbeitsgedächtnis und Kognition zu einer gemeinsamen Stufe des Informationsverarbeitungsprozesses zusammen, da diese permanent interagieren. Baddeley & Hitch [BH74] beschreiben das Arbeitsgedächtnis als ein aus mehreren Komponenten bestehendes komplexes System, welches selbst Informationen speichert und manipuliert und sich physisch vom Kurzzeitgedächtnis unterscheidet. Es besteht aus einer zentralen, kontrollierenden Exekutive, welche für einen kurzen Zeitraum für die momentane

Informationsverarbeitung und Speicherung von Informationen sowie für die Verbindung zum Langzeitgedächtnis zuständig ist, einer phonologischen Schleife, welche auditorische Informationen speichert, dem räumlich visuellen Notizblock, in dem optische Informationen gespeichert werden sowie dem episodischen Puffer, der für multimodale, zusammenhängende Informationen zuständig ist (vgl. Abbildung 3.15). Der episodische Puffer wurde später von Baddeley [Bad00] hinzugefügt, nachdem eine Beteiligung des Langzeitgedächtnisses ausgeschlossen wurde. Erst Cowan [Cow08] beschreibt das Arbeitsgedächtnis als „Kurzzeitgedächtnis, kombiniert mit unterschiedlichen Verarbeitungsmechanismen, mit deren Hilfe das Kurzzeitgedächtnis sinnvoll verwendet werden kann“. Gugerty [Gug97] führt ein dynamisches räumliches Arbeitsgedächtnis („dynamic spatial working memory“) für die mentale Repräsentation des Umgebungsverkehrs ein. Auch nach Baumann & Krems [BFK08] existiert eine mentale Repräsentation des Umgebungsverkehrs, welche mit Hilfe des Arbeitsgedächtnisses erzeugt wird. Dies konnte experimentell nachgewiesen werden. Ericsson & Kintsch [EK95] erweitern das Arbeitsgedächtniskonzept um das eines Langzeit-Arbeitsgedächtnisses. Dieses beschreibt, dass Teile des Langzeitgedächtnisses als Arbeitsgedächtnis dienen können, womit sich die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses theoretisch unbegrenzt erhöhen ließe. Einschränkend wirkt jedoch, dass die Verwendung des Langzeit-Arbeitsgedächtnisses vor allem auf Expertenwissen anwendbar ist.

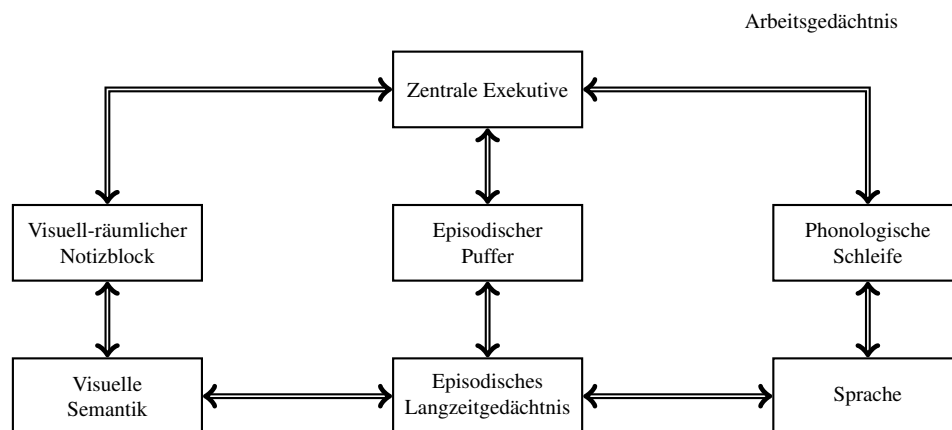


Abbildung 3.15: Schema des Arbeitsgedächtnisses nach Baddeley & Hitch [BH74] bzw. Baddeley [Bad00]

Fazit Im Bereich der Fahrermodellierung spielt das Gedächtnis eine erhebliche Rolle. So müssen beispielsweise die grundlegenden Verkehrsregeln als Faktenwissen in einer Art deklarativem Gedächtnis gespeichert werden, um im Bedarfsfall abgerufen werden zu können. Auch das prozedurale Gedächtnis wird – wenn auch nicht explizit – mit jedem regelungstechnischen Fahrermodell mitmodelliert. Des Weiteren sind fahrertypabhängige Unterschiede zu beachten: Ein Renn- oder Testfahrer fährt im Vergleich zum Normalfahrer viel mehr „aus dem Gedächtnis“. Das Konzept des Arbeitsgedächtnisses erlaubt die Modellierung von realistische(re)n Datengrundlagen menschähnlicher Fahrermodelle. Neben dem Arbeitsgedächtnis spielt das

Langzeitgedächtnis für die Fahraufgabe ebenfalls eine wichtige Rolle: In ihm sind beispielsweise die Verkehrsregeln oder komplexere Handlungsabläufe, die dem wissensbasierten Handeln zuzuordnen sind, hinterlegt.

3.2.2 Kognitive Prozesse

Im menschlichen Gehirn werden jederzeit – bewusst oder unbewusst – Informationen aufgenommen, verarbeitet und gespeichert. Birgt einer dieser Prozesse ein Mindestmaß an Abstraktion und Komplexität, so bezeichnet man diesen als einen kognitiven Prozess. Nach Volz [Vol00] grenzen sich kognitive Prozesse gegen folgende Sachverhalte ab: rein physiologische Vorgänge auf Zell- und Synapsenebene, neuronale Prozesse auf Zellebene (z. B. Reaktionen von Nervenzellen) oder auch einfache Wahrnehmungsleistungen (z. B. das Erkennen einfacher Muster). Anderson & Lebiere beschreiben Kognition schlicht als „process of thought“ [AL98]. Im Allgemeinen werden gedankliche Vorgänge wie Wahrnehmen, Assoziieren, (komplexes) Mustererkennen, Kategorisieren, Problemlösen, Planen, Erinnern, Lernen, Sprache bis hin zu Wollen oder Glauben als „kognitiver Prozess“ bezeichnet. Wickens & Hollands [WH00] beschreiben die Haupt Eigenschaften kognitiver Prozesse als „bewusste Aktivitäten, die Informationen transformieren oder speichern“, welche sich von den anderen Stufen ihres Modells unter anderem durch ihre langsamere Verarbeitungsgeschwindigkeit und ihren Bedarf an Aufmerksamkeitsressourcen unterscheiden. Wie diese Definition schon zeigt, ist die Abgrenzung von anderen innerhalb des Wickens'schen Informationsverarbeitungsparadigmas genannten Verarbeitungsstufen schwierig, ebenso wird die Reduktion auf bewusst ablaufende Prozesse oft nicht vorgenommen, beispielsweise definiert Schmidt [SLH07] kognitive Funktionen als „alle bewussten und nicht bewussten Vorgänge, die bei der Verarbeitung von organismusexterner oder -interner Information ablaufen“. Wahrnehmungs-, wie auch Gedächtnis- oder Aufmerksamkeitsprozesse können daher zu einem großen Teil ebenso als kognitiv bezeichnet werden, wurden jedoch schon in vorangegangenen Abschnitten beschrieben. In Rasmussens Modell [Ras83] sind kognitive Problemlöseprozesse notwendig mit der wissensbasierten Ebene verbunden. Nach Muthig [Mut90] ist weder eine strikte Definition bzw. Trennung noch eine voneinander unabhängige Untersuchung kognitiver Prozesse möglich.

Im Kontext dieser Arbeit wird daher in diesem Abschnitt auf jene kognitive Prozesse näher eingegangen, die Vorgänge im Gehirn bezeichnen, die im Kontext der Fahrzeugführung mittels Verarbeitung von Informationen dazu führen, Entscheidungen zu treffen und Handlungen ausführen zu können. Konzepte wie *mentale Modellbildung*, *Antizipation*, *Problemlösen* sowie *Handlungsplanung* stehen daher im Mittelpunkt dieses Abschnitts. Diese Prozesse haben gemein, dass sie eng mit dem Arbeitsgedächtnis verbunden sind, da sie Informationen aus diesem verwenden und manipulieren. *Entscheidungsfindung* sowie *Risikoabschätzung* werden im Sinne von Wickens & Hollands [WH00] separat behandelt.

3.2.2.1 Mentale Modellbildung und Antizipation

Die Einschätzung der aktuellen Situation geschieht basierend auf der mittels Wahrnehmung erlangten, eingeordneten und interpretierten Informationen über die Umwelt. Die im Arbeitsgedächtnis (vgl. Abschnitt 3.2.1.1) vorhandene Repräsentation eines wahrgenommenen Objekts oder einer Aufgabe mitsamt der ihm zugeordneten Eigenschaften wird als inneres oder mentales Modell bezeichnet. Mentale Modelle sind nach Norman [Nor83] inhärent unvollkommen (da oft stark vereinfacht), unbeständig (durch Vergessen gehen Inhalte verloren), nicht voneinander abgrenzbar (unterschiedliche mentale Modelle können sich überlappen) unwissenschaftlich (im Sinne einer Black Box können in dieser durchaus auch mystische Elemente vorhanden sein) und unökonomisch (manche Handlungen werden nicht optimiert, da sie ja funktionieren). Trotz all dieser Mängel stellen mentale Modelle die für einen Menschen zu jedem Zeitpunkt einzig vorhandene Wahrheit dar, auf deren Grundlage er handelt. Mentale Modelle werden nicht bewusst erzeugt und können daher bei geringer Inanspruchnahme kognitiver Ressourcen verwendet werden. Des Weiteren ändern sich mentale Modelle durch Erfahrung sowie Feedback, ebenso beeinflussen sie die Steuerung der Aufmerksamkeit und somit auch das Situationsbewusstsein. Für die zweite Stufe des Situationsbewusstseins (Verstehen) ist die Existenz mentaler Modelle zwingend notwendig.

Im Kontext der Fahrzeugführung ergibt die Summe der mentalen Modelle (des eigenen Fahrzeugs, anderer Verkehrsteilnehmer und Objekte, der Straßengeometrie usw.) ein durch die kognitiven Fähigkeiten bzw. Einschränkungen des Fahrers gefiltertes, subjektives Abbild der realen Situation. Mentale Modellbildung ist ein Prozess, der sich bezüglich Rasmussens Schema in die Ebenen der regel- und wissensbasierten Handlungen einordnen lässt. Wenn also sensumotorische Programme für die momentan zu lösende Problemstellung vorhanden sind, werden mentale Modelle nicht oder in nur sehr geringem Umfang verwendet.

Die Annahme über zukünftiges Verhalten ist ebenso ein Bestandteil mentaler Modelle. Die Verortung dieser Antizipationsprozesse im Wickens'schen Schema der Informationsverarbeitung ist jedoch nicht eindeutig vorzunehmen, da diese zum einen im Bereich der Wahrnehmung anzusiedeln sind, aber auch Einfluss auf den Entscheidungsprozess haben. In Endsleys Definition des Situationsbewusstseins (vgl. auch Abschnitt 3.4.3) ist Antizipation die dritte und letzte Stufe. Sommer [Som13] hingegen interpretiert Antizipation als eigenständige Stufe in einem ebenfalls vierstufigen Informationsverarbeitungsmodell (bestehend aus sensorischer Wahrnehmung, kognitiver Verarbeitung, Antizipation und Entscheidung).

Ein weiterer Aspekt der mentalen Modellbildung besteht aus der Einordnung eines Objekts in eine bestimmte Kategorie. Mit zunehmender Erfahrung nimmt die Anzahl der Modelle bzw. Modellkategorien zu, so dass eine immer genauere Einschätzung und somit eine zunehmende Annäherung des subjektiven mentalen Modells an die objektiven Eigenschaften stattfindet. Dies gilt ebenso für die Wahrnehmung von Situationen, beispielsweise können Vorfahrtsregelungen in komplexen Kreuzungssituationen gelernt werden, so dass die kognitive Leistung nicht mehr aus

dem kompletten Durchdringen der Situation besteht, sondern „nur“ noch das richtige mentale Modell ausgewählt und parametrisiert werden muss.

Bezüglich eigener Handlungen unterscheidet Bubb [BBGV15] bei mentalen Modellen zwischen „Wahrnehmungs-Handlungs-Modellen“ und „Handlungs-Wahrnehmungs-Modellen“. Erstere bestehen aus den aus der Wahrnehmung abgeleiteten motorischen Handlungen, beinhalten also eine Vorstellung einer noch durchzuführenden Handlung, während letztere die Vorstellung der zukünftig wahrzunehmenden Situation aufgrund einer Handlung darstellen. Bei Übereinstimmung bzw. geringen Abweichungen der Vorstellungen vom wahrgenommenen Ergebnis bleibt der komplette Vorgang im Bereich des Unbewussten. Bei wahrgenommenen Unterschieden (z. B. einer unvorhergesehenen Aktion eines anderen Verkehrsteilnehmers oder nicht geplantem Verhalten des eigenen Fahrzeugs) werden hingegen Entscheidungsprozesse notwendig, der Pfad des Unbewussten wird verlassen. Ein (gutes) mentales Modell ist nicht unmittelbar von den wahrnehmbaren Informationen abhängig: So kann ein momentan verdecktes Fahrzeug – falls das mentale Modell ein plötzliches Verschwinden oder Anhalten nicht beinhaltet – in der Vorstellung des Fahrers immer noch vorhanden sein. Ähnliches gilt auch reziprok: Ein sichtbares Fahrzeug muss nicht zwangsläufig als mentales Modell existieren, wenn es aufgrund kognitiver Überlastung oder fehlender Aufmerksamkeit übersehen wird. Mentale Modelle können analog zu Chunks interpretiert werden: Aktuell verwendete mentale Modelle befinden sich im Arbeitsgedächtnis, die Anzahl gleichzeitig vorhandener Modelle ist somit begrenzt. Die Genauigkeit eines mentalen Modells bezüglich der objektiven Eigenschaften des real existierenden Objekts ist stark von den individuellen Eigenschaften des Fahrers (z. B. Erfahrung oder Ortskenntnis) abhängig.

Fazit Mentale Modelle stellen im Kontext der Fahrermodellierung ein sinnvolles Werkzeug dar, um die dem Fahrer präsenten Informationen modellieren zu können. Nichtsdestoweniger bildet die Parametrierung eines solchen Modells immer die subjektive Sicht des Modellierers ab, da objektive Daten über mentale Modelle aus offensichtlichen Gründen nicht existieren. Mittels des Chunking-Konzepts lassen sich jedoch realistisch die Grenzen der kognitiven Verarbeitungskapazität bezüglich bewusster Prozesse in komplexen Verkehrssituationen simulieren. Mentale Modelle bilden in der menschlichen Informationsverarbeitung die Grundlage für den Entscheidungsprozess.

3.2.2.2 Problemlösen und Handlungsplanung

Problemlösen kann nach Freud als „inneres Probehandeln“ beschrieben werden (Blech [Ble10]). Diese kurze Definition beschreibt diesen kognitiven Prozesses erstaunlich treffend. Anders ausgedrückt besteht Problemlösen aus einer gedachten Handlung, die von einem (unbefriedigenden) Istzustand zu einem (befriedigenden) Sollzustand führt. Etwas technischer beschreibt dies Newell [NS72]: Ein Problem besteht demnach aus drei Teilen: einem *Ausgangszustand*, einem *Zielzustand* sowie einer Menge an *Operationen*, welche die Schritte beschreiben, die vom Ausgangs-

zum Zielzustand führen. Die sich stellende Aufgabe besteht somit darin, eine Superposition der zur Verfügung stehenden Operationen zu finden, welche das Problem löst. Um ein Problem lösen zu können, muss eine *innere Repräsentation* des Problemraumes erzeugt werden. Problemlösen besteht also zu einem Großteil aus planerischen Prozessen: Bekannte und ausführbare Handlungen und Handlungssequenzen werden im Bereich des dem Auszuführenden möglichen parametrisiert und kombiniert, so dass das gedachte Ziel erreicht werden kann. Funke [Fun06] beschreibt nach Dörner [Dör89] den Ablauf von Problemlöseprozessen folgendermaßen:

- 1.) *Phase der Zielausarbeitung*: Es wird eine Zielvorstellung entwickelt, die entweder präzise oder komparativ formuliert werden kann. Zielkonflikte sind möglich („Polytelie“).
- 2.) *Modellbildung und Informationssammlung*: Ein genaues Bild der Situation wird generiert, relevante Informationen werden extrahiert (vgl. Abschnitt über mentale Modellbildung).
- 3.) *Prognose und Extrapolation*: Es werden Abschätzungen über die weitere Entwicklung der Situation getätigt, wobei die Dynamik der beteiligten Objekte bzw. Prozesse beachtet werden muss, nichtlineare Dynamiken sind hierbei weitaus komplizierter zu antizipieren als lineare Dynamiken.
- 4.) *Phase der Planung von Aktionen*: Die Handlungsplanung findet auf Basis der gewonnenen Informationen statt.
- 5.) *Phase der Entscheidung und Durchführung von Aktionen*. Die geplanten Aktionen werden durchgeführt.
- 6.) *Phase der Effektkontrolle und Revision der Handlungsstrategien*. Es wird geprüft, ob das gewünschte Ergebnis erreicht worden ist.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang die Definition des Begriffs „Ziel“: Nach Schmidt & Kleinbeck [SK06] sind Ziele „Vorwegnahmen von Handlungsfolgen, die mehr oder weniger bewusst zustande kommen“ und „beziehen sich auf zukünftige Handlungsergebnisse“. Diese angestrebten Zielzustände sind aus technischer Sicht nichts anderes als Sollwerte (sowie teilweise Handlungen, deren Ergebnis das Erreichen desselben darstellt), die entweder selbst gebildet oder basierend auf externen Vorgaben erzeugt werden.

Im Kontext der Fahrzeugführung setzt sich der Fahrer größtenteils selbst Ziele, die auch auf verschiedenen zeitlichen Ebenen existieren können. So ist beispielsweise Ziel **A** „Ich möchte so schnell wie möglich ankommen“ ein für die komplette Fahrt gültiges Ziel, Ziel **B** „Ich möchte den vorausfahrenden LKW überholen“ ein lokales Ziel, welches jedoch als Teilziel für Ziel **A** interpretiert werden kann. Diese Teilziele muss sich der Fahrer während einer Fahrt immer wieder neu selbst definieren, um das größere Hauptziel erreichen zu können. Im Normalfall existieren mehrere Hauptziele parallel: Das Ziel „Ich möchte sicher ankommen“ ist üblicherweise bei jedem Fahrer zu jeder Zeit vorhanden. Somit kommt es oft zu Situationen, in denen sich Ziele widersprechen und der Fahrer eine Priorisierung der unterschiedlichen Ziele durchführen

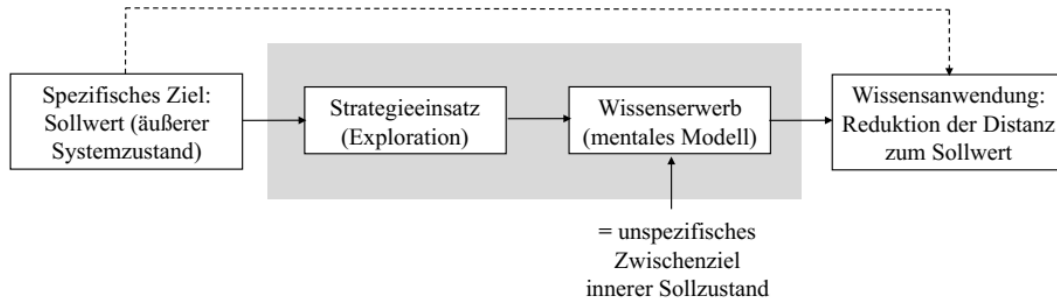


Abbildung 3.16: Prototypischer Ablauf des Problemlösens aus kognitiv-funktionalistischer Sicht aus Blech [Ble10]. Explorationsziele sind den Handlungs- oder Sollwertzielen bzw. Sollzuständen zeitlich und logisch vorgeordnet.

oder einen Kompromiss für ein lokales Ziel aushandeln muss, z. B. „ich werde so schnell und so sicher wie möglich überholen“.

Problemlösen findet sich im Kontext der Fahrzeugführung zum einen im Bereich der Navigation und ist bei unbekannten Strecken auf der wissensbasierten Ebene einzuordnen. Die aus der Entwicklung von Handlungsstrategien zum Erreichen lokaler Ziele resultierenden Handlungen sind zumeist *Fahrmanöver* (vgl. Abschnitt 4.1.1). Aus einem dem Fahrer durch seine Wahrnehmungs- und Gedächtnisfähigkeiten bekannten Ausgangszustand und der darauf basierenden erzeugten mentalen Modelle heraus generiert der Fahrer einen lokalen Plan. Die entsprechende Strategie zur Problemlösung wird durch persönliche Charakteristika des Fahrers, beispielsweise Fahrerfahrung oder Risikobereitschaft parametrisiert. Dieses Art des Problemlösens findet zumeist auf der fertigkeitbasierten Ebene statt und betrifft daher Handlungen bzw. Handlungsstrategien, die dem Fahrer bekannt, aber an die aktuelle Situation angepasst werden müssen. Nach Jürgensohn [JBGS18] ist bezüglich der Fahrzeugführung der Anteil der Prozesse, die bewusstes Problemlösen verwenden, sehr gering.

Fazit Das Problemlösen im kognitionspsychologischen Sinne spielt im Kontext der Fahrzeugführung quantitativ gesehen eine eher geringe Rolle, zum Großteil werden eingeübte Handlungsstrategien verwendet oder unbewusst gehandelt. Bei unbekannten oder besonders komplexen Situationen hingegen sind Handlungsstrategien, die mit Hilfe von kognitiven Problemlöseprozessen generiert wurden, die einzig mögliche Alternative zu einer Nichthandlung.

3.2.3 Entscheidungsfindung und Risiko

Entscheidungen bezeichnen die Wahl zwischen mindestens zwei Handlungsalternativen. Einer Entscheidung geht immer ein Entscheidungsprozess voraus, in welchem Ziele definiert, entsprechende Informationen aufgenommen und verarbeitet sowie mögliche Handlungen geplant und die daraus folgenden Konsequenzen antizipiert werden. Neben den subjektiven – jedoch als

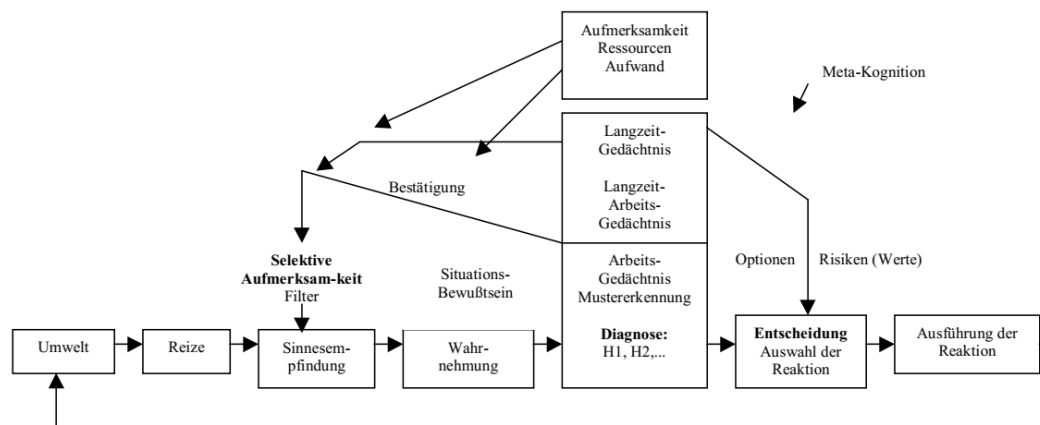


Abbildung 3.17: Entscheidungsmodell nach Wickens & Hollands [WH00]

objektiv wahrgenommenen – Informationen (vgl. Ribbeck [Rib]) über die aktuelle Situation wird die Entscheidungsfindung von Motivationen, Emotionen (vgl. Abschnitte 3.4.4 und 3.4.5) sowie einer Reihe anderer sehr individueller Faktoren beeinflusst. Es wird zwischen „Entscheidung unter Risiko“ – bei bekannten Wahrscheinlichkeiten für die Folgen des Handelns – und „Entscheidung unter Ungewissheit“ – bei unbekannten Wahrscheinlichkeiten unterschieden. Des Weiteren spielt der Faktor Zeit bei der Entscheidungsfindung eine bedeutende Rolle: Entscheidungen unter Zeitdruck sind, da sie auf mit weniger kognitiven Ressourcen generierten mentalen Modellen basieren, naturgemäß öfter fehleranfällig als Entscheidungen, die in Ruhe getroffen werden können. Nach dem Wickens’schen Modell der Entscheidungsfindung (vgl. Abbildung 3.17) sind die wichtigsten Elemente bezüglich einer zu treffenden Entscheidung *Selektive Aufmerksamkeit*, *Diagnose* und *Reaktionsauswahl*. *Selektive Aufmerksamkeit* wurde bereits im Abschnitt 3.4.1 beschrieben, *Diagnose* fasst die kognitiven Prozesse zusammen, welche für die Bewertung der aktuellen Situation (Situationsbewusstsein, vgl. Abschnitt 3.4.3) verantwortlich sind. In der *Reaktionswahl* werden nun die im Arbeitsgedächtnis generierten mentalen Modelle mit Informationen aus dem Langzeitgedächtnis kombiniert, um die Folgen der verschiedenen Handlungsalternativen abzuschätzen und sich für eine der Handlungsalternativen zu entscheiden.

Für das Fahren gilt, dass Entscheidungen auf verschiedenen Ebenen der Fahraufgabe (wissensbasiert, regelbasiert oder fertigkeitsbasiert bzw. auf der strategischen, taktischen- oder Regelungsebene) getroffen werden können (vgl. Rasmussen [RL82] bzw. Michon [Mic85] und Donges [Don82]). Bezüglich des Schemas von Rasmussen kann konstatiert werden, dass wissensbasierte Entscheidungen ein hohes Maß an kognitiven Ressourcen verwenden, Routenplanung oder komplexe bzw. unbekannte Kreuzungssituationen können hier als Beispiel dienen. Regelbasierte Entscheidungen hingegen erfordern nur die Auswahl einer adäquaten Handlung aus dem Erfahrungsschatz des Fahrers (z. B. die Auswahl eines passenden Manövers, welches vom Fahrer beherrscht wird). Fertigkeitsbasierte Entscheidungen, z. B. wie stark gelenkt oder gebremst werden muss, geschehen hingegen unbewusst. Schaut man sich die Donges’sche Einteilung der

Fahraufgabe an, so lässt sich Ähnliches feststellen: In der Navigationsebene werden Entscheidungen über die Routenwahl getroffen, geschieht dies vor Fahrtantritt, steht für die entsprechenden Diagnoseprozesse ausreichend Zeit zur Verfügung, falls während der Fahrt eine Änderung der Routenplanung stattfinden muss (z. B. weil eine Straße kurzfristig gesperrt wurde), findet dies jedoch oft unter Zeitdruck statt, so dass die Wahrscheinlichkeit für Fehlentscheidungen steigt. In der Führungsebene hingegen wird entschieden, welche der aktuellen Situation angepassten Zielgrößen (Abstände, Geschwindigkeiten, Spurwahl) gelten. Eine Handlungsauswahl (bzw. die Auswahl eines Fahrmanövers) ist in dieser Ebene jedoch nicht vorgesehen. Die taktische Ebene aus dem Michon-Modell erlaubt diese hingegen. Eine solche Auswahl kann mit oder ohne Zeitdruck erfolgen und beansprucht je nach Komplexität und Erfahrung unterschiedliche kognitive Ressourcen. Auf der Stabilisierungsebene getroffene Entscheidungen betreffen vor allem Regelungsprozesse (Bedienung von Lenkrad und Pedalerie), welche im Allgemeinen unbewusst ablaufen und daher kaum kognitive Ressourcen verwenden.

Nach Bubb [BBGV15] wird während eines Entscheidungsprozesses ein inneres Modellpaar (bestehend aus Wahrnehmungs-Handlungspaar sowie Handlungs-Wahrnehmungspaar, vgl. Abschnitt 3.2.2.1) ausgewählt. Bei mehreren möglichen Modellpaaren wird nun gedanklich jedes Handlungs-Wahrnehmungs-Modell ausgewählt und eine Abschätzung über die Konsequenz getroffen, danach wird jenes mit dem größten angenommenen Nutzen ausgewählt. Dieser (augenblickliche) Nutzen hängt von vielen Faktoren, u.a. Motivation, Emotion, Situationsbewusstsein usw. ab und muss mit dem möglichen Schaden abgewogen werden. Das Erwartung-mal-Wert-Modell erklärt Entscheidungen folgendermaßen: Die Attraktivität eines zu erreichenden Ziels (Wert) wird mit der Wahrscheinlichkeit, das Ziel zu erreichen (Erwartung) verrechnet. Nach Fiala [Fia06] können mehrere Sekunden vergehen, bis eine bewusste Entscheidung getroffen wird. Auch den Untersuchungen von Sommer [Som13] zufolge werden die einzelnen Stufen der Informationsverarbeitung in einem Zeitfenster von 7 bis 5 Sekunden vor einem handlungsrelevanten Merkmal durchlaufen, wobei die tatsächliche Handlungsentscheidung etwa 4 bis 2 Sekunden vor diesem stattfindet.

Entscheidungsfindung und Risiko sind während des Autofahrens untrennbar miteinander verknüpft. Aufgrund der systemimmanenten Gefahr, die von einem sich zumindest potentiell sehr schnellen und mehrere Tonnen schweren Gefährt ausgeht, muss bei dessen Bedienung das Risiko der entsprechenden Handlung mitberücksichtigt werden. Schon 1938 hat Gibson [GC38] das Konzept der Sicherheitsreserve beim Fahren postuliert; ein „field of safe travel“ wird mittels visueller Raumwahrnehmung eines Fahrers erzeugt, in dem sich gefahrlos bewegt werden kann. Nach Taylor [Tay64] sind Autofahrer bestrebt, während der Fahrt einen konstanten Angstpegel aufrechtzuerhalten. In aktuellen Veröffentlichungen wird eher das subjektive Risiko als die hauptsächliche Einflussgröße bei der Entscheidungsfindung beim Autofahren betrachtet (Rakotonirainy [RS09]). Als subjektives Risiko wird das Produkt eines subjektiven Wertes eines unangenehmen Ereignisses und der subjektiven Wahrscheinlichkeit dessen Eintreffens bezeichnet. Das beobachtbare Verhalten, dass sich mit objektiv zunehmender Sicherheit (z. B. durch

Sicherheitssysteme im Fahrzeug oder bessere Straßen) ein riskanteres Fahrverhalten einstellt, wird *Risikokompensation* genannt. Es gibt unterschiedliche Ansätze, um dieses Verhalten zu erklären:

- 1.) *Null-Risiko-Theorie* nach Näätänen & Summala [NS74], („zero-risk-theory“): Das vom Fahrer gewünschte subjektive Risiko, das zusätzlich von Vigilanz und anderen motivationalen Faktoren beeinflusst wird, soll jederzeit „Null“ betragen. Später wurde dies verworfen und gegen akzeptierte Sicherheitsspielräume („safety margins“) ersetzt, an denen sich der Fahrer orientiert und mit deren Hilfe er sein Verhalten regelt (Näätänen & Summala [NS74], [NS76])
- 2.) *Risikohomöostase* von Wilde [Wil82] („risk homeostasis“): Im Gegensatz zur „zero-risk-theory“ hat der Fahrer nach Wilde ein persönlich akzeptiertes Risiko, welches er versucht, während der Fahrt konstant zu halten. Demnach ergibt sich das objektive Risiko ausschließlich aus der persönlichen Risikoakzeptanz des Fahrers – objektive Sicherheitsverbesserungen hätten somit keinerlei Einfluss. Gruendl [Grü05] bezeichnet die Theorie daher auch als „provokant“ bzw. „extrem und pessimistisch“. Der Rückgang der Unfallzahlen in den letzten Jahrzehnten widerspricht der Theorie ebenso (wenn man davon ausgeht, dass Sicherheitssysteme einen gewissen Anteil daran haben).
- 3.) *Aufgabenschwierigkeitshomöostase* nach Fuller [Ful84] („task difficulty homeostasis“): Nicht das Risiko, sondern die Aufgabenschwierigkeit bestimmt das Verhalten und somit Entscheidungen des Fahrers. Dieser ist bestrebt, ein bestimmtes Niveau der Aufgabenschwierigkeit aufrechtzuerhalten. Die Aufgabenschwierigkeit ergibt sich aus dem Spannungsfeld zwischen den Anforderungen der aktuellen Aufgabe und den vorhandenen Fähigkeiten bzw. Ressourcen des Fahrers, diese zu erfüllen. Im TCI⁵-Modell [Ful05] wird dies näher spezifiziert. Die Aufgabenschwierigkeit passt der Fahrer vor allem durch die gewählte Geschwindigkeit an.

3.2.3.1 Entscheidungsmodelle für die Fahrermodellierung

Die realistische Modellierung menschlicher Entscheidungsprozesse stellt eine der größten Herausforderungen im Kontext der Fahrermodellierung dar. Die hierfür notwendige Annahme, dass Entscheidungen instantan aufgrund bestimmter und *bekannter* Parameter getroffen werden – nicht anders entscheiden Algorithmen – lässt sich nur schwer mit den im menschlichen Gehirn zum Teil unbewusst ablaufenden Prozessen in Einklang bringen. Nichtsdestoweniger wurden bisher unterschiedliche Versuche unternommen, menschliche Entscheidungsprozesse zu simulieren, auf einige wird folgend eingegangen.

Salvucci [Sal06] integrierte eine simple Entscheidungskomponente mittels ACT-R in sein Fahrermodell, welche Entscheidungen bezüglich Spurwechselmanövern basierend auf der aktuellen

⁵ „Task Capability Interface“

Umgebung des Fahrzeugs tätig. Wenn die Entscheidung für einen Spurwechsel getroffen wurde, folgt die davon abhängige, zweite Entscheidung über den Zeitpunkt des Spurwechsels.

Boer & Hoedemaker [BH98] entwickelten basierend auf Rasmussens und Michons Modellen und der „satisficing decision theory“ von Goodrich et al. [GSF98] ein Modell für menschliche Entscheidungsfindung beim Autofahren. Die Theorie des „satisficing decision makings“ – auf deutsch etwa „Treffen von zufriedenstellenden Entscheidungen“ – geht davon aus, dass der Mensch keine *optimale* Lösung für bestimmte Problemstellungen sucht, sondern eine *zufriedenstellende*. Daher werden keine (im Sinne von Berechnungskosten) teuren Suchen nach einer Optimallösung durchgeführt, da die Suche nach einer Lösung beendet wird, sobald ein unterer Schwellwert für eine akzeptable Lösung überschritten worden ist. Das Modell besteht analog zu Michons Modellvorschlag [Mic85] aus einer strategischen, einer taktischen und einer operationalen Ebene. Sogenannte „decision makers“ regeln den Informationsfluss zwischen den Ebenen (vgl. Abbildung 3.18) und bestimmen, welche mentalen Modelle aktiviert werden (vgl. Abschnitt 3.2.2.1). Allgemein wird „Fahren“ als eine Aufgabe beschrieben, in welcher permanent bestimmte Bedürfnisse befriedigt werden müssen und dies letztendlich bestimmt, welche Fahrmanöver wie ausgeführt werden. Hierbei werden solche Entscheidungen für bestimmte Aktionen getroffen, deren Nutzen letztendlich größer als deren entsprechende Kosten sind.

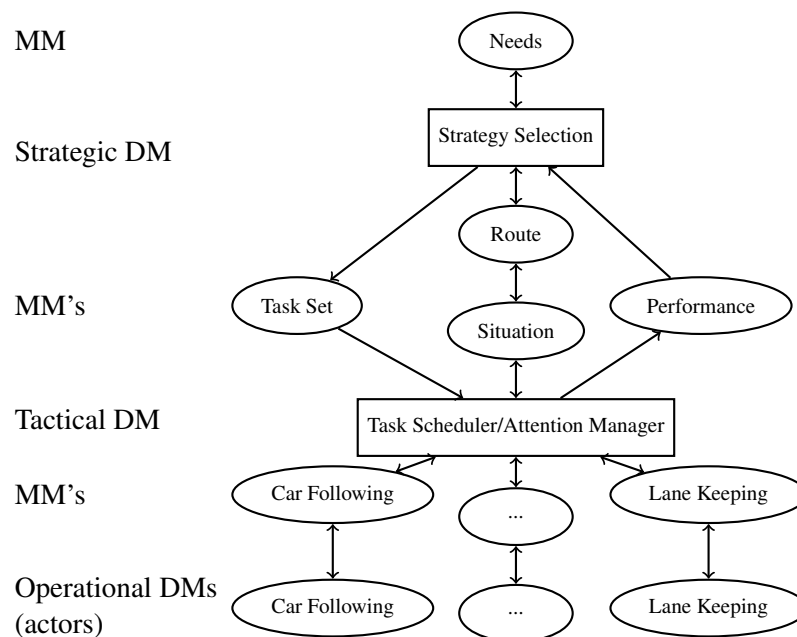


Abbildung 3.18: Modell von Fahrerentscheidungen nach Boer & Hoedemaker [BH98]: *Strategische, taktische und operative* Entscheider („DM“) aktivieren unterschiedliche mentale Modelle („MM“)

Konkret wird in der höchsten – der strategischen – Ebene die aktuelle Befriedigung ausgewertet und falls diese eine bestimmte Schwelle unterschreitet, wird das mentale Modell „Routenfindung“ ausgewertet, um mögliche – befriedigendere – Routen zu generieren. Auf der taktischen Ebene

werden die Aufmerksamkeitsressourcen und jene für die Handlungen auf der operationalen Ebene verteilt und Vorhersagen für die aktuelle und alternative Handlungen an die jeweils höhere Ebene kommuniziert. Die Auswertung dieser mentalen Modelle für bestimmte Handlungsalternativen wird nur bei Unterschreiten der Befriedigungsschwelle vorgenommen. Boer & Hoedemaker teilen Fahrerbedürfnisse in unterschiedliche Klassen ein, z. B. Risikoverhalten (riskant vs. sicher), Fahrvergnügen (werden bestimmte Routen bevorzugt oder nicht) sowie ökonomische Kosten.

Ein Modellierungsansatz, welcher Entscheidungsprozesse beinhaltet, ist im COSMODRIVE-Modell integriert (vgl. Abschnitt 2.2.5.1). Entscheidungen werden basierend auf „envelope zones“ (vgl. Abbildung 3.19) getroffen, die für jedes Fahrzeug existieren. Während des Fahrens werden mögliche zukünftige Überlappungen vom Fahrermodell antizipiert und basierend auf einer Entscheidungsmatrix, in welcher die entsprechenden Risikoklassen verzeichnet sind, wird eine adäquate Fahrerhandlung ausgewählt (Bornard et al. [BSB16]).

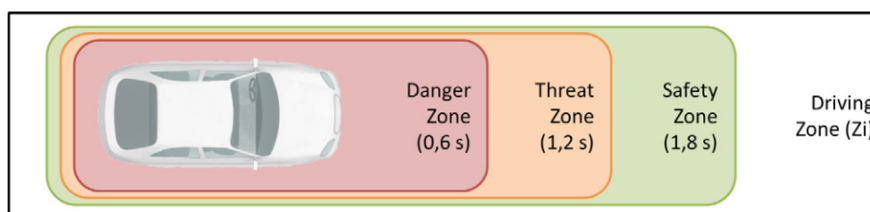


Abbildung 3.19: Umhüllende Zonen („envelope zones“) im COSMODRIVE-Modell aus Bornard et al. [BSB16]

Irmischer [Irm01a] beschreibt einen auf Motivationen basierenden mehrstufigen Entscheidungsprozess zum Überholen. Eine Entscheidungslogik basierend auf *Fuzzy Decision Making* bestimmt, ob ein Fahrermodell einen Überholvorgang initiiert oder im Folgemodus verharret. Ein nachgeordneter Entscheidungsvorgang bestimmt den Zeitpunkt des Spurwechsels. Die Entscheidung auf der sensumotorischen Ebene zwischen der Bedienung des Gas- oder Bremspedals wird ebenfalls modelliert. Die Handlungsalternativen unterscheiden sich durch bestimmte Merkmale voneinander, eine Entscheidung wird vom Fahrer basierend auf dem konkreten Nutzen – bestimmt durch die Bewertung der Merkmale – getroffen. Die Merkmale liegen beim Fuzzy Decision Making in Form linguistischer Variablen vor, die mit Nutzwertfunktionen verknüpft sind. Im Falle des Überholvorgangs sind dies „relativer Abstand“ und „relative Geschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs“ sowie „Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs“ und eine Situationseinschätzung des Fahrers (vgl. Abbildung 3.20).

Al-Shibabi & Mourant [ASM01], [ASM03] implementierten in ihr Fahrermodell-Framework ebenfalls eine „decision-making unit“ (DMU) basierend auf Fuzzy-Techniken, welche taktische Manöverentscheidungen – ebenfalls angelehnt an Michons Drei-Ebenen-Modell – trifft. Ein „decision-implementation unit“ (DIU) verwirklicht die vom DMU getroffenen Entscheidungen auf der operationalen Ebene. Die Entscheidungen hängen von aktuellen Informationen sowie dem momentanen emotionalen Status des Fahrers ab. Strategische Entscheidungen (Routenwahl)

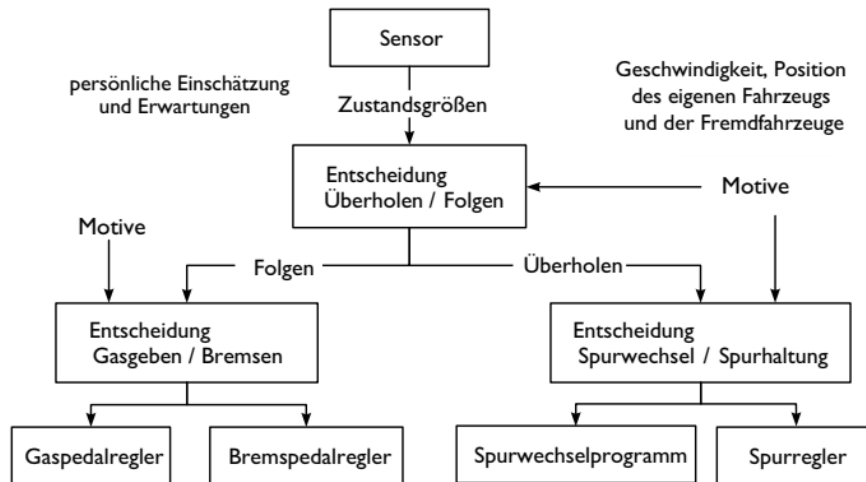


Abbildung 3.20: Entscheidungsprozesse beim Überholen nach Irmscher [Irm01a]

werden von einem externen „traffic controller“ herbeigeführt und sind nicht Teil der Simulation. Entscheidungen werden mit dem Ziel getroffen, den emotionalen Zustand des Fahrers zu verbessern, in dem entweder die Befriedigung erhöht oder ein vorhandenes Unbehagen verringert wird – je nach aktueller Priorität.

Fazit Der Prozess der Entscheidungsfindung ist im Straßenverkehr nicht ohne Risikoabschätzung denkbar. Die Frage, wie ein menschlicher Fahrer diese Abschätzung durchführt, welche Prioritäten er dabei setzt oder wie sich das subjektive Risiko bei sich ändernder objektiver Sicherheitslage verändert, kann mit unterschiedlichen Theorien beantwortet werden. Die Berücksichtigung eines subjektiven Risikos kann jedoch dazu dienen, Entscheidungen des Fahrers (gewünschte Geschwindigkeiten, Start von Manövern etc.) besser nachvollziehen zu können. Ein berechnetes Maß für das subjektive Risiko bzw. die subjektive Aufgabenschwierigkeit kann in einem menschähnlichen Fahrermodell dazu dienen, realistischere, individuelle und situativ „richtigere“ Sollwerte für Längs- und Querregelung zu erzeugen. Entscheidungsalgorithmen in bisher implementierten Fahrermodellen orientieren sich zumeist an einem Kosten-Nutzen-Verhältnis. Es werden unterschiedliche Attribute (Zufriedenheit, emotionaler Zustand, Risiko usw.) als Maß verwendet, welches es durch bestimmte Manöver zu verbessern gilt.

3.3 Handlungsausführung

Dem Informationsverarbeitungsparadigma von Wickens folgend wird in der Ebene der Handlungsausführung eine Handlung mittels Muskeln und Gelenken so vollzogen, dass das gewählte Ziel erreicht wird [WH00]). Die physische Ausführung einer Handlung stellt die Verbindung des Menschen zu seiner Umwelt her, nur durch sie kann auf diese eingewirkt und somit auf

das Erreichen eigener Ziele hingearbeitet werden. Durch die Rückkopplung mit der sich verändernden Umwelt können neue Informationen aufgenommen werden, welche wiederum zu neuen Handlungen führen können. Die Begrifflichkeit der *Handlung* grenzt sich nach Leontjew [Leo12] durch das Vorhandensein eines zugeordneten Ziels von einer *Tätigkeit* ab, kleinere und kürzere Teilhandlungen können als *Operationen* definiert werden. Das Fahren ist dementsprechend eine *Tätigkeit*. Ein Fahrmanöver, das ein bestimmtes Ziel besitzt (z.B. das Überholen eines vorausfahrenden Fahrzeugs) ist somit eine *Handlung* (vgl. Abschnitt 4.1.1). Die Bedienung des Lenkrads sowie der Pedalerie sind – so sie denn voneinander abgrenzbar und keine permanent stattfindende Regelung sind – *Operationen*. Das Kapitel 4 beschäftigt sich ausführlich u. a. mit der hier dargestellten Problematik der Abgrenzung von zeitlich abgrenzbaren Manövern im Gegensatz zu homöostatischen Regelungshandlungen des Fahrers.

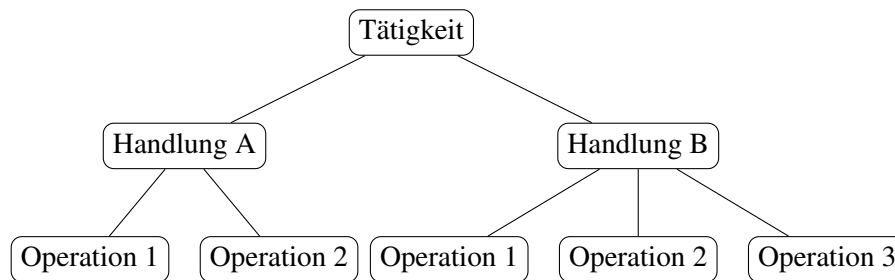


Abbildung 3.21: Strukturelle Einordnung von Tätigkeiten, Handlungen und Operationen

3.3.1 Der Handlungsbegriff, Handlungsregulation und Volition

Eine Handlung ist nach Hacker „eine zeitlich in sich geschlossene, auf ein Ziel gerichtete sowie inhaltlich und zeitlich gegliederte Einheit der Tätigkeit“, welche sich durch das bewusste Ziel von Tätigkeiten abgrenzt [Hac99]. Die Zielgerichtetheit einer Handlung sowie deren bewusste Ausführung stellt eine zentrale Annahme von Handlungsregulationstheorien dar. Diese beschreiben, wie Menschen psychische Ressourcen und gegebene Werkzeuge einsetzen, um zielgerichtet Aufträge zu erfüllen, in dem Handlungen in „komplexe aber dennoch hochflexibel an aktuelle Umstände anpassbare Hierarchien von Operationen, Teilhandlungen und Bewegungen umgesetzt werden, um ein Ziel zu erreichen“ (Timpe, [TJK02]). Miller et al. [MGP60] erläutern bereits 1960 eine Systematik zur Beschreibung von zielstrebigem Handeln (TOTE-Modell: Test - Operate - Test - Exit). Eine Handlung wird hier als Aneinanderreihung von Prüf- und Aktionsphasen beschrieben: Einer Testphase, in der ein Soll- mit einem Istwert verglichen wird, folgt bei Inkongruenz der Werte eine Aktionsphase, in der eine Operation durchgeführt wird, welche zum Ziel hat, den Istwert dem Sollwert anzugleichen. Bei Kongruenz der Werte wird die Rückkopplungsschleife verlassen (vgl. Abbildung 3.22). Der Begriff „Handlungsregulationstheorie“ geht auf die Arbeiten von Hacker [Hac73] bzw. Volpert [Vol74] zurück. Es werden drei Regulationsebenen eingeführt: Die intellektuelle, die perzeptiv-begriffliche und die sensumotorische. Die Handlungsausführung stellt in diesem Kontext die unterste Regulationsebene dar.

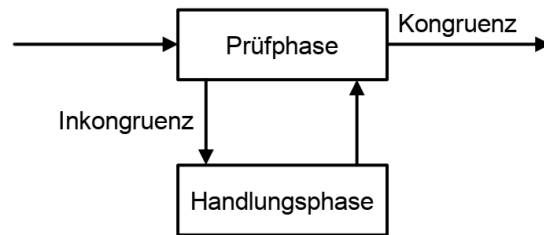


Abbildung 3.22: Handlungsmodell aus Jürgensohn [Jür97] nach Miller et al. [MGP60]

Handlungen können zumeist mit Hilfe einer hierarchisch-sequentiellen Struktur dargestellt werden und sind daher in Algorithmen abbildbar. Die kleinsten Elemente – die Grundbausteine menschlichen Handelns – innerhalb dieser Struktur nennt Volpert „zyklische Einheiten“ [Vol83]. Diese bestehen aus einem Ziel und Transformationen, mit deren Hilfe sich dem Ziel schrittweise genähert werden kann. Diese Transformationen bestehen aus einfachen Bewegungen, die durchaus auch automatisiert ablaufen können. Ziele und Teilziele der Handlungen und Teilhandlungen ergeben einen Handlungsplan. Teilziele können – im Unterschied zu Zielen – auch mit geringem Anteil bewusster kognitiver Prozesse erreicht werden. Eine einzelne Transformation kann ebenso als zyklische Einheit aufgefasst werden, so dass eine hierarchische Ordnung bzw. ein pyramidales Gebilde entsteht (vgl. Abbildung 3.23). Bei Übereinstimmung von (Teil-)Ziel und Transformationsergebnis wird dies der nächsthöheren Ebene übermittelt, was solange durchgeführt wird, bis das Ziel der obersten Handlungsebene erreicht und die Handlung somit erfolgreich beendet werden kann.

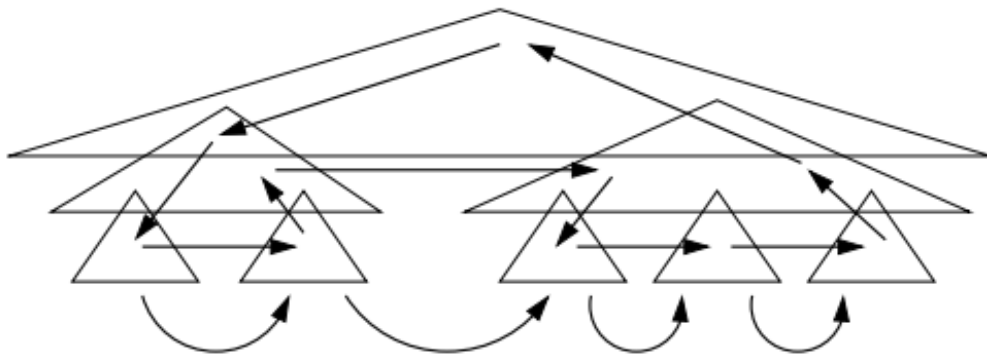


Abbildung 3.23: Hierarchisch-sequentiell Handlungsmodell nach Volpert [Vol83]

Handlungen lassen sich ebenso zeitlich gliedern. Frese & Zapf [FZ94] beschreiben sechs Phasen einer Handlung: In der ersten Phase, der *Zielbildung*, wird die Ausrichtung auf ein bestimmtes Ziel festgelegt bzw. bei mehreren möglichen Zielen wird sich für ein bestimmtes Ziel entschieden. In der zweiten Phase, der *Orientierungsphase*, werden mögliche Ausführungen eruiert. In der dritten Phase, der *Planungsphase*, werden ein oder mehrere Pläne für die Handlung entworfen,

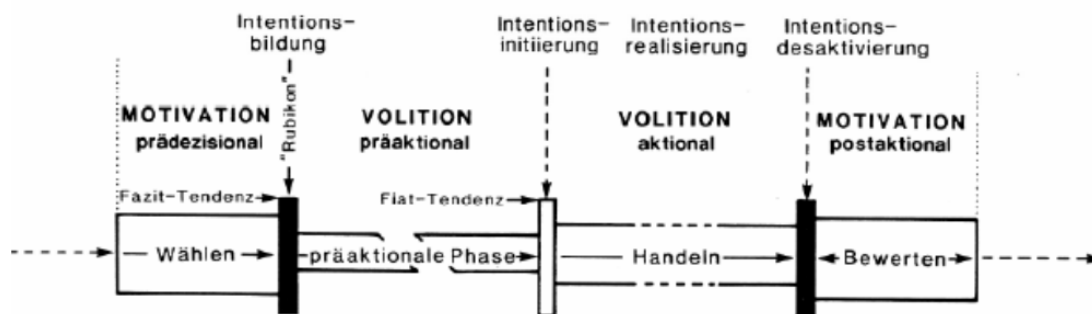


Abbildung 3.24: Rubikonmodell der Handlungsphasen nach Heckhausen [Hec89]

wobei Komplexität eines solchen Plans im Allgemeinen mit zunehmender Länge der Handlung abnimmt. In der fünften, der *Entscheidungsphase*, wird einer der entwickelten Pläne ausgesucht und in der sechsten Phase, der *Ausführungsphase*, abgearbeitet. In der letzten Phase, dem *Feed-back*, werden Informationen der Umwelt verwendet, um den Grad der Planerfüllung feststellen zu können. Die einzelnen Phasen dieses Modells sind jedoch nicht als starr von einander abgegrenzt zu verstehen, auch können während eines Handlungsprozesses unterschiedliche Phasen übersprungen werden.

Betrachtet man die Handlung aus der Perspektive des Handelnden, so stellt sich die Frage nach seiner Motivation während der Handlung bzw. deren Beibehaltung. Der Begriff der *Volition* beschreibt die Umsetzung von Motiven in Handlungen bzw. die Bereitschaft zur Handlung und die Verpflichtung gegenüber den Zielen der Handlung. Volition ist somit immer an ein Ziel geknüpft. Blech [Ble10] beschreibt Volition als „willentliche Verhaltenskontrolle“ mit der Aufgabe, sich an Ziele zu binden und diese gedanklich aufrecht zu erhalten. Das „Rubikon-Modell“ der Handlungsphasen nach Heckhausen [Hec89] betrachtet diese Problematik und beschreibt ebenso volitionale Prozesse, also Prozesse der bewussten Handlungsregulation (vgl. Abbildung 3.24). Aus der subjektiven Sicht des Handelnden gliedert sich eine Handlung in vier Phasen: Die erste Phase, die *prädeziSIONALE* Phase, ist eine motivationale, hier werden Handlungsoptionen gegenübergestellt und abgewogen. In der zweiten, der *präaktionalen* Phase, setzt die volitionale Kontrolle ein, die Handlung wird geplant und initiiert. Während der dritten, der *aktionalen* Phase, wird die Handlung mit der durch die Volitionsstärke definierten Stärke bzw. Ausdauer durchgeführt. Bei Erreichen des Zielzustands wird die letzte, die *postaktionale* Phase, begonnen und das Ergebnis der Handlung bezüglich des Ziels bewertet. Der Übergang von der prädeziSIONALen zur präaktionalen Phase beschreibt die nicht wieder rückgängig zu machende Festlegung für eine bestimmte Handlung und wird daher mit dem Übertritt des Grenzflusses Rubikon durch Julius Caesar verglichen.

Fazit Handlungsregulationsmodelle sind nützlich, um die Art und Weise, wie sich Handlungen, die von Maschinen durchgeführt werden, von denen, die von Menschen durchgeführt werden,

unterscheiden. Das Konzept der volitionalen Handlungskontrolle erlaubt es, Handlungen nicht nur als rein kybernetische Konstrukte zu betrachten, sondern – je nach Volitionsstärke – die Art und Weise der Durchführung der Handlung zu beeinflussen. Die hierarchisch-sequentielle Strukturierung einer Handlung ermöglicht eine rekursive algorithmische Umsetzung („divide-and-conquer“) und ist daher aus Programmiersicht ein effizienter Ansatz für eine Modellierung.

3.3.2 Sensumotorik

Die Interaktion der menschlichen Akteure durch motorische Aktionen mit ihrer Umwelt kann mit dem Begriff *Sensumotorik* umschrieben werden. Oftmals wird auch der Begriff *Psychomotorik* gebraucht, wegen der unscharfen Definition dieses Begriffs sowie dessen Verwendung in anderen Gebieten wird er in dieser Arbeit jedoch nicht weiter verwendet. Im Unterschied zu kognitiven Prozessen, welche ebenso auf Informationen aus der Wahrnehmung zurückgreifen können, sind sensumotorische Prozesse direkt mit motorischen Aktionen gekoppelt. Im Drei-Ebenen-Modell des menschlichen Verhaltens nach Rasmussen [RL82] sind die sensumotorischen Aktionen daher basaler Bestandteil des fertigkeitsbasierten Handelns (vgl. Abbildung 2.6 bzw. Abschnitt 3.3.2).

Einerseits sind sensumotorische Prozesse für die Durchführung von Handlungen bzw. Handlungsplänen zuständig, welche mittels kognitiver Prozesse erzeugt wurden, andererseits existieren auch solche, die ohne jede Verbindung zur Kognition existieren. Erstere nennt Jürgensohn „kognitiv-sensumotorisch“, letztere „rein sensumotorisch“ – beispielsweise das Aufrechterhalten einer konstanten Kraft bei äußeren Störeinflüssen [JBGS18]. Eine reine Dichotomie zwischen beiden Interpretationen sollte jedoch nicht angenommen werden, vielmehr ergibt sich ein Spektrum zwischen „kognitiv-sensumotorisch“ und „rein sensumotorisch“. Zumeist existiert ein Einfluss der Kognition auf die Sensumotorik, sei es als überwachendes oder als zielgebendes Element. Es kann davon ausgegangen werden, dass der kognitive Einfluss auf sensumotorische Prozesse mit zunehmender Expertise einer bestimmten Handlung abnimmt, die – langsameren – Regelanteile nehmen dementsprechend zugunsten der – schnelleren – Steuerungsanteile ab.

Die direkte Verbindung zum sensorischen Input bedeutet, dass sensumotorische Operationen vornehmlich unterbewusst ausgeführt werden, die übergeordnete Handlung ist jedoch – im Unterschied zu vegetativen Funktionen – eine durch kognitive Prozesse bewusst erzeugte (vgl. Abschnitt 3.2.2.2). Diese sensumotorischen Prozesse lassen sich regelungstechnisch sehr genau beschreiben (z. B. durch das „Crossover-Modell“, Jürgensohn [Jür97]) und laufen bei gut geübten Tätigkeiten ohne den „Umweg“ über kognitive Prozesse ab, so dass eine direkte Rückkopplung zwischen Kognition und Sensumotorik besteht.

Menschliche Bewegungen können gesteuert oder geregelt ausgeführt werden. Gesteuerte Bewegungen bezeichnet man auch als *ballistisch*, da – wie bei einer ballistischen Flugbahn eines Geschosses – nach dem Start der Bewegung diese nicht weiter modifiziert werden können. Ballistische Bewegungen bestehen aus zwei Phasen: Beschleunigen und Bremsen, menschliche

Willkürbewegungen (Blicksakkaden, Zeigebewegungen) sind typisch ballistische Bewegungen. Geregelte Bewegungen hingegen zeichnen sich – wegen ständiger Anpassungen – durch einen glatteren Verlauf aus. Im Allgemeinen bestehen Bewegungen aus Anteilen beider Bewegungsarten, wobei der ballistische Bewegungsanteil bei hoch geübten Handlungen ansteigt.

Generalisierte Motorprogramme Ein Konzept zur Beschreibung bestimmter, parametrierbarer Bewegungsmuster ist das der *Generalisierten Motorprogramme*. Die von Schmidt [Sch75] entwickelte Theorie postuliert eine prototypische Bewegungsabfolge, welche aus einzelnen Bewegungen zusammengesetzt wird und sich mittels bestimmter Parameter modifizieren lässt. Eine so erzeugte Bewegung hat den Vorteil, dass sie deutlich weniger kognitive Ressourcen beansprucht, jedoch flexibler ist als fest gespeicherte Muskelkommandos. Als Invarianten kommen relative Zeitintervalle und Kräfte in Frage (Grzesik [Grz09] erwähnt zusätzlich invariante Bewegungsdauern). Freie Parameter sind beispielsweise die Dauer der Gesamtbewegung, deren Stärke oder Geschwindigkeit. Angelehnt an diesen Ansatz wurde von Jürgensohn & Kupschick [JK08] ein Fahrermodell implementiert, welches basierend auf Realdaten von Testfahrern in der Lage war, hochdynamische Handling-Szenarien (z. B. Doppelter Spurwechsel) menschähnlich zu durchfahren.

Fazit Die Verwendung (kognitiv-)sensumotorischer Prozesse zum Behufe einer maximal menschähnlichen Modellierung eines Fahrers erscheint aus verschiedenen Gründen als sinnvoll: Beispielsweise lassen sich spezielle Charakteristika wie z. B. Fahrerfahrung durch einen erhöhten Anteil von gesteuertem gegenüber regeltem Verhalten abbilden. Weiterhin können sehr individuelle Bewegungsmuster mit entsprechenden Parametersätzen verwendet werden, um bestimmte Fahrweisen modellieren zu können (vgl. „Handschrift des Lenkens“, Jürgensohn et al. [JJW97]).

3.3.3 Physiologische Aspekte

Die physikalische Ausführung einer Handlung wird durch die menschliche Muskulatur vorgenommen, mit deren Hilfe Gelenke so bewegt werden können, dass die gewünschte Aktion durchgeführt werden kann. Eine solche, physische Handlung ist immer auch das Ergebnis komplexer neuronaler Prozesse: Ein Beweggrund für eine Handlung, erzeugt in den Motivationsarealen des Gehirns oftmals aufgrund eines Stimulus⁶, wird zunächst in einen Bewegungsplan umgesetzt. Dann wird ein Bewegungsprogramm entwickelt, dessen Ausführung vom Motorkortex überwacht und von der Skelettmuskulatur durchzuführen ist. Eine Bewegung ist somit durch eine hierarchische Kaskade aus Planung, Programmierung und Durchführung gekennzeichnet (Schmidt et al. [SLH07]).

⁶Die Auslösung einer Bewegung kann jedoch auch willkürlich ohne Stimulus oder unwillkürlich erfolgen.

Bewegungen werden über Motoneurone, also efferente Nervenzellen aus dem ZNS, gesteuert. Je weniger Muskelfasern mit einem Motoneuron verbunden sind, desto genauer kann die erzeugte Bewegung geregelt werden. Man unterscheidet zwischen oberen (UMN - „Upper Moto Neuron“) und unteren Motoneuronen (LMN - „Lower Moto Neuron“). Erstere befinden sich in der motorischen Rinde des Gehirns und können bewusste Bewegungen auslösen bzw. steuern, jedoch nur indirekt über die Verbindung zu den LMN. Diese hingegen befinden sich in der „grauen Substanz“ des Rückenmarks und können durch Innervation einzelner oder mehrerer Muskelfasern eine Kontraktion dieser bewirken, sodass eine Kraft an den Gelenken anliegt, welche die gewünschte Bewegung erzeugt. Prinzipiell existieren zwei Möglichkeiten, Bewegungsprogramme zu den Muskeln zu leiten: Schnelle und grobmotorische Bewegungen werden über α -Motoneurone ins Rückenmark transportiert, feinmotorische Bewegungen über γ -Motoneurone. Die Feinmotorik wird hierbei jedoch von der Grobmotorik überlagert. Im Rückenmark wird festgestellt, ob der gewünschte Sollzustand erreicht wurde. Diese „direkte“ Rückkopplung ohne den Umweg über das Gehirn wird *Eigenreflexbogen* genannt, diese Reaktion ist etwa vier mal schneller als die über die Kognition (Gillet [Gil99]).

Nach Bubb [BBGV15] existieren bezüglich des Hand-Arm-Systems zwei parallele Regelkreise, mit denen der Mensch Handlungen vollzieht: Längenservomechanismus (auch: Wegservomechanismus) und Kraftservomechanismus. Ersterer übernimmt die Regelung eines Weges mit dem Ziel, diesen störungsfrei einstellen zu können. Mittels Kraftservomechanismus hingegen kann eine konstante Kraft im Muskel eingeregelt werden. Dem Längenservomechanismus kommt eine etwa 5 – 10 mal stärkere Bedeutung als dem Kraftservomechanismus zu, daher ist der Mensch dazu in der Lage, den Weg feiner als die Kraft zu regeln (Bolte [Bol91]). Ausführliche Beschreibungen der neurophysiologischen Prozesse finden sich u.a. bei Grzesik [Grz09], Wolf [Wol09], Bubb [BBGV15] und Schmidt [SLH07].

Reaktionszeit Wichtige Aspekte bei der Beurteilung der Fähigkeiten des Menschen, hochdynamische Prozesse zu regeln, sind Informationen über die Größe physischer Signallaufzeiten sowie Verarbeitungsgeschwindigkeiten von Informationen. Allein bei einer typischen Fahrgeschwindigkeit von 130 km/h auf einer Autobahn bewegt sich der Mensch pro Sekunde um etwa 36 m fort. Unterschiede von einigen Zehntelsekunden können daher – etwas pathetisch formuliert – den Unterschied zwischen Leben und Tod ausmachen. Die menschliche Reaktionszeit wird allgemein als „Zeitspanne zwischen dem Eintreten eines bestimmten Reizes und dem Beginn der ersten darauf gerichteten Handlung“ definiert.

Laut Wolf [Wol09] ergibt sich die menschliche Reaktionszeit aus der sensorischen Empfindungslatenzzeit und der effektorischen Latenzzeit und hat im Normalfall eine Größenordnung von etwa 200 ms, falls keine willentlichen Verzögerungen vorhanden sind (vgl. Abbildung 3.25).

Typische Stelleingriffe des Fahrers zur Kompensation von Regelabweichungen auf der Stabilisierungsebene liegen nach Donges [Don77] im Bereich einiger 100 ms, oftmals sei jedoch zu

beobachten, dass Totzeiten bei geschlossenem Regelkreis selten kleiner als eine halbe Sekunde sind. Bei unerwarteten Ereignissen sind die Zeiten noch größer, diese liegen im Bereich von etwa 2 bis 3 Sekunden, bei höherer Komplexität kann die Reaktionszeit weiter ansteigen. Nach Winner [Win15] liegen die Reaktionszeiten von Autofahrern bei erwarteten Situationen bei etwa 0,7s, bei unerwarteten, aber bekannten Situationen bei etwa 1,25s und bei bis zu 1,5s bei überraschenden Situationen.

Reaktionszeiten unterscheiden sich des Weiteren abhängig vom verwendeten Informationskanal: Bei visueller Informationsaufnahme werden oft Zeiten von 200 ms bis 400 ms angenommen, auf auditiv wahrgenommene Informationen kann innerhalb von 100 ms bis 150 ms reagiert werden, am schnellsten ist eine Reaktion bei haptischem Input möglich – wegen des „kurzen Weges“ über den Eigenreflexbogen im Rückenmark kann bereits nach 80 ms bis 150 ms reagiert werden.

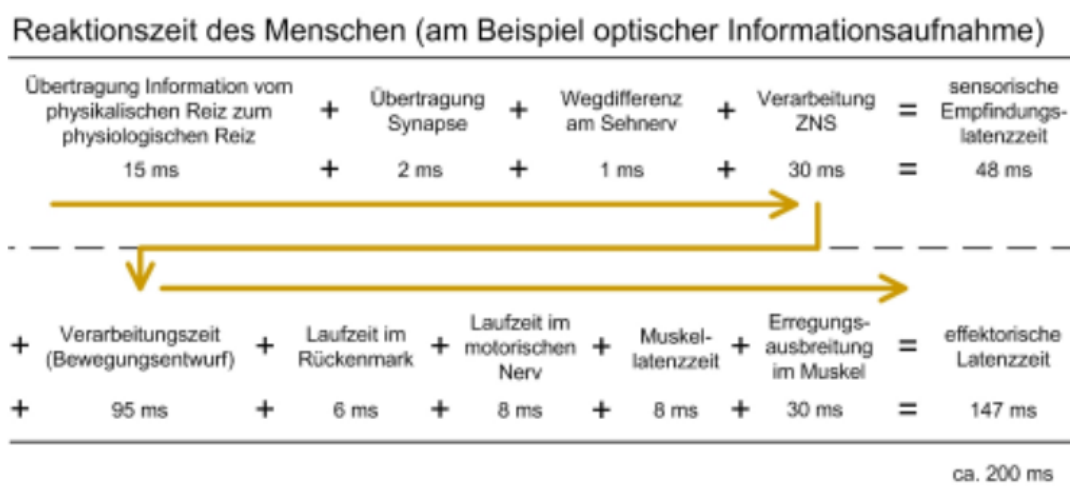


Abbildung 3.25: Minimale Reaktionszeit bei optischer Informationsaufnahme aus Wolf [Wol09]

Für die Fahrzeugführung ist ebenfalls die Umsetzzeit interessant. Diese beschreibt die Zeit, die der Fahrer benötigt, um vom Gas- auf das Bremspedal zu wechseln. Diese beträgt laut Winner [Win15] etwa 0,2 Sekunden und muss gegebenenfalls zur Reaktionszeit addiert werden.

Fazit Das Wissen um die Art und Weise, wie der Mensch Handlungen physikalisch ausführt, kann helfen, realistischere Fahrermodelle zu generieren. Allein die Implementierung typisch menschlicher Kenngrößen, wie z. B. vom Wahrnehmungskanal abhängige Reaktionszeiten, kann zu einem realitätsnäheren Modell führen. Eine komplexe Simulation der neurophysiologischen Vorgänge mag für spezielle Anwendungsfälle, beispielsweise bei der Simulation von Fahrern mit gewissen Einschränkungen, nützlich sein, zumeist scheint der Aufwand der Implementierung den Nutzen jedoch nicht rechtfertigen zu können.

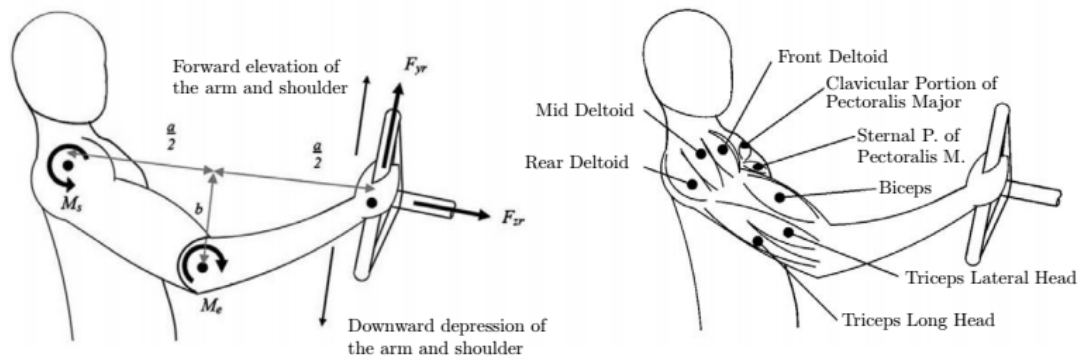


Abbildung 3.26: Motorik des Lenkens – links: Modellierung der Gelenkmomente und Lenkkräfte bei Lenkvorgängen; rechts: potentiell am Lenkvorgang beteiligte Muskeln, aus Pick & Cole [PC06]

3.3.4 Handlungsausführung beim Autofahren

Die Handlungsausführung beim Autofahren erfolgt zum einen über die Hände/Arme zur Lenkradbetätigung und zum anderen über die Füße/Beine für das Betätigen der Pedalerie. Weitere Bedienelemente, wie Schaltung, Navigations- bzw. Entertainmentsystem usw. werden ebenfalls mit den Händen bedient, sind jedoch bezüglich des Kontextes der Fahraufgabe von untergeordneter Bedeutung. Das Lenken – im Kontext der Handlungsausführung kann dies als „Ausführung von Lenkhandlungen“ interpretiert werden – kann somit als die Hauptaufgabe eines Fahrzeugführers bezeichnet werden. Nach Pick & Cole [PC06] sind am Lenkvorgang vor allem der vordere und mittlere Deltamuskel (*musculus deltoideus*), der lange Kopf des dreiköpfigen Armmuskels (*triceps brachii*) sowie der Brustbein-Rippenteil (*pars sternocostalis*) des großen Brustmuskels (*musculus pectoralis major*) beteiligt. Diese Muskeln erzeugen durch Anheben bzw. Absenken von Arm und Schultern tangentielle Kräfte, welche das Lenkrad in Bewegung setzen (vgl. Abbildung 3.26).

Es existieren verschiedene Modelle, die die Physis des Menschen bzgl. des Lenkens abbilden. Gemeinsam ist diesen Modellen, dass die Dynamik der Arme, also Dämpfung, Trägheit usw. sowie die sensorischen Rückmeldungen der Position des Lenkrads und des anliegenden Lenkmoments modelliert werden (z. B. bei Pick & Cole [PC03]). Ein Modell für das Lenken in diesem Kontext ist in Abbildung 3.27 dargestellt, die Modelle für die Muskulatur basieren zumeist auf dem Modell Hills von 1938 [Hil38]. Dieses beschreibt einen Muskel basierend auf drei Komponenten: ein eine aktive Kraft erzeugendes kontraktiles Element (CC), ein seriell elastisches Element (SEC) sowie ein paralleles elastisches Element (PEC). SEC und PEC stehen für die passiven, weichen Bindegewebe und Sehnen, sowie nicht aktive Muskelfasern, CE sind aktive Muskelfasern. Eine Übersicht über weitere Muskelmodelle und deren Implementierung ist in der Arbeit von Henning zu finden [Hen06].

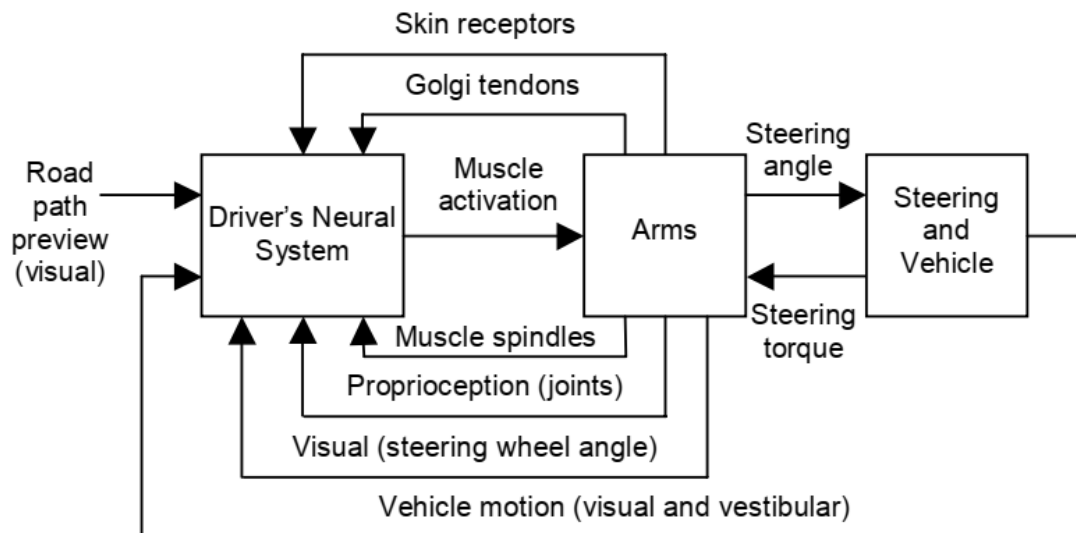


Abbildung 3.27: Modell des neuromuskulären Systems während des Lenkens aus Pick & Cole [PC03]

Die Umsetzung der Fahraufgabe in physiologische Handlungen geschieht über die im Abschnitt 3.3.3 beschriebenen Regelkreise (Längen- bzw. Kraftservomechanismus). Betrachtet man die Lenkhandlung etwas genauer mit Bezug auf die beiden Regelungsmechanismen, so stellt sich die Frage, wann genau welcher der beiden Mechanismen zum Einsatz kommt. Nach Rühmann [Rüh78] (zitiert nach Wolf [Wol09]) wird durch eine Kraft eine initiale Bewegung gestartet, welche durch entsprechende Rezeptoren (Tiefensensibilität) kontrolliert wird. Solange der Fahrer in der Lage ist, den Weg bzw. eine Längenänderung zu regeln, wird er dies tun, bis dieses nicht mehr möglich ist – dann setzt die Regelung der Kraft ein. Für das Lenken eines Fahrzeugs lässt sich somit schlussfolgern, dass das konstante Halten eines Lenkwinkels mittels Kraftregelung umgesetzt wird, das Einstellen eines bestimmten Lenkwinkels jedoch über eine Wegregelung realisiert wird (vgl. Abbildung 3.28). Diese Mechanismen werden während Notsituationen ausgesetzt, da nicht genügend kognitive Ressourcen für eine Regelung vorhanden sind – das schnellstmögliche Herumreißen des Lenkrads ist eine gesteuerte Handlung, die Regelung setzt dann wieder ein, sobald genügend Ressourcen verfügbar sind.

Eine Problematik bei der Handlungsausführung bezüglich des Lenkens besteht in der Kopplung mit der Fahrgeschwindigkeit: Bei niedrigen Geschwindigkeiten müssen im Allgemeinen größere Amplituden des Lenkwinkels aufgebracht werden, so dass der Lenkradstellung eine größere Bedeutung beigemessen werden kann. Bei höheren Geschwindigkeiten hingegen sinkt der nutzbare Bereich der Lenkradposition, so dass der Fahrer nun vor allem über das Rückstellmoment regelt.

Des Weiteren muss laut Beruscha [Ber12] beachtet werden, dass bei bestimmten einarmigen Lenkvorgängen aufgrund der Nutzung unterschiedlicher Muskeln zwischen einer Lenkradddrehung im Uhrzeigersinn und einer Drehung gegen den Uhrzeigersinn unterschieden werden muss.

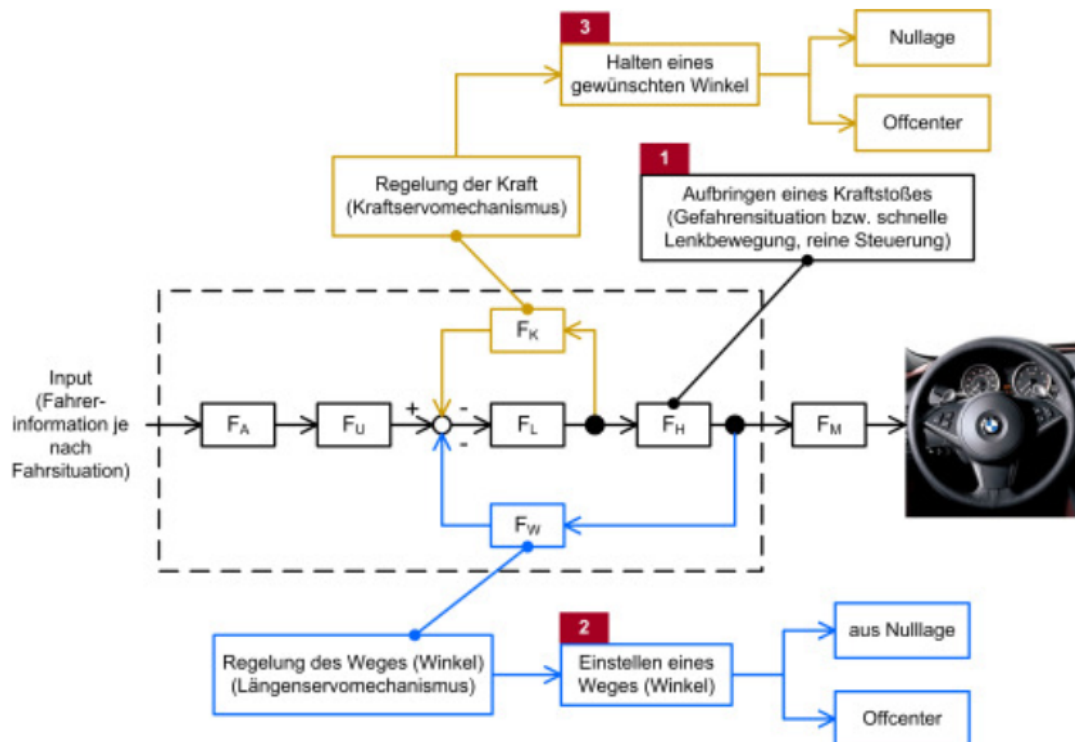


Abbildung 3.28: Blockschaltbild des Lenkvorgangs aus Wolf [Wol09]

Dies kann dazu führen, dass fahrerseitig bestimmte Prioritäten für Handlungen in eine bestimmte Richtung existieren.

Die Regelung der Geschwindigkeit des Fahrzeugs wird über die Pedalerie geregelt, direkten Einfluss haben hierbei das Gas- sowie das Bremspedal. Im Gegensatz zum Lenken ist die Geschwindigkeitsregelung mittels Pedalerie eine eindimensionale Aufgabe. Die Bedienung von Gas- und Bremspedal unterscheidet sich jedoch voneinander: So ist ein stetiger Druck auf das Gaspedal die normale Verhaltensweise, da aufgrund physikalischer Gegebenheiten dem Motor kontinuierlich Kraftstoff zugeführt werden muss, um eine gewünschte Geschwindigkeit aufrechtzuerhalten. Das Bremspedal hingegen wird nur verwendet, wenn die Geschwindigkeit schneller, als es die Reibungskräfte zulassen, verringert werden muss. Der Bremsvorgang ist ebenso wie das Lenken eine geregelte Handlung – der Bremswunsch des Fahrers wird durch das Bremssystem des Fahrzeugs in einen Bremsdruck umgesetzt, der zu einer Geschwindigkeitsverringerung des Fahrzeugs führt. Der Mensch nimmt zum einen die Reaktion des Fahrzeugs (vor allem Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, aber auch Nick- und Gierwinkel sowie deren Ableitungen), zum anderen aber auch haptische Informationen über das Bremspedal auf (Pedalweg und Pedalkraft, vgl. Abbildung 3.29).

Für die Ausführung der motorischen Aktionen des Bremsvorgangs (Heben des Fußes und Aufrechterhalten einer bestimmten Fußposition) ist vor allem der vordere Schienbeinmuskel

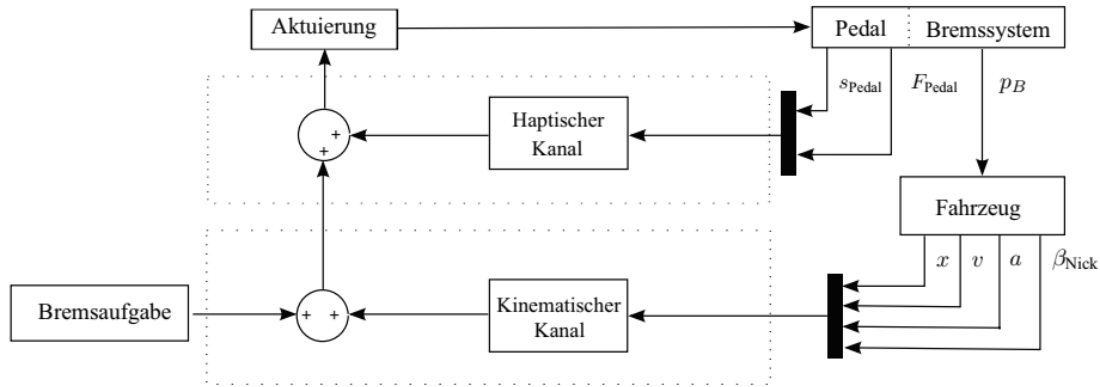


Abbildung 3.29: Bremsregelkreis nach Grzesik [Grz09]): Der Fahrer setzt den Bremswunsch an das Bremssystem um. Zurückgeführt werden die haptischen Variablen der Pedaldynamik sowie die Kinematik der Fahrzeugbewegung

(*musculus tibialis anterior*) verantwortlich (Sendler et al. [SAFA06]). Ein Fahrermodell für eine menschenähnliche Bremsstrategie haben z. B. Kim et al. [KOK⁺05] implementiert. Des Weiteren gibt es verschiedene kinematische Menschmodelle, die für ergonomische Untersuchungen die menschliche Physis detailgenau abbilden, beispielsweise RAMSIS, JACK und andere (eine Zusammenfassung findet sich u. a. in Bubb [BBGV15]).

Fazit Die menschliche Aktuatorik begrenzt durch ihre physikalischen Limitationen die Ausführungsgeschwindigkeiten der geplanten Aktionen bzw. die Planung auf ausführbare Handlungen. Für die vom menschlichen Fahrer durchführbaren Handlungen (also Bedienung von Lenkrad und Pedalerie) ist eine Implementierung physiologischer Modelle zumeist nicht notwendig. Für hochdynamische Simulationen sollten jedoch zumindest Reaktionszeiten im Modell berücksichtigt werden.

3.4 Einflussfaktoren

Unterschiedliche Einflussfaktoren wirken permanent oder temporär auf bestimmte Elemente des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses. Wichtige, während des Fahrens zu beachtende Faktoren wie *Aufmerksamkeit*, *kognitive Beanspruchung*, *Situationsbewusstsein*, *Motivation* und *Emotion* werden in diesem Abschnitt behandelt und hinsichtlich ihrer Modellierbarkeit bzw. der Notwendigkeit der Modellierung betrachtet.

3.4.1 Aufmerksamkeit

Das psychologische Konstrukt „Aufmerksamkeit“ stellt kein scharf umrissenes und klar definiertes Gebilde dar. Vielmehr beinhaltet es unterschiedliche Aspekte, die alle gemein haben, dass sie etwas mit der Fähigkeit, bestimmte wahrnehmbare Informationen erkennen und verarbeiten zu können, zu tun haben. Versteht man Aufmerksamkeit als Auswahl und Weiterverarbeitung bestimmter Reize, so kann diese als ein Selektionsmechanismus verstanden werden, interpretiert man sie als eine Art konzentrierte Bereitschaft, neue Informationen aufnehmen zu können, so betrachtet man eher die Dimension der Aufmerksamkeitsintensität. Innerhalb des Themengebiets „menschliches Fahren“ sind beide von großer Bedeutung.

Aufmerksamkeitsselektivität *Selektive* Aufmerksamkeit umschreibt die Fähigkeit, aus dem vielfältigen Reizangebot der Umwelt einzelne Reize oder Reizaspekte auszuwählen und bevorzugt zu betrachten, andere dagegen zu übergehen und zu unterdrücken. Da ein oder mehrere Reize gezielt fokussiert werden, spricht man auch von *gerichteter* Aufmerksamkeit. Die Auswahl der Reize wird hierbei durch vier Faktoren beeinflusst: Salienz (das Hervorstechen bestimmter Reize, „bottom-up“), Erwartung, Nutzen (beide „top-down“) und Aufwand (zitiert aus Wickens et al. [WGLL98] nach Miličić [Mil10]). *Geteilte* Aufmerksamkeit hingegen bedeutet, dass mehrere Informationsquellen gleichzeitig abgefragt werden, im Kontext der Fahrzeugführung entspräche dies beispielsweise der Bedienung eines Navigationsgerätes während des Fahrens. Jedoch ist es möglich, die parallele Durchführung zweier komplexer kognitiver Aufgaben zu erlernen (Spelke et al. [SHN76]) und ist umso besser umsetzbar, je mehr sich die zu bewältigenden Aufgaben voneinander unterscheiden (Navon & Gopher [NG79]). Des Weiteren existiert das Konzept der *visuell-räumlichen* Aufmerksamkeitsselektivität. Dieses beschreibt das Verschieben des Aufmerksamkeitsfokus von einer zur anderen Informationsquelle, dies kann durch Kopf- oder Augenbewegungen oder auch verdeckt geschehen.

Aufmerksamkeitsintensität Betrachtet man das psychologische Konstrukt „Aufmerksamkeit“ nach Zimbardo als einen „Zustand konzentrierter Bewusstheit, welcher von einer Bereitschaft des zentralen Nervensystems, auf Stimulation zu reagieren, begleitet wird“ [Zim92], so stellt sich im Kontext der Fahrzeugführung zum einen die Frage nach dem Grad der Konzentration, weiterhin kann die Zeitdauer des Zustands von Bedeutung sein. Die Intensität dieser *ungerichteten* Aufmerksamkeit kann durch die *Aktiviertheit* beschrieben werden. Hier kann man zwischen *tonischer* Wachheit, welche ein für eine längere Zeit gleichbleibendes Aktivierungsniveau (z. B. abhängig von der Tageszeit) beschreibt, und *phasischer* Wachheit, die eine abrupte Erhöhung des Aktivierungsniveaus (zumeist wegen eines starken Reizes) beschreibt, unterschieden werden. Eine für eine längere Zeit andauernde Konzentration auf eine bestimmte Sache wird als *Daueraufmerksamkeit* bezeichnet. Falls eine geringe Reizfrequenz bei der Bewältigung der entsprechenden Aufgabe vorhanden ist, beim Auftreten jedoch schnell gehandelt

werden muss, so spricht man von *Vigilanz*. Besonders im Kontext der Fahrzeugführung ist solch ein Zustand von Bedeutung. Als Beispiel sei hier eine Autobahnfahrt mit sich wenig verändernder Landschaft und wenig Verkehr genannt, bei der jedoch aufgrund der hohen Geschwindigkeiten schnell auf beispielsweise plötzlich auftretende Hindernisse reagiert werden muss.

Aufmerksamkeit ist von multiplen Faktoren abhängig, zum einen haben endogene Faktoren wie Erschöpfung, Müdigkeit oder ein zu geringes Erregungsniveau einen Einfluss, zum anderen können exogene Faktoren Unterforderung (z. B. hohe Vorhersehbarkeit der Verkehrssituation, „langweilige“ Fahrt), aber auch Überforderung (lang andauernde Fahrten bei hoher Verkehrsdichte und hohen Geschwindigkeiten) hervorrufen (Bubb, [BBGV15]).

3.4.1.1 Aufmerksamkeit als Ressource

Die Anzahl der Reize, welche gleichzeitig verarbeitet werden können, ist beschränkt. Schon Donders [Don68] nahm für sein Reiz-Reaktionsmodell an, dass mentale Prozesse seriell ablaufen und Zeit kosten. Nach Broadbent [Bro58] sind die Beschränkungen für den Fluss der Informationen durch das kognitive System flaschenhalsartiger Natur. Er nimmt an, dass man sich nur des Kommunikationskanals bewusst sein kann, auf welchen man die Aufmerksamkeit richtet („single channel theory“); andere Informationen werden zwar zwischengespeichert, nicht jedoch aktiv weiterverarbeitet. Dem Prinzip der Sequentialität wird in *Kaskadenmodellen* (z. B. McClelland [McC79]) zusätzlich das der Gleichzeitigkeit hinzugefügt: Ein Prozess $n + 1$ kann bereits starten, bevor der vorherige Prozess n vollständig abgearbeitet ist. Im Gegensatz zu den *sequentiellen* Modellen wird bei *Ressourcenmodellen* kein zeitlicher Ablauf modelliert. Das Hauptaugenmerk liegt in diesen Modellen auf der zur Verarbeitung eines Reizes aufzuwendenden Energie (z. B. Kahneman [Kah73]). Ein großer Vorteil dieser Modelle besteht in ihrer Fähigkeit, Ressourcenkonflikte darzustellen, was für eine möglichst menschähnliche Modellierung eines Fahrers eine eminent wichtige Eigenschaft darstellt.

Eine Zusammenführung von Stufen- und Ressourcenmodell stellt das vierdimensionale Modell der multiplen Ressourcen nach Wickens [Wic08] dar (vgl. Abbildung 3.30). Die Grundaussage dieses Modells besteht darin, dass zwei Aufgaben, die unterschiedliche Ressourcen beanspruchen, leichter parallel auszuführen sind, als solche, welche auf ähnliche Typen von Ressourcen zurückgreifen. Wickens beschreibt vier grundsätzliche Dimensionen der Ressourcen:

- 1.) **Verarbeitungsstufen:** Es gibt derer drei: Wahrnehmung, Informationsverarbeitung und Reaktion. Wickens weist jedoch die perzeptiv-kognitive Prozesse – inklusive des Arbeitsgedächtnisses – einer Verarbeitungsstufe zu.
- 2.) **sensorische Modalitäten:** Es wird zwischen visueller und auditiver Wahrnehmung unterschieden.
- 3.) **visuelle Kanäle:** Wickens unterscheidet zwischen fokalem und Umgebungssehen, biologisch stimmt dies größtenteils mit fovealem bzw. peripherem Sehen überein [Wic02].

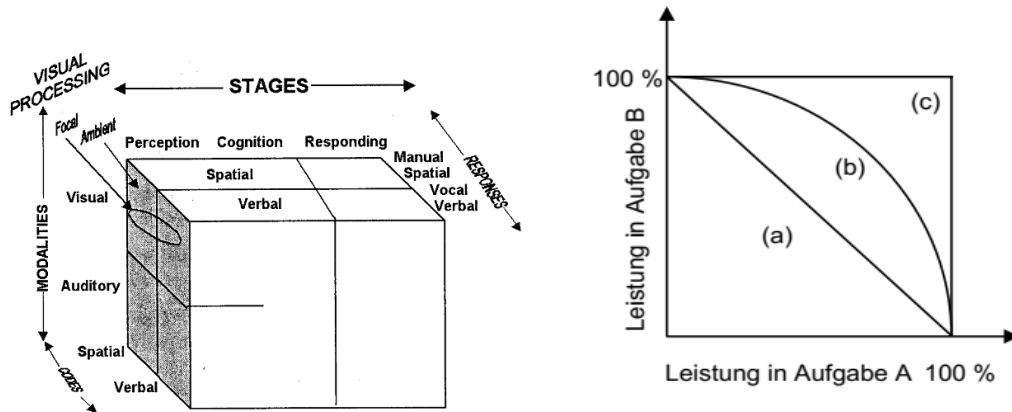


Abbildung 3.30: Links: multiples Ressourcenmodell aus Wickens [Wic08], rechts: POC-Kurven

- 4.) **Verarbeitungscodes:** Die Informationen können sprachlich oder räumlich verarbeitet werden. Die entsprechenden Reaktionen sind somit ebenso sprachlich oder motorisch bzw. räumlich.

Gerade im Hinblick auf die Fahrzeugführung erscheint die Wickens'sche Taxonomie als ein hilfreiches Werkzeug, um einige einem Autofahrer bekannte Phänomene zu erklären. So ist es in den meisten Fällen dem Fahrer problemlos möglich, während der Fahrt Konversation zu betreiben, eine (zusätzliche) visuelle Aufnahme von Informationen (z. B. Lesen, Schauen von Videos) führt jedoch zu größeren Problemen bei der Bewältigung der Fahraufgabe. Des Weiteren können neben den aus fokalem Sehen gewonnene Informationen aus der Peripherie „automatisch“ wahrgenommen werden (z. B. Wahrnehmung der Geschwindigkeit mittels peripherem Sehen), eine gleichzeitige Fokussierung auf mehrere Objekte ist dem Menschen hingegen nicht möglich. Kritisieren kann man an dem Modell, dass es strikt an einer Dichotomie der jeweiligen Ressourcen festhält, so fehlen beispielsweise einige Wahrnehmungskanäle und somit auch deren Einfluss auf die Verteilung der Ressourcen. Die Existenz einiger Untersuchungen, deren Ergebnisse den Annahmen der multiplen Ressourcentheorie widersprechen sowie die ungenaue Definition der einzelnen Ressourcen gibt ebenfalls Anlass zur Kritik (Vollrath & Totzke [VT03]).

Die Wirkung, welche eine Aufgabe, die auf unterschiedliche Ressourcen zugreift, bei gleichzeitiger Verwendung dieser auf die Leistung der entsprechenden Einzelaufgaben hat, kann mittels „Performance Operating Characteristic“ (POC) dargestellt werden (vgl. Abbildung 3.30). Es ergeben sich somit verschiedene Funktionen für die Leistung der Aufgaben abhängig von der Verwendung gemeinsamer Ressourcen. In der Grafik sind drei mögliche Abhängigkeiten dargestellt: Der Graph (a) beschreibt die Leistung zweier Aufgaben ohne Möglichkeit der Aufteilung der Ressource, Graph (b) erlaubt eine gewisse Parallelnutzung, Graph (c) beschreibt eine Ressource, welche ohne Verluste parallel genutzt werden kann.

3.4.1.2 Visuelle Aufmerksamkeit und Fahrzeugführung

Im Kontext der Fahrzeugführung spielt die visuelle Aufmerksamkeit eine herausragende Rolle. Die Führung eines Fahrzeugs erfordert eine möglichst ununterbrochene visuelle Aufmerksamkeit (Akyol et al. [ALK01]). Visuelle Aufmerksamkeit kann als eine Art Scheinwerfer verstanden werden, der auf bestimmte Bereiche des visuell zu erfassenden Bereichs gerichtet werden kann (Anderson [And01]). Je größer der so abgedeckte Bereich ist, umso schlechter werden die in diesem Bereich vorhandenen Informationen verarbeitet. Eine optimale Informationsaufnahme findet bei minimaler Größe des „Scheinwerfers“ statt, diese liegt bei etwa $2 - 3^\circ$ Sehwinkel. Der Fokus der visuellen Aufmerksamkeit stimmt im Allgemeinen mit dem aktuellen Fixationsort überein [JRV03], auch nach Schulz [Sch12] kann der Zusammenhang zwischen Blickrichtung und Aufmerksamkeitsfokussierung als gesichert gelten. Timpe [Tim01] interpretiert Blickbewegungen ebenso als Indikator kognitiver Prozesse.

Eine Messung von (selektiver) visueller Aufmerksamkeit ist somit mittels des Instruments Blickanalyse möglich. In einer Vielzahl von Studien (Underwood et al. [UCB⁺03], Schweigert [Sch02], Schulz [Sch12] usw.) wurde gemessen, wann, wie oft, wie lange und wohin Autofahrer ihre Blicke wenden. Trotz mannigfaltiger Untersuchungen zu dieser Thematik gibt es bisher jedoch weder universelle noch so etwas wie „richtige“ oder „falsche“ Blickstrategien des Fahrers, diese sind vielmehr stark von der jeweiligen Situation abhängig.

Ganz allgemein kann man jedoch zwei Arten von Blickbewegungen unterscheiden: *gesteuerte* (willkürliche) und *getriggerte* (unwillkürliche) Blickbewegungen. Erstere sind Teil eines Top-Down-Prozesses mit willentlich festgelegtem Fixationsziel, letztere geschehen vor allem aufgrund von Schlüsselreizen, die nur schwer zu unterdrücken sind und werden daher als Bottom-Up-Prozess angesehen (Schweigert [Sch02]). Für die Fahrzeugführung sind vorrangig *gesteuerte* Blickbewegungen von Bedeutung, da der Fahrer aus diesen einen Großteil seiner Informationen erlangt. Als Beispiel führt Schweigert eine Rechts-vor-links-Situation an, in der der Fahrer willkürlich auf die von rechts einmündende Straße blickt, um ein potentiell von dort auftauchendes Fahrzeug rechtzeitig erkennen zu können. Voraussetzung hierfür ist die korrekte Deutung der aktuellen Verkehrssituation. Vorwissen kann die Blickstrategien ebenso beeinflussen: Beispielsweise kennen Fahrer mit Ortskenntnis die lokalen Vorfahrtsregelungen und schauen daher nicht so oft auf die entsprechenden Verkehrszeichen, was bei Änderungen dieser oftmals zu erhöhten Unfallzahlen führt. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Blickstrategie ist das Kurzzeitgedächtnis: So wird ein erfahrener Fahrer, der sich vor wenigen Sekunden vergewissert hat, dass beispielsweise die Spur rechts von ihm frei ist, dies zumeist erst wieder überprüfen, wenn die physikalische Möglichkeit besteht, dass sich ein Fahrzeug dort befinden kann.

Zusätzlich kann zwischen „Scanning“- und „Processing“-Blicken unterschieden werden (Cohen [Coh76]). „Scanning“-Blicke haben den Zweck, möglichst viele Informationen über die aktuelle Situation zu erhalten, also über den Straßenverlauf, Verkehrsschilder sowie andere Verkehrsteilnehmer. Ihre Dauer beträgt etwa 400 ms (Schweigert [Sch02]). Die Scanning-Rate,

also die Anzahl der Fixationen pro Sekunde während des „Scannings“, liegt zwischen 0,8 Hz und 5 Hz. Als „Processing“-Blicke bezeichnet man Blicke auf bekannte Orte bzw. AOIs (z. B. Tachometer), um eine bestimmte Information, die inhaltlich mit diesen Orten verbunden ist und welche erwartet wird, aufzunehmen. Die Dauer dieser „Processing“-Blicke beträgt etwa das Doppelte der „Scanning“-Blicke.

Schweigert [Sch02] identifiziert drei visuelle Grundaufgaben des Fahrers:

- 1.) *Kontinuierliche Kontrolle der eigenen Bewegung*: Da die Bewegung des eigenen Fahrzeugs zumeist nicht für längere Zeit extrapoliert werden kann, muss eine visuelle Überprüfung des Sollzustands stattfinden. Dies geschieht bei erfahrenen Fahrern zumeist mittels peripherem Sehen.
- 2.) *kontinuierliche Überwachung des Fremdverkehrs*: Um eine rechtzeitige Reaktion auf eintretende, potentiell gefährliche Ereignisse gewährleisten zu können, muss die Fahrumgebung regelmäßig abgesucht werden. Dieses „explorative Scanning“ (Cohen [Coh76]) dient zur Wahrnehmung der anderen Verkehrsteilnehmer.
- 3.) *situativ erforderliches Blickverhalten*: Diese Aufgabe ist nur schwer zu spezifizieren, da sie stark von den lokalen, situativen Gegebenheiten abhängt. Sobald etwas Unvorhergesehenes geschieht, wird die visuelle Aufmerksamkeit zumeist darauf gerichtet, das Blickverhalten passt sich der Situation an.

Die Untersuchungen von Underwood et al. [UCB⁺03] haben ähnliches feststellen können: Neben individuellen bzw. situationsspezifischen Blickmustern existieren ein Vorausschmattern, in dem abwechselnd nahe und entfernte Straßenbereiche fixiert werden sowie ein seitliches Scanningmuster, in dem, ausgehend von der eigenen Fahrspur, seitlich vorhandene Fahrspuren auf mögliche Hindernisse überprüft werden.

Schulz [Sch12] fasst nach Wierda & Aasman [WA92] zusammen, dass etwa 25 % aller Fixationen der Spurführung dienen, wobei dieser Anteil (gemeint ist das foveale Sehen) bei schwierigen Streckenbedingungen zunimmt. Er betont ebenso, dass die Spurführungsaufgabe vor allem bei erfahrenen Fahrern überwiegend mittels peripheren Sehens im Nahbereich bewältigt wird. Nach Schweigert [Sch02], zitiert aus Bubb [BBGV15], beanspruchen Fixationen auf den Fluchtpunkt und auf das vorausfahrende Fahrzeug etwa 50 % der Fixationszeit. Zumeist wird in einer Entfernung von 1 s bis 1,5 s voraus visuell abgetastet (Bubb [BBGV15]), 30 % bis 50 % der Gesamtzeit während einer Autofahrt ist die visuelle Aufmerksamkeit eines Fahrers jedoch nicht fahrbezogenen Objekten gewidmet (Hughes & Cole [HC86]).

Antizipation Nach Sommer [Som13] wird Antizipationsleistung im Straßenverkehr „als Kompetenz verstanden, auf der Grundlage von Wissen und aktueller Wahrnehmung zukünftige Verkehrssituationen (und damit auch das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer) richtig einschätzen zu können“. Rauch [Rau09] hingegen fasst den Begriff etwas enger, hier beschränkt sich

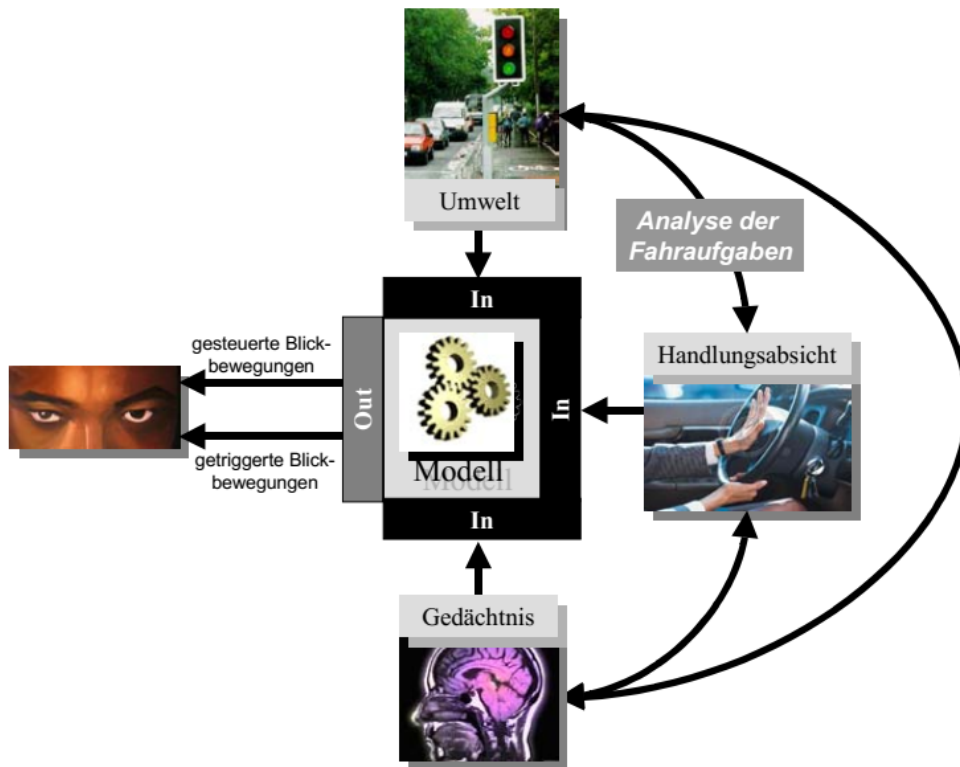


Abbildung 3.31: Einflussfaktoren auf das Blickverhalten aus Schweigert [Sch02]

Antizipation darauf, „handlungsrelevante Situationselemente rechtzeitig zu erkennen und daraufhin die Situation richtig zu interpretieren, um angemessen in ihr agieren und auf sie reagieren zu können“.

Im konkreten Kontext des Autofahrens stellt sich die Frage, in welchem Bereich die erwähnten Informationen aufgenommen werden können. Lorenz definiert eine *vorauslaufende Erfassungssichtweite*, welche den in den nächsten 10 Sekunden (gefahrlos) zu befahrenden Weg beschreibt [Lor71]. Eine Antizipationszeit im Bereich von bis zu 10 Sekunden nehmen auch Hoffmann & Mortimer [HM94] sowie Deutsche [Deu05] an (zitiert jeweils nach Sommer [Som13]). Eine Antizipation im Bereich über 10 Sekunden Vorausschauzeit kann bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten in Betracht gezogen werden, zumeist ist jedoch davon auszugehen, dass sie sich darunter befindet. Eine weitere Größe im Antizipationskontext bezeichnet die von Dilling [Dil73] eingeführte *Erkennbarkeitssichtweite*, welche die Entfernung, „in der ein Streckenabschnitt einwandfrei zu überschauen ist“ beschreibt. Diese wird zwischen 80m und 650m angesiedelt.

Untersuchungen von Leutner [Leu74] bezüglich der fokussierten Gebiete während des Autofahrens ergaben, dass zwischen drei Zonen mit erhöhter Aufmerksamkeit des Fahrers unterschieden werden kann:

- Zone 1 – Fernorientierung und Information (600 m – 250 m): Diese Zone wird durch die maximale Entfernung, in der Objekte vom Menschen erkennbar sind, definiert. Dieser

Abstand liegt für bewegte Objekte bei etwa 600 m – 800 m, unbewegte Objekte können bis zu einem Abstand von 400 m – 500 m erkannt werden.

- Zone 2 – Bereitschaft und Entscheidung (250 m – 75 m): Die Entfernung beruht auf der Annahme von Lorenz, dass bei einer Geschwindigkeit von 90 km/h der Fahrer innerhalb von 10 s etwa 250 m zurücklegt. Für höhere Geschwindigkeiten erhöhen sich die Entfernungen entsprechend.
- Zone 3 – Nahorientierung und Handlung (< 75 m): In diesem Bereich handelt der Fahrer, die Entfernung basiert auf der Erkennbarkeitssichtweite von Dilling [Dil73], der diese aufgrund von Fahrerhandlungen etwa 2,5 s – 3 s vor einer Kurve und einer angenommenen Geschwindigkeit von 90 km/h bei etwa 75 m festlegt (vgl. auch Abschnitt „Reaktionszeiten“ in Kapitel 3.3.4).

Die vom Fahrer anvisierten Koordinaten werden meist nach 2 bis 5 Sekunden befahren, somit kann der übliche Vorausschauhorizont auf eben diese Zeitspanne eingegrenzt werden [LS01].

3.4.1.3 Modellierung visueller Wahrnehmung

Eine Modellierung visueller Wahrnehmung eines Autofahrers sollte sowohl foveale, jedoch auch periphere Wahrnehmung beinhalten (vgl. Abschnitt 3.1.1). Die Kopf- und Augenbewegungen des Fahrers legen fest, in welchen Bereich seine Aufmerksamkeit gelenkt wird und welche Informationen aufgenommen werden können. Miura [Miu86] hat visuelle Aufgaben bei verschiedenen Fahrsituationen und Fahrmanövern untersucht und Situationen nach Blickverhalten kategorisiert (vgl. Abbildung 3.32). Demnach wird allein die Spurhaltung in bestimmten Situationen rein peripher wahrgenommen, das Überwachen von Fahrzeugen auf gleicher Höhe sowie das Achten auf die Straßenbegrenzungen geschieht teilweise peripher, in allen anderen beschriebenen visuellen Aufgaben wird auf foveale Sicht zurückgegriffen.

Ein Modell zur Nachbildung von Blickbewegungen des Fahrers ist das EMMA⁷-Modell von Salvucci [Sal01]. Es basiert lose auf dem „E-Z reader model“ von Reichle et al. [RPFR98], welches Blickbewegungen während des Lesevorgangs nachbildet. EMMA simuliert Blickbewegungen durch Änderungen der visuellen Aufmerksamkeit, wobei sowohl zeitliche als auch räumliche Aspekte beachtet werden. Das Modell beschreibt, ob und wann Blickbewegungen auftreten und worauf geschaut wird. Es kann an kognitive Modelle (z. B. mittels ACT-R erzeugte) angebunden werden, so dass die simulierten kognitiven Prozesse die Aufmerksamkeit steuern und das Modell abhängig davon vorhersagt, wohin geschaut wird.

Blickbewegungen innerhalb eines Objekts sowie unfreiwillige Sakkaden sowie andere Arten von Blickbewegungen außer „normalen“ Sakkaden können mit Hilfe dieses Modells nicht abgebildet werden. Das EMMA-Modell besteht aus drei Hauptkomponenten:

⁷EMMA steht für „eye movements and movement of attention.“

Fahrsituation und – manöver	Visuelle Aufgabe								
	Weite Vorausschau	Überwachen der Spurhaltung	Überwachen vorausfahrender Fahrzeuge	Überwachen von Fahrzeugen auf gleicher Höhe	Beobachten des rückwärtigen Verkehrs durch Spiegel	Beobachten des ruhenden Verkehrs	Beobachten des Verkehrs vor vorausfahrenden Fahrzeugen	Setzen des Einlenkpunktes	Beobachten der Begrenzungen einer engen Straße
Geradausfahrt	F	p p							
Vorbeifahrt an parkenden Fahrzeugen	F	p p				F			
Einfahrt in eine engere Straße	F	pFp					F	F	pFp
Überholen	F	pFp	F	pFp	F		F		

F = foveales Sehen; p p = peripheres Sehen; pFp = foveales / peripheres Sehen

Abbildung 3.32: Visuelle Aufgaben nach Miura [Miu86] aus Jürgensohn & Timpe [SRJ01]

- 1.) *Visual Encoding*: Die (externe) Aufmerksamkeitssteuerung wählt einen Bereich aus, in welchem die dort vorhandenen Objekte als mögliche Ziele für eine Fixation gespeichert werden. Bei Auswahl eines der möglichen Objekte wird dieses als interne Repräsentation gespeichert und eine Zeit T_{enc} für diesen kognitiven Prozess berechnet. Diese hängt u. a. von der Distanz des Objekts zur aktuellen Blickposition sowie der Häufigkeit, mit der das Objekt in der Vergangenheit abgetastet wurde, ab.
- 2.) *Eye Movements*: Die Augenbewegung durchläuft die Phasen *Vorbereitung* und *Ausführung*. Die Vorbereitungsphase beschreibt die „labile“ Phase des Bewegungsprogramms, welche noch abgebrochen werden kann. Die Ausführungsphase hingegen beinhaltet „nicht-labile“ Prozesse, die nicht rückgängig gemacht werden können („ballistische“ Bewegungen). Das Modell setzt für die Dauer der Vorbereitungsphase (T_{prep}) 135 ms an, die Dauer der Ausführungsphase (T_{exec}) berechnet sich aus 50 ms für „non-labile“ Programmierung, 20 ms für die Ausführung sowie 2 ms für jeden zurückgelegten Grad Sehwinkel.
- 3.) *Control Flow*: In dieser Komponente wird modelliert, wie Kognition, visuelle Kodierung und Augenbewegungen miteinander interagieren. Bei einer Anforderung einer Aufmerksamkeitsänderung hin zu einem neuen Objekt wird das Objekt enkodiert, während die Bewegung vorbereitet und ausgeführt wird. Falls eine Änderung der Aufmerksamkeit wäh-

rend der Vorbereitungsphase geschieht, kann die Bewegung noch abgebrochen werden, bei einer Änderungsanforderung während der Ausführungsphase muss die aktuelle Bewegung zu Ende gebracht werden (vgl. Abbildung 3.33).

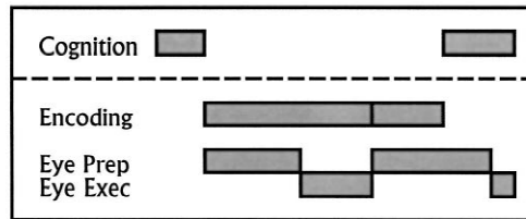


Abbildung 3.33: Darstellung eines Blickvorgangs mit Hilfe des EMMA-Modells nach Salvucci [Sal01]

Fazit Das psychologische Konstrukt „Aufmerksamkeit“ spielt im Kontext der Fahrermodellierung eine bedeutende Rolle: Ein bisher ausschließlich biologisch (u. a. durch die Eigenschaften des menschlichen Sehapparats) eingeschränkter, also ein „lokal allwissender“ Fahrer kann so in ein realitätsnahes Modell überführt werden. Betrachtet man die *visuelle* Aufmerksamkeit, so kann diese für die Modellierung als Auswahlprozess der vom biologischen Sensor „Auge“ bereitgestellten visuellen Informationen dienen. Informationen, welche nicht in einem wie auch immer modellierten „Aufmerksamkeitsspot“ liegen, können dem Fahrermodell dementsprechend nicht für die weitere Verarbeitung zur Verfügung stehen. Vom Fahrer benötigte Informationen (z. B. die genaue aktuelle Geschwindigkeit, das Vorhandensein anderer Verkehrsteilnehmer im Bereich hinter dem eigenen Fahrzeug usw.) können mittels Modellierung spezieller Blickstrategien erhalten werden. Interpretiert man Aufmerksamkeit zusätzlich als Mechanismus zur Ressourcenverwaltung, so können hiermit sowohl Beschränkungen der menschlichen kognitiven Verarbeitungskapazitäten, als auch die Fähigkeiten dieser bei multimodaler Informationsaufnahme- und Verarbeitung modelliert werden. Beispielsweise können so während der Fahrt zu bewältigende Nebenaufgaben, welche vor allem visueller Aufmerksamkeit bedürfen, betrachtet werden.

3.4.2 Belastung und Beanspruchung

Das menschliche Gehirn – wie im Abschnitt 3.2.1.1 beschrieben – ist begrenzt bezüglich seiner Fähigkeit, sich gleichzeitig mit einer bestimmten Anzahl an Aufgaben zu beschäftigen. Die psychologischen Konzepte der *Belastung* und *Beanspruchung* und daraus abgeleitet auch das der *Performanz* beschäftigen sich mit dieser Thematik. Die Begriffe „Belastung“ und „Beanspruchung“ wurden von Rohmert & Rutenfranz [RR75] aus dem Ingenieurwesen in die Arbeitspsychologie überführt. Belastungen bezeichnen von außen auf den Menschen einwirkende Einflüsse, Beanspruchungen dementsprechend die Wirkungen dieser im Menschen. Des Weiteren kann zwischen physischer und psychischer Beanspruchung unterschieden werden,

letztere lässt sich in mentale und emotionale Beanspruchung unterteilen. Mentale Beanspruchung kann weiterhin in kognitive, perzeptive und sensumotorische Beanspruchung untergliedert werden, wobei im Kontext der Fahrzeugführung zumeist kognitive Beanspruchung thematisiert wird. Physische Beanspruchung (also die Wirkung auf Muskeln, Gelenke, Kreislauf etc.) tritt heutzutage nur noch bei extremen Fahraufgaben (z. B. bei Autorennen, Rallye- oder Testfahrten) auf und wird daher nicht weiter betrachtet. Nach Wieland-Eckelmann unterscheidet sich emotionale von mentaler Beanspruchung vor allem dadurch, dass erstere durch ausführungsspezifische Belastungsfaktoren (Zeitdruck, Lärm, Hitze, Gestank, Gefahren, Stress, soziale Faktoren usw.) verursacht werden, welche mit negativen Emotionen wie Angst, Hilflosigkeit, aber auch Wut oder Ärger verknüpft werden ([WE92], vgl. auch Abschnitt 3.4.5). Mentale Beanspruchung hingegen wird durch aufgabenspezifische Belastungsfaktoren (Schwierigkeit und Komplexität der Aufgabe, aber auch Ermüdung) ausgelöst. Somit kann mentale Beanspruchung auch als ein Verhältnis der entsprechenden Anforderungen und der individuellen Leistungsfähigkeit des menschlichen Informationsverarbeitungsapparats aufgefasst werden. Intraindividuelle Unterschiede, z. B. tagesezeitabhängige Faktoren wie Müdigkeit oder Biorhythmus können die Anzahl der gleichzeitig zu verarbeitenden Informationen verringern und erhöhen somit die mentale Beanspruchung.

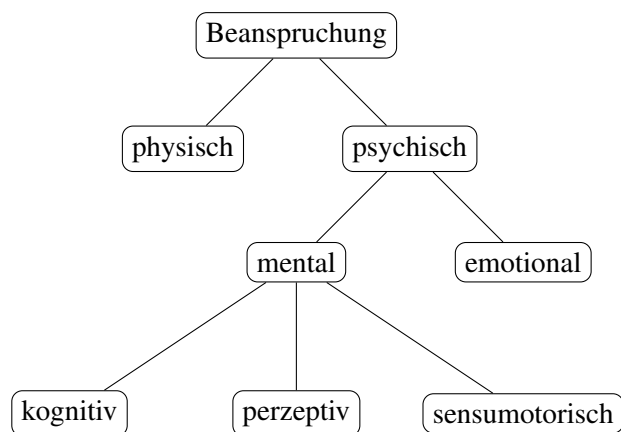


Abbildung 3.34: Kategorien von Beanspruchung

Eine scharfe Trennung zwischen emotionaler und mentaler Beanspruchung mag auf der theoretischen Ebene sinnvoll sein, praktisch gesehen ist diese jedoch nicht möglich. „Rein kognitive“ Prozesse – also jene, auf die sich mentale Beanspruchung bezieht, existieren in der Realität nicht, sie werden zu jeder Zeit von emotionalen und motivationalen Faktoren beeinflusst (Edelmann [Ede00]).

In diesem Kontext spielt der Zusammenhang zwischen mentaler Belastung und der entsprechenden Beanspruchung bzw. der erbrachten Leistung eine Rolle. Nach [DW96] durchlaufen beide dieser Größen bei steigender mentaler Belastung sechs Stufen (vgl. Abbildung 3.35). Bei geringer Belastung und daher geringer Leistung wird eine hohe Beanspruchung empfunden (Zone D), dies kann mit dem Konzept der Vigilanz erklärt werden. In den Zonen A1 – A3 ist die Performanz hoch, die Beanspruchung folgt einem U-Verlauf und hat ihr Minimum in A2. Dies

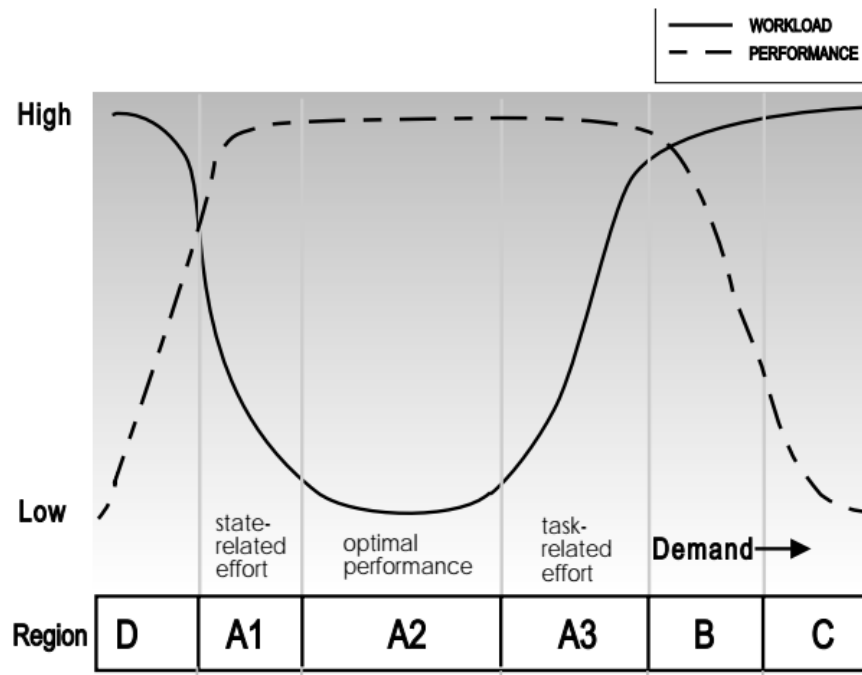


Abbildung 3.35: Zusammenhang zwischen mentaler Belastung und Leistung nach De Waard [DW96]

interpretiert De Waard folgendermaßen: In A1 ist die Aufgabe bereits schwer genug, um nicht zusätzlichen Aufwand für die Konzentration auf eine wenig anstrengende Aufgabe aufwenden zu müssen, in A2 kann die Aufgabe trotz steigender Belastung mühelos erfüllt werden, in A3 wird die Aufgabe als anstrengender empfunden, kann jedoch weiterhin – zeitlich begrenzt – erfüllt werden. Im Bereich B hingegen sinkt die Leistung aufgrund zu hoher Beanspruchung, im Bereich D ist der Fahrer bereits überfordert, die Leistung ist nur noch sehr gering.

3.4.2.1 Müdigkeit

Ein besonderer Fall von sowohl psychischer als auch physischer Beanspruchung stellt das Phänomen „Müdigkeit“ dar. In der DIN 33405 wird Müdigkeit als „eine vorübergehende Beeinträchtigung der psychischen und körperlichen Funktionstüchtigkeit, die von Intensität, Dauer und Verlauf der vorangegangenen psychischen Beanspruchung abhängt“ beschrieben. Müdigkeit (engl. „fatigue“) verändert sich tageszeitabhängig und hängt ebenfalls mit der Zeit, in der eine Aufgabe bereits bearbeitet wird („time-on-task“), zusammen (Shinar & Oppenheim [SO11]). Prinzipiell kann zwischen den individuell wahrgenommenen Auswirkungen, den messbaren physischen Veränderungen sowie dem im Fahrverhalten festzustellenden Einfluss von Müdigkeit unterschieden werden. Erstere äußern sich vor allem im Wunsch des Ermüdeten nach Erholung oder Schlaf bzw. im Wissen um seinen aktuellen physischen und psychischen Zustand. Müdigkeit wirkt sich vor allem auf die informationsverarbeitenden Prozesse, insbesondere die das Arbeits-

gedächtnis betreffenden, sowie auf neuromuskuläre Aktivitäten aus. Die Folgen von psychischer Ermüdung sind Leistungsschwankungen, verminderte Aufmerksamkeit und Fehlhandlungen (Platho et al. [PPK13]). Die Auswirkungen von Ermüdung sind in vielen Fällen mit denen von Alkoholgenuss vergleichbar, z. B. was das Spurhalten betrifft (Oppenheim et al. [OSC⁺10]).

Bezüglich des Fahrverhaltens kann konstatiert werden, dass sich Müdigkeit in Form von verlängerten Reaktionszeiten und einer erhöhten Wahrscheinlichkeit von Schreckreaktionen auf vergleichsweise harmlose Ereignisse auswirkt (Gründl [Grü05]). Vor allem bei jüngeren Fahrern ist das Risiko eines müdigkeitsbedingten Unfalls besonders hoch (Holte [Hol12]). Konkret ersichtlich wird dies darin, dass mit steigender Müdigkeit die Frequenz von großen Lenkradbewegungen – bei einer Abnahme der Gesamtzahl von Lenkradbewegungen – zunimmt. Nach Witt et al. [WWPK17] tendieren ermüdete Fahrer zu höheren Geschwindigkeiten. In einer Simulatorstudie kamen Itoh et al. [III15] zu dem Ergebnis, dass erhöhte Müdigkeit zu mehreren messbaren Effekten des Fahrverhaltens führt: Die Schwankungen des lateralen Spurversatzes nehmen zu, ebenso die des Lenkwinkels und des Abstands zum vorausfahrenden Fahrzeug.

Fazit Psychische Beanspruchung kann im Kontext der Fahrzeugführung einen wichtigen Einfluss auf die informationsverarbeitenden Vorgänge haben, eine Unterforderung kann ebenso wie eine Überforderung dazu führen, dass die aktuelle Fahraufgabe nicht oder nur unvollständig bearbeitet wird. Hierbei sind die Wechselwirkungen zwischen mentaler und emotionaler Beanspruchung zu beachten. Müdigkeit aufgrund physiologischer oder aufgabenbezogener Belastung ist ein in der Fahrzeugführung wichtiger Aspekt, diverse Auswirkungen auf das Fahrverhalten sind bekannt, eine Berücksichtigung für eine Modellierung scheint daher angebracht. Schwierig ist jedoch die Modellierung des Vorgangs der Ermüdung – diese stellt aus psychologischer Sicht einen Zustand („state“) dar und ist somit während einer Fahrt veränderlich. Für eine Modellierung muss daher strikt zwischen Modellen, die Ermüdung als Ergebnis einer Modellierung und denen, die jene nur als Eingabewert verwenden, unterschieden werden.

3.4.3 Situationsbewusstsein

Eine weiteres wichtiges psychologisches Konstrukt bezüglich der menschlichen Informationsverarbeitung ist das Situationsbewusstsein („situation awareness“). Es beschreibt das Sich-bewusstsein aller gegenwärtig für die aktuelle Aufgabe wichtigen Informationen sowie deren korrekte Interpretation. Es ist daher das Ergebnis verschiedener kognitiver Prozesse und ist selbst als ein kognitiver Zustand zu betrachten. Das Bewusstsein über eine sich entwickelnde Situation befindet sich größtenteils im Arbeitsgedächtnis und nimmt in dem Maße ab, in dem Ressourcen an andere Aufgaben vergeben werden. Ein optimales Situationsbewusstsein hängt somit direkt von der Zuteilung der selektiven Aufmerksamkeit ab (Wickens & Hollands [WH00]). Es muss zwischen dem Prozess der Aufrechterhaltung von Situationsbewusstsein, welches eben von Aufmerksamkeit und Arbeitsgedächtnis abhängt und dem Situationsbewusstsein an sich unterschieden werden.

Weiterhin muss beachtet werden, das Situationsbewusstsein ein kontextspezifisches Konstrukt ist, ein „allgemeines“ Situationsbewusstsein existiert nicht. Der Entscheidungs- sowie Handlungsabführungsprozess gehören nicht zum Situationsbewusstsein, dieses stellt vielmehr die Grundlage dar, auf dessen Basis Entscheidungen getroffen werden können (Endsley [ESS00]). Ein hohes Situationsbewusstsein muss jedoch nicht bedeuten, dass richtige Entscheidungen getroffen werden, es bietet nur die Basis für die Möglichkeit zum Treffen ebendieser Entscheidungen. Ebenso kann es vorkommen, dass trotz niedrigen Situationsbewusstseins „zufällig“ die richtige Entscheidung getroffen wurde.

Endsley beschreibt Situationsbewusstsein kurz als „knowing, what is going on“ (Endsley [End95]). Das ursprünglich aus der Luftfahrt⁸ stammende Konzept findet heutzutage auch im Bereich der Fahrzeugführung Anwendung. Endsley hat es als ein aus folgenden drei aufeinander aufbauenden Ebenen bestehendes System definiert (vgl. Abbildung 3.36):

- 1.) *Wahrnehmen*: Informationen müssen aufgenommen werden („perception of elements in the environment“), dies beinhaltet das Überwachen der Umgebung, das Erkennen von Signalen sowie das Wahrnehmen des eigenen Zustands.
- 2.) *Verstehen*: Die Bedeutung der Informationen muss verstanden werden („comprehension of the current situation“), die Relevanz der Informationen muss erkannt und ein Gesamtbild der Situation erstellt werden.
- 3.) *Antizipieren*: Mittels der erhaltenen Erkenntnisse können zukünftige Zustände abgeschätzt werden („projection of future status“).

Jede dieser drei Stufen beschreibt einen Zustand, in dem sich der Fahrer befindet, während er sich einer bestimmten Fahraufgabe widmet. Ein Fahrer in der ersten Stufe des Situationsbewusstseins befände sich in der Lage, die vorhandenen Informationen aufzunehmen, kann diese jedoch nicht adäquat einordnen und somit weder ein brauchbares Abbild der Situation erstellen, noch abschätzen, wie sich die anderen Objekte bzw. das eigene Fahrzeug zukünftig verhalten werden. Als Beispiel sei das Erkennen einer Warnleuchte im eigenen Fahrzeug bzw. eines unbekannten Verkehrsschildes ohne die Möglichkeit der Interpretation dieser genannt. Ähnliches gilt für die zweite Stufe: Die momentane Situation kann zwar akkurat geschätzt werden, die Antizipation schlägt jedoch fehl. Beispielsweise wäre dies auf einen Fahrer übertragbar, der zwar sieht, dass die Bremslichter des Vordermanns leuchten und ebenso versteht, dass dies bedeutet, dass dieser momentan bremst, er jedoch anhand der Geschwindigkeit und des Abstands des Vorderfahrzeugs die notwendige Bremsung zu spät/nicht stark genug durchführt.

Wichtig erscheint in diesem Zusammenhang auch das Konzept der Gegenwärtigkeit. Menschen erleben Zeit in Einheiten von etwa 2 bis 3 Sekunden (Pöppel [Pöp97]), womit sich die gefühlte Gegenwart auf ebendiese Zeit beschränkt. Dementsprechend ergibt sich ein „Antizipationshorizont“ ebendieser Zeitspanne sowie eine entsprechend von der aktuellen Geschwindigkeit

⁸Ziel einiger Untersuchungen war es, herauszufinden, was sog. „Fliegerasse“ von normalen Piloten unterscheidet, es ergab sich, dass u. a. höheres Situationsbewusstsein entscheidenden Einfluss innehat.

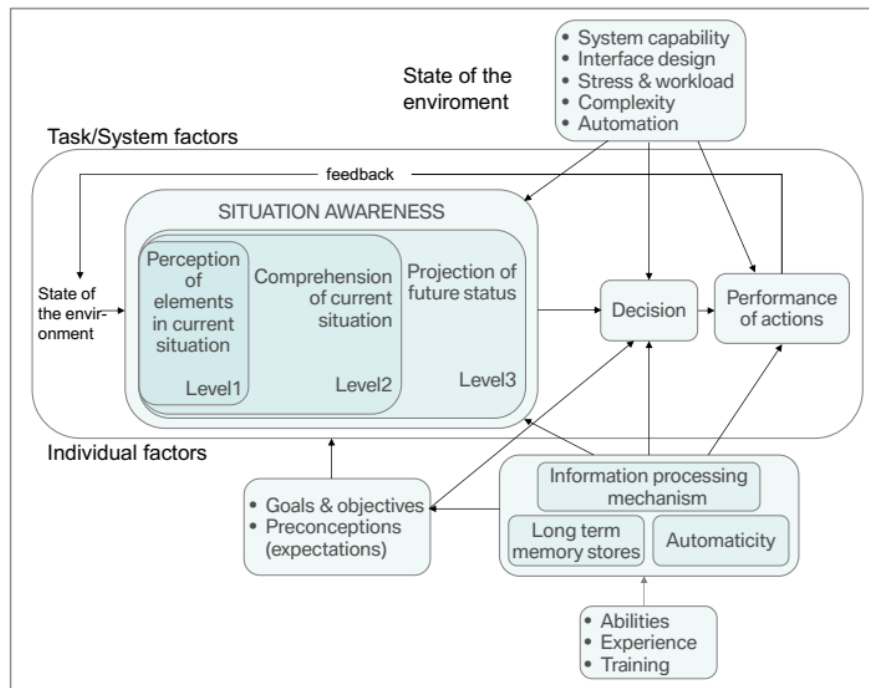


Abbildung 3.36: Schema des Situationsbewusstseins nach Endsley [End95]

abhängige Entfernung. Die Fähigkeit, sich in zeitkritischen Situationen bei begrenzter Verarbeitungsgeschwindigkeit die richtigen („kritischen“) Informationen herauszusuchen, stellt einen gewichtigen Teil von Fahrerfahrung dar, dies konnte beispielsweise von Sukthankar bestätigt werden [Suk97].

Fazit Das Konzept des Situationsbewusstseins kann helfen, bestimmte (vor allem fehlerhafte) Verhaltensweisen des Fahrers verstehen und somit letztendlich modellieren zu können. Beispielsweise kann ein „looked-but-failed-to-see“-Fehler mittels durch Ablenkung verursachtes niedriges Situationsbewusstsein erklärt und simuliert werden.

3.4.4 Motivation

Die Frage, warum ein Mensch so handelt, wie er handelt, bzw. weshalb er überhaupt eine Handlung ausführt, gehört zu den ältesten philosophischen Fragestellungen. Als *Motive* werden in diesem Kontext die grundlegenden Beweggründe (lat. „motivare“- bewegen) einer Handlung bezeichnet. Die Befriedigung dieser Motive stellt das Ziel jedweden Handelns dar; *Motivation* hingegen beschreibt die Gesamtheit aller momentan aktiven Motive und bestimmt somit die aktuelle Zielsetzung, beeinflusst aber auch kognitive Prozesse und Motorik. Mook definiert Motivationen als „Prozesse, die ein zielgerichtetes Verhalten auslösen und aufrechterhalten“ [Moo87], Heckhausen beschreibt Motivation als eine „momentane Gerichtetheit auf ein Handlungsziel, zu deren Erklärung man die Faktoren weder nur auf Seiten der Situation oder der

Person, sondern auf beiden Seiten heranziehen muss“ [Hec89]. Der Begriff des Bedürfnisses spielt in diesem Zusammenhang ebenfalls eine wichtige Rolle. Nach Holte [Hol94] kann ein Bedürfnis durch einen erlebten physiologischen oder psychologischen Mangelzustand beschrieben werden, welcher Motive auslösen kann, die zu zielgerichteten Handlungen führen. Die Stärke des jeweiligen Motivs steht hierbei in einem direkten Zusammenhang mit der Intensität des Mangelzustands. Motive selbst sind jedoch nicht zielgerichtet, nach Jürgensohn [Jür01] erklären diese „nur Tendenzen und Aspekte von Handlungen und keine Handlungen selbst“, daher werden Motive oft mit so weichen Begriffen wie „Streben“ oder „Kräfte“ assoziiert. Um die Motivation(en) eines Menschen verstehen zu können, müssen zuerst seine Motive bekannt sein. Es gibt allerdings in der Motivationsforschung keine allgemeine Theorie, die die Ursache(n) für jegliches Motiv erklären kann, die meisten der bekannten motivationspsychologischen Theorien können jedoch auf einer zweidimensionalen Skala mit den Achsen „Zeit“ und „Ort“ platziert werden. Auf der Zeitachse interessiert, ob das Motiv aus etwas Vergangenem rührt, es sich auf aktuelle Probleme im Hier und Jetzt bezieht oder auf zukünftig zu erreichende Ziele fokussiert ist. Die Ortsachse beschreibt den Ursprung des Motivs, wobei zwischen intern (also basierend aus den Eigenschaften, Erfahrungen usw. der Person) und extern (aus der Umgebung der Person stammend) unterschieden wird. Motive sind des Weiteren „äquifinal“, d. h. unterschiedliche Endsituationen von Handlungen können aufgrund eines einzigen Motivs entstehen. Jedoch sind Motive ebenso „multideterminiert“ – unterschiedliche Motive können zu ein und demselben Verhalten führen.

Motivationen wirken nach Huguenin [Hug88] bezüglich des Wickens’schen Informationsverarbeitungsmodells auf alle Komponenten, bis auf die Wahrnehmung. Es können jederzeit mehrere, sich zum Teil widersprechende Motive gleichzeitig aktiv sein, ebenso können sich die jeweiligen Motivstärken – und damit auch die Motivation – und damit letzten Endes auch die entsprechenden Ziele während einer Handlung ändern. Motive können durch äußere Einflüsse angeregt werden bzw. können einige Motive erst bei bestimmten Umgebungseigenschaften aktiviert werden (das „Konkurrenz“-Motiv kann beispielsweise erst aktiviert werden, wenn ein Objekt, das diese Konkurrenz darstellen kann, vorhanden ist). Resultierende Motivationen sind zeitlich nicht konstant, sie stehen in einem stetigen Wechselspiel zwischen innerem Antrieb und äußeren Reizen.

3.4.4.1 Motivation und Fahrzeugführung

Transformiert man die Frage nach dem Beweggrund für aktuelle Handlungen auf die Ebene der Fahrzeugführung, so kann man die möglichen Motive stark eingrenzen – die Frage lautet nun: „Was bewegt den Fahrer, so zu fahren, wie er fährt?“. Im Allgemeinen folgt jeder Fahrer den Grundmotiven, sein Ziel möglichst schnell, bequem, sicher und mit wenig Aufwand zu erreichen. Angelehnt an die von Klebelsberg [Kle82] beschriebenen Verhaltenstendenzen in Konfliktsituationen (Leistungstendenz mit Fokus auf Zielerreichung bzw. Sicherheitstendenz mittels Vermeidung negativer Konsequenzen) lassen sich daraus die Hauptmotive Leistung und

Sicherheit ableiten. Weitere, sog. „Extramotive“ wurden durch Näätänen & Summala [NS76] eingeführt, diese sind u. a. Selbstbestätigungsdrang, Fahrspaß, Erleben der eigenen Kompetenz, aber auch „Risiko um des Risikos Willen“. Des Weiteren beschreibt Holte [Hol94] Motive der sozialen Anerkennung sowie Machtmotive. In diesem Kontext kommen Motive wie Angst vor Zurückweisung, Ablehnung oder Ausschluss zum Tragen, ebenso Erwartungen, die bei Zugehörigkeit zu einer speziellen Bezugsgruppe auftreten können.

Jürgensohn definiert Motive als „kausale Quellen von Verhalten, die vollständig in uns liegen und nicht direkt auf eine äußere Situation bezogen sind“ [Jür01]. Mit Hilfe dieser Definition lässt sich sehr gut der Unterschied zum kognitiv-deterministischen Handeln darstellen: Die durch die vorgegebene äußere (Verkehrs-)Situation und die kognitiven Fähigkeiten des Fahrers logisch folgende Handlung wird u. a. wegen dem Fahrer innewohnenden Motiven bzw. aktuell wirksamen Motivationen nicht *genau so* durchgeführt. Vielmehr wirken die einzelnen Motive auf verschiedene Arten und Weisen auf die Handlung ein, welche entsprechend der Stärke der Motivation verändert wird. Ein und dasselbe Verhalten kann jedoch auch durch verschiedene Motive determiniert sein.

Motive können bezogen auf einzelne Handlungen, welche im Bereich des Autofahrens zumeist nur wenige Sekunden dauern, als zeitlich konstant angenommen werden. Zwar können sich Motive mit der Zeit ändern, jedoch nicht in einem Maße, welches einen Einfluss auf eine aktuelle Handlung – in diesem Kontext: ein Fahrmanöver – hat. Die Erfüllung eines Handlungsziels und somit auch die Befriedigung des entsprechenden Motivs und die daraufhin folgende Änderung der aktuellen Motivation widersprechen dem nicht, da die Handlung dann bereits abgeschlossen ist. Unerwartete Änderungen der Situation führen daher nicht zu Modifikationen von Motiven, sondern zu einer Veränderung der Gewichtung der aktiven Motive bzw. dazu, dass entsprechende Motive aktiviert oder deaktiviert werden, was zu einer Veränderung der aktuellen Motivation führen kann.

Nach einer Untersuchung von Berger et al. [BBD75] können folgende sechs verschiedene Fahrmotive unterschieden werden:

- 1.) *Thrill*: Dieses Fahrmotiv kann durch Lust am schnellen Fahren bzw. den Genuss des Geschwindigkeitsrauschs beschrieben werden. Zunehmende Gefährlichkeit der Fahraufgabe steigert den *Thrill*. Das Hauptziel besteht aus dem Überwinden von Risiko und Gefahr, dem Überstehen von riskanten Situationen, hierbei stehen Verlust von Sicherheit und Wiedergewinnen dieser in einer stetigen Wechselbeziehung.
- 2.) *Kraftentfaltung*: Dieses Fahrmotiv äußert sich durch das Zurschaustellen der eigenen Dynamik oder auch durch Demonstration der eigenen Potenz mittels Überholmanövern, dichtem Auffahren und hohen Beschleunigungen. Dies bringt mit sich, dass durch das Überholtwerden entsprechend negative Gefühle aktiviert werden, wodurch das Motiv Kraftentfaltung erneut verstärkt wird.

- 3.) *Erproben*: Im Gegensatz zu den Fahrmotiven und Kraftentfaltung kann das Motiv *Erproben* durch die Bewältigung von besonders schwierigen Fahraufgaben befriedigt werden. Komplizierte Situationen werden gezielt gesucht, nicht jedoch – im Gegensatz zum *Thrill* – primär wegen des Risikos, sondern um diese mit dem eigenen Können zu überstehen.
- 4.) *Autonomie*: Die Gefühle von Freiheit und Unabhängigkeit dominieren dieses Fahrmotiv. Eine konkrete Definition einzelner Ziele ist bezüglich *Autonomie* nur schwer möglich. Eine allgemeine Zufriedenheit beim Wissen um die eigenen Handlungsmöglichkeiten und damit verbunden eine gewisse Lockerheit ist Ausdruck hoher *Autonomie*.
- 5.) *Gleiten*: Dieses Fahrmotiv kann durch besonders ruhiges und entspanntes Fahren befriedigt werden; es wird angestrebt, das Ziel möglichst komplikationslos zu erreichen. Gefahren liegen hierbei in *zu* entspannter Fahrweise, was sich u. a. in Vermeidung großer Beschleunigungen ausdrücken kann, dies kann zu gefährlichen Situationen aufgrund beispielsweise zu geringer Spurtreue oder zu geringer Abstände führen.
- 6.) *Pilotieren*: Dieses Fahrmotiv wird als das Motiv, welches objektiv zu am meisten Sicherheit führt, beschrieben. Eine möglichst perfekte Fahrweise stellt hier das Hauptziel des Fahrers dar. Dies äußert sich in möglichst fehlerfreiem und stabilem Fahren.

Irmscher [Irm01b] hat unter anderem untersucht, welche konkreten Auswirkungen auf das Fahrverhalten bestimmte Motive während des Autofahrens hervorbringen (vgl. Tabelle 3.4).

3.4.4.2 Modellierung von Motivation

Die Modellierung von menschlichen Motivationen bzw. Motiven in der Fahrermodellierung wurde von Jürgensohn bereits umfassend theoretisch beschrieben [Jür01]. Nachdem ein deskriptives Modell eines Motivs vom Modellierer erzeugt wurde, können daraus Konsequenzen für das formale Modell abgeleitet werden. D. h. es werden nicht die Motive an sich, sondern deren Konsequenzen auf eine vom Modell durchzuführende Handlung modelliert. Dies können zeitliche Aspekte (Wann beginnt oder endet die Handlung? Wie schnell wird sie durchgeführt?) oder auch die Stärke der Handlung betreffende Aspekte sein (Mit welcher Intensität wird die Handlung durchgeführt?). Jürgensohn interpretiert „Denken“ als eine „mentale Handlung“ [Jür01], somit wirken Motive auch auf kognitive Prozesse. Letzten Endes können Motive ähnlich wie Parameter in Dynamikmodellen verwendet werden, folgende Regeln sollten dabei beachtet werden:

- *Parametrischer Einfluss*: Motive sind durch *Parameter* repräsentiert, diese liegen eine Ebene oberhalb der zu parametrierenden Variable.
- *Stärke*: Motive sind eindimensionale Parameter, diese sind üblicherweise positive reelle Zahlen, können jedoch auch qualitative bzw. Fuzzy-Maße annehmen und sollten in einem begrenzten Intervall liegen.

Motiv	Grundmotive nach Murray	Auswirkungen auf den Fahrer
Frustration	Misserfolgsvermeidung	unberechenbares Verhalten, jedoch kooperativ (im Sinne von defensiv-partnerschaftlichem Fahrstil)
Spaßerleben	Spiel	verminderte Leistung und Aufmerksamkeit, Nebenaktivitäten
Eile	Leistung	höhere und unregelmäßige Geschwindigkeit, mehr Überholvorgänge, höhere Aktiviertheit und Konzentration, kontinuierliche Strategie, wenig kooperativ, wenige Nebenaktivitäten
Risikovermeidung	Leidvermeidung	geringe Geschwindigkeit, große Abstände, wenige Nebenhandlungen, sehr kooperativ
Machtstreben, Wettbewerb	Machtausübung, Selbstdarstellung	hohe Geschwindigkeit, geringe Abstände, wenig kooperativ, wenig konzentriert, viele Nebenhandlungen
Aggression	Aggression	dichtes und schnelles Auffahren, blinken, schneiden, kommunikativ, aber wenig kooperativ
Erprobung eigener Fähigkeiten	Spiel, Unabhängigkeit	hohe Geschwindigkeit, hohe Konzentration, geringe Abstände, wenig kommunikativ, jedoch kooperativ

Tabelle 3.4: Motive und ihre Auswirkungen nach Irmischer [Irm01b]

- *Objektivierung und Validierung*: Eine optimale Modellbildung kann nur bei maximalem Basiswissen des Modellierers erfolgen – Ein Modell ist somit umso valider, je differenzierter die Modellvorstellungen des Modellierers sind.

Für die Modellierung sollte des Weiteren beachtet werden, dass Motive und Motivationen auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus existieren – eine Implementierung von impliziten Motiven wie z. B. dem Wunsch nach körperlicher Unversehrtheit ist nur sehr schwer bzw. unmöglich umzusetzen. Je spezifischer ein Motiv beschrieben werden kann, womöglich verbunden mit einer konkreten Handlungsabsicht und einem bestimmten Ziel, desto besser kann eine menschähnliche Umsetzung in ein Modell gelingen – und desto realistischer, da die Zusammenhänge für den Modellierer in konkreten Situationen besser nachzuvollziehen sind, verhält sich das resultierende Modell. Dies bedeutet letzten Endes, dass eine Modellierung von Motiven so geschieht, wie sich diese der Modellierer vorstellt, eine rein formale Modellbildung (also z. B. basierend auf experimentell erhobenen Daten) ist unrealistisch bzw. umso unrealistischer, je unspezifischer sich das Motiv darstellt.

Praktisch umgesetzt wurde die Modellierung von menschlichen Motivationen bzw. Motiven in verschiedenen (Fahrer-)Modellen zumeist auf handlungsnahen Abstraktionsebenen. So wirken

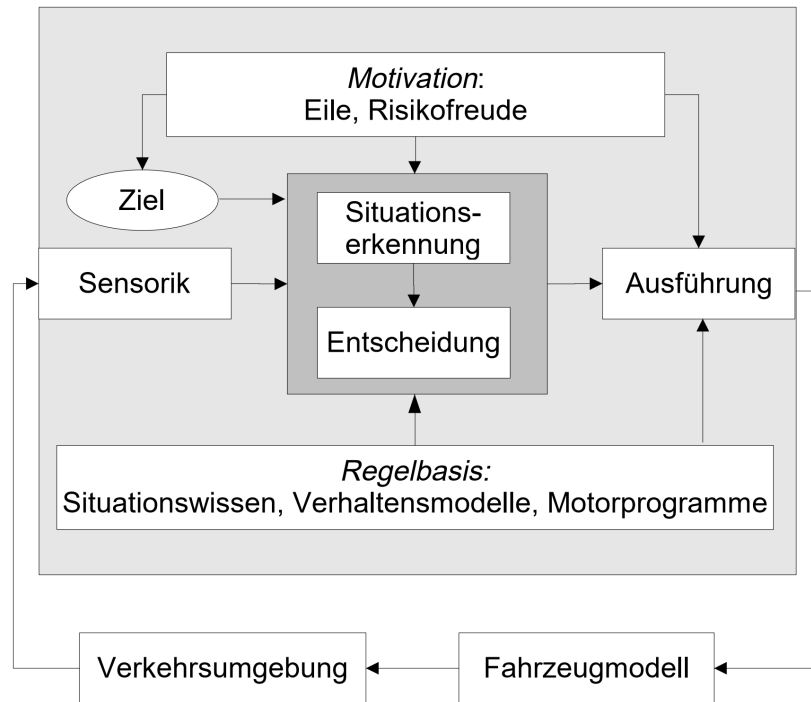


Abbildung 3.37: Fahrermodell bei einem Überholvorgang auf einer Autobahn nach Irmischer [Irm01b]

Motive in der PSI-Theorie der Handlungsregulation (Dörner [DS98]) als Parameter auf das Systemverhalten ein. Irmischer hat beobachtbare Verhaltensvariationen in einen Zusammenhang mit einigen Grundmotiven gestellt (vgl. Tabelle 3.4). In ihrem Fahrermodell wurden konkret die Motive „Eile“ und „Risikofreude“ umgesetzt, da sich diese für den Kontext des Modells – eine Überhol-situation auf der Autobahn – am besten eigneten (vgl. Abbildung 3.37). Motivationen beeinflussen nach diesem Ansatz Zielsetzung, kognitive Prozesse sowie Motorik.

Dagli [DR02] verwendete Motivationen, um das Fahrverhalten von anderen Verkehrsteilnehmern vorherzusagen. Innerhalb eines Autobahn-szenarios wurden die Motivationen Timing, Sicherheit, persönliche Motivationen (z. B. „Fahrer fährt ungern hinter LKW“) und Navigation implementiert. Benmimoun [Ben04] entwickelte ein motivationales Spurwechselmodell und führt einen Spurwechsel auf vier unterschiedliche Motivationen zurück: Erreichen einer Zielspur, Verlassen einer endenden Spur, Überholen eines langsameren Fahrzeugs sowie Einhalten des Rechtsfahrgebots. Schäfer definiert eine *short term motivation*, derart, dass diese ein Parameterset für die folgende Regelungsaufgabe darstellt [Sch04]. Als Beispiel für so eine *short term motivation* führt er das Fahren mit einem möglichst minimalen Abstand zur Solltrajektorie durch Verringerung des Winkelabstands zum Sollkurs bei minimaler Querabweichung an.

Fazit Der Einfluss der Motivation auf das Fahrverhalten ist ein oft nicht offensichtlicher, jedoch das Fahrverhalten durchaus prägender. Motive bestimmen, welche Ziele momentan aktiv

sind und mit welcher Vehemenz diese erreicht werden sollen. Vor allem für die Modellierung bzw. notwendigerweise die Erklärung von intraindividuellen Unterschieden können Motive bzw. Motivation als theoretische Grundlage herangezogen werden. Eine Motivation ist eine zutiefst menschliche Eigenschaft, erkennt man diese, so fällt die Einschätzung des Fahrers und somit auch die Antizipation seines zukünftigen Verhaltens leichter und führt somit zu mehr Sicherheit – ob in der Simulation oder in der Realität. Für die Simulation von realistischem Verkehr sind unterschiedliche Fahrertypen nötig, Motivationen sind ein wichtiger Aspekt, um diese Unterschiede generieren zu können. Situationsabhängige Aktivierungen von Motiven können den Grad des Realismus weiter erhöhen. So hat beispielsweise das Vorhandensein anderer Verkehrsteilnehmer starken Einfluss auf bestimmte Motivationen – das Motiv „Konkurrenz“ kann beispielsweise aktiviert werden, sobald zwei sportliche Fahrertypen, die vielleicht sogar mit „rivalisierenden“ Pkw-Marken an einer roten Ampel stehen (und kein stärkeres Motiv, beispielsweise ein Polizeiwagen, hinter den beiden aktiv ist). Sich unterscheidende bzw. sich ändernde Motivationen können somit in einem Fahrermodell, welches möglichst menschähnliche Verhaltensweisen an den Tag legen soll, das „Salz in der Suppe“ darstellen, vgl. auch Kapitel 3.4.4.2.

3.4.5 Emotion

Ebenso wie Motivationen können Emotionen („emovere“ lat. für „Herausbewegen“) Beweggründe für Handeln sein. Eine Emotion kann als mehrdimensionales psychologisches Konstrukt aufgefasst und gegenüber anderen affektiven Zuständen abgegrenzt werden. Die Dimensionen *Dauer*, *Intensität* sowie *Objektgerichtetheit* können hierbei Aufschluss über den Typus des vorhandenen affektiven Befindens geben: Emotionen zeichnen sich hierbei durch eine geringe Dauer, eine hohe Intensität und den Bezug zu einem Objekt aus. Ein Affekt ist einer Emotion bezüglich dieser Kategorien recht ähnlich, er ist jedoch kürzer und intensiver, des Weiteren kann eine gewisse Unkontrollierbarkeit der resultierenden Handlungen diagnostiziert werden. Im Gegensatz dazu sind Stimmungen langanhaltender, weniger intensiv und ohne konkreten Objektbezug.

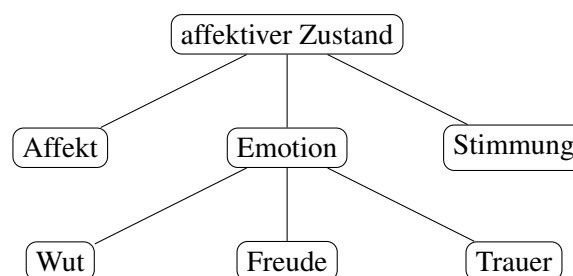


Abbildung 3.38: Kategorien affektiver Zustände

Emotionen sind komplexe, konkrete psychophysiologische Prozesse; Personen, die eine Emotion empfinden, haben ein charakteristisches Erleben, es treten bestimmte physiologische Verände-

rungen und Verhaltensweisen auf. Emotionen können, so sie denn zukunftsgerichtet sind und dementsprechend ein Ziel formulieren, auch eine motivationale Komponente aufweisen, so geben sie beispielsweise Rückmeldungen über das Erreichen bestimmter Ziele. Ein Gefühl ist in diesem Kontext kein eigener affektiver Zustand, da es lediglich das subjektive Erleben einer Emotion darstellt. Dieses Emotionserlebnis kann entweder angenehm oder unangenehm sein, bzw. positive oder negative Gefühle entstehen lassen, die Stärke der jeweiligen Emotion ist hierbei durchaus quantifizierbar. Je nach Quelle wird von einer Anzahl von 50 bis 100 Emotionen ausgegangen, wobei es nach Ekman [Ekm92] sechs Basisemotionen bzw. „Familien“ von Emotionen gibt: Wut, Abscheu, Angst, Freude, Trauer und Überraschung. Es wird angenommen, dass Basisemotionen angeboren sind, ihre Anzahl schwankt je nach Autor zwischen fünf und zehn. Laut Johnson-Laird & Oakley [JLO89] können alle Emotionen auf diese Basisemotionen zurückgeführt werden, Nicht-Basisemotionen unterscheiden sich von diesen vor allem in ihrer Intensität.

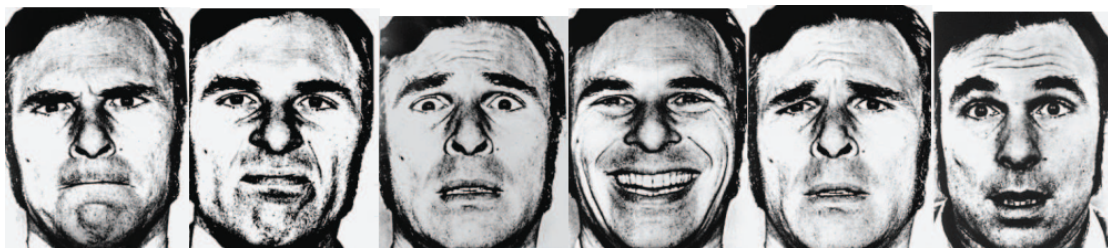


Abbildung 3.39: Die sechs Basisemotionen nach Ekman [Ekm92], von links nach rechts: Wut, Abscheu, Angst, Freude, Trauer und Überraschung

Im Gegensatz zu den diskreten Kategorien des basisemotionalen Ansatzes können Emotionen jedoch auch in einem zwei- bzw. dreidimensionalen Koordinatensystem abgebildet werden (z. B. nach Russell [Rus80]): Bei zwei Dimensionen werden die Achsen „Valenz“ und „Aktivierung“ verwendet, eine dritte Achse wäre die Dimension „Dominanz“ (mit Hilfe dieser dritten Dimension lassen sich beispielsweise „Wut“ und „Angst“ besser differenzieren).

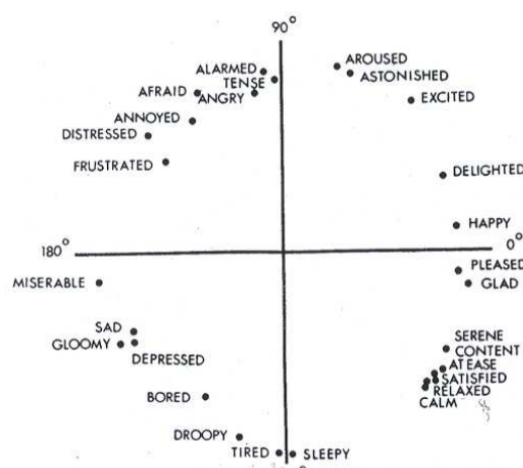


Abbildung 3.40: Dimensionales Emotionsmodell aus Russel [Rus80]

Im Kontext der Informationsverarbeitung und als Einflussfaktor auf kognitive Prozesse spielen Emotionen eine wichtige Rolle. Sie beeinflussen Aufmerksamkeit sowie Entscheidungsprozesse, so können mit deren Hilfe beispielsweise akute Bedrohungen erkannt und konstant Bewertungen der aktuellen Situation vorgenommen werden. Die Theorie der somatischen Marker (Damasio [Dam94]) beschäftigt sich näher mit diesen Prozessen. Laut ihr geschehen wichtige Entscheidungen vor der bewussten Entscheidung, also bevor eine Entscheidung mittels mentaler Modelle (vgl. Abschnitt 3.2.2.1) getroffen wird. Damasio beschreibt dies als „Bauchgefühl“ (engl. „gut feeling“), als Konsequenz wird die Aufmerksamkeit auf die möglicherweise negativen Konsequenzen einer Handlung gerichtet, er bezeichnet dies als eine Art „Alarmsignal“, welches vor zukünftigen Verlusten schützt und die Anzahl der möglichen Handlungsalternativen verringert.

Toda hingegen beschreibt jede Emotion als Entscheidungsvorgang („each emotion is a decision routine“) [Tod80]. Als Beispiel führt er die Emotion „Wut“ an, welche bei einer bestimmten kognitiven Bewertung einer Situation hervorgerufen wird. Die Ausgangssituation verlangt, ob mit oder ohne Wut, nach einer Entscheidung, die hervorgerufene Emotion „Wut“ führt nur dazu, dass die Informationsverarbeitung nurmehr aus weniger Handlungsalternativen auswählen kann, da sich durch die Wut die Handlungsplanung auf die unmittelbare Situation und das Wut auslösende Objekt konzentriert. Je stärker die Emotion, so Toda, desto schwieriger wird es, die Langzeitfolgen einer unter dem Einfluss dieser Emotion getroffenen Entscheidung abzuschätzen.

Mesken [Mes06] beschreibt den Emotionsprozess wie folgt: Ein Ereignis muss als relevant für ein Ziel wahrgenommen werden, dann muss entschieden werden, ob sich dieses Ereignis positiv oder negativ auf besagtes Ziel auswirkt. Falls entscheidende Auswirkungen prädiert werden, folgt eine mögliche Handlung, inklusive physiologischer Reaktionen. Emotionen können somit auch als Mittel zum Zweck interpretiert werden, deren Aufgabe es ist, Verhalten so zu beeinflussen, dass bestimmte Ziele trotz oder wegen aktueller Umwelteinflüsse erreicht werden können. Zielorientierte Verhaltensweisen werden unter dem Einfluss von Emotionen verstärkt. Nach Lazarus [Laz91] kann anhand von sechs Merkmalen bestimmt werden, welche Emotion bei einer bestimmten Situation auftritt, diese Merkmale lauten:

- 1.) *Zielrelevanz*: In welchem Ausmaß ist das Ereignis für die persönlichen Ziele relevant?
- 2.) *Zielübereinstimmung*: Steht das Ereignis im Widerspruch zu den Zielen oder nicht?
- 3.) *Selbstmiteinbeziehung*: Hat das Ereignis Einfluss auf die persönliche Befindlichkeit oder Identität?
- 4.) *Schuld/Verdienst*: Kann jemand (inklusive das Selbst) für das Ereignis (im negativen, wie auch im positiven Sinne) verantwortlich gemacht werden?
- 5.) *Bewältigungspotential*: Kann etwas an der Situation geändert werden?
- 6.) *Zukunftserwartung*: Wird sich die Situation zukünftig eher verbessern oder verschlechtern?

So kann beispielsweise die Emotion „Stress“ beschrieben werden, welche auftritt, wenn eine den eigenen Zielen schädigende Situation ohne eigenes Bewältigungspotential erkannt und als schädlich für die eigene Person eingeschätzt wird.

3.4.5.1 Emotion und Fahrzeugführung

Prinzipiell sind alle Emotionen, dazu in der Lage, die Fahraufgabe negativ zu beeinflussen, da sie die Aufmerksamkeit weg von der ursprünglichen Aufgabe lenken. Lazarus [Laz91] benennt mehrere dieser Mechanismen: *Interferenz* beschreibt, dass unter dem Einfluss einer Emotion viele Reize Aufmerksamkeit erfordern, die mit der eigentlichen Aufgabe nichts zu tun haben. Ein *Motivkonflikt* entsteht hingegen, wenn die aktuelle Aufgabe Handlungen erfordert, die sich im Widerspruch zu denen durch die Emotion ausgelösten Handlungen befinden. Bei Übereinstimmung kann jedoch die Performanz ebenso ansteigen, so können positive Rückmeldungen über den Grad der Zielerreichung eines bestimmten durch ein Motiv angestrebtes Ziel positive Emotionen verursachen. *Kognitive Bewältigungsprozesse* führen dazu, dass das Individuum die Emotion bewältigt, jedoch die aktuelle Aufgabe vernachlässigt.

Für die Bewältigung der Fahraufgabe besitzen die Emotionen *Wut* und *Angst* den größten Einfluss auf diese, wie auch auf die Wahrscheinlichkeit, Verkehrsregeln aufgrund von aggressivem und riskantem Fahren zu übertreten (Arnett et al. [AOF97]). Emotionen wie *Kränkung*, *Stolz* oder *Rache* können ebenso zu gefährlichen Situationen führen. *Angst* hingegen führt zu einer erhöhten Anzahl von Fahrfehlern. Des Weiteren muss beachtet werden, dass durch identische Situationen – je nach Fahrertyp – durchaus unterschiedliche Emotionen hervorgerufen werden können. Emotionen können zwei prinzipielle Effekte hervorrufen: Einerseits das Auslösen konkreter Aktionen, wie z. B. bei aggressiven Emotionen wie Ärger, Wut und Zorn, aber auch Ekel oder Angst, zum anderen der Einfluss auf kognitive Prozesse. Mesken [Mes06] beschreibt drei konkrete Ausprägungen dieser Beeinflussung: *Optimismus-Bias*, *Selbsteinschätzungs-Bias* und *Kontrollillusion*. Optimismus-Bias beschreibt die zu optimistische Einschätzung von Gefahren, Selbsteinschätzungs-Bias die zu optimistische Selbsteinschätzung und Kontrollillusion die Überschätzung der eigenen Möglichkeiten, einer gefährlichen Situation entrinnen zu können.

Vaa [Vaa03], [Vaa05] verwendet drei Grundannahmen aus Damasio's Theorie der somatischen Marker [Dam94] für ein Konzept eines Fahrerverhaltensmodells:

- 1.) Das fundamentale Motiv des Menschen ist Überleben.
- 2.) Um das Überleben zu gewährleisten, muss der Mensch spezielle Fähigkeiten besitzen, um Gefahren zu erkennen.
- 3.) Der „Monitor“, um die Gefahren zu erkennen, ist der menschliche Körper.

Das zentrale Konzept der Theorie besteht darin, dass ein Fahrer zu jeder Zeit versucht, eine funktionale Balance zu erreichen, welche mittels eines optimalen Gefühls („best feeling“) detektiert werden kann (vgl. Abbildung 3.41). Dieses permanente Streben geschieht jedoch unbewusst

– der Fahrer gewichtet ständig anhand der eigenen, wahrgenommenen Gefühle verschiedene Szenarien und wählt jenes aus, welches sich am besten anfühlt. Daraus schlussfolgert Vaa: Falls keine Emotionen wahrgenommen werden, findet keine Evaluation – und somit auch keine Entscheidung – statt. Dies kann als eine Erweiterung der Wilde'schen Risikohomöostase verstanden werden: Das Zielrisiko wird durch ein Zielgefühl ersetzt.

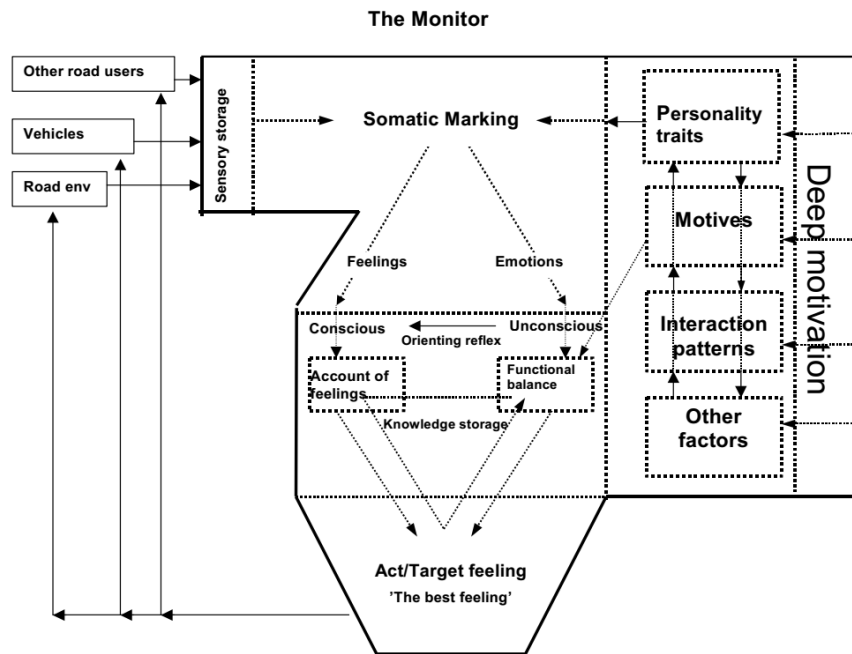


Abbildung 3.41: Struktur des „Monitor“-Modells nach Vaa [Vaa03]

3.4.5.2 Modellierung von Emotion

Die Modellierung von Emotionen wurde bisher nur in einigen wenigen Fahrermodellen umgesetzt. So haben Al-Shihabi & Mourant [ASM01], [ASM03] in ihrem Fahrermodell eine „Emotion Unit“ implementiert, in welcher die emotionalen Reaktionen des Modells auf seine Umwelt modelliert wurden. Das Ziel des Modells ist zu jeder Zeit, die Optimierung seines emotionalen Zustands. Angelehnt an Fuller [Ful84] beeinflusst dies sein Risikoverhalten bei Planung sowie Umsetzung der Handlungen. Es werden die sich gegenüberstehenden Faktoren „Sicherheit“ und „Effizienz“ betrachtet. Bei Unzufriedenheit bzgl. der erreichten Effizienz – vor allem also bei zu geringer Geschwindigkeit – werden Entscheidungen getroffen, die diese Faktoren erhöhen und damit ebenfalls zu einem erhöhten Gesamtrisiko führen. Ein als zu hoch empfundenes Risiko hingegen führt dementsprechend zu geschwindigkeitsvermindernden Entscheidungen. Eine Emotion wird – basierend auf der Kategorisierung Picards [Pic95] – aus den Eigenschaften „Typ“, „Intensität“, „Ursprung“ und „soziale Regeln der Umgebung“ gebildet.

Kraus [Kra12] gibt einen umfassenden Überblick über computergestützte Emotionsmodelle: Im „Cathexis“-Modell von Velasquez [Vel96] werden, basierend auf Rosemans [RSJ90] Theorie,

fünf kognitive Dimensionen zur Bestimmung einer Emotion verwendet: die Motivation hin zu einem erwünschten Zustand, der Abgleich zwischen diesem und einer vorliegenden Situation, sowie das Dasein, die Verdientheit und die Quelle der auslösenden Ereignisse. Einzelne Module („proto-specialists“) vertreten eine bestimmte Basisemotion, die Module lassen sich kombinieren, sodass der Raum der möglichen Emotionen umfassend abgebildet werden kann. Ortony, Clore & Collin [OCC90] entwickelten ein ComputermodeLL („OCC-Modell“), welches Art und Intensität der Emotionen basierend auf einer Einschätzung der aktuellen Situation ermittelt. Es werden 22 unterschiedliche Emotionen erkannt, welche in drei Hauptkategorien unterteilt werden können: Konsequenzen aus Ereignissen, Handlungen (eigene bzw. die anderer) sowie objektbezogene Aspekte. Die Klassifizierung bezüglich der Hauptkategorien wird mittels der Haltung des Fahrers gegenüber Ereignissen (Zielerreichung), Aktionen (Einhaltung von Normen) und Objekten (persönliche Einstellung zu diesen) durchgeführt. Die Intensität wird ebenso mittels der Hauptkategorien ermittelt: die Erwünschtheit von Ereignissen, die Löblichkeit von Aktionen sowie die Attraktivität von Objekten werden bewertet. Als positiv kann die hohe Anzahl an vorhandenen Emotionen angesehen werden, der nicht vorhandene zeitliche Aspekt hingegen muss als nachteilig bewertet werden.

Kraus [Kra12] implementierte basierend auf dem OCC-Modell ein eigenes Emotionsmodell, in welchem die Emotionspaare auf vier reduziert wurden: „love-hate“, „admiration-reproach“, „joy-distress“ und „hope-fear“. Emotionen können Werte von „-1“ bis „+1“ annehmen. Als Beispiel für die Implementierung soll hierbei das Emotionspaar „joy-distress“ dienen. Das Hauptziel „zeiteffizientes Zielerreichen“ wird mit diesem Emotionspaar verknüpft, so dass eine „+1“ bei vollständiger Erfüllung des Ziels erreicht wird, analog eine „-1“ bei vollständiger Verfehlung des Ziels. Zeiteffizientes Zielerreichen wird bei „unabhängigem“ (freiem Fahren) sowie „flüssigem“ (Folge-)Fahren erreicht. „Unabhängig“ kann bei Ausnutzung der maximal erlaubten Höchstgeschwindigkeit gefahren werden. „Flüssig“ wird gefahren, falls nicht gebremst werden muss. Dem Emotionspaar „hope-fear“ wird das Ziel des unfallfreien Fahrens zugeordnet, „love-hate“ berechnet sich aus einer Bewertung der Straßenklassifikation angelehnt an Fastenmeier [FG92], „admiration-reproach“ richtet sich nach dem Bußgeld für eine Regelübertretung.

Fazit Emotionen beeinflussen das Fahrverhalten auf unterschiedlichen Ebenen, sowohl was Dauer oder Stärke der Beeinflussung betrifft, als auch deren Wirkung auf unterschiedliche psychologische, wie auch physiologische Prozesse. Ähnlich dem motivationalen ist der emotionale Aspekt ebenfalls einer der Gründe für das Nichtdeterministische des menschlichen Fahrens. Im Gegensatz zu Motivationen sind Emotionen jedoch weniger geplant oder kontrolliert, allein deren große inter- und intraindividuelle Varianz sowie die oftmals objektiv „banalen“ Auslöser stellen eine besondere Schwierigkeit der Implementierung in ein Fahrermodell dar. Des Weiteren muss beim Thema „Modellierung von Emotionen“ zwischen „Modellierung des Entstehens von Emotionen beim Fahren“ und „Modellierung der Auswirkung von Emotionen auf das Fahrver-

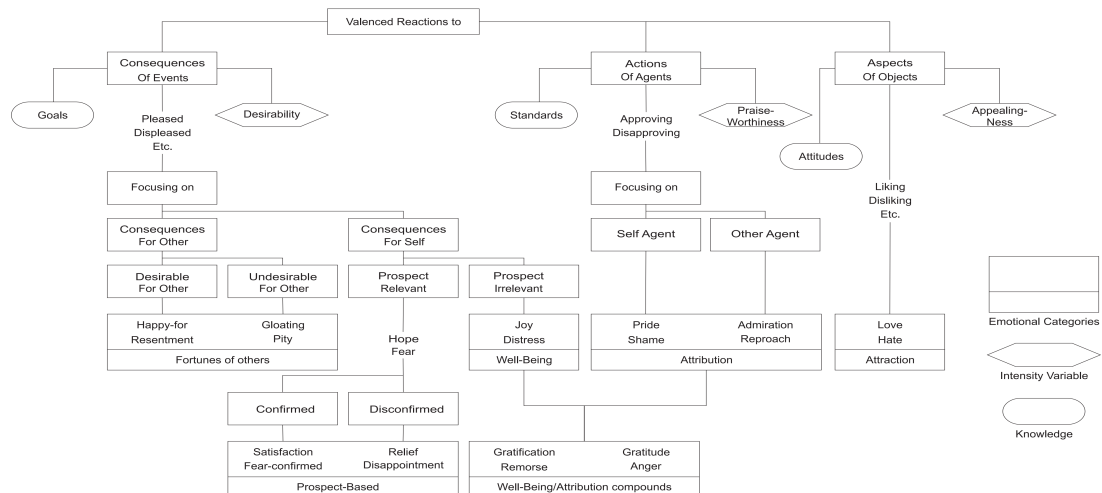


Abbildung 3.42: OCC-Modell nach Ortony, Clore & Collin [OCC90] aus Kraus [Kra12]

halten“ differenziert werden bzw. es sollten für die Implementierung in ein menschähnliches Fahrermodell beide Aspekte berücksichtigt werden.

3.5 Individualität menschlichen Fahrverhaltens

Ein Fahrermodell mit ideal modellierten kognitiven Parametern mag sich – so man nur eine bestimmte Situation betrachtet – menschähnlich verhalten. Der in einem solchen Fahrermodell steckende Determinismus der Aktionen stellt jedoch einen bedeutenden Unterschied zu einem Realfahrer dar. Bei gleichen kognitiven Fähigkeiten und identischen Situationen würde solch ein Modell eben auch identische Reaktionen zeigen – genau das würde man von solch einem Modell erwarten. Ebenso erwartbar ist, dass unterschiedliche Fahrer in nahezu identischen Verkehrssituationen unterschiedlich reagieren. Jedoch zeigen identische Fahrer in identischen Situationen mitunter völlig verschiedene Verhaltensweisen. Diese komplett in ein Fahrermodell zu integrieren ist mithin unmöglich, nichtsdestoweniger kann man sich diesen annähern. Dazu werden in diesem Kapitel mehrere Ursachen dieser „nicht-objektiven“ Verhaltensweisen näher betrachtet.

3.5.1 Situationen und Manöver

Während einer Autofahrt erlebt der Fahrer unterschiedliche Szenarien mit jeweils szenariospezifischen Situationen und damit verbunden unterschiedlichen psychischen und physischen Anforderungen an die Fahraufgabe. Phasen des Kaum-Handelns wechseln sich mit kognitiv fordernden Phasen ab, wobei die jeweilige Einordnung der aktuellen Situation inter- und intraindividuell unterschiedlich vorgenommen werden kann. Eine rein „objektive“ Kategorisierung, also

eine, die ohne Kenntnis der Motivationen bzw. Ziele des jeweiligen Fahrers eine Situation nur anhand der Umgebungsinformationen interpretiert, beschreibt den „wirklichen“ Zustand demnach nicht vollumfänglich. Ebenso fehlen der Einschätzung aus Fahrersicht oft wichtige Informationen über die Umgebung bzw. andere Verkehrsteilnehmer. Eine „objektive“ Situationsbeschreibung kann als „Verkehrssituation“ bezeichnet werden. Reichart [Rei01] definiert diese als „objektiv gegebene räumliche und zeitliche Konstellation, der verkehrsbezogenen Einflussgrößen der „Arbeitsumgebung der Verkehrsteilnehmer“. Eine Verkehrssituation entsteht schlussendlich aus den vielen Verhalten der Verkehrsteilnehmer und kann ein Ziel bzw. ein Ergebnis einer Modellierung darstellen. Der subjektiv vom Fahrer wahrgenommene und eingeordnete dynamische Zustand seines Fahrzeugs in der Welt sowie die Informationen über Umwelt und andere Verkehrsteilnehmer wird als „Fahrsituation“ bezeichnet. Der Begriff „Fahrsituation“ hingegen beschreibt die theoretisch wahrnehmbaren Informationen des Fahrers in einer bestimmten Verkehrssituation und stellt somit das Maximum der verwendbaren Informationen des Fahrers dar. Der Situationsbegriff wird im folgenden Abschnitt entsprechend den Anforderungen an den Modellierungskontext weiter spezifiziert.

Es gibt eine Vielzahl von Situationsdefinitionen in der einschlägigen Literatur. So definiert Fastenmeier [Fas95] Situationen als räumlich und zeitlich abgrenzbare Elemente einer Fahrt, die durch Fahrerhandlungen (z. B. das Überfahren einer Kreuzung) oder Änderungen der Umgebung (z. B. das Wegfallen einer Fahrspur) beendet bzw. initiiert werden können. Eine Klassifizierung wird basierend auf Straßentyp (innerorts, Landstraße, Autobahn), Straßenausbau (Anzahl Fahrspuren, Krümmung usw.), Trassierungsmerkmale (Steigung, Kreuzung, Art der Vorfahrt usw.) sowie Verkehrsablauf (Hindernisse, Fahrtrichtungsänderungen usw.) vorgenommen. Insgesamt können mit Hilfe dieser Taxonomie, da 8 Variablen mit jeweils 2 bis 9 Kategorien verwendet werden, bis zu 3150 unterschiedliche Situationen definiert werden (Bauer [Bau11]). Schweigert [Sch02] erweitert die Taxonomie um die Variablen „andere Verkehrsteilnehmer“ sowie „zulässige Geschwindigkeit“, somit können nun auch „dynamische“ Situationen betrachtet werden. Reichart hingegen [Rei01] grenzt Fahrsituationen zeitlich durch einen Wechsel der fahrtbezogenen Handlungsprogramme des Fahrers voneinander ab. Weitere Definitionen bzw. Sichtweisen auf den Situationsbegriff können bei Schneider [Sch09] sowie Kraus [Kra12] nachgeschlagen werden.

3.5.1.1 Variable Situationsmerkmale

Die bisher verwendeten Situationsdefinitionen sind bezüglich der „intrasituativen“ Faktoren wenig aussagekräftig. Eine Vielzahl von zeitlich kurzfristigen Einflüssen wirkt auf eine Situation, so dass dieser Kontext zwei auf dem Papier völlig identische Situationen – mit dementsprechend unterschiedlichem Fahrerverhalten – erzeugen kann. Die wichtigsten Einflussfaktoren und beispielhaft Zusammenhänge zum Fahrverhalten werden folgend tabellarisch dargestellt.

Faktor	Ausprägung	Wirkzusammenhang
Tageszeit	Tageslicht	Normalverhalten
	Dämmerung	evtl. Blendungen durch tiefstehende Sonne
	Nacht	allgemein schlechtere Sicht, evtl. Blendungen durch Scheinwerfer
Wetter	Bedeckter Himmel	Normalverhalten
	Sonne	Normalverhalten
	Regen	evtl. Blendungen bzw. Beeinträchtigungen durch Sonnenbrille
	Schnee	evtl. Glätte, Überdeckungen von Straßenschildern bzw. Scheinwerfern durch Schnee
	Nebel	stark beeinträchtigte Sicht
Fahrbahn	Trockenheit	gutes bzw. „normales“ Bremsverhalten
	Nässe	verlängerter Bremsweg, Aquaplaning
	Glatteis	extrem verlängerter Bremsweg Fahren nur bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten möglich
Innenraum	Klimaanlage defekt	erhöhte Temperaturen, evtl. erhöhte Frustration etc.
	Laute Musik	verminderte Aufnahmefähigkeit auditorischer Kanal (Martinshorn, Hupe überhören)

Tabelle 3.5: Wichtige, das Fahren beeinflussende Umweltfaktoren

Die in Tabelle 3.5 aufgezählten Faktoren stellen nur einen Teil der denkbaren Umwelteinflüsse auf das Fahrverhalten dar und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Zusammenhänge zum Fahrverhalten gelten im Allgemeinen nur für „Normalfahrer“. Je nach Fahrerfahrung, medizinischen Prädispositionen bzw. Lust und Laune beeinflussen diese das Fahrverhalten stärker oder schwächer.

Für die psychosozialen Faktoren in Tabelle 3.6 gilt die Aussage analog zu den Umweltfaktoren: Sie repräsentieren nur einige der denkbaren Einflussgrößen. In diesem Fall hängt der Wirkzusammenhang weitaus stärker mit der Persönlichkeit des Fahrers sowie dessen Beziehung zu den Mitfahrern, den Fahrzeugeigentümern usw. ab. In den Abschnitten 3.4.4.1 und 3.4.5.1 wird auf motivationale und emotionale Einflussfaktoren vertieft eingegangen.

3.5.1.2 Modi der Längsführung

Betrachtet man das Geschwindigkeitsverhalten von menschlichen Fahrern, so können primär zwei Modi identifiziert werden: „freie Fahrt“ und „Folgefahrt“ (bzw. nach Fastenmeier [Fas95] „ungebundene“ und „gebundene Fahrt“). Als „freie Fahrt“ wird im Allgemeinen ein Fahrzustand bezeichnet, in welchem der Fahrer nicht durch andere vorausfahrende Fahrzeuge beeinflusst wird. Vor allem für die Geschwindigkeitswahl ist dieser Zustand von Bedeutung, da diese nur durch

Faktor	Ausprägung	Wirkzusammenhang
Gruppendynamik	Alleinfahrt	Normalverhalten
	Beifahrer vorhanden	sicheres und langsames Fahren, besonders bei Kindern als Passagier Ausnahme: junge Fahrer, hier teilweise riskantere und schnellere Fahrweise
Eigentum	Leihwagen	teilweise rücksichtslosere Fahrweise
	eigenes Auto	teilweise rücksichtsvollere Fahrweise
Fahrtyp	Fahrt zur Arbeit	evtl. größerer Zeitdruck, riskanteres Fahren
	„Cruisen“	maximal entspanntes Fahren, langsamer
	Notfall	stark erhöhte Geschwindigkeiten

Tabelle 3.6: Psychosoziale Faktoren

eventuell vorhandene Geschwindigkeitsbeschränkungen sowie die durch die Streckenbeurteilung des Fahrers (Kurvenkrümmung, Untergrund, Sichtweite) begrenzt wird. Es gibt unterschiedliche Kriterien zur Abgrenzung der freien Fahrt von anderen Fahrzuständen: Nach Fastenmeier [Fas95] ist eine Zeitlücke von mindestens 2 Sekunden zum vorausfahrenden Fahrzeug ein Kriterium. Zöller [Zöl15] legt für ihre Untersuchungen eine Zeitlücke von mindestens 3 Sekunden fest.

Als „Folgefahrt“ wird die Fahrt hinter einem Fahrzeug beschrieben, somit ist die Geschwindigkeitswahl (nach oben) entsprechend eingeschränkt. Die bereits beschriebene Zeitlücke von 2 Sekunden stellt einen groben Anhaltspunkt für eine Differenzierung für Folgefahrt und freie Fahrt dar, jedoch kann diese nicht als alleiniges Maß dienen: Die Geschwindigkeitswahl kann bei niedrigen Geschwindigkeiten auch bei größeren Zeitlücken vom vorausfahrenden Fahrzeug beeinflusst werden, ebenfalls kann – bei wahrgenommener wachsender Zeitlücke – bei hohen Geschwindigkeiten eine kleine Zeitlücke „freie Fahrt“ bedeuten, z. B. bei einem geplanten Überholvorgang. Dem Kontext kommt also eine große Bedeutung zu, ebenso dem Fahrer und seiner Interpretation der Situation. Während der Folgefahrt regelt der Fahrer somit nicht zuvorderst die eigene Fahrgeschwindigkeit, sondern den Folgeabstand, welcher sich aus dem aktuellen Abstand und der Relativgeschwindigkeit zum vorausfahrenden Fahrzeug sowie der eigenen Geschwindigkeit berechnet (Fecher [Fec05]), vgl. auch Abschnitt 3.1.5.2. Ein weiteres Kriterium ist die Zeit, für welche die Zeitlücke die geforderten 2 Sekunden unterschreitet, Fecher [Fec05] setzt diese bei 10 Sekunden an, Zöller [Zöl15] verwendet 3 Sekunden. Des Weiteren kann eine Mindestgeschwindigkeit sinnvoll für die Abgrenzung von Stop-and-Go-Situationen sein, Fastenmeier [Fas95] sieht die Grenze für eine Kolonnenfahrt bei 30 km/h, bei Zöller [Zöl15] sind es 10 m/s, also 36 km/h.

Eine „freie Fahrt“ im strengen Sinne – also einer, in der der Fahrer völlig unbeeinflusst von anderen Fahrzeugen seine Geschwindigkeit wählt – kommt im alltäglichen Straßenverkehr nur bei freier Strecke vor. Sobald sich andere Fahrzeuge auf derselben Fahrbahn befinden, trifft der

Fahrer Voraussagen über das Verhalten, bewertet Risiken und trifft abhängig davon Entscheidungen, die sich auf die Geschwindigkeitswahl auswirken (Wird es einen Ausschervorgang auf die eigene Spur geben? Steht ein Bremsmanöver kurz bevor?). Im Gegensatz zur Geschwindigkeitswahl, welche oftmals anhand Geschwindigkeitsbegrenzungen, Wirtschaftlichkeits- oder Risikobetrachtungen getroffen wird, geschieht die Abstandswahl im „Folgefahrt“-Modus weniger „datenbasiert“. Zum einen liegt dies an fehlenden Instrumenten im Fahrzeug, des weiteren legen Untersuchungen nahe, dass eine fahrerspezifische als angenehm oder sicher geltende Zeitlücke existiert (Bauer et al. [BGR10], Ehmanns [Ehm01], Fecher [Fec05]). Geregelt wird nicht der Abstand, sondern eine persönlich präferierte Zeitlücke. Somit entbindet das Hinterherfahren den Fahrer von einigen Entscheidungsprozessen, die Regelung der Zeitlücke geschieht vor allem sensumotorisch.

Eine Möglichkeit der Modellierung von längsdynamischem Verhalten bietet das Verkehrsflussmodell von Wiedemann [Wie74]: Er beschreibt vier unterschiedliche Zustände, welche von Abstand und Geschwindigkeitsdifferenz zum vorausfahrenden Fahrzeug abhängen. Bei Abständen zum Vorderfahrzeug von über 150m befindet sich der Fahrer im Zustand „unbeeinflusstes Fahren“, dies ist mit der bereits beschriebenen „freien Fahrt“ gleichzusetzen. Im Zustand „unbewusst beeinflusstes Fahren“ folgt der Fahrer einem Fahrzeug mit einem bestimmten Abstand – dies entspricht der beschriebenen „Folgefahrt“. Im „bewusst beeinflussten Fahren“ findet sich zum einen ein Annäherungsvorgang bis zu einem bestimmten angepeilten Folgeabstand, falls dieser unterschritten wird, muss gebremst werden (vgl. Abbildung 3.43). Über unterschiedliche Wahrnehmungsschwellen für Relativgeschwindigkeiten sowie unterschiedliche Minimal- und Wunschabstände kann eine gewisse Menschähnlichkeit des Modells erzeugt werden. Des Weiteren existieren Toleranzen für die Abweichungen vom Wunschabstand, so dass Fahrerhandlungen nicht instantan bei erkannten Abweichungen durchgeführt werden.

Fazit Für den Normalfahrer ist anzunehmen, dass das freie Fahren der erwünschte Zustand ist, falls das nicht möglich ist, muss das Folgefahren gewählt werden. Nichtsdestoweniger hängt die zeitliche Verteilung der Zustände stark vom Umgebungsverkehr, der Straßenkategorie sowie dem Fahrverhalten des entsprechenden Fahrers ab. Für die Modellierung lässt sich zusammenfassen, dass das Wissen um den aktuellen „Längsregelungszustand“ durchaus relevant ist. Je nach Fahrertyp – aber auch abhängig vom aktuellen Erschöpfungszustand – wird „freie“ oder „Folgefahrt“ präferiert. Des Weiteren ist eine Klassifikation des Zustands für den Fahrregler von Bedeutung (Regelung der Geschwindigkeit bzw. des Abstands/der Zeitlücke). Für die Regelung der Querdynamik existieren keine vergleichbaren Fahrmodi, da die Breite der Fahrspur die Freiheiten des Fahrers genügend eingrenzt.

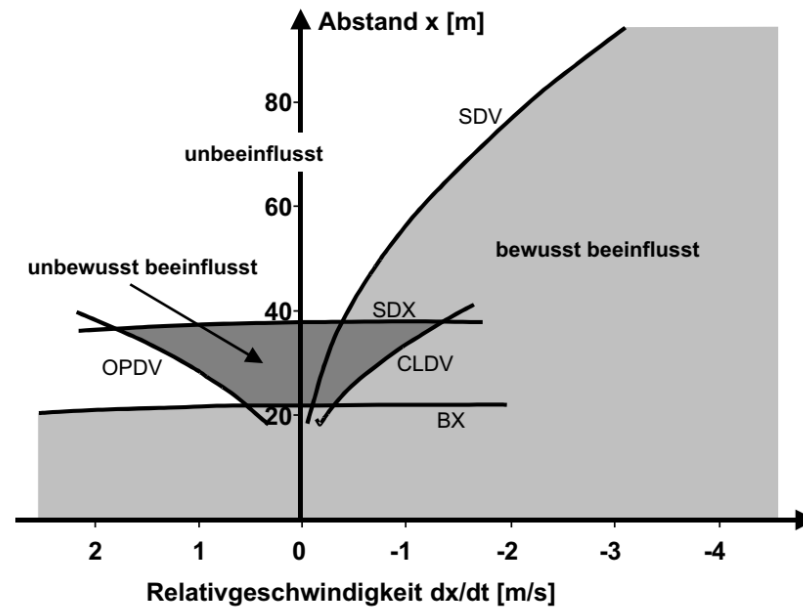


Abbildung 3.43: Folgemodell aus Wiedemann [Wie74]

3.5.1.3 Manöver

Ein Manöver bezeichnet im Kontext der Fahrzeugführung eine zeitlich und örtlich begrenzte Fahrhandlung mit einem bestimmten Ziel. Im Drei-Ebenen-Modell nach Michon [Mic85] sind Manöver auf der mittleren – der taktischen bzw. *Manöverebene* – einzuordnen. Die Ziele der Manöver müssen bestimmte Kriterien, die in der strategischen Ebene definiert wurden, erfüllen. In den Ebenenmodellen – die hierarchische Modelle sind – können Manöver jederzeit stattfinden, da keinerlei Zeitverhalten in den Modellen steckt. Damit diese Sichtweise aufrecht erhalten werden kann, wird zwischen „ständigen“ und „komplexen“ Manövern unterschieden (z. B. Bubb [BBGV15]). Ein „ständiges Manöver“ ist beispielsweise das „Folgen des Straßenverlaufs“, als Beispiel für ein „komplexes“ Manöver wird das „Folgen eines vorausfahrenden Fahrzeugs“ genannt, es wird sogar ein „sehr komplexes Manöver“ – das Überholen eines Fahrzeugs aufgezählt. Jürgensohn [JBGS18] grenzt Manöver auf einer zeitlichen Ebene von anderen Handlungen ab: Manöver können nach dieser Definition alle Teile der Fahraufgabe sein, die zum einen länger als automatisierte Handlungen im Millisekundenbereich, jedoch kürzer als Planungsvorgänge auf der strategischen Ebene andauern.

Eine Kategorisierung der von Fahrmanövern wurde u. a. von Nagel & Enkelmann vorgenommen [NE91]. Die Autoren beschrieben 17 Fahrmanöver, mit deren Hilfe es möglich sei, sowohl innerstädtischen als auch Verkehr auf Autobahnen zu beschreiben. Später wurde ein 18. Manöver („Stillstand“) hinzugefügt (Bajcsy & Nagel [BN96]). Tölle [Töl96] verringerte die Anzahl auf 9 basale Manöver, in dem er „virtuelle“ Objekte einführte und somit die Unterscheidung zwischen realen Verkehrsteilnehmern und Bezugsobjekten der Straße (z. B. Haltelinien) aufhob.

Nagel & Enkelmann	Tölle
Anfahren	Anfahren
hinter einem anfahrenden Fahrzeug anfahren	Anfahren
Straßenzug folgen	Folgen
rückwärts fahren	Folgen
einem Fahrzeug folgen	Folgen
Kreuzung überqueren	Kreuzung überqueren
Fahrspurwechsel nach links/rechts	Fahrspurwechsel
Überholen	Fahrspurwechsel
links/rechts abbiegen	Abbiegen
am rechten Straßenrand anhalten	Annähern
Stillstand	Annähern
Annähern an ein sich vor dem Fahrzeug befindendes Objekt	Annähern
vor einem Gegenstand anhalten	Annähern
Kehre links/rechts	Umkehren
Fahrtrichtung umkehren	Umkehren
links/rechts an einem Gegenstand vorbeifahren	Passieren
in eine Parklücke einfahren	Parken
aus einer Parklücke herausfahren	Parken

Tabelle 3.7: Fahrmanöver nach Nagel & Enkelmann [NE91] und Tölle [Töl96]

Die Manöver werden in drei Klassen eingeteilt; M1: „Fahrmanöver ohne Berücksichtigung von Verkehrsobjekten“, M2: „Fahrmanöver mit Berücksichtigung von Verkehrsobjekten“ und M3: „Parkmanöver“. Die Manöver sind jedoch nicht aus Fahrersicht betrachtet, sondern sollen Beschreibungen bzw. Fahrmissionen für von autonom fahrenden Fahrzeugen durchführbare Manöver darstellen. In Tabelle 3.7 sind die originalen bzw. reduzierten Manöver gegenübergestellt.

Schreiber [Sch11] evaluierte den Ansatz von Nagel bzw. Bajcsy und entwickelte daraufhin das Konzept von *expliziten* bzw. *impliziten* Manövern. *Explizite* Manöver sind vom Fahrer aktiv gewünschte und vom Fahrerassistenzsystem umzusetzende Manöver (z. B. Wechsel der Fahrbahn). *Implizite* Manöver hingegen sollen von der Manöverassistenz auch ohne expliziten Fahrerwunsch ausgeführt werden (z. B. das In-der-Spur-bleiben), diese Art von Manöver kann theoretisch unbegrenzt andauern. Des Weiteren kann zwischen *taktischen* und *strategischen* Manövern unterschieden werden (Siedersberger, [Sie03]). *Taktische* Manöver beschreiben reaktive Handlungen, die aufgrund von bestimmten Verkehrskonstellationen durchgeführt werden (z. B. das Überholen eines Fahrzeugs). *Strategische* Manöver hingegen sind im Vorhinein bekannt (z. B. ein Spurwechsel zum Zweck des Abfahrens von einer Autobahn). Einige Manöver (z. B. ein Spurwechselmanöver) kann sowohl taktisch als auch strategisch durchgeführt werden, diese unterscheiden sich somit vor allem in ihrer Motivation.

Die Unterscheidung zwischen aktiv gewünschten und „im Hintergrund“ ablaufenden Manövern ist ebenso auf menschliches Fahrverhalten anzuwenden. Unter „Manöver“ verstehen Testfahrer

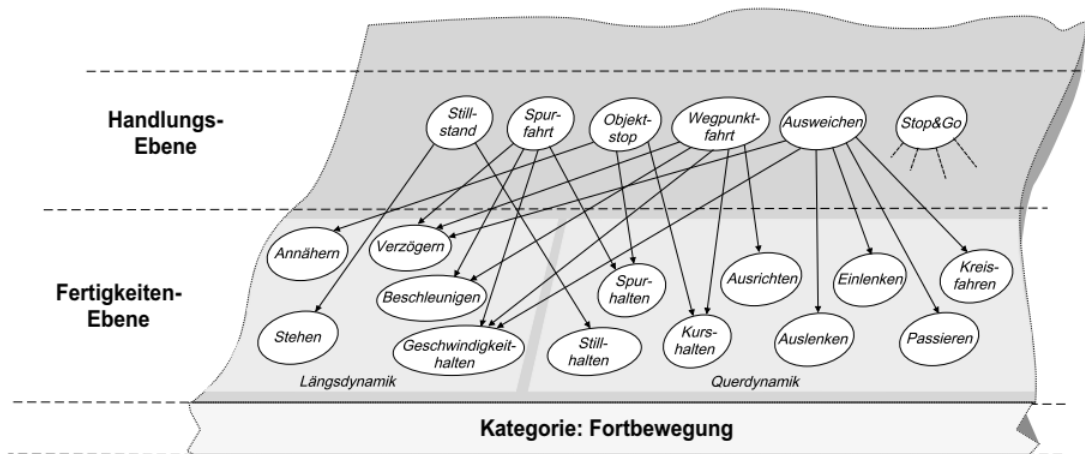


Abbildung 3.44: Fahrerfähigkeiten nach Siedersberger [Sie03]

bestimmte Fahraufgaben, also abzufahrende Kurse mit bestimmten Rahmenbedingungen (z. B. Doppelter Spurwechsel, Slalom etc.) – jedoch nicht das womöglich stundenlange Fahren auf einer Autobahn. Dementsprechend wird im Rahmen dieser Arbeit eine alternative Definition des Begriffs „Manöver“ verwendet: Ein *Manöver* bezeichnet eine zeitnahe Reaktion auf eine Situationsänderung aufgrund extrinsischer oder intrinsischer Reize. Diese Reaktion beinhaltet eine (Fahr-)Handlung sowie kognitive Planungs- und Entscheidungsvorgänge.

Wie schon aus den erwähnten Manöverkatalogen ersichtlich, gibt es Fahrmanöver unterschiedlicher Komplexitätsklassen. Beispielsweise kann das Manöver „links überholen“ in die Teilmanöver „Spurwechsel links“ und „Spurwechsel rechts“ unterteilt werden (so man nur die Querdynamik betrachtet). Führt man diesen Gedanken weiter, so erhält man letztendlich bestimmte Basis-Fahrhandlungen. Siedersberger [Sie03] nennt diese „Fahrerfähigkeiten“

Offensichtlich ist eine Trennung von Längs- und Querhandlungen sinnvoll, da die Längs- und Querführung mittels unterschiedlicher Bedienelemente durchgeführt wird. Viele dieser Fertigkeiten finden auf der sensumotorischen Ebene – und somit zumeist unbewusst – statt. Manöver beschreiben also eine bestimmte Klasse von Handlungen, welche eine spezifische Problemstellung im Kontext der Fahrzeugführung lösen.

3.5.2 Fehler

In der Psychologie existieren eine Vielzahl von Fehlerdefinitionen und -klassifikationen. Der Begriff „Fehler“ kann aus zwei Sichtweisen betrachtet werden: Zum einen als eine Verhaltensabweichung von einem Soll- oder Normverhalten, zum anderen als Nichterreichen eines bestimmten Handlungsziels durch den Handelnden. Eine entscheidende Eigenschaft, die eine Handlung innehaben muss, um als „fehlerhaft“ definiert werden zu können, ist deren Vermeid-

barkeit (Zapf et al. [ZFB⁺99]). Damit einhergehend gilt für die nicht erreichten Handlungsziele, dass es eine Möglichkeit zur Erreichung dieser gegeben haben muss, um das Nichterreichen als Fehler bezeichnen zu können. Bei der Untersuchung menschlichen Fahrverhaltens fallen unweigerlich die mannigfaltigen Möglichkeiten menschlicher Fehlhandlungen während des Fahrens auf. Betrachtet man die Fahraufgabe mit Hilfe des Wickens'schen Modells der Informationsverarbeitung, so kommt man zu dem Schluss, dass Fehlhandlungen im Allgemeinen in all den beschriebenen Stufen des Modells ihren Ursprung haben können. Michon [Mic85] schlussfolgert daher, dass prinzipiell vier Fehlertypen existieren: Fehler der Wahrnehmung, des Verstehens, der Entscheidung und der Handlung. Rasmussens [Ras82] Modell des Handlungsablaufs bei Fehlern hingegen beschreibt ausnahmslos fehlerhafte Handlungen, die zwischen Signaldetektion und Handlungsausführung geschehen. Er geht von einem sequentiellen Verlauf der Informationsverarbeitung aus und ordnet jedem Schritt einen spezifischen Fehlertyp zu. Zimmer [Zim01] hat das Modell des Handlungsablaufs bei Fehlern von Rasmussen an die Fahraufgabe adaptiert (vgl. Abbildung 3.45). Folgende Fehlertypen können demnach beim Fahren auftreten:

- *Struktureller bzw. mechanischer Fehler*: Die Fehlhandlung liegt außerhalb der Fahrerhandlung bzw. ist eine Folge einer im Vorfeld begangenen Fehlhandlung, die einen nicht mehr abwendbaren Fehler nach sich trägt (z. B. bei einem unabwendbaren Unfall oder einem technischen Defekt).
- *Informationsfehler*: Wichtige Informationen werden nicht bzw. zu spät wahrgenommen (z. B. Übersehen einer roten Ampel).
- *Diagnosefehler*: Die Situationseinschätzung ist fehlerhaft (z. B. Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer).
- *Zielsetzungsfehler*: Ein Ziel wird ausgewählt, das nicht der (objektiven) Situation angepasst ist (z. B. ein riskantes Ausweichmanöver wegen eines kleinen Tieres).
- *Methodenfehler*: Es wird eine nicht adäquate Handlung zur Zielerreichung gewählt (z. B. beim Autofahren Lenken, Bremsen, Beschleunigen – da es zumeist nur eine Methode gibt, um ein Ziel zu erreichen, kommen Methodenfehler beim Autofahren so gut wie nie vor, denkbar wäre z. B. „untersteuerndes Lenken mit Handbremse bei Schnee“ vs. „normales Lenken“).
- *Handlungsfehler*: Die Handlung wird fehlerhaft ausgeführt (z. B. zu starkes Lenken, Bremsen).
- *Bedienungsfehler*: Ein Fehler ist bei der Betätigung des Bedienelements aufgetreten (z. B. Abrutschen von einem Pedal).

Gruendl [Grü05] hat Unfallursachen mit Hilfe dieser Fehlertaxonomie untersucht, diese hatte zum Ergebnis, dass Informationsfehler bei weitem überwiegen (vgl. Abbildung 3.46).

Eine etwas andere Kategorisierung nahm Reason vor [Rea90]. Er unterscheidet in seinem „Modell der gefährdenden Verhaltensweisen“ zwischen *intendierten* und *nicht intendierten* sowie

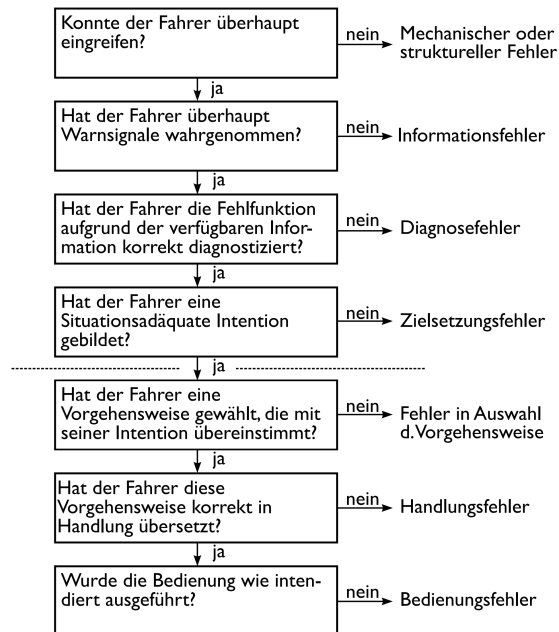


Abbildung 3.45: Fehlerkategorien von Zimmer [Zim01] nach Rasmussen [Ras82]

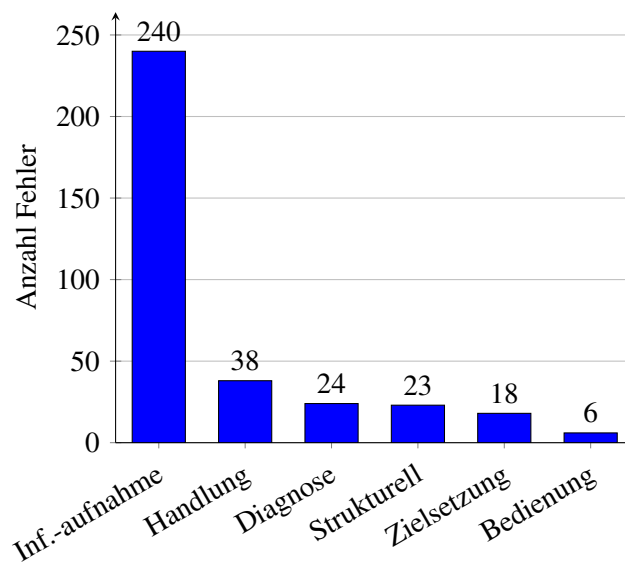


Abbildung 3.46: Unfallursachen nach einer Untersuchung durch Gründl [Grü05]

zwischen *sicherheitsorientierten* und *effektivitätsorientierten* Verhaltensweisen. Ein *Verstoß* unterscheidet sich somit von *Fehlern* dadurch, dass er bewusst und aufgrund eines falschen Effektivitätsverständnisses hervorgerufen wird (vgl. Tabelle 3.8).

Verhalten	sicherheitsorientiert	effektivitätsorientiert
nicht intendiert	Aufmerksamkeitsfehler, Gedächtnisfehler	Zielsetzungsfehler
intendiert	–	Verstoß

Tabelle 3.8: Fehlerarten nach Reason [Rea90]

Jones & Endsley [JE00] entwickelten eine Fehlertaxonomie basierend auf dem Konzept des Situationsbewusstseins (vgl. Abschnitt 3.4.3) und unterschieden drei Fehlerebenen:

- Ebene 1 – Fehler in der Situationswahrnehmung: Die Situation wird nicht korrekt wahrgenommen (Informationen sind nicht verfügbar, schwer zu erkennen, wurden falsch erkannt oder vergessen).
- Ebene 2 – Fehler im Situationsverständnis: Die Situation wird z. B. aufgrund schlechter oder falscher mentaler Modelle falsch eingeschätzt.
- Ebene 3 – Fehler in der Situationsprognose: Die zukünftige Entwicklung der Situation wird aufgrund schlechter oder falscher mentaler Modelle falsch extrapoliert.

Bezüglich dieser Kategorisierung haben die meisten Unfälle ihre Ursachen in Fehlern der Ebene 1 – also der Situationswahrnehmung.

Hacker [Hac98] unterscheidet zwischen drei Ursachen menschliches Fehlverhalten:

- Objektives Fehlen von Informationen
- Fehlende Nutzung objektiv vorhandener Informationen: Übersehen, Vergessen, Übergehen, Informationsreduktion bei Redundanzausnutzung, Zeit- bzw. kapazitätsbedingte Verarbeitungsdefizite
- Falsche Nutzung objektiv vorhandener Informationen: falsches Orientieren, falsches Entwerfen von Aktionsprogrammen, falsches Entscheiden, unzutreffende Bedingungeinordnung von Aktionsprogrammen

Betrachtet man aktuelle Daten des statistischen Bundesamtes, so erhält man als Hauptunfallursachen bei Fahrzeugführerinnen und -führern im Jahr 2017 Fehler beim Abbiegen, Wenden, Rückwärtsfahren sowie beim Ein- und Anfahren (16 %). Am zweithäufigsten wurde die Vorfahrt beziehungsweise der Vorrang anderer Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmer missachtet (15 %). Oft wurde auch der Abstand nicht eingehalten (14 %) beziehungsweise die Geschwindigkeit nicht angepasst (12 %).

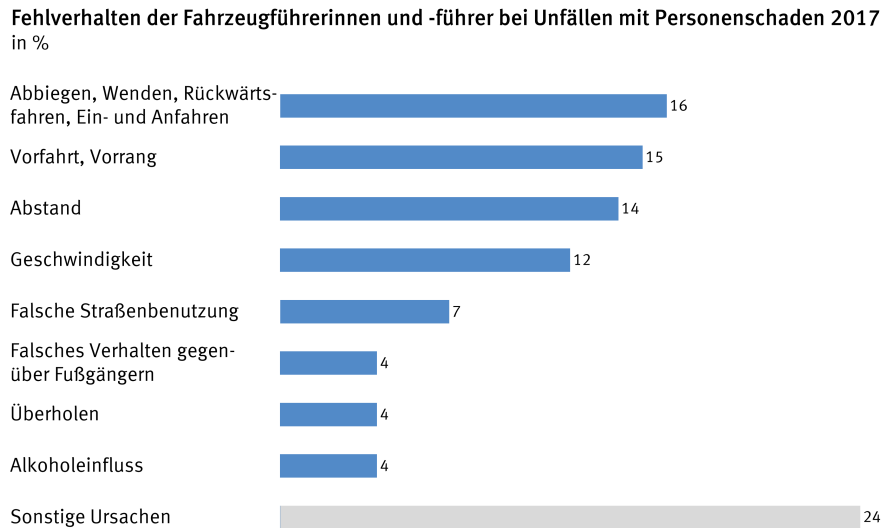


Abbildung 3.47: Unfälle nach Fehlerkategorien im Jahr 2017 [Bun18]

Es stellt sich nun die Frage nach der Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Fehlertyps bzw. der Häufigkeit seines Vorkommens. Die HEP (Human Error Probability) beschreibt die Anzahl der fehlerhaft durchgeführten Aufgaben des Typs „A“ geteilt durch alle Aufgaben des Typs „A“ (Bubb [BBGV15]). Bei hochgeübten (fertigkeitstbasierten) Handlungen werden Fehlhandlungswahrscheinlichkeiten von 10^{-3} erwähnt (nach Swain & Guttman [SG83], basierend auf Untersuchungen im Kontext von Atomkraftwerken), für wissensbasierte Handlungen sind die Wahrscheinlichkeiten um mehrere Größenordnungen erhöht (10^{-1} bis 10^{-2}). Bubb nimmt eine „interne Zykluszeit des Menschen“ von 3 Sekunden für hochgeübte Tätigkeiten und 2 Sekunden für neuartige Tätigkeiten an und berechnet daraus eine MTBF (Mean Time Between Failures) von ca. 50 min (3000 s bei 10^{-3}). Bei einer Fehlhandlungswahrscheinlichkeit von 10^{-4} betrüge die MTBF entsprechend 500 min.

Fazit Ein Fahrermodell, welches nicht in der Lage ist, menschliche Fehlhandlungen zu simulieren, kann schwerlich als „menschähnlich“ bezeichnet werden, da das Vorhandensein von Fehlern eine systeminhärente Eigenschaft menschlicher Handlungsweisen ist. Je nach Modellierungsziel, Typ der Menschähnlichkeit und Modellierungsressourcen können Fehler in verschiedenen Ebenen eines Fahrermodells implementiert werden. Bei einer Modellstruktur basierend auf dem Wickens'schen Informationsverarbeitungsmodell bietet sich die Rasmussen'sche Taxonomie an, eine Erweiterung bezüglich situativer Elemente sollte jedoch – siehe Kapitel 4.1 – angedacht werden.

3.5.3 Lernen

Als Lernen wird ein Prozess definiert, der zu Veränderungen im Verhalten führt und auf Erfahrung aufbaut. Erfahrungen sind hierbei gesammelte Erkenntnisse über Reaktionen der Umwelt auf (eigene) Handlungen. Außerhalb der Fahrschule findet das Erlernen des Autofahrens vor allem durch *informelles Lernen*, also nicht bewusst angestrebtes Lernen, bzw. noch genauer als *implizites Lernen*, also als Lernen, dessen Verlauf und Ergebnis dem Lernenden nicht bewusst sind, statt. Beim Erlernen des Autofahrens wird nicht die *eine* Fähigkeit „Autofahren“ erlernt, vielmehr werden viele unterschiedliche Kombinationen der Koordination von sensorischen und motorischen Signalen erlernt, beim Autofahren sind dies insbesondere das Lenken, Bremsen, Wechseln des Gangs und Kuppeln, Verwendung der Rückspiegel, Beachten der Verkehrsschilder, Beobachten der anderen Verkehrsteilnehmer und vieles mehr [Lan06].

Bezüglich Rasmussens Modell des zielgerichteten Verhaltens „wandern“ Fähigkeiten während des Lernens von der wissensbasierten (obersten) Ebene zur fertigkeitsbasierten (untersten) Ebene. Bei einem „erfahrenen“ Fahrer finden nach einer gewissen Zeit (bzw. Anzahl gefahrener Kilometer) viele, vor allem sensumotorische Prozesse automatisch bzw. unbewusst statt⁹. Für kognitive Prozesse während des Fahrens bedeutet Lernen eine immer genauere Präzisierung mentaler Modelle (Modelle des eigenen Fahrzeugs, der Voraussage von Handlungen, von Umwelteinflüssen usw.). Umfangreiche Ausführungen zu diesem Thema sind bei Jürgensohn [JBGS18] nachzulesen.

Eine Implementierung von „Lernen“, welches eben genannter Beschreibung entspricht, in Fahrermodelle wurde bisher aus Komplexitätsgründen nicht unternommen. Im Kontext der Fahrermodellierung beschränkt sich „Lernen“ zumeist auf unterschiedliche Formen des *maschinellen Lernens*, diese sollen jedoch nicht menschliches Lernen simulieren, sondern stellen im Allgemeinen eine Optimierung bestimmter Funktionen des Fahrreglers dar und sind daher in diesem Kontext nicht von Bedeutung.

Fazit Im Allgemeinen ändern sich Fahrerfahrung bzw. die Fertigkeit des Fahrens nur sehr langsam, eine Implementierung des Lernvorgangs in ein Fahrermodell, welches üblicherweise einzelne Fahrten durchführen soll, erscheint daher als vergleichsweise aufwändig und ineffizient. Im Hinblick auf unterschiedliche Fahrertypen ist die Verwendung eines bestimmten Lernfortschritts – also der Fahrerfahrung – jedoch möglich.

3.6 Unterschiede im Fahrverhalten und ihre Ursachen

Wenn von „menschlichem“ oder „menschähnlichem“ Verhalten die Rede ist, dann werden alle Verhaltensweisen, die für einen Menschen denkbar sind, zusammen betrachtet. Während der

⁹Es dauert ca. 7 Jahre bzw. 100000km Fahrleistung, bis ein niedriges Unfallniveau erreicht wird (Donges [Don15]), dies ist unabhängig vom Alter bei Erwerb des Führerscheins

Bewältigung der Fahraufgabe trifft der Fahrer permanent Entscheidungen, somit zählen alle daraus abgeleiteten Handlungen zu „menschlichem“ Fahrverhalten. Es gibt eine Vielzahl von Einflussfaktoren, die auf die einzelnen kognitiven und sensumotorischen Prozesse wirken und dazu führen, dass sich menschliche Handlungen voneinander unterscheiden. Dies betrifft sowohl interindividuelle als auch intraindividuelle Verhaltensunterschiede. Letztere wurden im Abschnitt 3.4 dieses Kapitels ausführlich erläutert, vor allem beeinflussen Motivationen und Emotionen Variationen im Fahrverhalten eines Fahrers. Einige dieser Faktoren sind während einer Fahrt konstant bzw. ändern sich so langsam, dass von einer Konstanz ausgegangen werden kann, andere sind von bestimmten Umgebungsbedingungen bzw. Situationen abhängig und können daher während der Fahrt variieren. Eine Simulation von menschähnlichem Fahrverhalten muss jedoch all diese Einflussfaktoren berücksichtigen, um ein möglichst hohes Maß an Menschähnlichkeit erreichen zu können.

Die Individualität des menschlichen Fahrverhaltens wird jedoch durch die Beschränkung seiner Handlungsmöglichkeiten begrenzt – zum einen physikalisch durch die ihm zur Verfügung stehenden Bedienelemente und die Bewegung in einem Fahrzeug und zum anderen auch bezüglich des Handlungsraums durch das recht starre Regelwerk des Straßenverkehrs. Nichtsdestoweniger wird das Fahrverhalten eines Menschen durch unterschiedliche Faktoren seiner Psyche, aber auch seiner Physis beeinflusst. Diese Eigenschaften, welche Unterschiede zwischen Menschen bzw. in deren Fahrverhalten beschreiben, sind zum einen spezifische kognitive und körperliche Fähigkeiten, aber auch Erfahrung und die damit einhergehenden Fertigkeiten. Weiterhin spielen auch demografische Eigenschaften wie Alter und Geschlecht, aber auch kulturelle Prädispositionen eine gewisse Rolle.

Carsten [Car07] extrahiert aus einer Vielzahl von Untersuchungen und Modelltheorien fünf Haupteinflussfaktoren für das Fahrverhalten, von denen die ersten beiden interindividuelle und die letzten drei intraindividuelle Unterschiede beschreiben.

- 1) (innere) Einstellung/Persönlichkeit („attitudes/personality“)
- 2) Erfahrung („experience“)
- 3) Fahrerzustand („driver state“)
- 4) Aufgabenanforderung („task demand“)
- 5) Situationsbewusstsein („situation awareness“)

Kratzsch [Kra11] verwendet für sein Modell zur fahrerzentrierten Beschreibung der integralen Fahrzeugsicherheit folgende Kategorien, auch hier wird nicht explizit zwischen intra- und interindividuellen Unterschieden getrennt.

- 1) Alter (< 21, 21 – 59, > 59)
- 2) Geschlecht (weiblich vs. männlich)
- 3) Fahrstil (sportlich, moderat oder komfortabel)

- 4) Fahrleistung (wenig, mittel oder viel)
- 5) Aufmerksamkeit (aufmerksam vs. nicht aufmerksam)
- 6) Beanspruchung (wenig, mittel oder stark)

Folgend werden die Kategorien „Persönlichkeit“ (inkl. Demografie), „Fahrerfahrung“ und „Fahrstil“ näher betrachtet.

3.6.1 Persönlichkeit

Heutzutage besteht Einigkeit in der Forschungsgemeinde, dass eine Kategorisierung einer Persönlichkeit mittels fünf Hauptdimensionen („Big Five“) gut möglich ist. Diese sind „Extraversion“, „Neurotizismus“, „Gewissenhaftigkeit“, „Verträglichkeit“ und „Offenheit“. Ein Einfluss dieser – aber auch anderer – Persönlichkeitsfaktoren auf das Fahrverhalten existiert und wurde in verschiedenen Studien nachgewiesen (z. B. Ulleberg [Ull02], Dahlen [DMRK05] oder Holte [Hol12]). So korreliert eine geringe Ausprägung an Gewissenhaftigkeit mit einer erhöhten Unfallgefahr. Eine hohe Ausprägung der Variablen Extraversion sowie Neurotizismus wird mit einem Anstieg der Unfallhäufigkeit und Regelübertretungen in Verbindung gebracht, letztere zusätzlich noch mit Aggressionen während des Fahrens. Für Verträglichkeit und Offenheit sind die Zusammenhänge weniger deutlich. Ein weiteres Konstrukt – welches jedoch nicht direkt aus den Big Five hergeleitet werden kann – ist das des „Sensation Seekings“. Es beschreibt nach Zuckerman [Zuc94] einen „Trait, der definiert ist durch das Bedürfnis nach wechselnden, neuen und komplexen Erregungen und der Bereitschaft, um dieser Erregungen Willen physische und soziale Risiken auf sich zu nehmen“. Somit sind Fahrer mit hohem „Sensation Seeking“ prädestiniert für eher rücksichtsloseres Fahrverhalten, hohe „Sensation Seeking“-Werte sind mit erhöhten Unfallzahlen, höheren Geschwindigkeiten und anderen unsicheren Verhaltensweisen verknüpft – ähnliches gilt für „Driving Anger“, also dem Wütendwerden während des Fahrens.

Schulze [Sch99] untersuchte den Zusammenhang der Zugehörigkeit von Fahrern zu verschiedenen Lebensstiltypen und deren Fahrverhalten. Die Lebensstiltypen „Action-Typ“, „Fashion-Typ“, „häuslicher Typ“, „kritischer Typ“ und „kicksuchender Typ“ unterscheiden sich in bestimmten, verkehrssicherheitsrelevanten Merkmalen deutlich voneinander. Vor allem der Action- und der kicksuchende Typ fallen durch eine signifikant höhere Gefährdung der Verkehrssicherheit und riskantere Verhaltensweisen auf. Sie können durch hohes „Sensation Seeking“ und eine starke Ausprägung einiger Extramotive charakterisiert werden. Vor allem jüngere Fahrer, insbesondere Männer, sind in diesen Gruppen stark überrepräsentiert.

3.6.2 Demografie

Neben der Persönlichkeit beeinflusst auch die Zugehörigkeit des Fahrers zu einer bestimmten demografischen Gruppe – zumindest statistisch – bis zu einem gewissen Maße sein Fahrverhalten.

Alter So fahren jüngere Fahrer durchschnittlich schneller und riskanter, was – neben der fehlenden Fahrerfahrung – in Defiziten bei der Wahrnehmung wichtiger Informationen, der Situationseinschätzung, der Aufmerksamkeitssteuerung sowie beim Fahrzeughandling begründet ist (Grattenthaler et al. [GK09]). „Typische“ Unfälle für jüngere Fahrer sind das Abkommen von der Fahrbahn, die Gründe für Unfälle bei Jüngeren sind zumeist Verstöße, also bewusste Regelübertritte (Gründl, [Grü05]). Jüngere Fahrer zeichnen sich zudem durch eine riskantere Fahrweise aus. Dies äußert sich beispielsweise durch dichtes Auffahren, überhöhte Geschwindigkeit oder Bei-gelb-über-die-Ampel-fahren. Ursächlich für die riskante Fahrweise sind sowohl Selbstüberschätzung als auch die Unterschätzung von Risiken.

Ältere Fahrer leiden jedoch an vergleichbaren Problemen – eine Verlangsamung kognitiver Prozesse sowie motorischer Aktionen kann beobachtet werden (Meyer et al., [MGM⁺01]). Nach Abendroth & Bruder [AB15] verschlechtern sich mit zunehmendem Alter die Rezeptorfähigkeiten, somit können weniger Informationen aufgenommen werden. Eine Einschränkung des Sichtfelds ist ebenso zu beobachten, dies führt u. a. zu Detektionsproblemen von sich bewegenden Objekten im peripheren Gesichtsfeld (Ball & Owsley [BO93a]). Die Wahrnehmbarkeit von hohen Frequenzen verschlechtert sich ebenso wie der Gleichgewichtssinn und die taktile Wahrnehmungsempfindlichkeit. Vor allem in komplexen, neuen Situationen tritt die insgesamt schlechtere Aufmerksamkeitsleistung zutage, was letztendlich zu Fehlern führen kann (vgl. Abschnitt 3.5.2). Ältere sind eher für Unfälle im Kreuzungsbereich verantwortlich, die Gründe hierfür sind oftmals Informationsfehler, die auf Probleme in der Wahrnehmung bzw. der kognitiven Verarbeitung zurückzuführen sind (Gründl, [Grü05]).

Geschlecht Während in einigen Untersuchungen geschlechtsspezifische Unterschiede im Fahrerverhalten festgestellt wurden, konnten in anderen Untersuchungen keine Unterschiede im Hinblick auf das Risikoverhalten sowie das Geschwindigkeitsverhalten bestätigt werden. Unterschiede sind aber in der Wahrnehmung des Unfallrisikos bei Männern und Frauen festzustellen: Männer schätzen ihr Fahrkönnen besser ein als Frauen, dabei neigen Frauen eher zu einer Unterschätzung ihrer Leistungsfähigkeit, während Männer eher zu einer Überschätzung tendieren. Außerdem beurteilten männliche Fahrer bestimmte Verhaltensweisen als weniger gefährlich und weniger unfallträchtig als weibliche. Laut Gründl [Grü05] führen Männer, die einen Unfall verursacht haben, etwa doppelt so oft wie weibliche Unfallverursacher eine „gefährdende Routine“ durch (dazu zählen z. B. Verhalten wie „zu schnelles Fahren“ oder „Überschreiten des Sicherheitsabstands“). Nach Holte [Hol12] fahren Männer etwa viermal öfter unter Alkoholein-

fluss als Frauen und überholen etwa anderthalb mal so oft fehlerhaft. Frauen zeigten erhöhtes Fehlverhalten bei Vorfahrtsverletzungen (+40 %) sowie beim Abbiegen (+15 %). Dies lässt ebenfalls vermuten, dass von Männern verursachte Unfälle vermehrt Verstöße zum Ausgangspunkt haben, bei Frauen hingegen Fehler in der Informationsaufnahme bzw. Situationswahrnehmung dominieren (Sommer [Som13]).

3.6.3 Fahrerfahrung

Eine Vielzahl von Unterschieden bezüglich des Fahrverhaltens kann auf unterschiedliche Fahrerfahrung zurückgeführt werden. Im Gegensatz zu unerfahrenen Fahrern haben erfahrene Fahrer viele komplexe Situationen bereits erlebt und müssen die erfolgreich angewandten Strategien für eine neue Situation nur leicht modifizieren. Ebenfalls können Reaktionen des eigenen Fahrzeugs bzw. die anderer Verkehrsteilnehmer von erfahrenen Fahrern besser antizipiert werden, was zu einer besseren Risikoeinschätzung führt. Fast alle Handlungen erfahrener Fahrer sind auf der fertigkeitbasierten Ebene bzw. der Ebene der sensumotorischen Regelung zu verorten, was zu einer geringeren Ausnutzung kognitiver Ressourcen führt. Dem ist jedoch entgegenzusetzen, dass dem subjektiven Gefühl des Könnens und der Sicherheit auch objektiv schlechte Verhaltensweisen einhergehen: Bestimmte Gewohnheiten (weniger Kontrollblicke, zu dichtes Auffahren) sind bei erfahrenen Fahrern vermehrt anzutreffen.

Nach Abendroth & Bruder [AB15] unterscheiden sich Anfänger von erfahrenen Fahrern unter anderem durch spätes Beschleunigen, schlechteres bzw. inkonsistenteres Lenken, eine höhere Lenkfrequenz sowie langsamere Gangwechsel. Ebenfalls werden entfernte Gefahren später erkannt, da öfter im Nahbereich fixiert wird. Erfahrene Fahrer fahren in Kurven höhere Geschwindigkeiten, verzögern jedoch auch stärker.

Erfahrene Fahrer zeichnet des Weiteren ihre weiter entwickelten Antizipationsfähigkeiten aus, nach Fuller [Ful05] verhalten sich erfahrene Fahrer vorausschauender, da sie bereits vor dem Auftreten möglicher Gefahren ihre Fahrweise so anpassen, dass diese eliminiert wird (somit bleibt das Niveau der Fahraufgabe konstant). Unerfahrene Fahrer hingegen reagieren später, aber gezwungenermaßen stärker. Des Weiteren erkennen diese weiter entfernte Hindernisse signifikant schlechter als erfahrene Fahrer und erinnern sich an deutlich weniger Informationen.

3.6.4 Fahrstile

Als Fahrstil kann eine spezifische Art und Weise der Lösung der Fahraufgabe bezeichnet werden. Die Einflussfaktoren *Persönlichkeit*, *Demografie* und *Fahrerfahrung* sind ursächlich bzw. modifizieren Fähigkeiten und Fertigkeiten eines Fahrers. Diese beeinflussen seine kognitiven und motorischen Prozesse während des Fahrens, wobei bestimmte Ausprägungen bei einzelnen Aspekten der Fahraufgabe zu einem Fahrstil zusammengefasst werden können. Eine *Fähigkeit* beschreibt in diesem Kontext das Potential allgemeiner psychischer und physischer Leistungsfa-

higkeit (z. B. Intelligenz, Körperkraft usw.), eine *Fertigkeit* hingegen ein (komplexes) gelerntes Handlungsmuster bezüglich einer konkreten (Fahr-)Aufgabe, beispielsweise „Bremsen auf glatter Fahrbahn“. Des Weiteren muss zwischen den Begrifflichkeiten *Fahrstil* und *Fahrertyp* unterschieden werden: Ersterer beschreibt eine konkrete Art und Weise des Fahrens, letzterer charakterisiert einen Fahrer, der bestimmte Fahrstile anderen vorzieht. Ein aggressiver Fahrertyp wird statistisch gesehen öfter einen aggressiven Fahrstil an den Tag legen, dies geschieht jedoch nicht permanent.

Die Beschreibungen von Fahrstilen sind vielfältig. Abendroth & Bruder [AB15] benutzen für Lkw-Fahrer die Begriffe „lahm-lasch“, „eckig-abrupt“ und „zügig-flott“, für Pkw-Fahrer „eher langsam und komfortbewusst“, „durchschnittlich mit hohem Sicherheitsbewusstsein“ sowie „schnell und sportlich“, wobei die Beurteilungen anhand der Kenngrößen Geschwindigkeit, Längsbeschleunigung und Abstand zum Vorfahrenden getroffen wurden.

Nach Ebersbach [Ebe06], der zwischen drei Fahrertypen differenziert, unterscheiden sich diese vor allem in der auftretenden maximalen Querschleunigung, der auftretenden Längsverzögerung /-beschleunigung und der kumulierten Geschwindigkeitsänderung während einer Fahrt. Bezüglich der Beschleunigungen können g-g-Diagramme bzw. g-g-v-Diagramme verwendet werden, um die fahrertypabhängigen Beschleunigungsgrenzen grafisch darzustellen, letztere sind geschwindigkeitsabhängige g-g-Diagramme (Fischer et al. [FBEV11]). Nach Lewandowitz [Lew14] werden in der Literatur maximale Querschleunigungswerte für den Normalfahrer von 3 m/s^2 bis 4 m/s^2 angegeben. Wegscheider & Prokop [WP05] untersuchten das Geschwindigkeitsverhalten unterschiedlicher Fahrertypen auf Landstraßen: „Defensive“ Fahrer bevorzugten eine Geschwindigkeit von 100 km/h , „dynamische“ Fahrer wünschten sich eine um 16 km/h erhöhte Geschwindigkeit.

Im Projekt S.A.N.T.O.S.¹⁰ (Ebersbach [Ebe06]) wurden folgende fünf Fahrertypen definiert: „sportlich-draufgängerisch“, „dynamisch-progressiv“, „routiniert-abgeklärt“, „unauffällig-konservativ“ sowie „ängstlich-zurückhaltend“. Eine andere Einteilung innerhalb des Projekts ergab sechs Fahrertypen, die sich von Typ 1 – „gelassen“ bis Typ 6 – „dynamisch“ erstrecken. Zu einer ähnlichen Taxonomie gelangt Aasman [Aas95], er beschreibt fünf Klassen von Typ 1 – „ruhig, diszipliniert“ bis Typ 5 – „aggressiv, aufdringlich“. Oftmals wird aus Gründen der Eingängigkeit eine Kategorisierung in drei Fahrertypen favorisiert, die zumeist die drei Fahrertypen „sportlich/aggressiv“, „normal“ und „entspannt“ abbilden sollen. Fahrertypen werden in der Unfallpsychologie nach Erfahrungsgrad (erfahren vs. unerfahren) und Fahrstil (vorsichtig vs. risikobereit) unterteilt (Heinrich [Hei16]).

Kulturelle Prägung Das Autofahren an sich unterscheidet sich rein technisch in unterschiedlichen Ländern nur wenig. Ein Hauptunterschied ist hier die standardmäßig zu befahrende Fahrspur, die sich auch auf das Design der Fahrzeuge auswirkt (Links- bzw. Rechtslenker). In einem Fahr-

¹⁰Situations-Angepasste und Nutzer-Typ-zentrierte Optimierung von Systemen zur Fahrerunterstützung

system ungeübte Autofahrer müssen sich zunächst an die veränderten Regeln gewöhnen. Es ist daher anzunehmen, dass in dieser Eingewöhnungszeit Fahrfehler vermehrt auftreten. Weitere kulturelle Unterschiede beschreibt Färber [Fär15]: So unterscheidet sich beispielsweise der Grad der Regelbefolgung in unterschiedlichen Kulturen stark – Das Beharren auf das Vorfahrtsrecht ist in Deutschland besonders ausgeprägt, als Beispiel wird das Einholen des Einverständnisses für ein Einschermanöver angeführt. Weiterhin wird ein besonderes gleichmäßiges und spurbezogenes Fahren für die USA beschrieben, was sich z. B. gerade nicht für den Verkehr in China aussagen lässt: Dort zeichnet sich das Fahren (bislang) durch eine geringe Regelbefolgung aus. Özkan et al. [ÖLC⁺06] beschreiben ebenfalls kulturelle Unterschiede im Fahrverhalten, wobei sich auf Verletzungen der Verkehrsregeln konzentriert wird. Es wird zwischen „gewöhnlichen“ und „aggressiven“ Verstößen unterschieden, wobei sich vor allem bei letzterem Unterschiede zwischen nord-/westeuropäischen sowie südeuropäischen und Fahrern aus dem Nahen und Mittleren Osten zeigen. Sivak et al. fanden länderspezifische Unterschiede in Risikowahrnehmung [SST89a], eingegangenem Risiko [SST89b] sowie Fahrerselbsteinschätzung [SST89c].

Fazit Unterschiede im menschliches Fahrverhalten bestehen aufgrund vielerlei Ursachen: Intraindividuelle Unterschiede lassen sich vor allem durch Motivationen und Emotionen erklären, längerfristig betrachtet spielt die Fahrerfahrung eine weitere wichtig Rolle. Interindividuelle Unterschiede existieren zuvorderst basierend auf Persönlichkeitsmerkmalen, aber – damit zusammenhängend – auch auf der Zugehörigkeit des Fahrers zu einer bestimmten sozio-kulturellen Gruppe, wobei Geschlecht und Alter ebenfalls bezüglich bestimmter Handlungsweisen eine Rolle spielen können. Für die Modellierung kann daher die (triviale) Aussage getroffen werden, dass der zu modellierende Fahrertyp umso besser modelliert werden kann, je mehr Informationen über diesen sowie bekannte Implikationen für das zu modellierende Fahrverhalten vorhanden sind.

4 Menschähnlichkeit und ihre Modellierung

„An ihren Taten sollt ihr sie erkennen!“

1. Johannes 2,1-6

Um Vorhersagen über menschliches Verhalten treffen zu können bzw. bereits geschehenes Verhalten besser verstehen zu können, ist die Modellierung, also das „Vermathematisieren“ von psychologischen Theorien unausweichlich. Nur durch Modellbildung ist man überhaupt in der Lage, (komplexe) psychologische Konstrukte mit menschlichem Verhalten vergleichen und so eine quantifizierbare Aussage über deren Validität treffen zu können. Dementsprechend ist und bleibt die realistische Modellierung der menschlichen Informationsverarbeitung eine der großen Herausforderungen, um eine möglichst wirklichkeitsnahe Simulation menschlichen Fahrverhaltens zu erreichen. In diesem Kapitel werden Eigenschaften, die menschähnliche Fahrermodelle besitzen sollten, diskutiert und bezüglich ihrer Modellierbarkeit bewertet. Daraus wird ein Modellierungskonzept abgeleitet, mit dessen Hilfe typisch menschliche Aspekte des Fahrens abgebildet werden können.

Die Frage, wie weit die mathematische Nachbildung des menschlichen Fahrens gehen kann, ist nicht einfach zu beantworten. Anhand der eingeführten Stufen der Menschähnlichkeit eines Fahrermodells (vgl. Abbildung 1.2) wird dargelegt, welche Aspekte des menschlichen Fahrens durch mathematische Modellierung abgebildet werden können bzw. an welche natürlichen Grenzen die Modellierung stoßen muss.

Der Prozess der Modellierung geht immer auch mit der Vereinfachung bestimmter Eigenschaften des zu modellierenden Objekts einher. Ebenso kann mittels eines mathematischen bzw. algorithmischen Modells ausschließlich *formalisierbares* Verhalten modelliert werden. Eine Vielzahl von kognitiven Prozessen bzw. die daraus resultierenden Handlungen laufen jedoch unbewusst ab. Solche Handlungen können zwar beobachtet werden und befinden sich somit (teilweise) im Raum des Modellierbaren, deren kausalen Gründe lassen sich jedoch oft nicht erschließen, was eine Modellierung dieser zusätzlich erschwert.

Ein weiteres Argument gegen eine vollständige Modellierung eines Objekts basiert auf der „Unnatürlichkeit“ bzw. daraus abgeleiteten „Überkomplexität“ des Konzepts der formalen Modellbildung: Selbst für einfache Handlungen, die sich mit wenigen Worten beschreiben lassen, muss vom Modellierer eine weitaus komplexere Transformationsleistung erbracht werden, um die Handlung algorithmisch beschreiben zu können. Daraus lässt sich zwar keine theoretische

Grenze für menschähnliche Modellierung herleiten, aus ökonomischen Gesichtspunkten ist eine Modellierung ab einem gewissen Grad an Menschähnlichkeit jedoch nicht mehr effizient.

Nähert man sich von technischer Seite der Problemstellung an, so kann man Minimalanforderungen für ein Fahrermodell ableiten: Ein Fahrermodell muss die ihm gestellte Fahraufgabe lösen. Ein sehr reduziertes Reglermodell, welches per Längs- und Querregelung die – ebenso entsprechend reduzierte – Fahraufgabe löst, besitzt somit eine „minimale Menschähnlichkeit“. Daher stellt sich die Frage, „wie viel“ Menschähnlichkeit maximal effizient modellierbar ist. Auch dies lässt sich nur anhand der gestellten Fahr- bzw. Modellierungsaufgabe beantworten. Der Modellierer steht letztendlich vor der Aufgabe, sowohl die Komplexitätsstufe der Modellierungsaufgabe einzuschätzen, als auch die Modellierungsmethode mit maximal effizienter Modellierungskomplexität zu wählen.

Für die Bewertung eines Modells hinsichtlich der Qualität „Menschähnlichkeit“ ist eine stringente Definition des Begriffs vonnöten. Ein naiver Ansatz verwendet die Dichotomie „menschähnlich“ und „nicht menschähnlich“, die letztendlich für alle möglichen autonomen Systeme so getroffen werden kann. Die Gesamtbeurteilung kann sich bei einem so komplexen Vorgang wie „Fahren“, der sich aus einer Vielzahl unterschiedlicher Handlungen zusammensetzt, nur aus den Bewertungen der Einzelhandlungen zusammensetzen. Aus der Frage „Verhält sich das Modell menschähnlich?“ ist somit die Frage „Ist die konkret definierte Handlung des Modells in dieser Situation menschähnlich?“ entstanden. Fokussiert man nun auf einzelne Handlungen, so kann man weiter differenzieren: Wird die Handlungswirkung, die Handlungsausführung oder die Handlungsinitiierung betrachtet? Dies führt zu den im Einführungskapitel dieser Arbeit eingeführten Modelltypen, vgl. auch Abbildung 1.2:

Typ 0	Fahrer-Fahrzeug-Ensemble verhält sich nicht menschähnlich
Typ I	Fahrer-Fahrzeug-Ensemble verhält sich menschähnlich
Typ II	motorische Aktionen des Fahrers sind menschähnlich
Typ III	kausale Ursachen der motorischen Aktionen des Fahrers sind menschähnlich

Tabelle 4.1: Typen von Menschähnlichkeit

Dem Begriff der Ähnlichkeit kann sich basierend auf diesen Typen genähert werden. Eine einfache Schlussfolgerung ist somit: Ein Fahrermodell ist umso menschähnlicher, je höher seine Menschähnlichkeitskategorie ist. Das löst jedoch nicht das Problem, die Ähnlichkeit innerhalb einer Kategorie zu bestimmen. Da sich die einzelnen Kategorien signifikant voneinander unterscheiden, muss eine kategoriespezifische Betrachtung der Menschähnlichkeit vorgenommen werden.

Für Typ-0 bzw. Typ-I-Modelle („Fahrer-Fahrzeug-Ensemble verhält sich (nicht) menschähnlich“) kann ein Konzept ähnlich zum Turing-Test verwendet werden: Wenn ein Mensch anhand des Fahrverhaltens keinen Unterschied zwischen einem durch ein Fahrermodell und einem durch einen menschlichen Fahrer gesteuertes Fahrzeug erkennt, dann ist das Fahrermodell als „menschähnlich“ anzusehen. Nun ist hierbei das offensichtliche Problem, dass simple Situationen

(z. B. Folgefahrt hinter einem Fahrzeug) viel einfacher menschähnlich zu modellieren sind, als komplexe Überholsituationen mit mehreren Verkehrsteilnehmern. Eine Möglichkeit, ein maximal menschähnliches Typ-I-Modell zu erhalten, könnte eine Bewertung unterschiedlicher Fahrsituationen durch menschliche Beobachter darstellen: Man erhielte so einen Katalog von Situationen, die entweder als menschähnlich oder eben nicht-menschähnlich erkannt würden. Der Anteil der als menschähnlich eingestuften Situationen käme dann einem prozentualen „Menschähnlichkeitswert“ gleich.

Für Typ-II-Modelle („motorische Aktionen des Fahrers sind menschähnlich“) gilt prinzipiell eine analoge Herangehensweise: Es müssen neben den Bewegungen des Fahrzeugs auch die des Fahrers in die Bewertung aufgenommen werden. Dabei spielen zusätzlich zu den – auch bei Typ-I-Modellen vorhandenen – Plausibilitätsbetrachtungen auch physikalische Grenzen eine Rolle (z. B. Bewegungsgeschwindigkeiten, Reaktionszeiten usw.).

Bei Typ-III-Modellen („kausale Ursachen der motorischen Aktionen des Fahrers sind menschähnlich“) gestaltet sich eine Quantifizierung der Menschähnlichkeit als komplexer. Zum einen lassen sich kausale Ursachen von Aktionen nicht per se erkennen – es müsste also für die Bewertung zusätzliche Informationen geben, die über die Ursache bestimmter Handlungen informieren. Einhundertprozentige Sicherheit bezüglich der Ursachen bestimmter Verhaltensweisen besteht selbst für menschliche Fahrer nicht – eine „Ähnlichkeit“ zu einem nicht klar definierten Konstrukt herzustellen, gestaltet sich somit zumindest als schwierig. Somit kann nur das Bewertungsprädikat „Nachvollziehbarkeit der Handlungen“ des Modells zu Rate gezogen werden. Falls die Möglichkeit bestünde, in den „Kopf“ des Modells zu schauen, also die internen Ziele per „Debugmodus“ zu erhalten, so könnten diese in puncto Menschähnlichkeit bewertet werden.

Eine weitere Problematik der Bewertung der Menschähnlichkeit durch menschliche Bewerter liegt in der Subjektivität der Beobachter begründet: Handlungen bzw. kausale Ursachen können für Beobachter A plausibel – also „menschähnlich“ wirken, vom Beobachter B aber als „völlig unrealistisch“ eingestuft werden.

Auch nach dem Herunterbrechen des Vorgangs „Fahren“ auf einzelne Handlungen und der Spezifizierung des zu bewertenden Fahrermodells basierend auf den definierten Typen sind die *Definitionen* der Klassen „menschähnliche Handlung“ und „nicht-menschähnliche Handlung“ noch sehr diffus. Da menschliches Fahrverhalten als Normalverhalten angesehen werden kann, ist die Frage nach der Definition des Nicht-Menschlichen eventuell zielführender. Bei Fahrermodellen liegt eine Ursache für deren Nichtmenschlichkeit in der Zielsetzung der Modellierung begründet: Das Ziel der Modellierung ist zumeist nicht die Nachbildung eines menschlichen Fahrers, sondern die Konstruktion eines Modells, welches eine bestimmte Fahraufgabe zu lösen imstande ist. Somit fehlen den Modellen typisch menschliche Eigenschaften, die sich auf die Bewältigung der Fahraufgabe niederschlagen, aber im jeweiligen Modellkontext eher schädlich wirken würden – dies sind vor allem Fehler. Das Nicht-Menschliche ist daher in vielen Kontexten

das Perfekte, das Deterministische, das Rationale; kurzum: Das Fehlen der Fehler. Ein weiterer Aspekt – der jedoch erst bei mehreren simulierten Verkehrsteilnehmern und deren Interaktion bzw. beim mehrfachen Beobachten ein und der selben Situation zum Vorschein tritt ist das Fehlen intraindividuelle Unterschiede bei algorithmisch gelenkten Fahrzeugen. Es sind die emotionalen, motivationalen, psychosozialen und physischen Einflüsse, die starken Schwankungen unterliegen und das Fahrverhalten stark beeinflussen können.

Wünschenswert wäre daher eine Modellierungsarchitektur, welche sich an die Komplexität der zu modellierenden Aufgabe anpasst, beispielsweise ein „leeres“ Typ-III-Modell, welches je nach Fahraufgabe mit den zur Lösung dieser benötigten Module gefüllt werden kann. Ein Modell basierend auf diesem Ansatz wird in Kapitel 5 vorgestellt.

Zusammenfassend lassen sich vier wichtige Aspekte bezüglich der Menschähnlichkeit eines Fahrermodells aufzählen:

- Nachvollziehbarkeit/Plausibilität von Zielen und Handlungen
- Vorhandensein von intra- und interindividuellen Unterschiede der Fahrer
- Erkennbarkeit eines bestimmten Maßes an Variabilität („nicht roboterhaftes Fahren“)
- Vorhandensein von Fehlern, sowohl auf der Ebene der Zielbildung, als auch in der Handlungsausführung

Weiterhin kann geschlussfolgert werden, dass eine Quantifizierung des Konstrukts „Menschähnlichkeit“ für Typ-I sowie Typ-II-Modelle möglich erscheint, für Typ-III-Modelle jedoch objektiv nicht sinnvoll durchzuführen ist – nichtsdestoweniger können erfahrene Beobachter für bestimmte Szenarien eine Plausibilitätsbewertung bezüglich der beschriebenen Eigenschaften des Fahrermodells vornehmen, ein objektives Maß für die „Menschähnlichkeit“ eines Modells lässt sich daraus jedoch nicht herleiten.

4.1 Modell menschähnlicher Fahrhandlungen

Aufbauend auf den im Kapitel 3 beschriebenen Erkenntnissen wird in diesem Abschnitt ein Konzept für die Struktur eines kognitiven und menschähnlichen Fahrermodells vorgestellt. Bezüglich des Drei-Ebenen-Modells der Fahraufgabe nach Michon [Mic85] konzentriert sich das Modell auf die taktische bzw. die Manöverebene. Die Navigationsebene spielt während einer Fahrt zumeist nur eine sehr untergeordnete Rolle und kann somit entweder außerhalb des Modellrahmens simuliert, vorgegeben oder vernachlässigt werden. Für die Ebene der sensumotorischen Regelung hingegen steht eine Vielzahl von Modellen zur Verfügung, die eine realistische Längs- bzw. Querverführung gewährleisten (vgl. Abbildung 4.1).

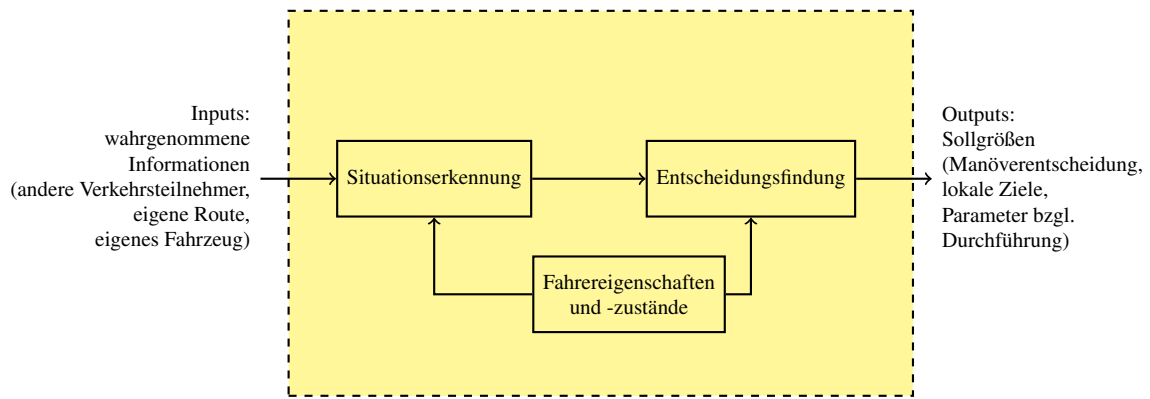


Abbildung 4.1: Modellgrenzen des vorgestellten Ansatzes: Wahrnehmung und Handlungsausführung liegen außerhalb des Modells, Prozesse bzgl. Situationserkennung und Entscheidung werden von Fahrereigenschaften und -zuständen (z. B. Motivationen, Emotionen) beeinflusst.

4.1.1 Fahrhandlung

Das Lösen der Fahraufgabe kann als eine Abfolge von Handlungen beschrieben werden. Eine Handlung kann – wie in Abschnitt 3.3.1 beschrieben – in mehrere Phasen unterteilt werden. Es gilt hierbei, dass die Phasen „Zielbildung“, „Handlungsausführung“ und „Zielevaluation“ Bestandteile jeder Fahrhandlung sind. Dies ist für einfachste, rein sensumotorische Handlungen, wie beispielsweise das Regeln einer Geschwindigkeit mittels des Gaspedals der Fall (vgl. Abbildung 4.2) und wird daher als für alle Fahrhandlungen gültig angenommen.

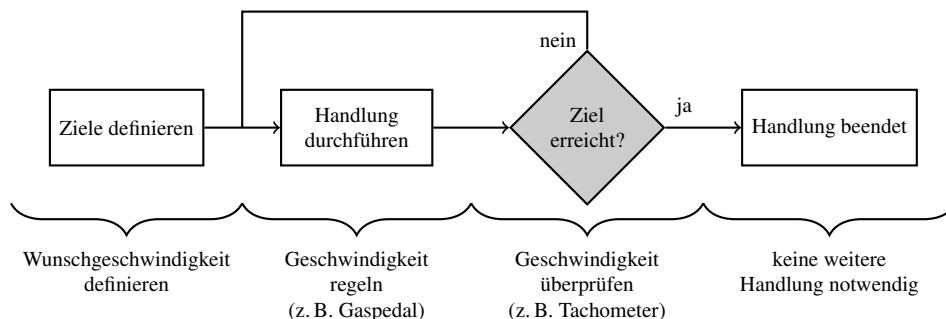


Abbildung 4.2: Vereinfachte Darstellung einer Fahrhandlung am Beispiel des Regelns einer Geschwindigkeit: Nach der Zieldefinition (Festlegen einer Wunschgeschwindigkeit) wird eine Handlung (Einstellen des Gaspedals) solange ausgeführt, bis durch eine Zielevaluation (Erreichen der Wunschgeschwindigkeit) festgestellt wird, dass das Ziel erreicht wurde.

Die Tatsache, ob der Fahrer die Handlung bewusst oder unbewusst ausführt, spielt hier keine Rolle: auch unbewusste Handlungen benötigen ein Ziel, unabhängig davon, ob der Fahrer sich dies vergegenwärtigen kann oder nicht. Eine Handlung existiert somit in einem Zeitraum beginnend mit der Existenz des Handlungsziels bis zur Erkenntnis des Erreichens dieses bzw.

einem vorzeitigen Abbruch der Handlung. Allgemein können zwei unterschiedliche Arten von Fahrhandlungen unterschieden werden: Komplexe Handlungen, deren Planung eine Vielzahl kognitiver Ressourcen verwendet und deren Ziele bewusst formuliert werden, sowie solche, die zum Großteil unbewusst ablaufen und aus einfachen sensumotorischen Handlungen bestehen. Erstere werden im Kontext dieser Arbeit als *Manöver* bezeichnet: Ein Manöver benötigt als Bedingung für die Bestimmung des Handlungsziels das Vorhandensein einer bestimmten potentiell *manöverauslösenden Situation* (kurz: *M-Situation*). Technisch betrachtet tritt eine M-Situation dann auf, wenn der Fahrer eine Abweichung zwischen einem Ist- und einem Sollwert feststellt, die größer ist, als die von ihm maximal akzeptierte Abweichung zur entsprechenden Bezugsgröße.

Im Kontext dieser Arbeit bezeichnen *Sollwerte* im Allgemeinen vom Fahrer gewünschte und messbare physikalische Größen des Fahrzeugs bzw. aus diesen ableitbare Größen bzw. Relationen zu Objekten in der Umgebung des Fahrzeugs, die durch bestimmte Fahrhandlungen erreicht werden sollen. Ein einfaches Beispiel für eine Sollgröße ist die vom Fahrer gewünschte Geschwindigkeit des Fahrzeugs v_{wunsch} . Diese wird über das Gaspedal eingestellt und kann u. a. über das Tachometer abgelesen werden. Jede vom Fahrer erkennbare Größe, für die eine Grenze existiert, die der Fahrer nicht über- bzw. unterschreiten möchte, kann als Sollgröße dienen.

Eine M-Situation wird hingegen durch die Erkenntnis des Fahrers definiert, dass eine Notwendigkeit zur Änderung seines Verhaltens besteht, unabhängig davon, ob er dies selbst wünscht oder die Verhaltensänderung auf einer Reaktion auf eine Änderung der Verkehrsumgebung basiert. Im Normalfall wechseln sich somit M-Situationen und Nicht-M-Situationen und dementsprechend ebenso Manöver- und Nicht-Manöverphasen ab. Der Zustand des Nichtvorhandenseins einer M-Situation wird folgend als *Homöostase* bezeichnet.

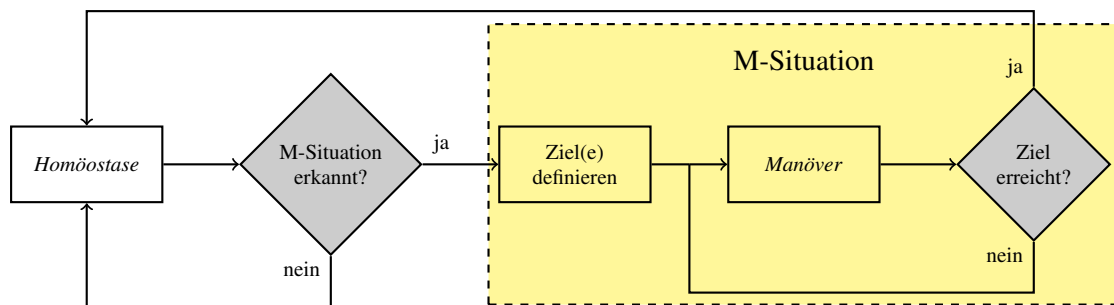


Abbildung 4.3: Homöostase und Manöver: Solange keine manöverauslösende Situation erkannt wird, befindet sich der Fahrer im Fahrmodus *Homöostase*. Bei Erkennen der M-Situation werden Ziele für das Manöver definiert und das Manöver wird bis zur Zielerreichung gefahren (andere Abbruchkriterien wurden der Einfachheit halber in diesem Schaubild weggelassen).

Entscheidend für die Erkennung von M-Situationen sind die wahrgenommenen und interpretierten Informationen des Fahrers (vgl. auch Abschnitt 3.1.5). Basierend auf diesen kann er seine Situation einschätzen und möglichen Handlungsbedarf erkennen. Während einer Fahrt

verfolgt der Fahrer zumeist parallel mehrere Ziele, die über Motive bzw. Motivationen erzeugt und von Emotionen beeinflusst werden. So ist das fundamentale Motiv des Menschen zu jeder Zeit das des Überlebens, woraus sich während der Autofahrt eine Vielzahl von Zielen ableiten bzw. entsprechende Sollgrößen generieren lassen. Fahrertypabhängig kommen weitere Motive hinzu, etwa „möglichst entspanntes Fahren“ oder „möglichst schnelle Zielerreichung“, welche entsprechende Ziele/Sollgrößen erzeugen. Ein Ziel kann somit als ein auf einer Motivation basierter formulierbarer Wunsch des Fahrers definiert werden, welcher räumlich und/oder zeitlich begrenzt ist (vgl. Abschnitt 3.2.2.2). Obwohl mehrere Ziele parallel existieren können, kann der Fahrer oftmals nicht all diesen Zielen gleichzeitig folgen, da sich diese u. U. widersprechen. Eine gewisse Priorisierung von Zielen bzw. der Reihenfolge der Bewältigung möglicherweise parallel auftretender M-Situationen ist somit notwendig. Darauf wird in Abschnitt 4.1.3 eingegangen.

Eine Gegenüberstellung des in diesem Kapitel vorgestellten Modellkonzepts mit dem Wickens'schen Informationsverarbeitungsmodell (vgl. Abbildung 4.4) führt zu der Erkenntnis, dass die sich auf ein Manöver beziehenden Konzepte bei Wickens im Bereich „Entscheidung und Reaktionsselektion“ verortet werden können. Wenn eine manöverauslösende Situation erkannt wird, wirken eine Vielzahl kognitiver Prozesse an der Lösung der aktuellen Fahraufgabe mit. Die tatsächliche Ausführung der Handlung liegt bereits in der „Reaktionsausführung“ – falls ein Manöver erkannt wurde, werden hier die Steuerungs- und Regelprozesse ausgeführt, die nötig sind, um das Manöver zu bewältigen. Falls jedoch kein Manöver erkannt wurde, werden die entsprechenden – größtenteils sensumotorischen – Prozesse während des Fahrmodus Homöostase ausgeführt.

Aus technischer Sicht betrachtet zeichnet sich der Zustand *Homöostase* durch eine andere Reglerparametrierung als die eines Manövers aus. Dynamische Fahrer mit einem Bedürfnis nach einem vergleichsweise hohen Aufgabenschwierigkeitsniveau – als Extremfall seien Rennfahrer angeführt – erzeugen sich durch ihr stetes Streben nach besseren Rundenzeiten ihre *M-Situationen* durch die permanente Diskrepanz zwischen Soll- und Istwerten selbst, bedingt durch vergleichsweise (betragsmäßige) geringe Werte für untere und obere Situationsgrenzen¹. Es ist daher davon auszugehen, dass sich Rennfahrer so gut wie nie in einem homöostaseartigen Zustand befinden. Eine Homöostasephase beginnt in dem Moment, in dem der Fahrer keine M-Situation erkennt und endet dementsprechend bei der Erkennung einer solchen.

Die unterschiedlichen Regelungsmechanismen für Längs- und Querdynamik bedeuten für den Homöostase-Zustand ebenfalls eine Unterteilung zwischen Längs- sowie Querhomöostase. Wenn eine Situation erkannt wird, die beispielsweise nur ein Längsmanöver erfordert, so wird die Querhomöostase beibehalten. Als Beispiel dient die Situation „zu geringe TTC zum vorausfahrenden Fahrzeug“: Das durchzuführende Manöver beschränkt sich ausschließlich auf die Längsdynamik – mittels Gas- bzw. Bremspedal wird die Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs so verringert, dass die Situation aufgelöst wird. Die Querdynamik bleibt davon jedoch unbeein-

¹ G_{min} bzw. G_{max} , siehe folgende Abschnitte

flusst und somit kann der Fahrer während des Längsdynamikmanövers in der Querhomöostase verharren. Dies gilt ebenso für die Längshomöostase. Handlungen während der Homöostase beschränken sich allgemein auf das Einstellen bzw. Halten bestimmter Sollwerte. Beispiele für die Längshomöostase sind die Sollgrößen „Motordrehzahl“, „Geschwindigkeit“ oder „Zeitlücke“. Für die Querhomöostase sind dies beispielsweise die Sollgrößen „Abstand zum Fahrbahnrand“ bzw. „Abstand zur Spurmitte“.

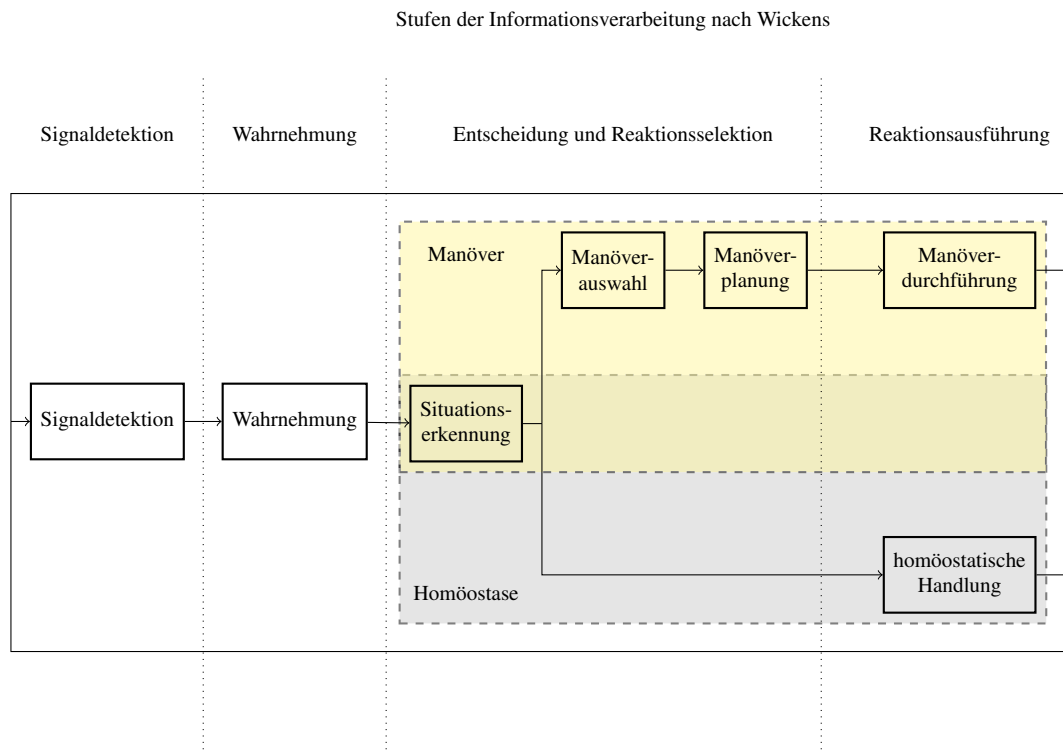


Abbildung 4.4: Verortung der im Modellierungskonzept beschriebenen Bereiche bzgl. des Wickens'schen Informationsverarbeitungsmodells

Die bisher erwähnten Gedanken zur konkreten Modellbildung zielen darauf ab, eine möglichst nachvollziehbare – und damit menschähnliche – Zielbildung zu definieren, auf deren Grundlage Fahrerhandlungen modelliert werden können. In den folgenden Abschnitten werden die beiden Fahrmodi *Homöostase* (Abschnitt 4.1.2) und *Manöver* (Abschnitt 4.1.3) ausführlich beschrieben. Ein weiteres Konzept, welches in die Modellierung miteinbezogen wird, ist das des menschlichen Fehlers. Basierend auf einer Taxonomie, die jedem der Schritte der menschlichen Informationsverarbeitung spezifische Fehlertypen zuweist, können Fehler im Fahrverhalten erzeugt werden bzw. entstehen als Konsequenz der Modellierung (Abschnitt 4.1.4). Abschließend wird die Modellierung inter- und intraindividuelle Unterschiede in Abschnitt 4.1.5 betrachtet.

4.1.2 Homöostase

Die Handlung „Fahren“ kann, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, in zwei Hauptzustände unterteilt werden: *Homöostase* und *Manöver*. Der Zustand der Homöostase ist als der Grundzustand anzusehen. Dies basiert auf der Annahme, dass in den Phasen, in denen keine manöverauslösende Situation aktiv ist, nur wenige kognitive Ressourcen für die Fahraufgabe verwendet werden und die Handlungen zum Großteil aus Sensumotorik bestehen. Er lehnt sich an den biologischen Begriff eines Gleichgewichtszustands bzw. an den Wilde'schen Begriff der Risikohomöostase [Wil82] an, hier jedoch mit dem Bestreben nach möglichst geringer Veränderung und einem entspannten, unangestregten Fahren. Mit dieser Beschreibung der Homöostase geht auch eine entsprechend geringe Aufgabenschwierigkeit einher. Der Zustand der Homöostase ist für die Mehrzahl der Fahrertypen als Ideal- bzw. Zielzustand anzusehen.

Im Gegensatz zu einem Manöver folgt der Fahrer in der Homöostasephase nicht bewusst bestimmten Sollwerten. Vielmehr kann das Handlungsziel während der Homöostase als das Verbleiben innerhalb einer vom Fahrer akzeptierte Abweichung von einem bestimmten Sollwert betrachtet werden, dies wird nachfolgend als *impliziter Sollwert* bezeichnet. Ein impliziter Sollwert S_i besteht demnach aus einem 4-Tupel:

$$S_i = [G_{min}, H_{min}, H_{max}, G_{max}]$$

wobei G_{min} die untere Situationsgrenze, H_{min} die untere Handlungsgrenze, H_{max} die obere Handlungsgrenze und G_{max} die obere Situationsgrenze definieren. Solange sich der wahrgenommene aktuelle Ist-Wert Ist_{wahr} innerhalb der Handlungsgrenzen befindet, wird keine Korrekturhandlung durchgeführt. Mit Hilfe dieses Konzeptes können beispielsweise Toleranzen des Fahrers bezüglich Wahrnehmung oder Fahrstil abgebildet werden. Fahrerhandlungen finden somit nur dann statt, wenn das Verlassen des „Nichthandlungsbereichs“ wahrgenommen wird. Davon zu unterscheiden ist die maximal akzeptierte Abweichung (die Situationsgrenze): Sobald eine Überschreitung dieser in eine Richtung zu erkennen ist, wird die Homöostase beendet, eine manöverauslösende Situation erkannt und letztendlich ein entsprechendes Manöver durchgeführt:

$$\text{Handlung des Fahrers : } \begin{cases} \text{keine, wenn} & H_{min} \leq Ist_{wahr} \leq H_{max} \\ \text{Korrektur, wenn} & G_{min} \leq Ist_{wahr} < H_{min} \\ \text{Korrektur, wenn} & H_{max} < Ist_{wahr} \leq G_{max} \\ \text{Manöver, wenn} & Ist_{wahr} < G_{min} \\ \text{Manöver, wenn} & Ist_{wahr} > G_{max} \end{cases}$$

Die Handlungs- sowie Situationsgrenzen werden von fahrertypabhängigen sowie situativen Parametern beeinflusst, beispielsweise Straßenbeschaffenheit, aktueller Geschwindigkeit oder Ähnlichem. *Implizite Sollwerte* sind immer mit dem Zustand „Homöostase“ verknüpft. Das

Konzept ist an das „Action-Point-Model of the Driver Vehicle System“ angelehnt, welches auf Wahrnehmungsschwellen für Geschwindigkeitsdifferenzen basiert und ein Fahrverhalten beschreibt, in dem der Fahrer in Folgefahrt um einen Wunschabstand pendelt (Todosiev [Tod63]). Verhaltensänderungen treten nur an den „Action Points“ auf – also den Punkten einer wahrgenommenen Geschwindigkeitsänderung zuzüglich Reaktionszeit.

Längshomöostase Im Zustand der *Längshomöostase* versucht der Fahrer, längsdynamische Sollwerte einzustellen bzw. konstant zu halten. Es existieren zwei Modi der Längshomöostase: *Folgefahrthomöostase* und *Freie-Fahrt-Homöostase* (vgl. Abschnitt 3.5.1.2). Sie unterscheiden sich durch die für die Homöostase relevanten impliziten Sollwerte. Für die Folgefahrthomöostase kann beispielsweise eine Zeitlücke t_{gap} verwendet werden, für die *Freie-Fahrt-Homöostase* eine Wunschgeschwindigkeit v_{wunsch} . In Abbildung 4.5 ist der Ablauf schematisch dargestellt: Zu beachten ist, dass sich die Wahrnehmung sowie die damit einhergehende Interpretation des Istwertes innerhalb der Homöostase befindet. Damit soll angedeutet werden, dass eine sensumotorische Regelung immer auch die Wahrnehmung des zu regelnden Wertes beinhaltet, es handelt sich somit um zumeist unbewusst aufgenommene Informationen.

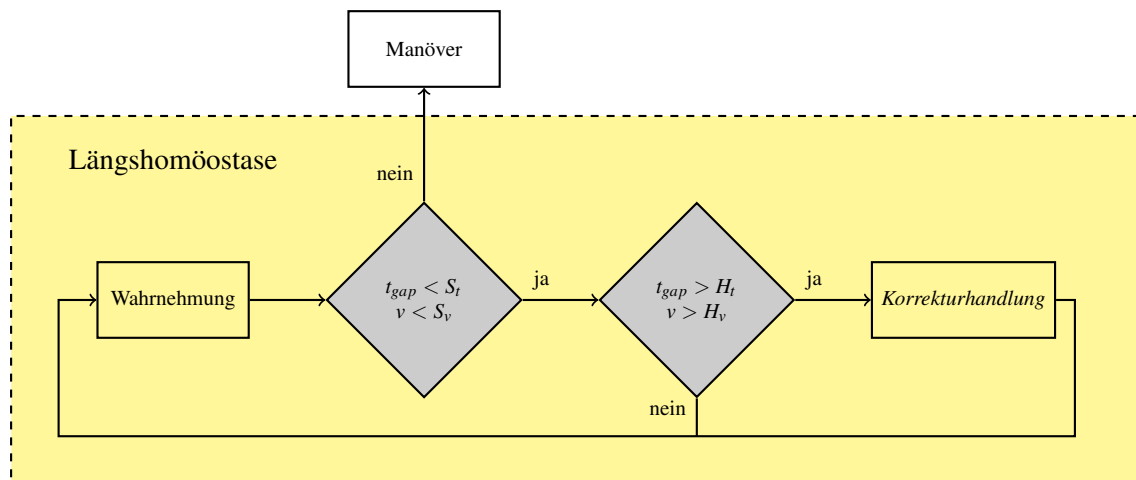


Abbildung 4.5: Ablauf Längshomöostase: Solange die wahrgenommene Geschwindigkeit v innerhalb der Handlungsgrenzen $[H_{min}, H_{max}]$ liegt, wird nicht gehandelt. Liegt v hingegen zwischen H und S , wird eine Handlung innerhalb der Längshomöostase durchgeführt. Ist v hingegen größer als die Situationsgrenze S , so wird der Zustand *Längshomöostase* verlassen und eine *Situation* beginnt. Dies gilt analog für die Folgefahrt und die erkannte Zeitlücke t_{gap}

Die impliziten Sollwerte für die Folgefahrthomöostase ergeben sich aus:

$$\text{Handlung des Fahrers : } \begin{cases} \text{Manöver} & \text{wenn } t_{gap} < G_{min} & (1) \\ \text{Korrektur} & \text{wenn } G_{min} \leq t_{gap} < H_{min} & (2) \\ \text{keine} & \text{wenn } H_{min} \leq t_{gap} \leq H_{max} & (3) \\ \text{Korrektur} & \text{wenn } H_{max} < t_{gap} < G_{max} & (4) \\ \text{neue Fahrsituation} & \text{wenn } G_{max} < t_{gap} & (5) \end{cases}$$

Fall (1) bedeutet, dass dem vorausfahrenden Fahrzeug zu nah gekommen wird und ein (Brems-) Manöver eingeleitet werden muss. Alternativ kann auch ein Ausweichmanöver gefahren werden. Die Fälle (2) und (4) beschreiben die normalen Korrekturmanöver, die – im Allgemeinen mittels Gaspedal – vorgenommen werden müssen, um die gewünschte Zeitlücke einzuhalten. In Fall (3) muss der Fahrer keine Handlungen ausführen, das Konstanthalten des Gaspedals stellt in diesem Kontext keine Handlung dar. In Fall (5) wird der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug zu groß, der Fahrer befindet sich nicht mehr im Modus „Folgefahrt“. Dies kann dazu führen, dass in die Freie Fahrt gewechselt oder z. B. ein Beschleunigungsmanöver durchgeführt wird – die Folgefahrtthomöostase wird jedoch zunächst verlassen. In Abbildung 4.6 sind die impliziten Sollwerte für die Folgefahrtthomöostase grafisch dargestellt.

Im Gegensatz zur optisch wahrgenommenen Zeitlücke kann die Fahrzeuggeschwindigkeit (als Sollwert während der Freien Fahrt) mit Hilfe unterschiedlicher Informationen wahrgenommen werden. Eine genaue Bestimmung findet jedoch über das Ablesen des Tachometers statt. Die impliziten Sollwerte sowie die Situations- und Handlungsgrenzen für die Längshomöostase während der Freien Fahrt ergeben sich somit als:

$$\text{Handlung des Fahrers: } \begin{cases} \text{Manöver} & \text{wenn } v < G_{min} & (1) \\ \text{Korrektur} & \text{wenn } G_{min} < v < H_{min} & (2) \\ \text{keine} & \text{wenn } H_{min} \leq v \leq H_{max} & (3) \\ \text{Korrektur} & \text{wenn } H_{max} < v < G_{max} & (4) \\ \text{neue Fahrsituation} & \text{wenn } G_{max} < v & (5) \end{cases}$$

Fall (1) führt zu einem Beschleunigungsmanöver. Die Fälle (2) – (4) können analog zur Folgefahrtthomöostase interpretiert werden. Im Gegensatz zur Folgefahrtthomöostase zieht Fall (1) nicht zwangsläufig² ein Brems- oder Ausweichmanöver nach sich. Der Fahrer hat jedoch wahrgenommen, dass er zu schnell fährt und kann basierend auf dieser Erkenntnis weitere Entscheidungen treffen (z. B. ein Bremsmanöver einleiten oder das Fahrzeug ausrollen lassen). Die impliziten Sollwerte sind in Abbildung 4.7 grafisch dargestellt.

²Der Fahrer hat immer die Option einer Nicht-Handlung. Dies würde für Fall (1) bei Folgefahrtthomöostase jedoch höchstwahrscheinlich zu einem Kontakt mit dem vorausfahrenden Fahrzeug führen.

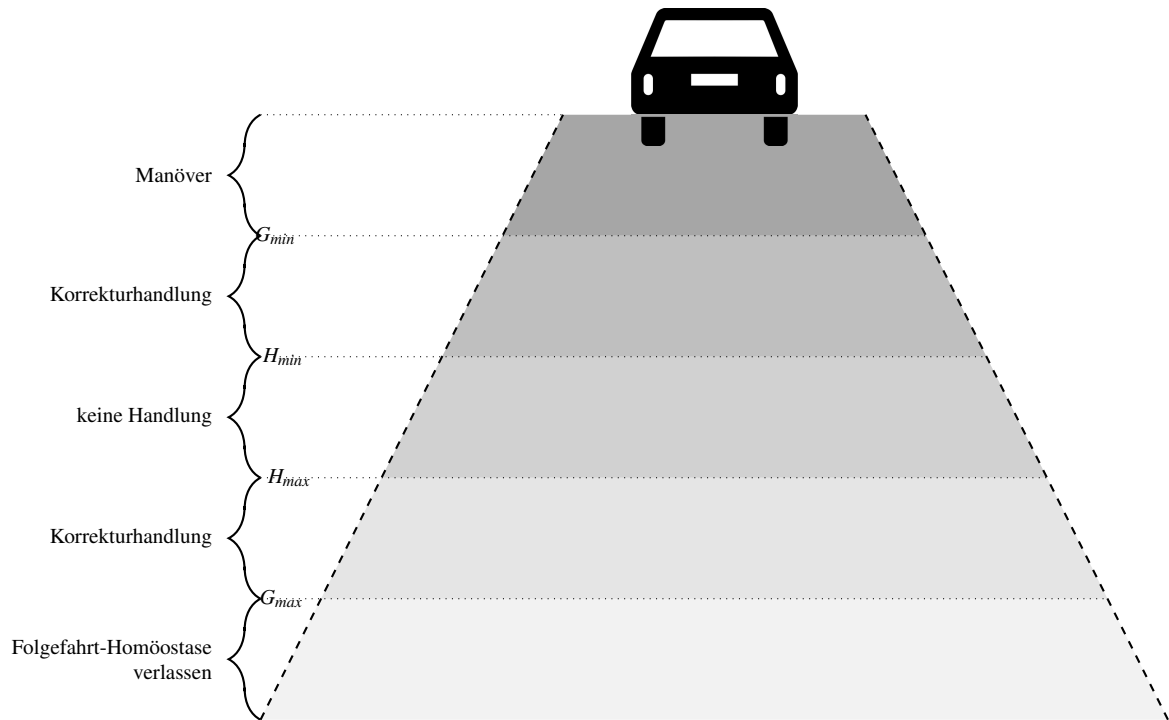


Abbildung 4.6: Implizite Sollwerte während der Längshomöostase (Folgefahrt): Der Zustand der Längshomöostase ist aktiv, solange sich die wahrgenommene Zeitlücke t_{gap} innerhalb der Situationsgrenzen $[G_{min}, G_{max}]$ befindet. Innerhalb der Handlungsgrenzen $[H_{min}, H_{max}]$ handelt der Fahrer nicht, außerhalb dieser werden Korrekturhandlungen durchgeführt. Außerhalb der Situationsgrenzen wird entweder ein Brems- bzw. Ausweichmanöver vorgenommen ($t_{gap} < G_{min}$) oder der Zustand der Folgefahrt-Homöostase zugunsten der Freie-Fahrt-Homöostase verlassen ($t_{gap} > G_{max}$).

Querhomöostase Während der Querhomöostase versucht der Fahrer, einen bestimmten Bereich auf der Fahrbahn nicht zu verlassen. Der Bereich definiert sich analog zur allgemeinen Beschreibung der während einer Homöostasephase vorhandenen und für den Fahrer zu beachtenden Größen:

$$\text{Handlung des Fahrers : } \begin{cases} \text{Manöver} & \text{wenn } q_{ist} < S_{links} & (1) \\ \text{Korrektur} & \text{wenn } S_{links} \leq q_{ist} < H_{rechts} & (2) \\ \text{keine} & \text{wenn } H_{links} \leq q_{ist} \leq H_{rechts} & (3) \\ \text{Korrektur} & \text{wenn } H_{rechts} < q_{ist} < S_{rechts} & (4) \\ \text{Manöver} & \text{wenn } S_{rechts} < q_{ist} & (5) \end{cases}$$

Der Bereich, in dem keine Handlung notwendig ist – der *Nichthandlungsbereich* – wird auf der in Fahrtrichtung linken Seite durch die *linke Handlungsgrenze* H_{links} und auf der rechten Seite durch die *rechte Handlungsgrenze* H_{rechts} begrenzt. Der *linke Handlungsbereich* erstreckt sich zwischen

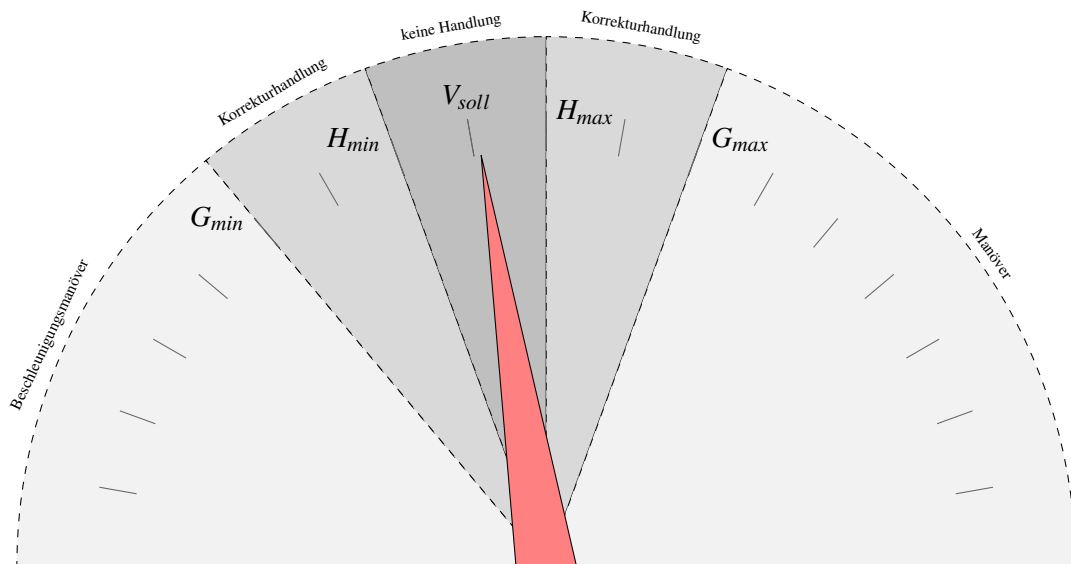


Abbildung 4.7: Implizite Sollwerte während der Längshomöostase (Freie Fahrt): Der Zustand der Längshomöostase ist aktiv, solange sich die wahrgenommene Geschwindigkeit innerhalb der Situationsgrenzen G_{min} und G_{max} befindet: Falls sich die aktuell wahrgenommene Geschwindigkeit zusätzlich innerhalb der Handlungsgrenzen $[H_{min}, H_{max}]$ befindet, so findet keine Handlung statt, ansonsten wird eine Korrekturhandlung vorgenommen, um die gewünschte Geschwindigkeit V_{soll} zu erreichen. Die Korrekturhandlungen beschränken sich auf die Verwendung des Gaspedals. Falls die wahrgenommene Geschwindigkeit kleiner als G_{min} ist, so wird ein Beschleunigungsmanöver durchgeführt, falls diese größer als G_{max} ist, so muss entschieden werden, ob ein Bremsmanöver durchgeführt oder die Geschwindigkeit durch Ausrollen verringert werden soll.

H_{links} und linker Situationsgrenze S_{links} , der rechte Handlungsbereich dementsprechend zwischen H_{rechts} und rechter Situationsgrenze S_{rechts} . Wird eine der Situationsgrenzen überschritten (1) bzw. (5), so wird der Zustand der Querhomöostase verlassen und ein Manöver eingeleitet. Korrekturhandlungen werden bei (2) bzw. (4) vorgenommen, falls (3) aktiv ist, wird keine Lenkhandlung durchgeführt (vgl. auch Abbildung 4.9).

Dies ist schematisch in Abbildung 4.8 dargestellt. Zu beachten ist, dass der Übergang zwischen Querhomöostase und einem Manöver nur eine Möglichkeit beschreibt, die Querhomöostase auf Grund von Verhaltensweisen innerhalb dieses Zustands zu verlassen. Es gibt eine Vielzahl von Kausalitäten außerhalb der Querhomöostase, die zum Verlassen des Homöostasezustands führen, beispielsweise neu gebildete Ziele, unvorhergesehenes Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer oder des eigenen Fahrzeugs.

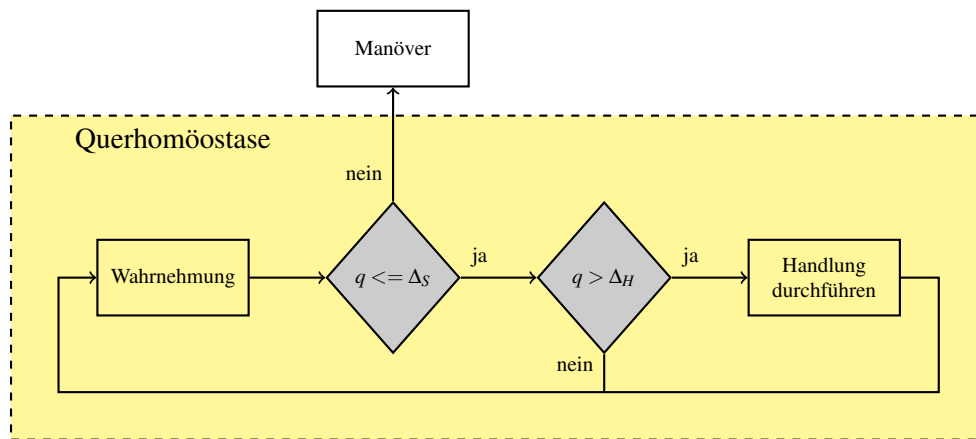


Abbildung 4.8: Ablauf Querhomöostase: Solange die wahrgenommene Querabweichung q innerhalb der Handlungsgrenzen ΔH liegt, wird nicht gehandelt. Liegt q hingegen zwischen H und S , wird eine Handlung innerhalb der Querhomöostase durchgeführt, ist q jedoch größer als die Situationsgrenze S , so wird der Zustand *Querhomöostase* verlassen.

4.1.3 Manöver

Im Modellkontext bezeichnet ein *Manöver* eine Fahr-Handlung, die mit Hilfe bestimmter Bedienelemente durchgeführt werden kann und eine (geplante oder erzwungene) Zustandsänderung des Fahrzeugs bewirkt. Eine solche Zustandsänderung bezieht sich entweder auf die Relation des Fahrzeugs zur Fahrbahn bzw. zu anderen Verkehrsteilnehmern oder direkt auf das eigene Fahrzeug. Wenn es – basierend auf den in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Merkmalen – zu einer Veränderung der subjektiven Verkehrssituation kommt, so kann dies ein Manöver auslösen. Solange der Fahrer „zufrieden“ mit den dynamischen Verhältnissen zwischen dem eigenen und den Fremdfahrzeugen sowie dem eigenen Fahrzeugs bezüglich der Fahrbahn ist, hat dieser keine Veranlassung, ein Manöver einzuleiten. Durch Handlungen der anderen Verkehrsteilnehmer können diese Verhältnisse jedoch geändert werden, so dass eine Notwendigkeit zur Durchführung eines Manövers entsteht. Diese existiert zeitlich betrachtet ab dem Zeitpunkt, an dem der Fahrer eine *manöverauslösende Situation* erkennt. Er hat nun mehrere Möglichkeiten, diese *M-Situation* mittels unterschiedlicher Fahr-Handlungen zu verlassen, um den Zustand der Homöostase für sich zurückzugewinnen. Eine M-Situation ist für den Fahrer solange aktiv, bis entweder ein geplantes Manöver zu Ende geführt wird oder durch Handlungen anderer Verkehrsteilnehmer oder Änderungen der Umgebung die Ausgangsbedingung für das Eintreten der Situation auflösen bzw. diese als aufgelöst erkannt wird.

Damit eine M-Situation aktiv wird, muss der Fahrer zunächst eine Diskrepanz (bzw. eine Kombination aus Diskrepanzen) eines Ist- und eines Sollwertes feststellen. Das Vorhandensein einer solchen Ist-Soll-Diskrepanz (kurz: ISD) stellt daher eine notwendige Bedingung für die Ausführung eines Manövers dar. Weiterhin muss die ISD die persönlich akzeptierte Toleranzschwelle des Fahrers überschreiten, um als aktive Diskrepanz zu gelten. Ist dies der Fall, so ist ab diesem

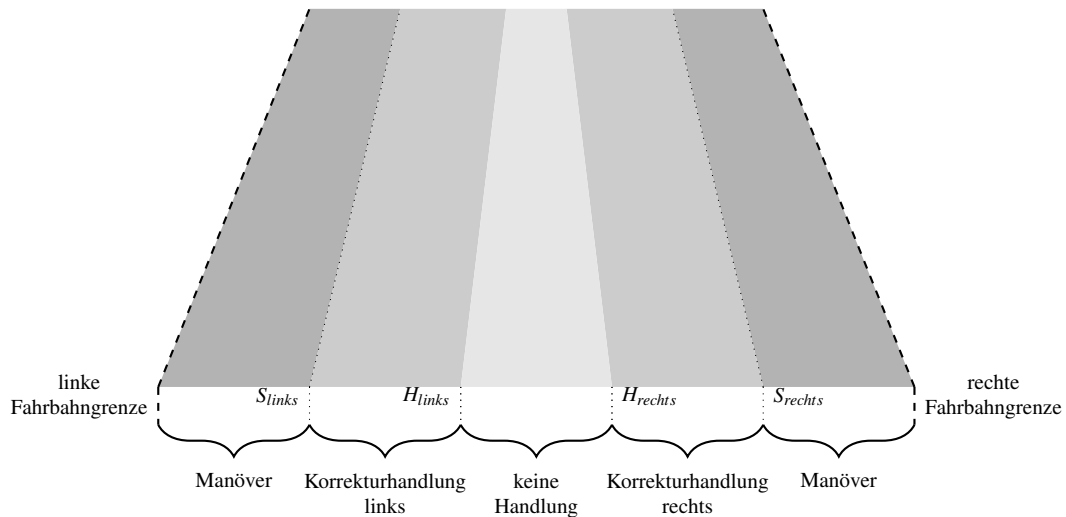


Abbildung 4.9: Implizite Sollwerte während der Querhomöostase: Der Zustand der Querhomöostase ist aktiv, solange sich die wahrgenommene Querabweichung innerhalb der Situationsgrenzen befindet. Lenkhandlungen finden nur innerhalb des Handlungsbereichs statt.

Zeitpunkt ein Manöverwunsch vorhanden. Ein Manöver kann jedoch erst durchgeführt werden, wenn weitere Bedingungen, zumeist bezüglich verschiedener Sicherheitsaspekte, erfüllt werden. Einem Manöver M können somit zunächst eine ISD³ I sowie weitere Bedingungen B zugeordnet werden.

Anders als bei homöostatische Fahrhandlungen, die theoretisch unbegrenzt andauern können, sind Manöver durch ein klar definiertes Ziel definiert und dauern im Regelfall (falls es nicht zu einer Unterbrechung des Manövers kommt) solange an, bis dieses Ziel erreicht wird. Ein solches Ziel wird als *expliziter* Sollwert formuliert. Ein expliziter Sollwert beschreibt einen vom Fahrer bewusst angestrebten Zielwert innerhalb einer gewissen Toleranz. Im Gegensatz zur Homöostase, in der das Ziel das Nichtverlassen eines bestimmten Akzeptanzkorridors ist (dessen sich der Fahrer nicht unbedingt bewusst sein muss), existiert während eines Manövers ein aktiver Wunsch des Fahrers zur Erfüllung des definierten Ziels der entsprechenden Vorgabe. Im Kontext der Fahraufgabe können im Allgemeinen nur je ein expliziter Sollwert für die Längs- sowie Querführungsaufgabe zeitgleich aktiv sein. Eine aktive M-Situation hat somit immer zur Folge, dass mindestens ein expliziter Sollwert für das entsprechende Manöver generiert wird. Eine genaue Ausregelung des expliziten Sollwerts ist zumeist nicht nötig – oder auch aufgrund der „menschlichen“ Messungenauigkeiten gar nicht möglich. Somit werden jedem expliziten Sollwert „Zufriedenheitsgrenzen“ zugeordnet, die bestimmen, ob ein Sollwert als „erreicht“ aufgefasst wird. Diese beschreiben gleichzeitig die Bedingungen zum Verlassen der M-Situation. Ein expliziter Sollwert S_e besteht aus einem 3-Tupel:

³Eine ISD muss sich nicht zwangsläufig auf einen Wert beziehen. Sie kann ebenso aus beliebigen logischen Verknüpfungen von durch den Fahrer wahrnehmbare Informationen bestehen.

$$S_e = [G_{min}, S, G_{max}]$$

wobei G_{min} und G_{max} die untere bzw. obere Zufriedenheitsgrenze beschreiben. Sobald sich der wahrgenommene Istwert innerhalb der Zufriedenheitsgrenze befindet, gilt der Sollwert S_e als erreicht (vgl. auch Abbildung 4.10). Die Formulierung „expliziter Sollwert“ bedeutet nicht, dass ein Sollwert genau eingeregelt wird. Der Bereich $\Delta S = G_{max} - G_{min}$ kann vergleichsweise groß ausfallen (z. B. bei einem Überholmanöver und sehr breiten Fahrbahnen). Einem expliziten Sollwert fehlt im Gegensatz zu einem impliziten Sollwert der „Nichthandlungsbereich“ – während eines Manövers versucht der Fahrer, den Bereich ΔS zu erreichen, wohingegen er in der Homöostase bestrebt ist, den Bereich $\Delta H = H_{max} - H_{min}$ nicht zu verlassen.

Ein Manöver M kann demnach als 3-Tupel definiert werden:

$$M = [I_M, B_M, S_M]$$

Die ISD I_M kann aus beliebig logisch verknüpften Ist-Soll-Diskrepanzen $I_{M_1} \dots I_{M_n}$ bestehen, sobald der verknüpfte Wert WAHR ist, ist die Manövereingangsbedingung erfüllt und der Manöverwunsch aktiv. Ähnliches gilt für B_M : Die Bedingungen $B_{M_1} \dots B_{M_n}$ müssen (jedoch UND - verknüpft) WAHR sein, um das Manöver beginnen zu können. Falls das Manöver aus mehreren Teilmanövern besteht, kann der explizite Sollwert S_M als eine Menge nacheinander geltender Sollwerte $[S_{M_1} \dots S_{M_n}]$ dargestellt werden. Ein einzelner expliziter Sollwert S_{M_i} besteht entweder aus einem Tupel $[S_{long}, S_{lat}]$ mit

$$S_M : \begin{cases} [S_{long}, \emptyset] & \text{wenn Längsmanöver} \\ [\emptyset, S_{lat}] & \text{wenn Quermanöver} \\ [S_{long}, S_{lat}] & \text{wenn kombiniertes Manöver} \end{cases}$$

Zeitlich kann ein Manöver wie folgt beschrieben werden: Nachdem eine M-Situation erkannt wurde, wird zuerst geprüft, ob eine eventuell höher priorisierte M-Situation aktiv ist. Falls dies nicht der Fall ist, wird ein Manöver ausgewählt, um die M-Situation aufzulösen. Ein stattfindendes Manöver kann jederzeit während der Durchführung abgebrochen bzw. durch Handlungen anderer M-Situationen ersetzt werden. Wenn beispielsweise während eines Querführungsmanövers mit dem Ziel, die Mitte der Fahrbahn zu erreichen (z. B. bei erkannter Situation „Fahrzeug hat Fahrbahn unbeabsichtigt verlassen“), eine neue M-Situation erkannt wird, beispielsweise „Hindernis auf der Fahrbahn“, dann kann die aktuelle M-Situation verlassen und das aktuelle Manöver durch eines, welches in der Lage ist, die neue M-Situation aufzulösen, ersetzt werden. Eine Priorisierung von M-Situationen hängt stark von den individuellen Eigenschaften und Vorlieben des Fahrers ab, so können beispielsweise M-Situationen, die durch Motivationen wie

„Komfort“ oder „schnelles Erreichen des Ziels“ entstehen, je nach Fahrer stark unterschiedlich gewichtet werden.

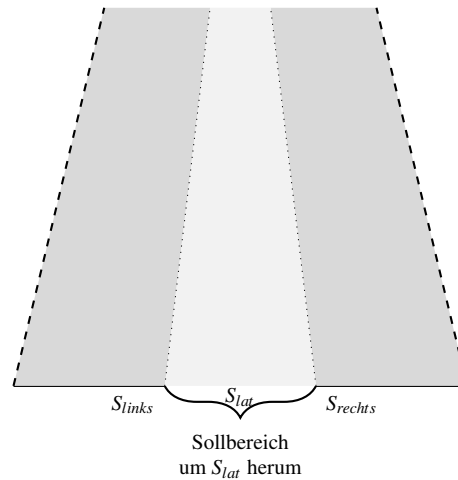


Abbildung 4.10: Explizite Sollwerte während eines (Teil-)Quermanövers: Sobald der Sollbereich $[S_{min}, S_{max}]$ um den lateralen Sollwert S_{lat} herum erreicht wird, wird das (Teil-)Manöver abgeschlossen.

In Tabelle 4.2 wird eine Situationspriorisierung vorgeschlagen: Die höchste Priorität erhalten Situationen, in denen eine Gefahr für Leib und Leben für den Fahrer oder Passagiere erkannt wird, gefolgt von ähnlichen Gefahren für andere Verkehrsteilnehmer (in diesem Fall stellt zumeist das eigene Fahrzeug die Gefahr dar). Weitere, für den Fahrer vergleichsweise hoch priorisierte Manöver stellen solche dar, die aufgrund von starken Motivationen oder Emotionen zustande kommen (besondere Eile oder Angst führt oft zum Übertreten von Verkehrsregeln). Das Einhalten von Verkehrsregeln bzw. der Spur kommt im Kontext einer durchschnittlichen Fahrt recht häufig vor und ist bezüglich seiner Priorität unter den bisher beschriebenen Motivationen für Manöver anzusiedeln – falls das Nichteinhalten von Verkehrsregeln subjektiv als gefährlich eingestuft wird, ändert sich somit automatisch auch die Priorität der erkannten Situation.

Manöver lassen sich qualitativ in drei Arten unterteilen: *Längsmanöver*, *Quermanöver* sowie *kombinierte Manöver*. Längsmanöver beschreiben Handlungen, welche ausschließlich mittels Manipulation der Längsdynamik des Fahrzeugs ausgeführt werden, analog werden Quermanöver definiert. Kombinierte Manöver hingegen erfordern zwingend die gleichzeitige bzw. aufeinander abgestimmte Veränderung von längs- und querdynamischen Zuständen des Fahrzeugs. Des Weiteren kann zwischen Manövern, die allein aufgrund der Straßengeometrie durchgeführt werden müssen und solchen, die aufgrund dynamischer Veränderungen der Umgebung durchgeführt werden müssen, unterschieden werden (vgl. Beispiele in Tabelle 4.3). Inhaltlich unterscheiden sich die Sollwerte der Manöver abhängig von deren Ursache: So werden „Permanentmanöver“, wie beispielsweise das Befahren einer sehr engen Straße (die Fahrbahngrenzen befinden sich innerhalb der Homöostasegrenzen) so lange durchgeführt, bis die Ursache für das Manöver nicht mehr vorhanden ist. Der Fahrer weiß also zu Manöverbeginn noch nicht, wie lange das

Priorität	Vorkommen	Kategorie	Beispiel	Handlung
höchste	extrem selten	Lebensgefahr für Fahrer oder Insassen	Hindernis auf Fahrbahn	Ausweichen, Bremsen, Beschleunigen
hohe	selten	Lebensgefahr für andere Verkehrsteilnehmer	anderer Verkehrsteilnehmer auf Fahrbahn	Ausweichen, Bremsen, Beschleunigen
erhöht	gelegentlich	hohe Motivation	Eile	mehr Überhol- und Beschleunigungsmanöver
erhöht	selten	starke Emotion	Wut, Angst	mehr Überhol- und Beschleunigungsmanöver
mittlere	sehr häufig	Einhalten von Verkehrsregeln	Geschwindigkeitsbegrenzung	Anhalten
mittlere	sehr häufig	Einhalten von Sollvorgaben	Spur verlassen	Querregelung
niedrige	häufig	Komfortaspekte	fragile Ladung	weniger Manöver (modifizierte Sollwerte)

Tabelle 4.2: Vorschlag einer Situationspriorisierung

Manöver auszuführen ist und überprüft die Existenz der Manöverursache fortwährend. Ein solches Manöver ergibt sich somit direkt aus den aktuellen Fahrumständen, eine Planung oder Entscheidungsfindung findet in diesem Fall nicht statt. Im Gegensatz dazu wird während Manövern mit eindeutig definiertem Manöverziel („Überholen von Fahrzeug x“, „Stehenbleiben an Position y“) überprüft, ob das Manöverziel erreicht wurde, die kausale Ursache für das Manöver spielt im weiteren Verlauf hingegen keine Rolle.

4.1.4 Fehler

Eine wichtige Eigenschaft eines menschähnlichen Fahrermodells ist dessen Möglichkeit, menschliches Fehlverhalten simulieren zu können. Angelehnt an die in Abschnitt 3.5.2 beschriebenen Fehlerkategorien nach Zimmer [Zim01] bzw. Rasmussen [Ras82] beim Fahren wird folgend ein Konzept, welches ebenso auf die Fahrmodi *Homöostase* und *Manöver* eingeht, eingeführt.

4.1.4.1 Fehler während der Homöostase

Der Zustand der Homöostase zeichnet sich durch das Nichtvorhandensein starker Korrekturmaßnahmen aus, da lediglich sensumotorische Regelungsprozesse aktiv sind. Fehlhandlungen innerhalb der Homöostase können daher zum Verlassen des Zustands führen. Wie in den Abbildungen 4.5 bzw. 4.8 ersichtlich ist, kommen für auftretende Fehler während der Homöostase

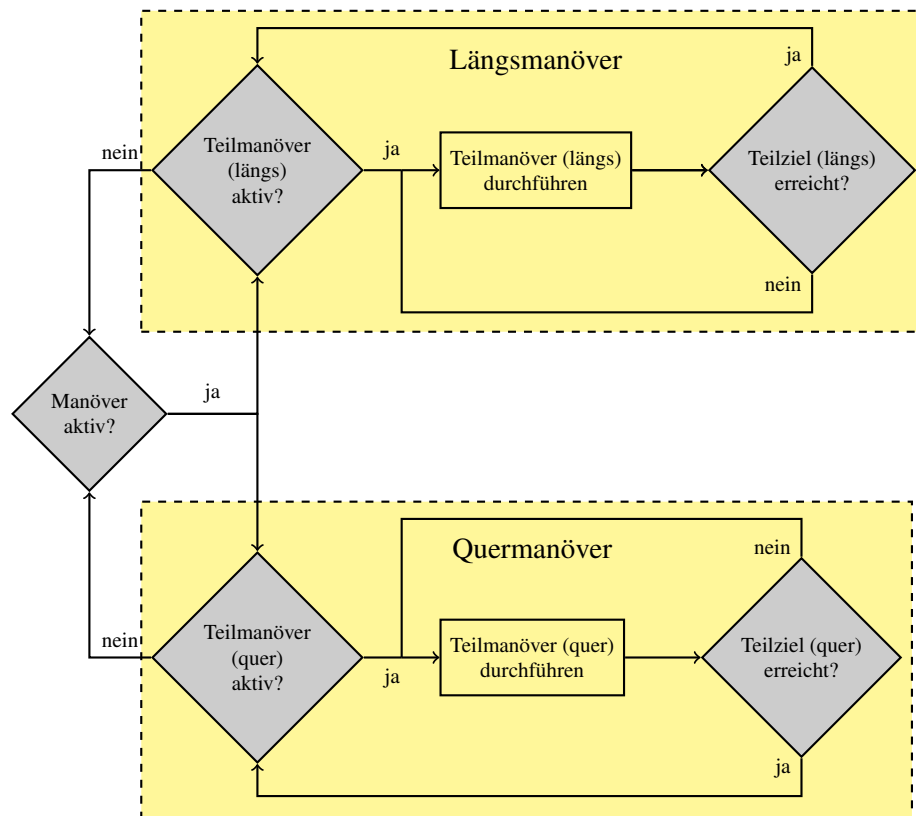


Abbildung 4.11: Schema Teilmanöver: Ein Manöver kann aus mehreren Teilmanövern bestehen. Längs- und Quer(teil)manöver können hierbei parallel ausgeführt werden

nur die Module „Wahrnehmung“ sowie „Handlungsdurchführung“ in Frage. Somit stellen auf der einen Seite die wahrgenommenen Istwerte, die mit impliziten Sollwerten verglichen werden und auf der anderen Seite die ausgeführten Handlungen mögliche Fehlerquellen dar. Die Zielbildung bezüglich der Homöostasephasen geschieht implizit bzw. unbewusst, somit können keine Fehler auftreten, die mit der Zielbildung konnotiert sind. Bezüglich der Fehlerkategorien (vgl. Abbildung 4.12) können während der Homöostase Informations- sowie Handlungsfehler auftreten.

Längshomöostase Die Längshomöostase wird durch das 4-Tupel des impliziten Sollwerts $S_l = [G_{min}, H_{min}, H_{max}, G_{max}]$ definiert. Für den Fall der Freien Fahrt kann die eigene Fahrzeuggeschwindigkeit v_w fehlerhaft eingeschätzt werden: Je nach Implementierung der menschlichen Wahrnehmung kann ein Fehler durch einen zu großen Zeitabschnitt zwischen der letzten genauen Messung (mittels Tachometer) und der aktuell wahren Fahrzeuggeschwindigkeit liegen, jedoch können auch andere Gründe zur Fehleinschätzung führen. Für den Fall der Folgefahrt kann die Zeitlücke t_w falsch interpretiert werden. Entsprechend Tabelle 4.4 können fehlerhafte Informationen entweder zu vorzeitigem oder zu verzögertem Verlassen der Homöostase führen. Letzteres

	Längsmanöver	Quermanöver	kombinierte Manöver
Straße	Abbremsen (Kreuzung, Schilder) Beschleunigen (Kreuzung, Schilder)	„Permanentmanöver“ (Baustelle, Tunnel) taktischer Spurwechsel	Abbiegen Auf-/Abfahrt Autobahn
Verkehr	Abbremsen wg. vorausfahrendem Fahrzeug Beschleunigen wg. vorausfahrendem Fahrzeug (Abstand halten)	Ausweichen wg. Hindernis Spurwechsel wg. anderen Verkehrsteilnehmern	Überholen Abbiegen

Tabelle 4.3: Kategorisierung von Manövern bzgl. Fahrzeugdynamik sowie deren Ursachen

kann bei einer entsprechend großen Abweichung zum Betätigen des Bremspedals und somit zu einer weiteren Reaktion des nachfolgenden Verkehrs führen.

Querhomöostase Der implizite Sollwert wurde für die Querhomöostase als das 4-Tupel $S_q = [S_{links}, H_{links}, H_{rechts}, S_{rechts}]$ definiert. Die wahrgenommene Querabweichung q_w stellt somit die erste mögliche Fehlerquelle dar: Je nach Implementierung der menschlichen Wahrnehmung kann q_w beispielsweise aufgrund mangelnder Aufmerksamkeit oder schlechter Sichtverhältnisse falsch eingeschätzt werden. Falls $|q_w| < |q_{ist}|$ ist, so kann die reale Situationsgrenze S erreicht werden (falls dies erkannt wird) und somit die Homöostase verlassen werden. Ist hingegen $|q_w| > |q_{ist}|$, so wird die Handlungsgrenze ΔH früher erreicht, was zu einer vorzeitigen Lenkhandlung führt, aber keine weiteren direkten Konsequenzen nach sich zieht. Eine Ausnahme stellt jedoch der Fall $|q_w| > |\Delta S|$ dar: Hier nimmt der Fahrer fälschlicherweise an, die Situationsgrenze überschritten zu haben, was ebenso zum Verlassen der Homöostasephase führt. Eine zweite Fehlerursache liegt in der Handlungsausführung: Die Korrekturmanöver können falsch parametrisiert sein, was entweder zu einem zu starken oder zu schwachen Lenkmanöver führt. Ersteres kann zu einem Verlassen der Homöostase führen, für den zweiten Fall gilt dies nicht unmittelbar (vgl. Tabelle 4.4).

4.1.4.2 Fehler während einer M-Situation

Im komplexen Fahrzustand der M-Situation können Fehler – zusätzlich zu denen auch während der Homöostase auftretenden *Informations-* und *Handlungsfehlern* (wie in Abschnitt 4.1.4.1 dargestellt) – in weiteren Stufen der Informationsverarbeitung vorkommen. Eine M-Situation entsteht, sobald der Fahrer eine Diskrepanz zwischen einem Ist- und einem Sollwert erkennt, welche größer ist, als die fahrerspezifische akzeptierte Differenz. Basierend auf dieser Definition können *Diagnosefehler* definiert werden, welche allgemein eine fehlerhafte Situationseinschätzung beschreiben. Technisch betrachtet kann ein Diagnosefehler entstehen, wenn erstens entweder eine

Stufen der Informationsverarbeitung nach Wickens

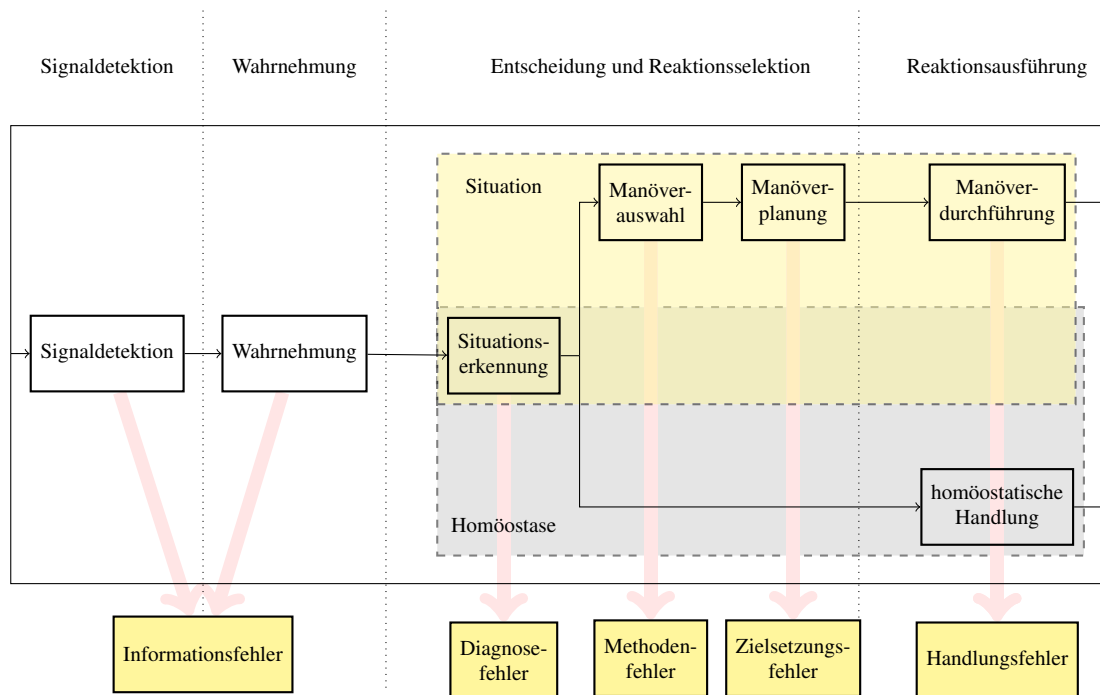


Abbildung 4.12: Modellierung von Fehlern abgeleitet aus dem Fehlermodell nach Zimmer [Zim01] bzw. Rasmussen [Ras82]

Differenz einer wahrgenommenen Information und einem Sollwert (ISD) kleiner oder größer als die reale Differenz ist; zweitens wenn eine ISD erkannt wird, obwohl der Bezugswert objektiv nicht vorhanden ist („False Positive“) bzw. drittens wenn eine ISD nicht wahrgenommen wird, obwohl die Werte objektiv vorhanden sind („Miss“).

Ein *Miss* wird in diesem Kontext so definiert, dass die Situation aufgrund fehlender Informationen nicht vom Fahrer erkannt wird (beispielsweise aufgrund von Verdeckungen). *False Positives* entstehen durch fehlerhaft eingeordnete Informationen, beispielsweise durch Fehlinterpretationen von Handlungen anderer Verkehrsteilnehmer. Fehler dieser Art sind innerhalb der beschriebenen Modellstruktur nur bedingt umsetzbar. Vorstellbar sind fehlerhafte Extrapolationen für Kurse anderer Verkehrsteilnehmer kombiniert mit plötzlichen Richtungsänderungen dieser aufgrund anderer Umstände. Die Implementierung von „leichten“ *Diagnosefehlern* (vgl. Tabelle 4.5) ist vergleichsweise einfach: Sie ergeben sich zumeist als Fehlerfortpflanzungen von Informationsfehlern. Die Umsetzung „schwerer“ *Diagnosefehler*, wie „looked-but-failed-to-see“-Fehlern kann hingegen nicht ohne eine Modellierung von Situationsbewusstsein bzw. Aufmerksamkeit geschehen.

Nachdem eine Situation erkannt wurde, können sich weitere Fehler während der Informationsverarbeitung (also der Manöverauswahl, der Zieldefinition und -evaluation) ereignen. Ein *Methodenfehler* kann auftreten, wenn während der Manöverauswahl ein solches ausgewählt wird,

	$ q_w \leq q_{ist} $	$ q_w > q_{ist} $
$ q_w < \Delta H $	Handlung zu spät, kein Verlassen der Homöostase	Handlung zu früh, kein Verlassen der Homöostase
$ \Delta H \leq q_w < \Delta S $	Handlung zu spät, kein Verlassen der Homöostase obwohl ΔS evtl. erreicht	Handlung zu früh, kein Verlassen der Homöostase
$ \Delta S \leq q_{ist} $	Handlung zu spät, zu spätes Verlassen der Homöostase	Handlung zu früh, unnötiges Verlassen der Homöostase

Tabelle 4.4: Informationsfehler während der Homöostase und ihre Auswirkung

Diagnosefehler	Beispiel
$ISD_w < ISD$	Situation wird zu spät erkannt → Manöver wird evtl. zu spät ausgeführt (leichter Fehler)
$ISD_w > ISD$	Situation wird zu früh erkannt → Manöver wird evtl. zu früh ausgeführt (leichter Fehler)
$ISD_w \in \emptyset \wedge ISD \notin \emptyset$ („Miss“)	objektiv vorhandene Situation wird nicht erkannt → es wird kein Manöver geplant (schwerer Fehler)
$ISD_w \notin \emptyset \wedge ISD \in \emptyset$ („False Alarm“)	Situation wird erkannt, obwohl objektiv nicht vorhanden → es wird ein unnützes Manöver geplant (schwerer Fehler)

Tabelle 4.5: Diagnosefehler in der Situationserkennung und ihre Auswirkung

welches die Situation objektiv nicht aufzulösen imstande ist: Beispielsweise kann ein Bremsmanöver ausgewählt werden, obwohl ein Ausweichmanöver die bessere Alternative dargestellt hätte. Wenn dies aufgrund zu geringer Ressourcen für die Planung eines Alternativmanövers geschieht, dann ist das resultierende – einfachere – Manöver als „Heuristik-Manöver“ bzw. „Reflex-Manöver“ zu interpretieren. Im Unterschied zur ursprünglichen Definition bezieht sich ein *Methodenfehler* im Kontext dieser Arbeit nicht ausschließlich auf die (falsche) Wahl eines Bedienelementes (Lenken vs. Gas/Bremse), sondern auch auf unterschiedliche Manöver. Ein *Methodenfehler* lässt sich beispielsweise durch persönliche Präferenzen, Emotionen (z. B. Ängste) oder Motivationen (bestimmte Motivationen erhöhen die Wahrscheinlichkeit, riskantere Manöver auszuwählen) implementieren.

Die Bestimmung der (expliziten) Sollwerte für ein ausgewähltes Manöver kann ebenso fehlerhaft erfolgen. Ein solcher *Zielsetzungsfehler*⁴ entsteht, wenn Sollwerte definiert werden, auf deren Grundlage das ausgewählte Manöver nicht bzw. nicht optimal durchgeführt werden kann, bei-

⁴Dieser ist nicht zu verwechseln mit dem in Abschnitt 3.5.2 beschriebenen.

spielsweise ein zu spät gewählter Zeitpunkt oder eine zu gering gewählte Pedalstellung für ein Bremsmanöver.

Die Implementierung von *Bedienfehlern* wie z. B. das Abrutschen von einem Pedal sind innerhalb des vorgestellten Modellkonzepts nicht angedacht – die dazu benötigte (physische bzw. physikalische) Modellierung des Fahrers bzw. der Bedienelemente liegt weit außerhalb der Modellgrenzen.

Verstöße hingegen, also vorsätzlich begangene „Fehler“ – bzw. von der Straßenverkehrsordnung nicht legitimates Verhalten, welches zu riskanten Situationen oder Unfällen führt, können ebenfalls mittels Motivationen, Emotionen und fahrertypspezifischen Parametern modelliert werden.

4.1.5 Modellierung von Einflussfaktoren

In Abschnitt 3.4 wurden unterschiedliche Einflussfaktoren, die auf menschliches Fahrverhalten wirken, beschrieben. Eine Modellierung aller behandelten Konstrukte ist jedoch weder effizient, noch notwendig, um menschähnliches Fahrverhalten generieren zu können. Einflussfaktoren auf das menschliche Fahrverhalten können in *statische* und *dynamische* Faktoren unterteilt werden. Erstere werden als für eine Fahrt konstant angenommen bzw. ändern sich so langsam, dass ihr direkter Einfluss auf das Fahrverhalten als sehr gering eingeschätzt wird, eine Implementierung als Parameter bietet sich daher an. Dynamische Faktoren können sich während einer Fahrt ändern und sind daher in der Lage, das Verhalten wahrnehmbar zu beeinflussen.

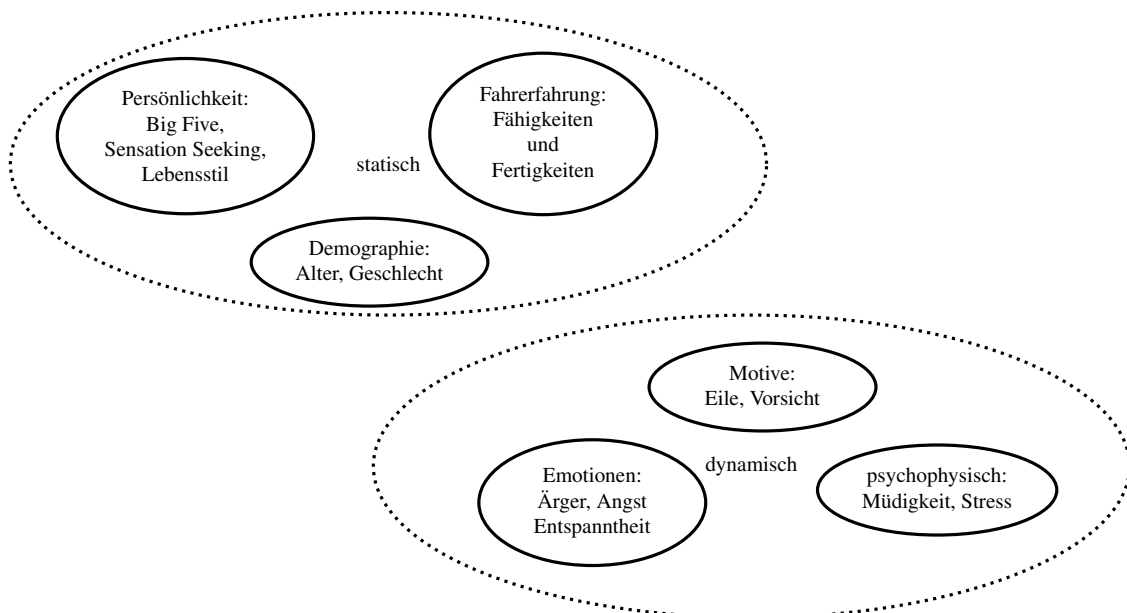


Abbildung 4.13: Statische und Dynamische Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten

Betrachtet man die Fahraufgabe aus der Perspektive der möglichen Fahrhandlungen, so bestehen diese aus einem – definierten – Pool aus Manövern und homöostatischen Fahrhandlungen. Beide Formen von Fahrhandlungen können mittels eines Sollwerttupels definiert werden (vgl. Abschnitte 4.1.2 und 4.1.3). Manöver werden durch eine erkannte Ist-Soll-Diskrepanz eingeleitet. Persönlichkeitseigenschaften und längerfristige Motive hingegen bestimmen die grundsätzliche Parametrierung der Situationserkennung sowie die Art und Weise der auszuführenden Handlungen. In Abbildung 4.14 wird dies grafisch veranschaulicht: Ein Motiv – beispielsweise „Eile“ – parametriert Sollwerte und Ist-Soll-Diskrepanzen mehrerer Situationen im Modul „Situationserkennung“. Als Beispiel dient eine Überholsituation: Eine notwendige Bedingung für die Erkennung einer solchen ist gegeben, wenn der Wert der Geschwindigkeitsdifferenz $\Delta v = v_{wunsch} - v_{voraus}$ größer als eine vom Fahrer maximal akzeptierte Geschwindigkeitsdifferenz Δv_{max} ist. Falls also das Fahrmotiv „Eile“ aktiv ist, so wirken die Parameter $P_{v_{wunsch}}^{Eile}$ und $P_{\Delta v_{max}}^{Eile}$ auf die Eintrittsbedingung. Die Überholsituation wird früher erkannt, da die vom Fahrer aufgrund eines langsameren vorausfahrenden Fahrzeugs akzeptierte Geschwindigkeitsdifferenz verringert wird:

$$\Delta v_{max}^{Eile} = P_{v_{wunsch}}^{Eile} \cdot \Delta v_{max} \text{ mit } P_{v_{wunsch}}^{Eile} < 1.$$

Zusätzlich wird die eigene Wunschgeschwindigkeit erhöht:

$$v_{wunsch}^{Eile} = v_{wunsch} \cdot P_{v_{wunsch}}^{Eile}.$$

Für das Motiv „Eile“ kann weiterhin angenommen werden, dass eine genaue Ausführung von Manövern negativ mit der Stärke des Motivs einhergeht, somit ergibt sich für den expliziten Sollwert

$$S^{Eile} = [G_{min}^{Eile}, S, G_{max}^{Eile}]$$

mit

$$G_{min}^{Eile} = P_{G_{min}}^{Eile} \cdot G_{min} \text{ und } G_{max}^{Eile} = P_{G_{max}}^{Eile} \cdot G_{max}$$

und den Parametern

$$P_{G_{min}}^{Eile} < 1 \text{ und } P_{G_{max}}^{Eile} < 1.$$

Mit Hilfe dieses Konzepts kann somit manipuliert werden, *ob* und *wann* eine Situation erkannt wird, *welches* Manöver zur Auflösung dieser ausgewählt wird, *wann* und *wie* das Manöver ausgeführt werden soll und *wie lange* eine Homöostasehandlung andauern wird. Die Beeinflussung von Wahrnehmung sowie Handlungsausführung durch Motivationen kann mit Hilfe dieses Ansatzes ebenso modelliert werden – jedoch kann dies nur im Kontext des verwendeten Modells stattfinden. Für die Wahrnehmungsmodellierung ist eine Vielzahl von Modellen vorhanden: Mit Hilfe von Blicksteuerungsmodellen können die notwendigen Informationen zur Verfügung gestellt sowie Problemstellungen wie Verdeckung, nutzbares Sichtfeld oder visuelle Aufmerksamkeit realistisch implementiert werden. Für die Handlungsausführung kann ebenfalls aus vielen unter-

schiedlichen Reglermodellen, welche an das Konzept der impliziten und expliziten Sollwerte angepasst werden können, gewählt werden. Hierbei muss zunächst evaluiert werden, wie ein solches Modell parametrisiert werden kann: Vorstellbar sind Veränderungen bei Parametern bzgl. der Bedienelemente, sowie der Reglerparameter. Des Weiteren wirken Emotionen während der Fahrhandlung sowohl indirekt über Motive (beispielsweise kann die Emotion „Angst“ das Motiv „Eile“ verstärken) als auch direkt auf einzelne Module.

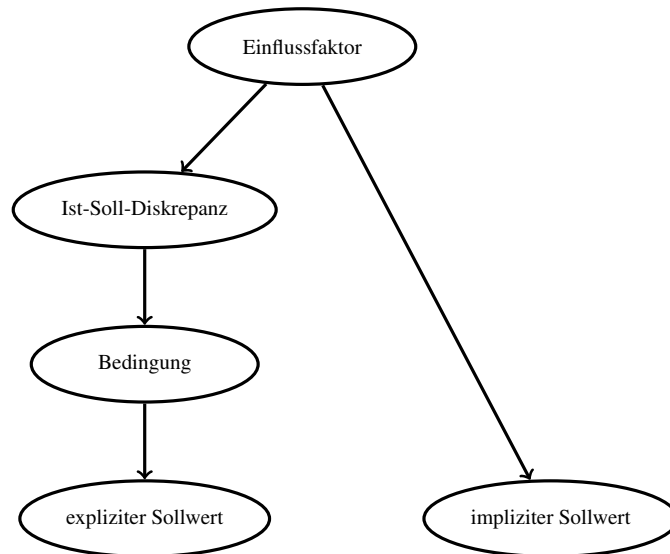


Abbildung 4.14: Motiv-Handlungs-Kette: Ein Einflussfaktor wirkt auf eine Menge an Ist-Soll-Diskrepanzen, aus diesen können Bedingungen gebildet werden, um bestimmte Manöver auszulösen. Des Weiteren können sowohl explizite als auch implizite Sollwerte durch Einflussfaktoren parametrisiert werden.

Die Summe aus statischen Einflussfaktoren bildet die Grundlage für die Beschreibung eines Fahrertyps. Hierfür werden einige spezifische Parametersätze für die jeweiligen expliziten und impliziten Sollwerte, als auch für Ist-Soll-Diskrepanzen für die Situationserkennung benötigt. Aus statistischen Daten kann beispielsweise abgeleitet werden, dass sich durchschnittliche Zeitlücken für die Folgefahrt bei Autofahrern einer bestimmten Demografie vom Durchschnittswert der Grundgesamtheit unterscheiden. Die impliziten Sollwerte für die Folgefahrt können dementsprechend um diesen Differenzwert zuzüglich Varianz verändert werden. Mit diesem Ansatz können für definierte Manöver sowie homöostatische Fahrhandlungen sowohl statische als auch dynamische Einflussfaktoren verwendet werden, um so einen individuellen Fahrer aus einer bestimmten Grundgesamtheit abbilden zu können.

Fazit Es wurde ein Ansatz zur Modellierung der Fahrhandlung vorgestellt, welcher ermöglichen soll, menschähnliches Fahren zu modellieren. Dies geschieht durch die Aufteilung der Fahrhandlung in zwei grundlegend unterschiedlichen Fahrmodi: *Manöver* und *Homöostase*. Diese können mathematisch durch Sollwerttupel beschrieben werden. Parameter können auf die

Sollwerte einwirken und somit das Fahrverhalten verändern. Psychologische Konstrukte wie Motivation oder Emotion können über diese Parameter ebenfalls auf das Fahrverhalten einwirken. Auch typisch menschliche Phänomene wie Fahrfehler können mit Hilfe dieses Ansatzes abgebildet werden. Fahrertypen, also sich in ihrem Fahrverhalten unterscheidende Gruppen von Fahrern, können mit Hilfe von ähnlich definierten Parametern erzeugt werden. Teile dieser theoretischen Ausarbeitung wurden bereits in das in Kapitel 5 vorgestellten Fahrermodell implementiert.

Bezüglich der eingeführten Menschähnlichkeitstypen von Fahrermodellen muss zwischen den Fahrmodi *Homöostase* und *Manöver* unterschieden werden. Fahrhandlungen während der Homöostase sind als sensumotorische Handlungen ohne bewusste kognitive Anstrengungen zu interpretieren und können daher maximal in die Typ-II-Kategorie eingeordnet werden. Komplexere Fahrhandlungen wie Fahrmanöver können – so denn eine Validierung des Sollwertkonzepts stattgefunden hat – zum Teil in Kategorie III fallen. Die Einordnung kann jedoch auch dann nur für jeweils einzelne, validierte Manöver vorgenommen werden. Schlussendlich kann das Modellkonzept als hybrides Typ-II/Typ-III-Modell interpretiert werden, wobei jedoch auf die Modellierung der Handlungsausführung verzichtet wurde.

4.2 Validierung von Fahrermodellen

Für jeden Modellierungsvorgang stellt sich die Frage, inwiefern die Aussagen, die das Modell trifft, mit denen aus der Realität gewonnenen übereinstimmen bzw. ob diese ähnlich genug sind, um ein Modell als *valide* bezeichnen zu können. Aus dieser Grundproblematik einer jeden Modellierung leiten sich weitere Fragen ab: Wie ähnlich müssen die Aussagen sein? Ist ein Modell schon nicht mehr als valide zu betrachten, wenn eine einzige Aussage nicht mit der Realität übereinstimmt? Gibt es Grade der Modellvalidität? Um auf diese Punkte am Ende des Abschnitts näher eingehen zu können, wird zunächst das Konzept der Modellvalidierung aus verschiedenen Standpunkten beleuchtet sowie damit zusammenhängende Begrifflichkeiten definiert.

Im Umfeld des Begriffs *Validierung* fällt oft der Terminus *Verifikation*. Diese bezeichnet den Prozess für den Nachweis einer formal korrekten Implementierung eines (Computer-)Modells – nicht mehr und nicht weniger. *Validierung* hingegen bezieht sich auf den Kontakt des Modells mit der Wirklichkeit, sie beinhaltet eine Einschätzung, inwiefern dieses für einen bestimmten Anwendungszweck geeignet ist und weiterhin, wie genau ein Modell der realen Modellvorlage entspricht bzw. die Realität abbildet. Je nach Kontext und Wissenschaftsfeld variiert die Gewichtung zwischen beiden Interpretationsmöglichkeiten. Für das Erreichen des gewünschten Modellverhaltens kann ein Modell *kalibriert* werden, indem Modellanpassungen – zumeist mittels Parametervariation – vorgenommen werden.

Zunächst ist zu bemerken, dass bisher kein allgemeingültiger Prozess für eine Modellvalidierung existiert – vielmehr gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Sichtweisen und Prozesse (vgl. auch

Viehof & Winner [VW17]). Kleindorfer et al. [KOG98] beleuchten unterschiedliche philosophische Denkschulen und bewerten deren Einflüsse auf die Validierung von simulativen Modellen. Sie kommen zu dem Schluss, dass Validierung als ein ethisches Problem zu betrachten ist, in dem letztendlich der Anwender auf verantwortliche und professionelle Weise die Berechtigung des Modells zu vertreten hat, da ein Modell weder als „vollständig validiert“ noch als „vollständig widerlegt“ betrachtet werden kann.

Nach Klein & Herskovitz [KH05] können Modelle analog zu wissenschaftlichen Theorien behandelt werden, da jedes Modell ebenfalls aus einer Reihe von Aussagen über die Funktionsweise eines bestimmten Systems besteht. Somit kann jedes Modell anfangs als eine Hypothese angesehen werden, die besagt, dass das konstruierte Modell innerhalb eines bestimmten Anwendungsrahmens ein zu modellierendes System mit einer angestrebten Genauigkeit abbildet. Diese Hypothese kann durch den Prozess der Validierung bestätigt oder verworfen werden, wozu u. a. statistische Methoden verwendet werden können. Das führt zur Schlussfolgerung, dass ein Modell – je nach Sichtweise – entweder niemals umfassend validiert werden kann, da jede erfolglose Validierung zum Verwerfen des Modells führen muss und dieses daher bis zu einer solchen nur als „nicht invalide“ bezeichnet werden kann. Alternativ nimmt man an, dass sich ein Modell auf einer Nützlichkeitsskala verorten lässt und es sich nach erfolglosen Validierungsversuchen durch verhältnismäßig kleine Änderungen (Kalibrierungen) „re-validieren“ lässt. Dementsprechend muss der Ansatz gewählt werden, der mit dem Modellierungsziel weitestmöglich übereinstimmt: Sollen wissenschaftlich valide Erkenntnisse mittels Extrapolation gewonnen werden, so ist die falsifikationistische Herangehensweise die zielführendere, bei interpolierenden Modellen – also bei Modellen, die in Situationen verwendet werden, die den bereits validierten ähnlich sind – ist eine induktive, verifikationistische Interpretation der Validierung hingegen die sinnvollere.

Die Sichtweise von Law & McComas [LM01] ist mit letzterer vergleichbar: Sie bezeichnen ein Modell als „valide“, wenn es dazu verwendet werden kann, Entscheidungen über ein System zu treffen, die identisch mit denen sind, die man aus Experimenten mit dem realen System ableiten würde. „Absolute“ Modellvalidität wird ebenfalls prinzipiell abgelehnt, da diese nur bei Identität mit dem zu modellierenden System vorliegt und ein Modell sich ja gerade durch Abstraktion und Vereinfachung der Realität definiert. Dementsprechend kann „absolute“ Modellvalidität weder Ziel noch Ergebnis einer Modellierung sein.

Konkrete Aussagen über den Validierungsprozess treffen Oberkampff & Trucano [OT08]: Sie fordern, drei Kernaspekte zu berücksichtigen:

- 1) Bewertung der Modellgenauigkeit durch Vergleich mit Experimentaldaten
- 2) Interpolation bzw. Extrapolation des Modells für den gedachten Einsatzbereich
- 3) Entscheidung über die Eignung des Modells für die spätere Benutzung

Sie betonen zusätzlich, dass Experimentaldaten das glaubwürdigste Abbild der Realität zum Zwecke der Validierung darstellen, dass jedoch auch Fehler- und statistische Unsicherheitsbe-

trachtungen sowohl auf Modellebene, als auch bezüglich der Experimentaldaten durchgeführt werden müssen.

Kutluay [Kut13] fasst die Problemstellung der Modellvalidierung zutreffend zusammen: Wenn das ComputermodeLL das mathematische Modell gut abbildet (Verifikation) und das mathematische Modell zur Theorie passt (konzeptuelle Validierung), dann bildet das ComputermodeLL auch die Theorie gut ab. Wenn die Theorie die Realität gut abbildet, dann bildet das Modell diese ebenfalls gut ab (operationale Validierung), so denn die verwendeten Daten zuverlässig sind (Datenvalidität).

Nach Sargent [Sar10] existiert eine Vielzahl von Validierungsmethoden, die subjektiv oder objektiv sein können, wobei statistische bzw. mathematische Techniken als „objektiv“ bezeichnet werden. Wichtiger im Kontext dieser Arbeit erscheinen die „subjektiven“ Methoden:

- Animation, Vergleich mit anderen Modellen
- Test auf Extremkonditionen (unwahrscheinliche Kombination von Eingabewerten und Umgebungsvariablen)
- „Augenscheinvalidität“ (Expertenmeinung über nachvollziehbares Systemverhalten)
- interne Validität (Berücksichtigung der internen Stochastik des Modells)
- Sensitivitätsanalyse (Variation der vorhandenen Parameter, um deren Effekt bewerten zu können)
- Turing-Tests (Experten müssen zwischen Modell und Realdaten unterscheiden)

Realitätstreue Ein weiteres Konstrukt, welches bei der Validierung eines Modells nützlich sein kann, ist dessen *Realitätstreue*. Buchholz [Buc19] definiert diese folgendermaßen: Sei V_R ein Verhaltensmaß für das Realsystem und V_S das Verhalten für das simulierte Modell. Dann bezeichnet $D(V_R, V_S)$ das Maß für die erkennbaren Verhaltensunterschiede zwischen Realsystem und Modell. Ein Modell gilt demnach als „realitätsgetreu“, wenn $D(V_R, V_S)$ unter einem bestimmten Grenzwert liegt, der abhängig vom Modellierungsziel spezifiziert werden muss. Eine *Kalibrierung* des Modells hat nun zum Ziel, die Verhaltensunterschiede $D(V_R, V_S)$ auf ein gewünschtes Maß zu reduzieren. Zum einen kann dies durch Strukturänderungen des Modells geschehen, andererseits durch Änderungen der Modellparameter – ohne Änderungen an der Modellstruktur.

Eine bestimmte Situation – also eine Kombination aus Modellkonfiguration und Zustand der Simulationsumgebung – kann als ein Punkt in einem „Situationsraum“ interpretiert werden (vgl. Abbildung 4.15). Zunächst ist davon auszugehen, dass innerhalb dieses Raumes ein Bereich G existiert, in dem das Modell valide Modellausgaben generiert und dementsprechend auch ein Bereich $\neg G$, in dem dies nicht so ist. Weiterhin existieren Situationen K , die kalibrierte und somit validierte Modellkonfigurationen darstellen, die in G liegen. Testet man nun mit einer (validen) Modellkonfiguration eine unbekannte Situation E , so kann das Ergebnis dieses Tests

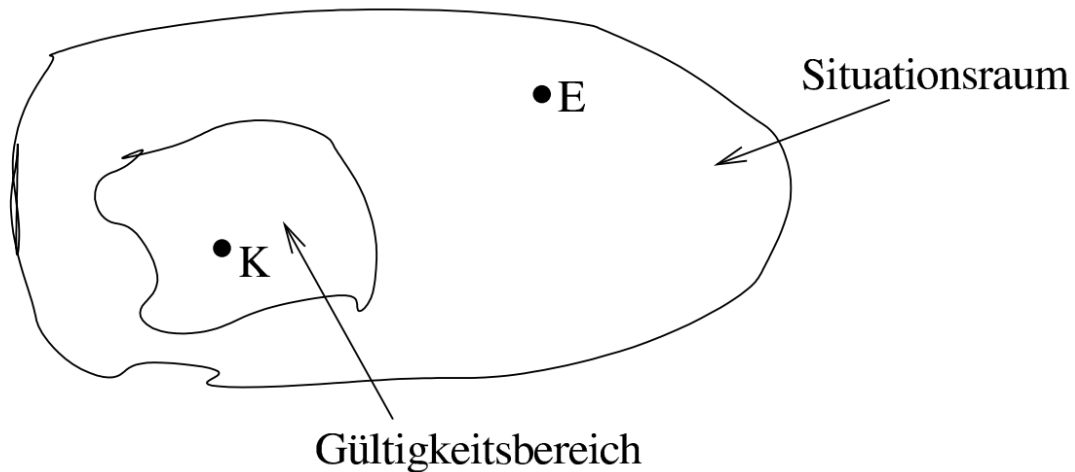


Abbildung 4.15: Situationsraum mit Kalibriersituation K innerhalb eines Gültigkeitsbereichs und Experimentalsituation E aus Buchholz [Buc19]

entweder positiv – dann hat man eine neue validierte Situation gefunden – oder negativ ausfallen. In beiden Fällen besteht der Erkenntnisgewinn aus neu gewonnenen Informationen über G . Eine Neukalibrierung des Modells, welche dazu führt, dass E in G läge, würde jedoch dazu führen, dass vorherige Informationen über G ihre Gültigkeit verlieren.

Allgemein kann die Aussage getroffen werden, dass das Modellverhalten bei komplexen Modellen prinzipiell unbekannt ist und Aussagen über Validität – basierend auf Verhalten in bekannten Situationen – in unbekannten Situationen schwierig zu treffen sind. Bei sehr ähnlichen Situationen ist es zwar wahrscheinlicher, dass sich ein Modell in unbekannten Situationen, die sich „nahe“ an validierten Situationen befinden, ebenfalls valide verhält – mit Sicherheit kann dies jedoch nicht angenommen werden. Somit steigt zwar das Vertrauen in ein Modell mit der Anzahl der validen Situationen, dies erhöht jedoch in ähnlichem Maße die Kosten. Ein Kompromiss zwischen Validierungsaufwand und Modellqualität sollte daher, basierend auf der Zielstellung der Modellierung, gefunden werden.

Validierung sollte daher als ein Prozess betrachtet werden, der dazu dient einerseits das Modellvertrauen des (späteren) Benutzers zu erhöhen, zusätzlich jedoch auch während der Modellierung Fehler aufzudecken. Balci [Bal97] beschreibt drei Fehlertypen, die bei der Modellierung auftreten können und unbedingt zu vermeiden sind:

- Typ-I-Fehler treten auf, wenn die Simulationsergebnisse als unbefriedigend interpretiert werden, obwohl diese durchaus glaubwürdig sind („Risiko des Modellierers“).
- Typ-II-Fehler beschreiben den gegenteiligen Effekt – die Akzeptanz von objektiv unglaublichen Simulationsergebnissen („Risiko des Anwenders“ bzw. „one run looks ok, so the model is correct syndrome“).

- Typ-III- Fehler hingegen sind bei Modellen zu finden, die „zweckentfremdet“ eingesetzt werden und deren Ergebnisse somit nicht zu gebrauchen sind.

Sind die Folgen eines Typ-I-Fehlers noch überschaubar (im schlimmsten Fall erhöhen sich die Entwicklungskosten des Modells), so können Typ-II- und Typ-III-Fehler dramatische Konsequenzen nach sich ziehen.

Aus den bisher zusammengefassten theoretischen Betrachtungen zum Thema Modellvalidierung lassen sich einige Fragen bezüglich des in dieser Arbeit vorgestellten Modells menschlicher Fahrhandlungen ableiten, auf die folgend eingegangen wird.

- 1) Validierung und Menschähnlichkeit: Welche Aussagen können allgemein über die Validierung von menschähnlichen Fahrermodellen (auch in Zusammenhang mit ihrer Menschähnlichkeitsstufe) getroffen werden?
- 2) Validierung und Kalibrierung des Modells: Wie und mittels welcher Methodik kann das vorgestellte Modell validiert werden? Wie und für welche Fahrer(-typen) kann das vorgestellte Modell kalibriert werden?
- 3) Schlussfolgerungen: Welche Aussagen können mit Hilfe des Modells nach einer Validierung bzw. ohne Validierung getroffen werden und welche nicht?

4.2.1 Validierung und Menschähnlichkeit

Bevor auf die Frage eingegangen wird, ob und wie sich das vorgestellte Fahrermodell validieren lässt, können einige allgemeine Aussagen über die unterschiedlichen Möglichkeiten der Validierung eines Fahrermodells abhängig von seiner Menschähnlichkeitsstufe getroffen werden. So könnte ein Typ-I-Modell anhand aufgezeichneter Fahrzeugdaten (Position, Ausrichtung, Geschwindigkeit, Beschleunigung usw.) validiert werden. D. h. es müssten Datensätze von Realfahrern aufgezeichnet werden und mit den Simulationsergebnissen des Fahrermodells verglichen werden. Die Aufzeichnung dieser Daten ist heutzutage problemlos möglich (z. B. mittels hochgenauem GPS). Für ein Typ-II-Modell müssten die Fahreroutputs (Lenkrad/Pedalerie) ein bestimmtes Ähnlichkeitsmaß erfüllen. Die Aufzeichnung der entsprechenden Signale ist technisch ebenfalls möglich. Bei Typ-III-Modellen wäre der Nachweis bestimmter kognitiver Konstrukte in der Gedankenwelt des Fahrers für eine Validierung des Modells nötig – dies erscheint sowohl mit dem heutigen Stand der Forschung als auch zukünftig kaum realisierbar. Zwar können mittels EEG einfache Aktivierungsaktivitäten in bestimmten Hirnarealen, die beispielsweise eine gewünschte Richtung betreffen, erkannt werden. Eine weitere Verfeinerung solcher Verfahren hin zur Erfassung von Intentionen bzw. Gedanken erscheint jedoch sowohl physisch unmöglich, als auch ethisch nicht vertretbar. Somit kann eine rein datengetriebene Validierung für Typ-III-Modelle ausgeschlossen werden.

Weiterhin kann die Aussage getroffen werden, dass eine „Abwärtsvalidität“ verlangt werden kann, d. h. dass ein Typ-III-Modell sowohl Typ-II- als auch Typ-I-valide sein und ein Typ-II-

Modell dementsprechend alle Bedingungen für Typ-I-Validität erfüllen muss. Für eine mögliche Validierung des vorgestellten Fahrermodells gilt daher, dass zum einen Typ-I-Validität nachgewiesen werden muss, was in diesem Fall bedeutet, dass sich das modellierte Fahrzeugverhalten im Straßenverkehr so oder so ähnlich beobachten lassen muss. Eine Typ-II-Validität hingegen ist für das vorgestellte Modell unerheblich, da sich dieses nicht konkret mit menschlichen Fahrhandlungen beschäftigt, sondern mit deren kognitiven Ursachen. Diese könnten validiert werden, falls sich psychologisch nachweisen ließe, dass Konzepte wie Längs- und Querhomöostase während des Führens eines Fahrzeugs vorhanden sind – dann wäre Typ-III-Validität für dieses Modell erreichbar.

4.2.2 Validierung und Kalibrierung des Fahrermodells

Zunächst muss definiert werden, was „Validierung“ im Kontext des vorgestellten Modells bedeutet: Sie soll hier als Prozess verstanden werden, der Aufschluss geben soll, inwiefern eine realitätsnahe Abbildung bestimmter zu modellierender Eigenschaften erfolgreich durchgeführt wurde. D. h. die Aussage, dass es sich um ein „valides“ Modell handelt, bedeutet, dass das Modell nachvollziehbare Ausgaben generiert, welche so oder so ähnlich auch von einem menschlichen Fahrer hätten produziert werden können. Das impliziert, dass sich das Modell gerade *nicht* im Popper’schen Sinne als wissenschaftliche Theorie versteht und somit nicht für die mit einer gegebenen Sicherheit vorhandenen Vorhersage von menschlichem Verhalten in unbekannten Situationen verwendet werden kann. Vielmehr soll das Modell einen bestimmten, definierten Situationsraum abdecken – die Validität des Modells (hier interpretiert als Größe des Gültigkeitsbereichs) stellt sich somit proportional zur Anzahl von erfolgreich kalibrierten Situationen dar.

Neben der Validierung mittels Kalibrierung von Situationen können weitere Argumente für eine Modellvalidität angeführt werden: So stützt sich das Modell der Längs- und Querhomöostase auf bekannte Konzepte aus der Literatur (vgl. Abschnitt 4.1), womit ebenfalls eine konzeptuelle Validität angenommen werden kann. Da eine Implementierung bisher nicht vollständig stattgefunden hat, stehen sowohl Verifikation der Implementierung als auch der Vergleich mit Experimentaldaten aus.

Eine Kalibrierung des Modells, um dieses an einen bestimmten Fahrer bzw. Fahrertyp anzupassen, könnte mit Hilfe der Modellparameter vorgenommen werden. Diese bestehen aus dem Tupel $[S_i, S_e]$ mit $S_e = [G_{min}, S, G_{max}]$ und $S_i = [G_{min}, H_{min}, H_{max}, G_{max}]$ ⁵ und beschreiben die Situations- und Handlungsgrenzen des Fahrers. Für eine solche Kalibrierung müssten Daten von real existierenden Fahrern vorhanden sein, d. h. zunächst müsste eine Untersuchung durchgeführt werden, um das Vorhandensein dieser internen Grenzwerte belegen zu können. Des Weiteren müssten diese Werte ermittelt und bei entsprechender Verfügbarkeit geclustert werden, um Gemeinsam-

⁵Identische Parameterbezeichnungen für die einzelnen Handlungsgrenzen bezeichnen unterschiedliche Parameter für S_i und S_e .

keiten für bestimmte Fahrertypen herausarbeiten zu können. Die Probleme sind offensichtlich: Zum einen erscheint eine solche Untersuchung aufwändig, vor allem jedoch stellt sich die Frage, ob bzw. wie solch interne Verhaltensparameter erfasst werden können, da eine Verbalisierung dieser teilweise während subbewusster Fahrzustände stattzufinden hat. Schlussendlich ist nicht klar, ob die postulierten Parameter existieren bzw. „ausgelesen“ werden können. Ist das gesamte Modell daher zu verwerfen? Diese Frage kann ebenfalls nur abhängig vom Anwendungskontext beantwortet werden: Wenn das Modell „menschähnliches“ Fahrverhalten erzeugt, dann hat es eine Daseinsberechtigung auch ohne wissenschaftliche Validierung, im besten Fall kann es für eine Vielzahl von Situationen und Fahrertypen kalibriert werden und somit für die Simulation menschähnlichen Verhaltens verwendet werden.

Abschließend soll noch einmal auf den Unterschied zwischen „formalen“⁶ und „nichtformalen“ Modellen und den Zusammenhang zur Validierbarkeit eines Modells eingegangen werden: Jürgensohn [Jür01] unterscheidet die zwei Modelltypen u. a. bezüglich ihrer Validierbarkeit: Formale Modelle sind validierbar bzw. überprüfbar, nichtformale jedoch höchstens „einschätzbar“. Das hier vorgestellte Modell kann insgesamt als „formal“ bezeichnet werden, da mathematische Abhängigkeiten formuliert wurden und dementsprechend eine Simulation durchführbar ist. Dennoch existieren nichtformale Komponenten (z. B. Situations- oder Handlungsgrenzen), deren Modellierung und Parametrierung zuvorderst auf den Vorstellungen des Modellierers basieren. Da diese Komponenten eben *nicht* auf objektiv validierbaren Parametern, sondern auf vom Modellierer angenommenen motivationalen und emotionalen Zuständen fußen, ist eine Validierung dieser Komponenten zumindest problematisch, wenn nicht unmöglich bzw. nach Jürgensohn „reine Spekulation“. Somit kann ein solches Modell nicht valide im Sinne der korrekten Abbildung der Realität sein, sondern nur im Sinne der Erfüllung des Modellauftrags – eine solche Validierung steht noch aus.

⁶Ein formales Modell ist im Gegensatz zu einem nichtformalen Modell berechenbar, wohingegen in letzteren eher vage Zusammenhänge vorkommen (z. B. in deskriptiven Modellen).

5 Rahmenmodell für die Erzeugung parametrierbarer menschähnlicher Fahrermodelle

„Das beste Modell für eine Katze ist eine Katze. Möglichst dieselbe Katze.“

Norbert Wiener

Basierend auf den Grundlagen der menschlichen Informationsverarbeitung (Kapitel 3), den Gedanken zu Menschähnlichkeit bzw. einem Konzept der Modellierung menschähnlichen Fahrverhaltens (Kapitel 4) wird folgend die Entwicklung eines Rahmenmodells für menschähnliche Fahrermodelle für unterschiedliche Einsatzgebiete beschrieben. Mit dem Wissen, dass – wie es vielfach von Entwicklerseite gewünscht wird – die Entwicklung *eines* allgemeingültigen Fahrermodells, welches alle denkbaren Thematiken abdeckt, praktisch unmöglich ist, wurde ein Konzept entwickelt, welches es ermöglicht, spezifische, auf einen bestimmten Anwendungszweck hin optimierte, aus dem Rahmenmodell abgeleitete Fahrermodellinstanzen zu erzeugen. Kern des Rahmenmodells ist eine Struktur, die die Nachbildung typischer, anwendungsgetriebener Funktionalitäten menschlichen Verhaltens im Auto erlaubt. Die Rahmenstruktur ermöglicht das Einbinden von Modulen, die jeweils eine Teilfunktionalität abbilden. Beispielhaft können Module, die die Querregelaufgabe lösen, die Reaktionen auf Verkehr im Kreuzungsbereich oder das Bremsverhalten vor Ampeln bei Vorhandensein von Fahrzeugen voraus nachbilden, angeführt werden. Dabei werden die Module nur dann in die Simulation eingebunden, wenn es die Aufgabenstellung verlangt. In vielen Anwendungen (z. B. zur Abbildung von individuellem Fremdverkehr in der Simulation) wird von dem Fahrermodell nur eingeschränkt variables oder intelligentes Verhalten verlangt. Dementsprechend kann das Verhalten des Modells von menschähnlich-variabel bis hin zu deterministisch-technisch konfiguriert werden.

Folgende vier Designziele sind maßgeblich für die Entwicklung des Fahrerrahmenmodells:

- 1) Das Rahmenmodell soll die Entwicklung von dynamischen Modellen des menschlichen Verhaltens als Führer eines Automobils in prinzipiell beliebigen Verkehrssituationen erlauben.
- 2) Aus dem Rahmenmodell abgeleitete Fahrermodelle müssen sich leicht in dynamische Simulationsumgebungen (z. B. in Verbindung mit Fahrzeugmodellen oder Fahr simulatoren) integrieren lassen.

- 3) Die aus dem Rahmenmodell abgeleiteten Fahrermodelle müssen nach Vorgabe des Anwendungszwecks mit geringem Aufwand erweitert oder modifiziert werden können.
- 4) Die aus dem Rahmenmodell abgeleiteten Fahrermodelle dürfen aus modellökonomischen Gründen nicht mehr „können“, als die Simulationsaufgabe verlangt.

Aus der Anforderung 1) ergibt sich, dass das Rahmenmodell sowohl Längs- und Querregelung beinhalten muss, als auch Verhaltensstrukturen, die Entscheidungsprozesse im Verkehr abbilden können. In Verbindung mit Forderung 2) ergeben sich Implikationen an das Implementierungsmittel: Für die Implementierung des Rahmenmodells wird als Programmierungsumgebung *Simulink* sowie *Stateflow* gewählt, um Echtzeitanforderungen bzw. eine Integration in eine Hardware-in-the-Loop(HiL)-Simulation zu gewährleisten. Aus der Forderung 3) resultiert das im Rahmenmodell umgesetzte Baukastenprinzip. Teilfunktionalitäten der mit dem Rahmenmodell implementierten Fahrermodelle werden in Modulen realisiert. Für eine Weiterentwicklung werden je nach Maßgabe des Einsatzzweckes entweder bestehende Module angepasst oder neu erstellt. Auf diese Weise lassen sich nach Forderung 4) Fahrermodelle zusammenstellen, die unterschiedlich komplex sind und klar definierte Fähigkeiten zur Bewältigung spezifischer Aufgaben besitzen.

5.1 Aufbau und Struktur des Rahmenmodells

Ein Fahrermodell mit typisch menschlichem Verhalten muss in der Lage sein, die grundsätzlichen menschlichen und für die Fahraufgabe relevanten Verarbeitungs- und Handlungsprozesse abbilden zu können. Ein Fahrer nimmt seine Umwelt wahr, er erkennt Situationen und äußere Umstände, verarbeitet diese, wobei am Ende dieses Prozesses eine Entscheidung steht, welche zu einer Handlung führt. Diese prinzipielle Struktur ist im Modell durch die Hauptmodule *Wahrnehmen*, *Erkennen*, *Entscheiden* und *Handeln* abgebildet. Weiterhin beeinflussen Informationen aus den Modulen *Motivation/Emotion* und *Gedächtnis* die Prozesse innerhalb der Hauptmodule. Diese sind zunächst nur leere Hüllen, die allein durch ihre Struktur definiert sind. Im Prozess der konkreten Fahrermodellbildung werden innerhalb dieser Hauptmodule Teilmodule implementiert und eingebunden, die jeweils die Nachbildung einer bestimmten Fähigkeit realisieren, wobei diese Fähigkeiten so elementar wie möglich definiert werden. Letztendlich dient die Strukturierung vor allem der Übersichtlichkeit und Nachvollziehbarkeit des Informationsflusses – weder sollen bestimmte Bereiche des menschlichen Gehirns abgebildet werden, noch eine physische oder anders geartete Abgeschlossenheit der einzelnen Module impliziert werden. Des Weiteren beeinflussen unterschiedliche Einflussfaktoren die Ausführung der Fahraufgabe. Wie in Abschnitt 4.1.5 beschrieben, kann zwischen statischen und dynamischen Einflussfaktoren unterschieden werden. Diese Einflussfaktoren können als Parameter interpretiert werden, welche die Ausführung einer oder mehrerer Fähigkeiten beeinflussen. Mehrere Parameter können zeitgleich auf eine Fähigkeit wirken, technisch werden diese Parameter multiplikativ verknüpft.

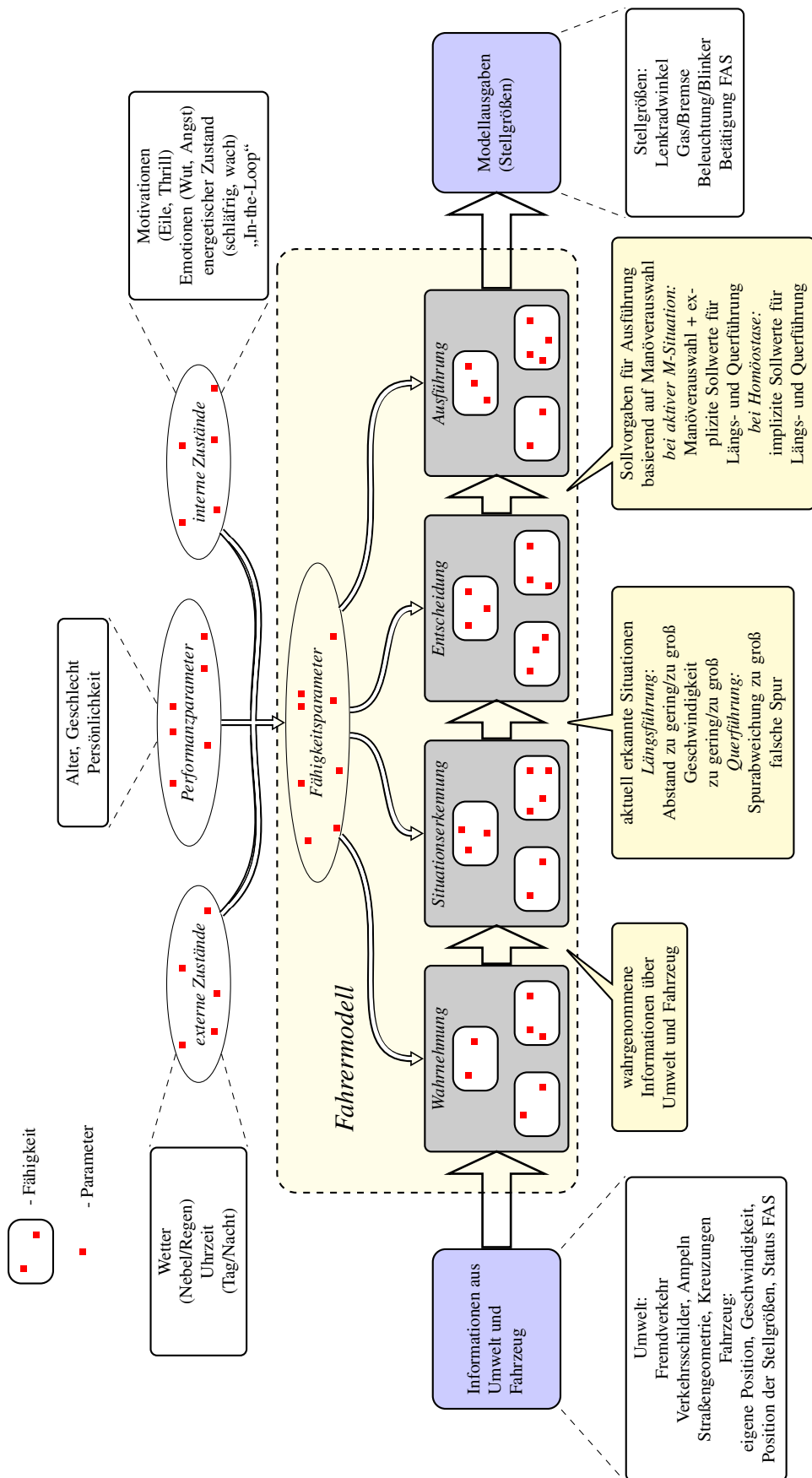


Abbildung 5.1: Struktur des Rahmenmodells: Der Kern des Fahrermodells beinhaltet die 4 Hauptmodule „Wahrnehmung“, „Situationserkennung“, „Entscheidung“ und „Ausführung“, die durch Fähigkeitsparameter beeinflusst werden (dargestellt durch die roten Punkte). Diese werden aus Leistungsparametern, externen sowie internen Zustandsparametern berechnet.

Fähigkeiten Im Kontext des Fahrermodells bezeichnet der Begriff „Fähigkeit“ die algorithmische Implementierung eines Vermögens zur Erfüllung einer spezifischen Aufgabe. Ein Fähigkeitsmodul besteht somit aus Eingabedaten, einer mathematischen Verknüpfung dieser sowie Ausgabedaten. Eine wichtige Rolle spielen *Fähigkeitsparameter*: Diese parametrieren bestimmte Aspekte des entsprechenden Fähigkeitsalgorithmus, um unterschiedliche Abstufungen der Ausführung der entsprechenden Fähigkeit abbilden zu können – Sinn und Zweck dieser Strukturierung ist die Abbildung unterschiedlichen menschlichen Verhaltens. Fähigkeiten existieren in jedem der beschriebenen Hauptmodule und bilden die Basisbausteine des Modells. In Abbildung 5.2 ist eine prototypische Fähigkeit dargestellt.

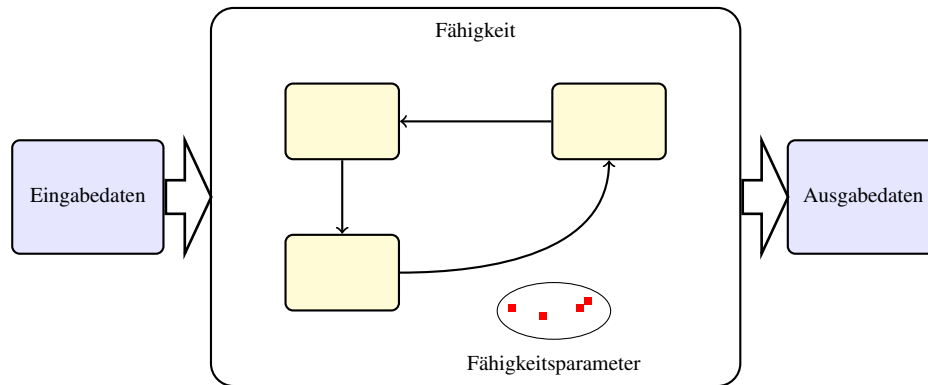


Abbildung 5.2: Struktur einer Fähigkeit: Zumeist sind Fähigkeiten als endliche Automaten implementiert, Fähigkeitsparameter beeinflussen die Ausführung der Fähigkeit.

Parameter und Zustände Die Durchführung einer Fähigkeit kann ausschließlich mittels der ihr zugeordneten Fähigkeitsparameter beeinflusst werden. Die Ausgaben eines Fähigkeitsmoduls hängen somit einerseits von der Algorithmusstruktur und andererseits von (zunächst) zeitinvarianten, reellwertigen Parametern, zusätzlich jedoch von zeitveränderlichen Zustandswerten ab. Durch Variation der Parameter können Unterschiede zwischen Individuen einer Fahrermodellspezies, mit Hilfe der Zustände können zeit- und situationsveränderliche Abhängigkeiten abgebildet werden. Folgende Zustandswerte bzw. Parameter finden im Modell Anwendung:

- 1) *Fähigkeitsparameter*: Fähigkeitsparameter P sind notwendig vorhandene bzw. vor einer Simulation festzulegende Parameter, die jeweils einer bestimmten Fähigkeit zugeordnet werden. Eine Fähigkeit, welche ohne Fähigkeitsparameter definiert wurde, kann ihr Verhalten nicht verändern. Bei der Konstruktion eines Fähigkeitsparameters ist daher schon die jeweilige Schnittstelle zur Fähigkeit zu berücksichtigen. Vereinfacht ausgedrückt beschreibt ein Fähigkeitsparameter *wie* die entsprechende Fähigkeit ausgeführt wird – er ist als ein Meta-Parameter zu betrachten, der durch andere Parameter bzw. Zustandswerte selbst parametrierbar ist, jedoch ebenfalls als einzelner Wert definiert werden kann. Eine Fähigkeit kann durch mehrere Fähigkeitsparameter beeinflusst werden.

- 2) *Performanzparameter*: Performanzparameter P_P beschreiben verhaltensbestimmende Parameter, die messbare physiologische oder psychologische Eigenschaften des menschlichen Fahrers umreißen. Beispiele sind „maximale Kraft beim Lenken“, „Sehschärfe“ oder „Konzentrationsvermögen“, aber auch „Fahrerfahrung“ oder „Alter“. Diese bestimmen ebenfalls das Verhalten des Fahrermodells, sind aber nicht nur einem Modul zugeordnet, sondern wirken modulübergreifend. Die Performanzparameter unterscheiden sich von den Fähigkeitsparametern insbesondere dadurch, dass sie wenig vom Kontext der Aufgabe abhängen und durch physiologische Messung oder psychologische Tests ermittelbar sind. Damit sind sie besonders gut geeignet, Fahrertypen zu definieren.
- 3) *Interne Zustände*: Interne Zustände P_I sind vom Fahrer selbst erzeugte bzw. als Reaktion auf bestimmte äußere Einflussfaktoren generierte zeitveränderliche Größen, die abhängig vom entsprechenden internen Zustand auf einen oder mehrere Fähigkeitsparameter wirken. Typisch menschliche Einflüsse wie Stress oder Müdigkeit, aber auch emotionale oder motivationale Zustände fallen in diese Kategorie.
- 4) *Externe Zustände*: Externe Zustände P_E bezeichnen durch den Fahrer nicht zu beeinflussende von außen einwirkende Einflüsse auf das Fahren. Im Gegensatz zu internen Zuständen sind diese für andere Verkehrsteilnehmer zu erkennen. Als Beispiele können Wetter, Tageszeit oder Fahrbahnbeschaffenheit angeführt werden.

Jeder auf eine Fähigkeit wirkende Fähigkeitsparameter P ergibt sich als mathematische Verknüpfung aus Performanzparametern P_P , interner und externer Zustände P_I und P_E . Die Anzahl der so verknüpften Parameter aus einer Parameterklasse ist nicht begrenzt, so können beispielsweise mehrere Motivationen gleichzeitig eine Fähigkeit beeinflussen. Ein Fähigkeitsparameter P wirkt konkret auf eine oder mehrere Variablen einer Fähigkeit. Daher ist aus Gründen der Übersichtlichkeit und der einfachen mathematischen Implementierung der Zahlenbereich von P als $P \in [-1; 1]$ definiert. So bewirkt ein Fähigkeitsparameter $P < 0$, dass eine parametrisierte Variable in die mathematisch kleinere Richtung beeinflusst wird, diese Beeinflussung erreicht ihr Maximum für $P = -1$. Analog dazu beschreibt $P = 1$ eine maximale Abweichung in die mathematisch größere Richtung. Für $P = 0$ wird die Fähigkeit nicht beeinflusst und zeigt somit Standardverhalten¹. Für einen Fähigkeitsparameter P , der aus N_P Performanzparametern P_P , N_I internen Zuständen P_I sowie N_E externen Zuständen P_E erzeugt wird, gilt dann:

$$P = \sum_{i=1}^{N_P} (P_{P_i}) + \sum_{i=1}^{N_I} (P_{I_i}) + \sum_{i=1}^{N_E} (P_{E_i}) \text{ mit } P_{min} = -1 \text{ und } P_{max} = 1$$

Für jeden Fähigkeitsparameter P existiert eine Funktion $f^P : [-1; 1] \mapsto \mathbb{R}$, die den Einfluss des Parameters auf die Fähigkeit mathematisch beschreibt. Diese Transformationsfunktion f^P muss vom Modellierer für jede Fähigkeit P definiert werden. Das Ergebnis dieser Funktion ist $\tilde{P}$

¹im Sinne von: vom Modellierer eingestelltes Verhalten ohne den Einfluss von Parametern

und beschreibt den die Fähigkeit parametrierenden Wert, der innerhalb der Fähigkeit mit dieser mathematisch verknüpft wird. Bestimmte Elemente eines Fähigkeitsparameters können sich während der Simulation ändern, diese Informationen über die Parameter entstammen entweder der Simulationsumgebung (z. B. Umweltbedingungen, Straßenbeschaffenheit usw.) oder müssen modellintern mitberechnet werden (vgl. Abschnitt 5.6).

Neben der Festlegung eines Parameters auf einen (mehr oder weniger willkürlich gewählten) Wert kann dieser auch als Zufallsvariable definiert werden, um bei einer größeren Fahrermodellpopulation oder Wiederholungen eine variable Komponente zu beinhalten. In diesem Fall wird ein Parameter während der Simulation fortwährend mit einer festzulegenden Streuung modifiziert, so dass auch intraindividuelle Unterschiede bzw. nichtdeterministisches Verhalten modelliert werden können.

Beispiel Parameterkonzept Als Beispiel soll hier die beliebig ausgewählte Fähigkeit „Schätzen des Bremswegs“ dienen. Der Wert des aus der Faustformel $s = \frac{v^2}{100}$ geschätzten Bremswegs kann auf unterschiedliche Arten und Weisen vom Fahrer beeinflusst werden: Er könnte entweder das Ergebnis direkt verändern (hier: s), Variablen der Formel beeinflussen (hier: v) oder eine Kombination beider Beeinflussungsmöglichkeiten bilden. In diesem Fall soll angenommen werden, dass das Ergebnis der Schätzung zwischen 0.5 s und 1.5 s liegen soll. Dies bedeutet für die Transformationsfunktion: $f^P : [-1; 1] \mapsto [0.5; 1.5]$, beispielsweise $f^P(P) = \frac{P}{2} + 1$. Ein externer Zustandsparameter für „besonders guten Grip“ könnte so definiert werden: $P_{Grip}^E = -0.2$. Zusätzlich kann eine Motivation vorhanden sein, die den Fahrer ein höheres Risiko eingehen lässt (z. B. „Eile“) und die dazu führt, dass sich der akzeptierte Bremsweg aufgrund eines „Risikoaufschlags“ verringert: $P_{Eile}^I = -0.4$. Die Summe aller Teilparameter ergibt für dieses Beispiel $P = -0.6$, somit ergibt sich für $\tilde{P}$ ein Wert von 0.7. Ein „eiliger“ Fahrer auf einer „griffigen“ Fahrbahn würde einen um 10% höheren Bremsweg akzeptieren, als ein Durchschnittsfahrer auf normaler Fahrbahn². In Abbildung 5.3 ist dies grafisch dargestellt: Links ist die Transferfunktion f^P abgebildet, rechts die unparametrierte Fähigkeit (rot) sowie die mit dem Fähigkeitsparameter $P = -0.6$ parametrierte Fähigkeit (blau).

5.2 Wahrnehmung

Die möglichst realitätsnahe Modellierung der Informationen, welche ein Fahrer zum Führen eines Fahrzeugs benötigt, stellt eine notwendige Bedingung für eine akkurate Nachbildung menschlichen Fahrverhaltens dar. Hierbei muss jedoch beachtet werden, dass sich die „Wirklichkeiten“ unterschiedlicher Menschen unterscheiden, es existiert kein gemeinsames, objektives Wissen um die objektive Realität. Jeder Fahrer kann sich mittels der ihm zu Verfügung stehenden Sensorik seine eigene Rekonstruktion der Welt sowie seine eigenen mentalen Modelle der wahr-

²Die verwendeten Werte sind fiktiv und dienen ausschließlich zur Veranschaulichung des Parameterkonzepts

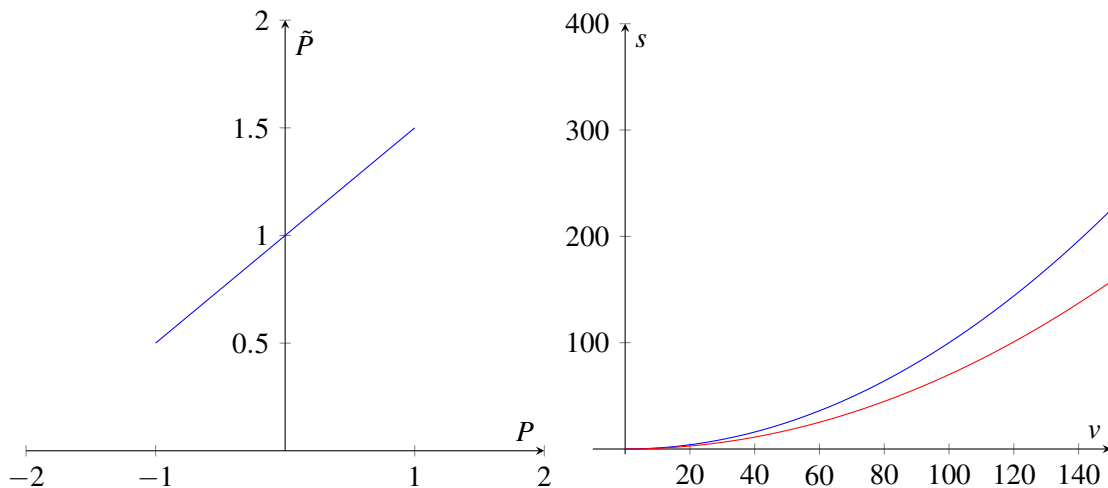


Abbildung 5.3: Parametereinfluss anhand der Beispielfähigkeit „Schätzen des Bremswegs“. Links: Transferfunktion f^P , rechts: unparametrisierte Fähigkeit (rot) sowie mit $P = -0,6$ parametrisierte Fähigkeit (blau).

genommenen Objekte und Situationen erzeugen. Konkret bedeutet dies für die Modellierung, dass je nach Anwendungszweck eine entsprechend gewählte Granularität der Modellierung des Wahrnehmungsapparats des Menschen implementiert werden muss. Die Teilmodule des Hauptmoduls „Wahrnehmung“ können in „Informationen aus der Umwelt“ und „Informationen aus dem eigenen Fahrzeug“ untergliedert werden. Die Blätter des in Abbildung 5.4 dargestellten „Fähigkeitenbaums“ stellen jeweils eine eigene zu implementierende Fähigkeit dar.

Die mittels Wahrnehmungsfähigkeiten aufgenommenen Informationen dienen nun als Grundlage für die Erkennung von bestimmten Situationen und Zuständen auf deren Basis der Fahrer Entscheidungen trifft, um bestimmte Handlungen auszuführen.

Eine Wahrnehmungsfähigkeit, ohne die ein Fahrermodell im Allgemeinen nicht auskommt, ist die Fähigkeit „Geschwindigkeitswahrnehmung“. Für die Umsetzung der Regelung der Fahrgeschwindigkeit ist es für ein Fahrermodell (wie auch für den Menschen) unerlässlich, die eigene momentane Geschwindigkeit mit einer von dem Kontext abhängenden Genauigkeit zu kennen. Für viele Anwendungsfälle von Fahrermodellen genügt es anzunehmen, dass das Modell die Geschwindigkeit exakt kennt. Die Fähigkeit „Geschwindigkeitswahrnehmung“ besteht in diesem Fall nur aus einer Signalleitung aus dem Fahrzeugmodell. Wenn es aber darum geht, beispielsweise typisch menschliche Regelvorgänge bei der Fahrgeschwindigkeit abzubilden, die sich aus Spezifika des Wahrnehmungsapparates ergeben, muss der Vorgang des Schätzens von Geschwindigkeiten differenzierter nachgebildet werden. Ein weiteres Beispiel, bei dem ebenfalls eine umfangreicher ausgearbeitete Fähigkeit der Geschwindigkeitswahrnehmung benötigt wird, ist die Fahrerassistenzsystementwicklung. Wenn das FAS für seine Bedienung eine entsprechende Blickzuwendung benötigt, kann ein Fahrer in der Zeit weder die Geschwindigkeit durch Ablesen des Tachos noch durch Ableiten aus dem optischen Fluss oder perspektivischen Größenänderungen gewinnen.

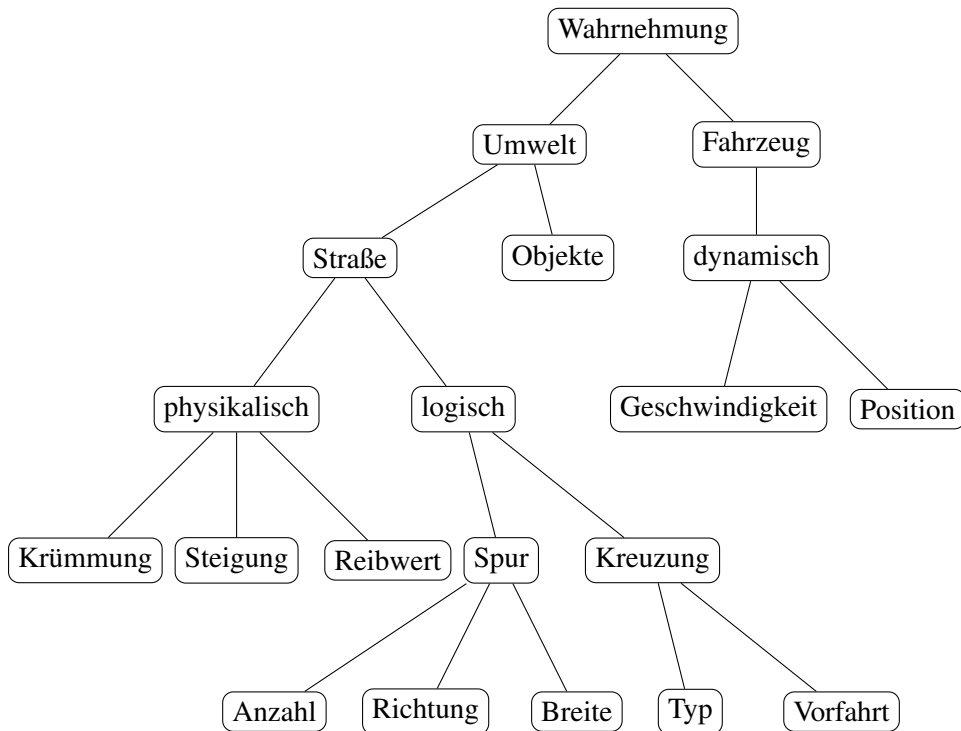


Abbildung 5.4: Exemplarische Struktur der Fähigkeiten des Hauptmoduls „Wahrnehmung“

Um dies im Modell abbilden zu können, müssen die Mechanismen von Blickzuwendungszeiten, Blickressourcenallokation und Ablesezeiten realisiert sein. Die Detailtiefe und Genauigkeit in der Realisierung hängt wiederum sehr stark von den Anforderungen der Gesamtaufgabenstellung ab. Allein für die Teilfunktionalität der Blickressourcenallokation gibt es aus der Grundlagenforschung sehr detaillierte Modelle, die in der Regel wesentlich spezifischer sind, als für die Mehrzahl der Anwendungen benötigt. In Abbildung 5.5 ist ein Beispiel des Ablaufschemas einer Fähigkeit zur Geschwindigkeitswahrnehmung abgebildet.

5.3 Situationserkennung

Die aus der Wahrnehmung aufgenommenen Informationen dienen dem Fahrer dazu, sich ein Bild der aktuellen Situation zu verschaffen. An dieser Stelle muss jedoch noch einmal auf den Situationsbegriff eingegangen werden. Im Abschnitt 3.5.1 wurde eine *M-Situation* als ein manöverauslösender Zustand definiert – im Gegensatz zur umgangssprachlichen Deutung des Wortes „Situation“ für die Gesamtheit der aufgenommenen und interpretierten Informationen des Fahrers. Das Hauptmodul „Situationserkennung“ fungiert nun gewissermaßen als aggregierendes und interpretierendes Element, dessen Hauptaufgabe darin besteht, bestimmten Konglomeraten von Informationen eine neue Bedeutung zuzuweisen. Hier werden alle implementierten M-Situationen auf Aktivierung geprüft und die entsprechenden Informationen an das Entscheidungsmodul weitergeleitet. Dementsprechend kann eine Vielzahl unterschiedlicher

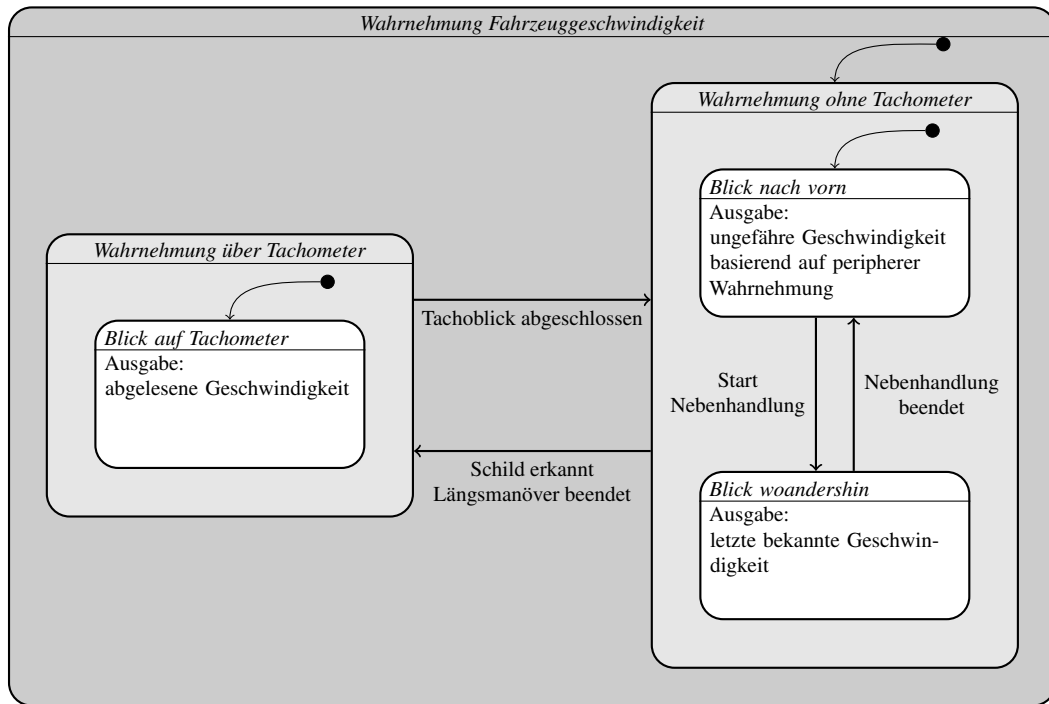


Abbildung 5.5: Vereinfachte Statechart-Darstellung der Wahrnehmungsfähigkeit „Geschwindigkeitswahrnehmung“

M-Situationen gleichzeitig aktiv sein, jedoch können nicht alle gleichzeitig (durch ein Manöver) aufgelöst werden. Der Umgang mit mehreren aktiven M-Situationen wird im Modul „Entscheidung“ beschrieben. Aus der Kenntnis, in welcher M-Situation (bzw. in welchem Manöver) sich der Fahrer gerade befindet sowie basierend auf den aktuellen Wahrnehmungsinformationen und denen aus dem Arbeitsgedächtnis kann der Fahrer sich in einer oder mehreren M-Situationen verorten. Anders formuliert ist eine M-Situation immer dann aktiv, wenn ein bestimmter Sollwert eine bestimmte Differenz vom zugeordneten Istwert überschreitet.

Als Beispiel für eine Situationsfähigkeit dient die in Abbildung 5.6 dargestellte M-Situation „Erkennung zu hoher Eigengeschwindigkeit“. Der zur M-Situation gehörende Sollwert V_{Soll} entspricht der wahrgenommenen Geschwindigkeitsbegrenzung $V_{Erlaubt}$, die – multipliziert mit dem Fähigkeitsparameter $F_{V_{Soll}}$ – die für den Fahrer geltende Zielgeschwindigkeit darstellt. Bei einer positiven Geschwindigkeitsdifferenz V_{Diff} aus aktuell wahrgenommener Geschwindigkeit V_{Ego} und einer Grenzgeschwindigkeit V_{Grenz} wird die M-Situation „Geschwindigkeitsreduzierung wegen Geschwindigkeitsbegrenzung“ aktiviert. Die Grenzgeschwindigkeit V_{Grenz} beschreibt hierbei jene Geschwindigkeit, die der Fahrer bei einer bestimmten aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit noch akzeptiert, ohne eine Handlung zur Geschwindigkeitsbegrenzung durchzuführen. V_{Grenz} wird als abhängig von der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit sowie vom Fähigkeitsparameter $F_{V_{Grenz}}$ angenommen. Wenn nun $V_{diff} > 0$, so ist die Bedingung für die Aktivierung der gleichnamigen M-Situation erfüllt. Dies bedeutet jedoch mitnichten, dass der Fahrer unweiger-

lich ein Manöver initiiert, um diese M-Situation aufzulösen. Vielmehr stellt die beschriebene Kondition lediglich eine notwendige Bedingung für ein geschwindigkeitsveränderndes Manöver dar. Dementsprechend wird der Fahrmodus *Homöostase* bereits aufgrund des Vorhandenseins einer als „aktiv“ beurteilten M-Situation verlassen.

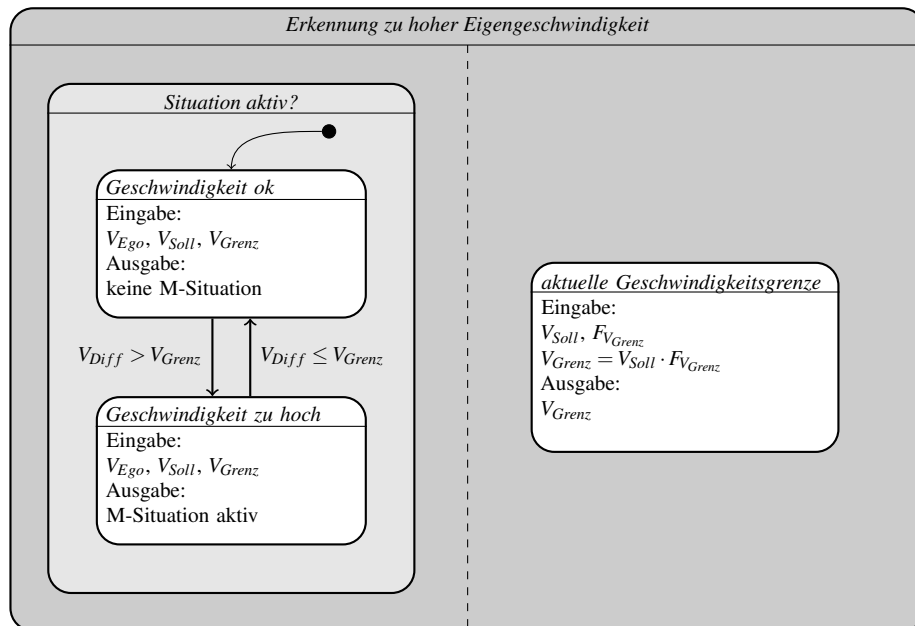


Abbildung 5.6: Vereinfachte Statechart-Darstellung der Situationsfähigkeit „Erkennung zu hoher Eigengeschwindigkeit“

5.4 Entscheidung

Die Aufgabe des Entscheidungsmoduls besteht zum einen darin, festzulegen, ob ein oder mehrere Manöver eingeleitet werden und zum anderen darin, Vorgaben für auszuführende Handlungen zu generieren. Ein Manöver bezeichnet in diesem Kontext eine Handlung, deren Ziel darin besteht, eine M-Situation aufzulösen. Ein Manöver kann somit einer oder mehreren M-Situationen zugeordnet werden, ebenso können mehrere M-Situationen durch ein einziges Manöver aufgelöst werden (n:n-Beziehung). Als Beispiel dient die bereits erwähnte M-Situation „Erkennung zu hoher Eigengeschwindigkeit“. Dieser M-Situation sind die Manöver „Geschwindigkeitsreduzierung durch Bremsen“ sowie „Geschwindigkeitsreduzierung durch Gaswegnehmen“ zugeordnet (weitere sind denkbar). Das Manöver „Geschwindigkeitsreduzierung durch Bremsen“ ist ebenso weiteren M-Situationen, beispielsweise „Time-To-Collision zum vorausfahrenden Fahrzeug zu gering“ oder „Anhalten wegen Stoppschild“ zugeordnet. Im Entscheidungsmodul wird also a) festgelegt, *welche* M-Situationen aufgelöst werden und b) *wie* dies geschieht. Ein Manöver muss nicht explizit ein Fahrmanöver sein, auch das Einschalten des Abblendlichts, die Wahl eines Radiosenders oder weitere fahrfremde Tätigkeiten können unter dem Manöverbegriff

subsumiert werden. Fahrmanöver sind jedoch elementar für ein Fahrermodell und besitzen daher einen höheren Stellenwert in der Implementierung. Allgemein gilt, dass nur je ein Fahrmanöver für Längs- und Querdynamik gleichzeitig aktiv sein kann. Ein Priorisierungsmodul überwacht, welche M-Situationen aktiv sind und bestimmt bei mehreren gleichzeitig aktiven M-Situationen anhand der ihr zugewiesenen Prioritätsklasse, welche M-Situation mittels eines Manövers zuerst aufgelöst werden soll. Dies geschieht zumeist parallel für Längs- und Querdynamikmanöver, bestimmte Manöver benötigen jedoch die gleichzeitige Kontrolle über Längs- und Querdynamik (z. B. Überholmanöver), so dass in diesen Fällen nur dieses eine Manöver gefahren werden kann. Falls aktuell kein Manöver aktiv ist, so werden Vorgaben für die Homöostasefahrt generiert. Die Ausgaben des Entscheidungsmoduls bestehen dementsprechend aus Sollvorgaben für Längs- und Querregelung des Fahrzeugs sowie für eventuell zu verwendende Fahrerassistenzsysteme.

In Abbildung 5.7 ist dies schematisch für eine beliebige Manöverfähigkeit dargestellt: Solange keine M-Situation erkannt wurde, befindet sich der Fahrer im Fahrmodus Homöostase. Falls nun im Modul „Situationserkennung“ eine M-Situation erkannt wird und keine weiteren M-Situationen aktiv sind, wird ein passendes Manöver ausgewählt (vgl. Abbildung 5.8) und ausgeführt. Während der Ausführung dieses Manövers wird regelmäßig überprüft, ob eventuell M-Situationen mit höherer Priorität erkannt wurden. Wenn dies der Fall ist, wird das Manöver abgebrochen und ein höher priorisiertes Manöver gestartet (ein Beispiel ist ein Notbremsmanöver, welches eine höhere Priorität besitzt als ein Beschleunigungsmanöver zum schnellen Erreichen einer gewünschten Sollgeschwindigkeit). Falls nach dem Abschluss eines Manövers keine aktive M-Situation erkannt wird, wechselt der Fahrer zurück in den Homöostase-Modus.

In Abbildung 5.8 wird mittels eines Statechart-Diagramms dargestellt, wie die Manöverauswahl bei einer aktiven M-Situation (hier: „Erkennung zu hoher Eigengeschwindigkeit“) erfolgt: In diesem Fall soll die Eigengeschwindigkeit reduziert werden, was mittels der Manöverfähigkeit „Geschwindigkeitsreduzierung“ erreicht werden kann. Als Fähigkeitsparameter kann hier die gewünschte Verzögerung $F_{aWunsch}$ die Durchführung des Manövers beeinflussen. Bei einer sehr hohen gewünschten Verzögerung (z. B. bei einem Notbremsmanöver) wird die Geschwindigkeitsreduzierung mittels Bremspedalregelung als Default-Methode gewählt, bei einer vergleichsweise geringen gewünschten Verzögerung wird zunächst Gas weggenommen, falls dies jedoch nicht dazu führt, die gewünschte Verzögerung zu erreichen, wird im Bremsmodus operiert. Falls ein Manöver ohne Bremsbetätigung geplant ist („kleine“ Verzögerung), so erzeugt die Manöverfähigkeit so lange Sollvorgaben für das Gaspedal, bis die Differenz aus Soll- und Istwert der aktuellen Verzögerung eine maximale akzeptierte Differenz δ übersteigt. Falls dies der Fall ist, wird in den Bremspedalmodus gewechselt und dementsprechend eine Sollvorgabe für das Bremspedal generiert.

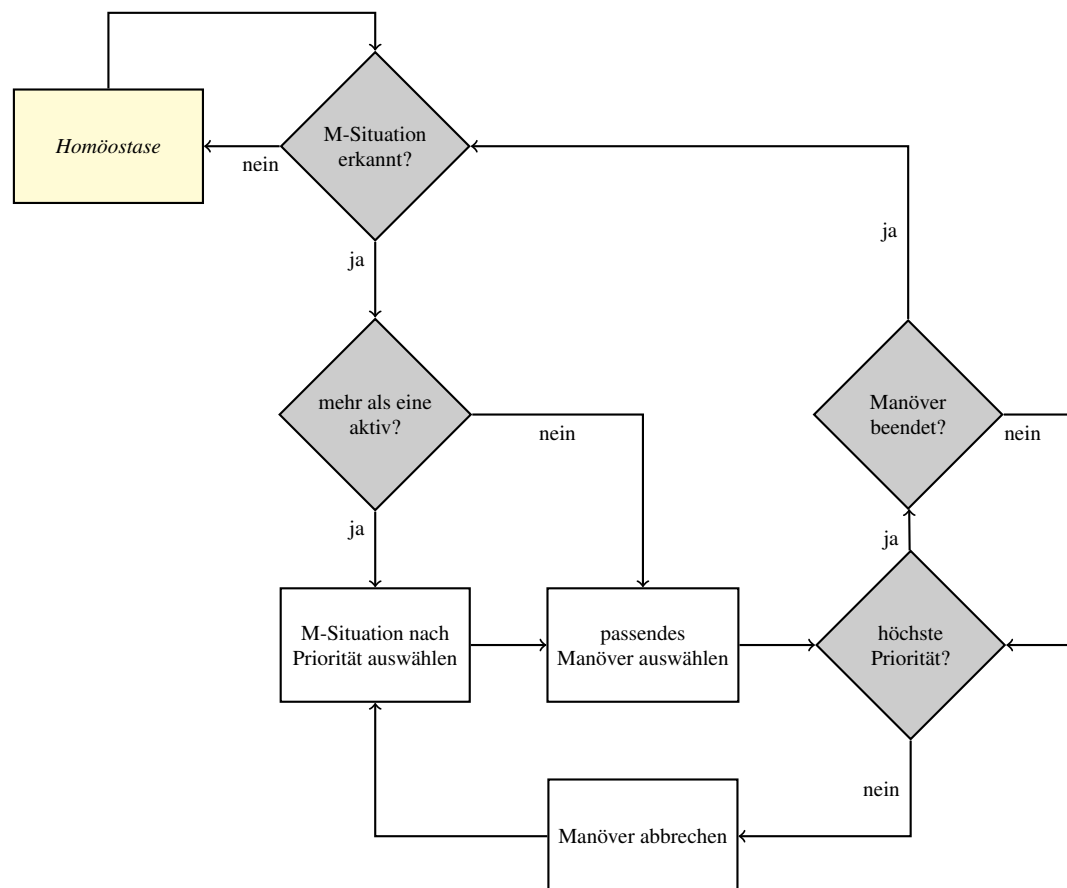


Abbildung 5.7: Schema Entscheidungsmodul: Bei Vorhandensein einer oder mehrerer M-Situationen wird das zugehörige Manöver ausgewählt

5.5 Ausführung

Das Ausführungsmodul beinhaltet die Regler, um die im Entscheidungsmodul generierten Sollvorgaben mittels den zur Verfügung stehenden Bedienelementen (diese sind abhängig vom verwendeten Fahrzeugmodell, bestehen jedoch zumeist aus Gas- und Bremspedal sowie Lenkrad) umzusetzen. Längs- und Querdynamik werden hierbei getrennt voneinander behandelt. Je nach gewünschter Menschähnlichkeit der Modellierung bzw. Anforderungen an die Hardware können unterschiedlich komplexe Regelungsalgorithmen verwendet werden. Besonderen Einfluss auf die Art und Weise der Umsetzung der Sollvorgaben haben die Performanzparameter, mit deren Hilfe physikalische Beschränkungen (z. B. maximale Lenkradgeschwindigkeit und -beschleunigung des Fahrers) abgebildet werden können. Beim Durchführen eines Manövers entstammen die Sollvorgaben aus der Entscheidungsebene aus den entsprechenden Manöverfähigkeiten. Falls keine M-Situation aktiv ist, befindet sich der Fahrer im Homöostasezustand, die Sollvorgaben kommen dann aus den Modulen „Längshomöostase“ und „Querhomöostase“, die parallel zur Entscheidungsebene angeordnet sind.

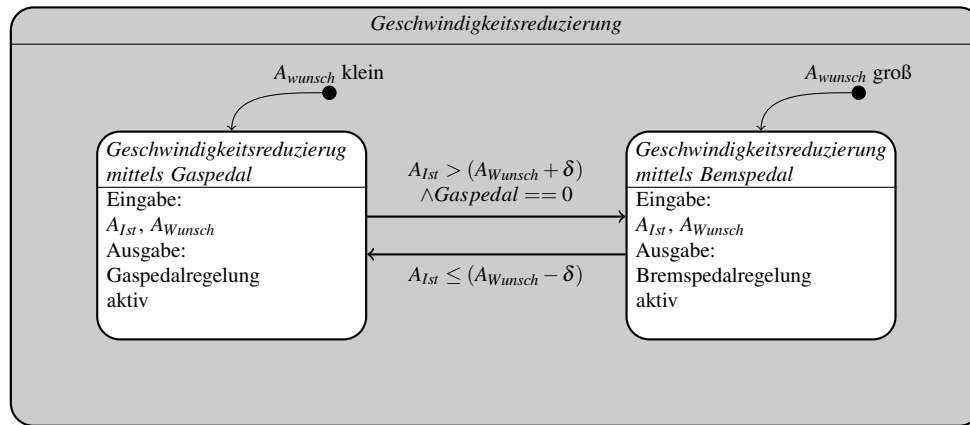


Abbildung 5.8: Vereinfachte Statechart-Darstellung der Manöverfähigkeit „Geschwindigkeitsreduzierung“

In Abbildung 5.9 ist beispielhaft die Ausführungsfähigkeit „Regelung der Fahrzeuggeschwindigkeit“ dargestellt: Solange kein aktives Manöver vorhanden ist, wird die Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs mittels Gaspedal im Modus der Längshomöostase geregelt. Falls ein Beschleunigungs- oder Bremsmanöver (oder ein kombiniertes Längs- und Quermanöver) aktiv ist, ändern sich der entsprechende Parametersatz der Ausführungsfähigkeit sowie der Sollwerttyp (vgl. Abschnitte 4.1.2 und 4.1.3). Befindet sich der Fahrer im Zustand der Längshomöostase, werden implizite Sollvorgaben für die Gaspedalregelung verwendet, während eines Längsmanövers sind die entsprechenden Sollvorgaben hingegen als explizite Sollwerte zu verstehen. Eine Geschwindigkeitsregelung mittels Bremspedal ist immer einem Manöver zur Geschwindigkeitsbegrenzung zugeordnet, da die Benutzung des Bremspedals im Normalfall (vorstellbar ist eine Geschwindigkeitsregelung in starkem Gefälle mittels Bremspedalregelung) nicht dem Homöostasefahren zugeordnet wird.

5.6 Motivations- und Emotionskomponenten

Zusätzlich zu den statischen Einflussgrößen (Fähigkeitsparameter, Performanzparameter) sowie variablen externen Einflussgrößen (externe Zustände) können sich gewisse Fähigkeitsparameter auch während der Fahrt ändern. Psychologisch betrachtet sind dafür Motivationen und Emotionen zuständig (vgl. Abschnitte 3.4.4 und 3.4.5). Im Modell ist dies folgendermaßen realisiert: Motivationen werden nicht aus sich heraus erzeugt, sondern haben eine außerhalb des reinen Fahrermodells liegende Ursache. Beispielsweise entsteht die Motivation „Eile“ aus einem gewissen Zeitdruck heraus, der zwar während der Fahrt entstehen kann, jedoch nur in Zusammenhang mit einem extern generierten Zielwert (z. B. einem Termin). Mittels Motivations-Aktions-Ketten (vgl. Abschnitt 4.1.5) können die Auswirkungen einer solchen Motivation auf das Modellverhalten beschrieben werden. Ähnliches gilt für Fahrverhalten, welches durch bestimmte Emotionen beeinflusst wird. Diese können jedoch – je nach Fahrertyp – durch die aktuelle Verkehrssituation

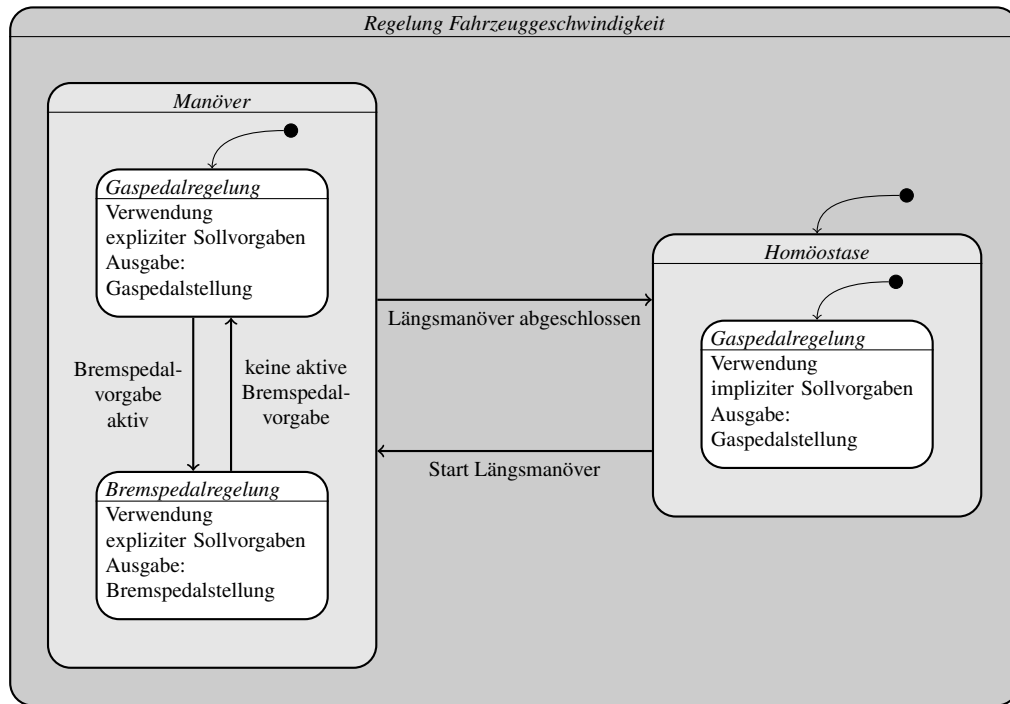


Abbildung 5.9: Vereinfachte Statechart-Darstellung der Ausführungsfähigkeit „Regelung der Fahrzeuggeschwindigkeit“

hervorgerufen, aber ebenfalls durch Motivationen beeinflusst werden. Beispielsweise kann eine aggressive Stimmung des Fahrers auftreten, wenn dieser a) einem aggressiveren Fahrertyp zugeordnet werden kann (also eine nicht durch kausale Ursachen nachvollziehbare höhere Grundaggressivität besitzt), b) durch bestimmte Motivationen die aggressionssteigernden Auslöser verändert werden, so dass diese früher eintreten oder c) eine Fahrsituation auftritt, die Potential für aggressionssteigerndes Verhalten bietet.

Da aggressives Fahrverhalten in vielen fahrerischen Ausprägungen einem „eiligen“ Fahrer ähnelt (größere Wunschgeschwindigkeit, geringere akzeptierte Abweichungen von dieser etc.), ist in Abbildung 5.10 als Beispiel für den Einfluss einer Emotion auf das Fahrverhalten ein entspannter emotionaler Zustand des Fahrers dargestellt: Eine modellierte Motivation bzw. Emotion besteht aus einem Parametersatz P_M bzw. P_E , in dem für jede zu beeinflussende Fähigkeit eine Vielzahl von Fähigkeitsparametern definiert werden muss. Für die Wahrnehmungsfähigkeit „Wahrnehmung der Fahrzeuggeschwindigkeit“ ist dies jeweils der Parameter $t_{\text{Nebenhandlung}}$, der die Zeit beeinflusst, in der sich der Fahrer stochastisch mit Nebenhandlungen beschäftigt. Hat es der Fahrer besonders eilig, ist er fokussierter auf die Fahraufgabe, fährt er entspannter, lässt er sich leichter ablenken. Für die Situationsfähigkeit „zu geringe Fahrzeuggeschwindigkeit“ kann der Parameter δ_v die Differenz aus Soll- und Istgeschwindigkeit beeinflussen, so dass bei aktiver Motivation „Eile“ auch kleinere Differenzen dazu führen, die M-Situation zu aktivieren. Analog dazu verhindert die Emotion „Entspannung“ dies durch ein größeres δ_v . Im Entscheidungsmodul

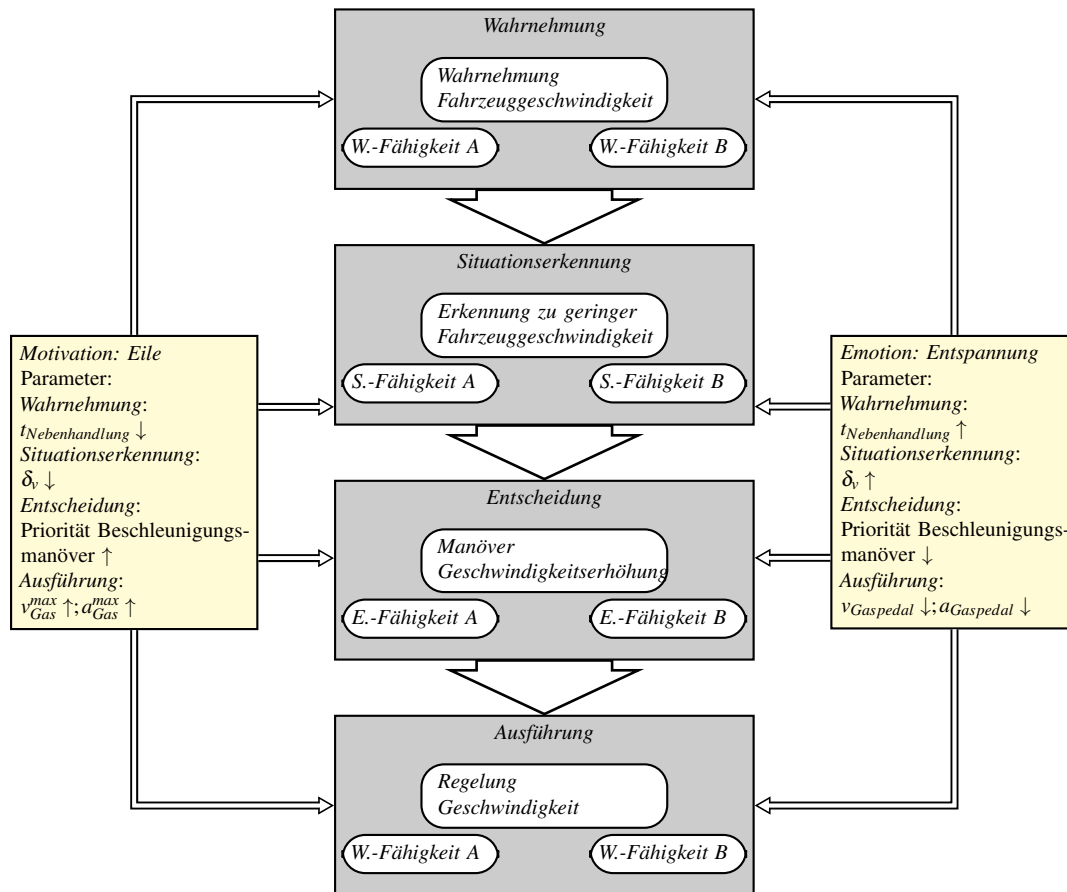


Abbildung 5.10: Beeinflussung des Fahrermodellverhaltens durch Motivationen/Emotionen anhand einer Motivations-(bzw. Emotions-)Aktions-Kette für die Längsführung durch die Motivation „Eile“ bzw. die Emotion „Entspannung“

können Emotionen/Motivationen ebenfalls die Priorität von Manövern für bestimmte Situationen verändern. Als Beispiel kann eine erkannte „gelbe“ Ampel dienen: Ein hoher „Eile“-Wert führt dazu, unter bestimmten Umständen ein Beschleunigungsmanöver durchzuführen, ein entspannter Fahrer würde in dieser Situation ein Bremsmanöver durchführen. Die abgebildete Ausführungsfähigkeit „Regelung der Geschwindigkeit“ wird ebenso beeinflusst: Maximale Gaspedalgeschwindigkeiten (v_{Gas}^{max}) und -beschleunigungen (a_{Gas}^{max}) erhöhen sich bei Eile, bei entspanntem Fahren werden diese verringert.

Mit Hilfe dieses Konzeptes können beliebige Motivationen bzw. Emotionen so implementiert werden, dass die Wirkung auf das Fahrverhalten sowohl nachvollziehbar als auch ersichtlich und – bei Vorhandensein entsprechender Daten – psychologisch valide ist. Möglichst heterogenes Fahrverhalten, welches nachvollziehbar und menschähnlich sein soll, ist ohne die Einflussnahme von Motivationen sowie Emotionen auf das Fahrverhalten kaum möglich.

5.7 Arbeitsgedächtnis

Ein weiterer Baustein, um menschliches (Fahr-)Verhalten realistisch beschreiben und somit simulieren zu können besteht aus der menschlichen Fähigkeit zur Abstraktion, zur Vereinfachung und Zusammenfassung bestimmter Wahrnehmungen zu einer einfachen und dem jeweiligen Kontext angepassten Information. Die Ergebnisse eines solchen Prozesses sind Informationen, ohne die eine Tätigkeit wie „Fahren“, nicht abgebildet werden kann. Die Mehrzahl der für das Fahren notwendigen Informationen wird visuell aufgenommen und befindet sich in Fahrtrichtung des Fahrzeugs. Wenn also der Blick des Fahrers auf die zukünftig zu befahrene Strecke gerichtet ist, so sind die so aufgenommenen Informationen über Strecke und Fremdverkehr zumeist ausreichend für die Fahrzeugführung. In komplexeren Situationen kommen jedoch weitere Faktoren hinzu: So spielen Fahrzeuge neben und hinter dem eigenen Fahrzeug eine Rolle, weiterhin gelten je nach Ort unterschiedliche „Spielregeln“ für die Fahraufgabe (Geschwindigkeitsbegrenzungen, Vorfahrtsregelungen). Ein Speicher für solcherlei Informationen muss demnach vorhanden sein, um einen situationsbewussten Fahrer modellieren zu können – die Alternativen wären entweder ein allwissender Fahrer (alle Sensorinformationen sind immer gleichzeitig vorhanden – dies ist aufgrund physikalischer Beschränkungen unrealistisch) oder ein Fahrer, der nur basierend auf aktuell wahrnehmbaren Reizen agiert. Letzterer wäre jedoch ausschließlich für das Abfahren von Strecken zu verwenden, eine komplexe Interaktion mit anderen Verkehrsteilnehmern wäre auf diese Art und Weise nicht realisierbar.

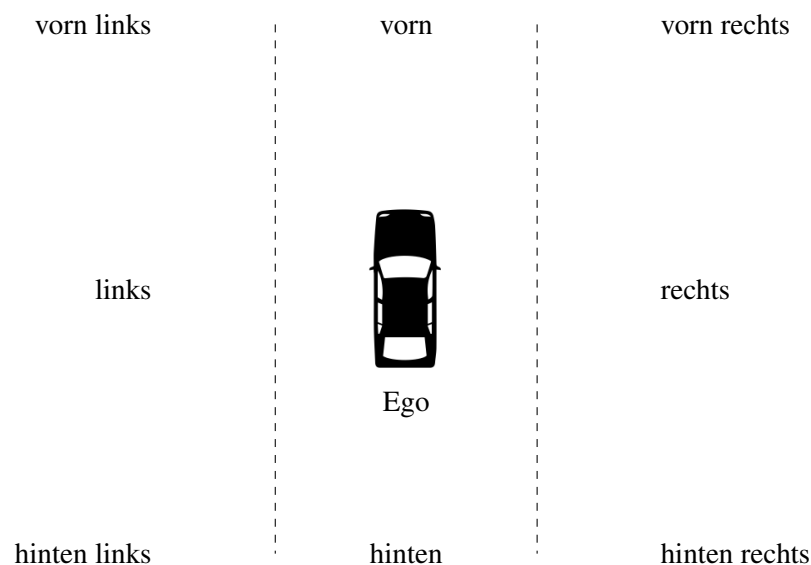


Abbildung 5.11: 3x3-Matrix des zu beachtenden Fremdverkehrs

Ein Gedächtnismodul muss demnach derartige Informationen beinhalten, die für den Fahrer momentan nicht wahrzunehmen sind, jedoch weiterhin eine gewisse Relevanz für die Fahraufgabe besitzen. Dies sind vor allem Informationen über andere Verkehrsteilnehmer: Dies kann in einer matrixartigen Darstellung abgespeichert bzw. vom Fahrer sprachlich definiert werden

(vgl. Abbildung 5.11). Da sich der Fahrer im Allgemeinen auf einer durch Fahrspuren aufgeteilten Straße bewegt, werden die anderen Verkehrsteilnehmer die sich in die gleiche Richtung bewegen, ebenfalls anhand dieser Spuren kategorisiert. Dem vorausfahrenden Fahrzeug wird hierbei die größte Bedeutung zugemessen: Es dient für bestimmte Fahrphasen (z. B. Folgefahrt) als grundlegende Informationsquelle bzw. Bezugspunkt – aktuelle Informationen sind daher sicherheitsrelevant und möglichst oft zu aktualisieren. In einigen Situationen kann auch ein Fahrzeug, das sich ein oder mehrere Fahrzeuge vor dem vorausfahrenden Fahrzeug befindet, relevant für das Fahrverhalten sein – z. B. bei sich stauendem Verkehr aufgrund eines langsamen LKW oder vergleichbare Szenarien. Ähnliches gilt für Fahrzeuge mehrere Positionen hinter dem eigenen Fahrzeug: Nähert sich ein LKW beispielsweise schnell einem Stauende, so stellt dies eine genauso wichtige Information dar. Ebenfalls gibt es Situationen, in denen Fahrzeuge, die sich auf der übernächsten Spur befinden, wichtig für die Manöverplanung sind: Falls ein Spurwechsel beabsichtigt wird, so muss abgesichert werden, dass nicht ein weiteres Fahrzeug einen Spurwechsel auf die eigene Zielspur vollziehen möchte. Fahrzeuge neben dem eigenen Fahrzeug sind erst von Interesse, wenn ein Spurwechsel beabsichtigt wird, Informationen über Fahrzeuge in den Positionen schräg vor dem eigenen Fahrzeug werden vor allem bei Überholmanövern benötigt (vor allem die Position vorn links). Die sich schräg hinter dem Ego-Fahrzeug befindenden Positionen (vor allem auf der linken Seite) werden benötigt, um sich schnell nähernde Fahrzeuge zu erkennen, die zu einem Konflikt bei einem Überholvorgang führen können.

Für viele Fahrsituationen genügen die Informationen über Fahrzeuge an den erwähnten Positionen. Je nach Fahrermodell kann es ausreichen, ausschließlich die Information über die Belegung der entsprechenden Position zu verwenden, mit zunehmender Dynamik gewinnen weitere Informationen wie Abstand, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Typ des entsprechenden Objekts an Bedeutung. Je nach Komplexität der Blickmodellierung kann so mit dem Wissen über nicht vorhandene Informationen eine Kopf-/Blickbewegung ausgelöst werden, um an die entsprechende Information zu gelangen. Eine wichtige Eigenschaft einer jeden Information im so modellierten „Arbeitsgedächtnis“ ist die Verbleibensdauer. So kann die Information über ein sich neben dem Ego-Fahrzeug befindenden Fahrzeug während des Wartens vor einer Ampel als so lange gültig angesehen werden, bis die Fahrt fortgesetzt wird – während einer Autobahnfahrt ist eine solche Information nur von vergleichsweise kurzer Gültigkeit, da sich der dynamische Zustand der Verkehrsteilnehmer innerhalb weniger Sekunden ändern kann. Im Gegensatz dazu sind Verkehrsregeln jeweils so lange gültig, bis diese durch andere Verkehrsregeln aufgehoben bzw. geändert werden (nach der Wahrnehmung einer Geschwindigkeitsbegrenzung ist die Information über diese so lange im Arbeitsgedächtnis zu speichern, bis diese durch ein weiteres Verkehrszeichen entweder komplett aufgehoben oder geändert wird). In Tabelle 5.1 sind bisher implementierte Informationen sowie ihre Gültigkeit zusammengefasst.

Information	Gültigkeit	Überprüfung	Wahrnehmung
Verkehrsregeln:			
aktuelle Geschwindigkeitsbegrenzung	bis durch anderes Verkehrszeichen aufgehoben oder Gültigkeitsbereich verlassen	einmalig	bewusst
Vorfahrtsregeln	bis Kreuzung überfahren	einmalig	unbewusst
Straßeninformationen:			
Anzahl der Fahrspuren	bis Änderung wahrgenommen	permanent	unbewusst
Kurvenradius in Vorausschau	bis Kurve durchfahren	permanent	unbewusst
Information ob andere Spur frei ist	mehrere Sekunden	mehrmals vor Manöver	bewusst
Information ob eigene Spur frei	bis Änderung wahrgenommen	permanent	unbewusst
eigene Position	bis Änderung wahrgenommen	permanent	unbewusst
Informationen über andere Verkehrsteilnehmer:			
Fzg. vor Ego	bis Änderung wahrgenommen	permanent	unbewusst
Fzg. links oder rechts neben Ego	bis zum nächsten Blick	einmalig	bewusst
Fzg. hinter Ego	bis zum nächsten Blick	mehrmals vor Manöver	bewusst
Fzg. vorn links	bis Änderung wahrgenommen	permanent	unbewusst
Fzg. vorn rechts	bis Änderung wahrgenommen	permanent	unbewusst
Fzg. hinten links	bis zum nächsten Blick bzw. Manöverende	mehrmals vor Manöver	bewusst
Fzg. hinten rechts	bis zum nächsten Blick bzw. Manöverende	mehrmals vor Manöver	bewusst

Tabelle 5.1: Informationen im Arbeitsgedächtnis des Fahrermodells und ihre Gültigkeiten

5.8 Fahrertypen

Für die Simulation ist die Verwendung von unterschiedlich parametrisierten Fahrermodellen wünschenswert. Mit Hilfe des vorgestellten Ansatzes lassen sich einzelne Fahrer durch Fähigkeitsparameter so konfigurieren, dass ein gewünschtes Fahrverhalten abgebildet werden kann. Eine Parametrierung alleinig über Fähigkeitsparameter ist zwar möglich, erscheint jedoch als wenig intuitiv. Des Weiteren beeinflussen externe und interne Zustände, sowie Performanzparameter das modellierte Fahrverhalten. Externe Zustände bezeichnen hierbei fahrertypunabhängige äußere Gegebenheiten und können daher nicht als Parameter für bestimmte Fahrertypen herhalten. Interne Zustände modellieren vor allem menschliche Emotionen und Motivationen. Auch diese sind als universell anzusehen und kommen daher ebenfalls nicht in Betracht. Performanzparameter hingegen wirken in der Regel auf mehrere Fähigkeitsparameter und verschlanken dadurch den Parameterraum für die Einstellung des Verhaltens. Für eine Fahrermodellspezies – welche durch ein bestimmtes Set von Fähigkeiten definiert werden kann – repräsentiert eine Konfiguration der Performanzparameter ein Fahrermodellindividuum. Auf diese Weise sind unterschiedliche Fahrertypen für das Modellverhalten realisierbar. Ein *Fahrertyp* bezeichnet dementsprechend eine Umgebung im Koordinatensystem der Performanzparameter und eine entsprechende Auswahl von Fähigkeitsmodulen. Ein Fahrertyp kann somit als n -dimensionale Punktwolke im Koordinatensystem der n Performanzparameter interpretiert werden. Die Zugehörigkeit eines Fahrers zu einem bestimmten Fahrertyp kann durch den Abstand des den Fahrer repräsentierenden n -Tupels zum Mittelpunkt der Fahrertypen-Punktwolke ermittelt werden (vgl. Abbildung 5.12). Die so definierten Fahrertypen sind zunächst nur abstrakt über ihre Parameterkonstellation beschrieben. Für den praktischen Einsatz können die Typen mit einem Label wie „erfahrener Fahrer“, „junger aggressiver Fahrer“ belegt werden bzw. können Parametersätze entsprechend der gewünschten Charakterisierung zusammengestellt werden.

5.9 Validierung des Rahmenmodells

Für die Validierung des Rahmenmodells können Argumente ähnlich zu denen in Abschnitt 4.2 beschriebenen angeführt werden. Wie schon Salvucci in [Sal06] formulierte, kann, da es keine einzelne Methode oder Maßnahme gibt, die ausreichend ist, um menschliches Fahrverhalten zu verstehen, dementsprechend auch kein solches Validierungsmaß existieren. Es können zumeist nur einzelne Subsysteme in bestimmten Szenarien validiert werden. Jedoch kann aus erfolgreich validierten Submodellen nicht abgeleitet werden, dass das Gesamtmodell ebenfalls als „validiert“ zu betrachten ist.

Zum Einen kann in diesem Fall das Modell als solches keine Validierung erfahren, da es sich um ein Rahmenmodell handelt. Dementsprechend können nur spezielle Konfigurationen bzw. Parametrierungen des Modells einer Validierung unterzogen werden. Wichtiger in diesem Kontext wäre eine Überprüfung der verwendeten Modellparameter: Einzelne könnten im Rahmen

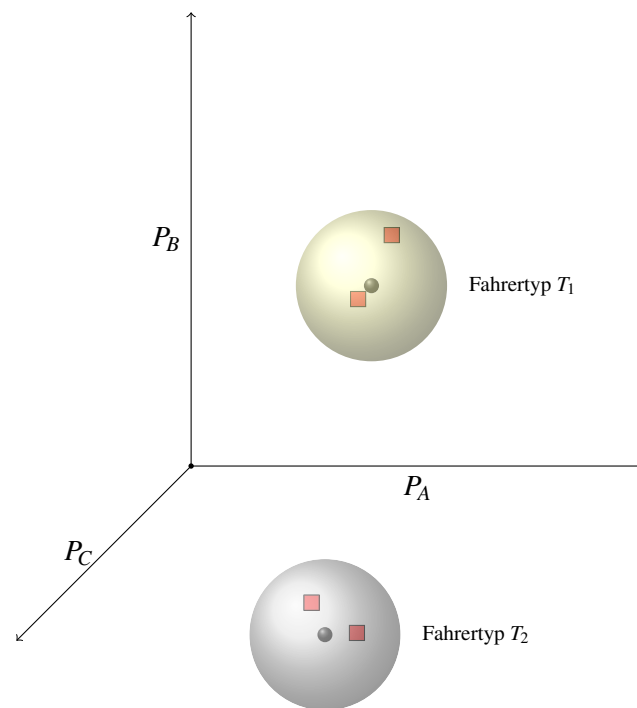


Abbildung 5.12: Beispiel für den Raum der Performanzparametern für $N = 3$. Eine Kugel definiert einen Fahrertypenraum, ein schwarzer Punkt dessen Mittelpunkt (bzw. den „typischen“ Fahrer eines Fahrertyps). Kleine rote Punkte stehen für einen bestimmten Fahrer innerhalb dieses Raums.

psychologischer Untersuchungen validiert werden – wobei auch hier letztendlich maximal festgestellt werden kann, dass die entsprechende Parametrierung „nicht unrealistisch“ erscheint. Auf eine wie auch immer geartete „Korrektheit“ kann auch auf diese Art und Weise nicht getestet werden. Das Verhalten, das mittels der Module des Rahmenmodells generiert wird, hängt sowohl von einzelnen modellierten Abhängigkeiten innerhalb des Modells als auch und vorrangig von dessen Parametrierung ab. Dementsprechend kann mit Sicherheit gesagt werden, dass mittels dieses Modellierungsansatzes eine schier unüberschaubare Menge an Verhaltensvariationen abgebildet werden kann, von denen die meisten als „nicht menschähnlich“ bezeichnet werden können. Es gilt also, die Parameter so zu setzen, dass ein als „menschähnlich“ zu bezeichnendes Fahrverhalten erzeugt wird. Diese Entscheidung ist kaum zu objektivieren und hängt somit stark von den subjektiven Vorstellungen des Modellierers bzw. Nutzers ab.

Eine fiktive Validierungsstudie für *eine* Modellkonfiguration muss daher dynamische Abhängigkeiten zwischen Parametern unberücksichtigt lassen und kann nur validieren, ob die verwendete Konfiguration ein zu bestimmendes Ähnlichkeitsmaß zu Daten eines bestimmten Fahrers aufweist. Selbst eine Ähnlichkeit von beispielsweise Lenkwinkeldaten bedeutet im Umkehrschluss nicht, dass die motivationalen und emotionalen Abhängigkeiten korrekt umgesetzt sind – die Übereinstimmung kann durchaus zufällig zustande gekommen sein. Wenn man dies außer Acht ließe, bestünde eine solche Validierungssituation aus einem Parametersatz, einer Menge von

verwendeten Modulen, einem klar definierten Umgebungsszenario und einem Datensatz einer Person aus einer identischen Situation als „Eichmaß“. Bei Miteinbeziehung der motivationalen und emotionalen Komponenten ergäben sich schon aufgrund der sowohl inter- als auch intraindividuellen Unterschiede nicht auflösbare Probleme, die eine zufriedenstellende Validierung nicht zuließen.

Weiterhin ist fraglich, inwiefern die Möglichkeit besteht, valide Vergleichsdaten über die erwähnten psychologischen Konstrukte zu erhalten. Zum einen lassen sich Daten über subbewusste psychologische Zustände kaum erheben, des Weiteren ist die Formalisierung der ebenfalls teilweise subbewusst vorhandenen Einflüsse auf das Fahrerhalten schwierig. Abschließend kann gesagt werden, dass eine Validierung im klassischen Sinne für das vorgestellte Rahmenmodell, dessen Konfigurationen jeweils hybride Fahrermodelle sind, die sowohl aus psychologischen als auch ingenieurwissenschaftlich modellierten Komponenten bestehen, nicht bzw. nur für singuläre Situationen durchgeführt werden kann.

5.10 Zusammenfassung & Ausblick

Ein aus dem Rahmenmodell abgeleitetes Fahrermodell besteht aus einer Anzahl von in Modulen implementierten Fähigkeiten, sowie aus Parametern, (interne sowie externe Zustände und Performanzparameter), die zusammen als Fähigkeitsparameter das Verhalten des Modells beeinflussen können. Eingangsgrößen in das Fahrermodell sind Informationen aus Umwelt und Fahrzeug, die als Signale aus der Simulationsumgebung empfangen werden. Dazu gehören neben den für die reine Fahrtätigkeit notwendigen reellwertigen Informationen wie momentane Querabweichung, Krümmung der Straße in Höhe des Schwerpunkts oder Abstand zum Vorderfahrzeug auch diskrete Informationen, wie der Zustand der Lichtsignalanlage an der nächsten Kreuzung oder momentan gültige Geschwindigkeitsbeschränkungen. Die Handlungen des Fahrermodells, (der Modell-Output) sind Veränderungen der Stellgrößen bzw. Benutzerschnittstellen des Fahrzeugs. Dies können Lenkbewegungen, Betätigung der Bremse bzw. des Gaspedals, aber auch Handhabung des Blinkers, des Radio-Lautstärkereglers oder eines Fahrerassistenzsystems sein. Abbildung 5.1 zeigt die Grundstruktur des Rahmenmodells.

Die bisher beschriebene theoretische Struktur eines Rahmenmodells für Fahrermodelle wurde bereits erfolgreich – wenn auch nicht in allen Hauptmodulen in hochkomplexer Form – implementiert und in einer echtzeitfähigen Simulatorumgebung eingesetzt. Informationen, wie beispielsweise die Anzahl der Fahrspuren, deren Breite, sowie vorhandene Beschilderung und Lichtsignale können aus der Straßenrepräsentation³ erhalten werden. Unterschiedliche aus dem Rahmenmodell generierte Fahrermodelle wurden bisher sowohl in Autobahnumgebungen, als auch in Landstraßen- und Innenstadtszenarien verwendet.

³Eine Schnittstelle zum *OpenDrive*-Format ist vorhanden.

Mit dem Rahmenmodell für menschähnliche Fahrermodelle ist eine Struktur geschaffen worden, die die Entwicklung von sehr unterschiedlichen Fahrermodellen ermöglicht. Eine Besonderheit ist der Fokus auf möglichst hohe Menschähnlichkeit der Modelle. Dies wird gewährleistet, da die einzelnen Module auf beobachtbaren und teilweise bereits modellierten menschlichen Verhaltensweisen basieren. Mittels des Rahmenmodells realisierte Fahrermodelle sind daher vor allem für die Entwicklung und Erprobung von Fahrerassistenzsystemen geeignet. Ebenfalls sind diese für den Einsatz als intelligente Fahrer in einer Simulatorumgebung prädestiniert.

Zukünftige Modellierungsarbeiten betreffen vor allem die Entwicklung und Implementierung weiterer spezifischer Module: Im Wahrnehmungsmodul kann eine komplexere Kopf- bzw. Blicksteuerung umgesetzt werden. Das Modul für die Situationserkennung kann um ein umfassendes Arbeitsgedächtnismodell ergänzt werden. Im Entscheidungsmodul kann das im Kapitel 4 vorgestellte Modell implementiert werden. Weitere Fahrregler für spezifische Fahrverhalten können im Ausführungsmodul realisiert werden. Weiterhin können Laboruntersuchungen zur Generierung von Parametern zur Validierung einzelner Module durchgeführt werden.

Literaturverzeichnis

- [Aas95] AASMAN, Jannes: Modelling driver behaviour in Soar. (1995)
- [AAz16] ABUALI, Najah ; ABOU-ZEID, Hatem: Driver Behavior Modeling: Developments and Future Directions. In: *International Journal of Vehicular Technology* (2016)
- [AB15] ABENDROTH, Bettina ; BRUDER, Ralph: Die Leistungsfähigkeit des Menschen für die Fahrzeugführung. In: WINNER, Hermann (Hrsg.) ; HAKULI, Stephan (Hrsg.) ; LOTZ, Felix (Hrsg.) ; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Springer Vieweg, 2015, S. 3–16
- [ABB⁺04] ANDERSON, John R. ; BOTHELL, Daniel ; BYRNE, Michael D. ; DOUGLASS, Scott ; LEBIERE, Christian ; QIN, Yulin: An Integrated Theory of the Mind. In: *Psychological Review* 111 (2004), Nr. 4, S. 1036–1060
- [AC09] AMANTINI, A. ; CACCIABUE, P. C.: A simple simulation predicting driver behavior, attitudes and errors. In: *Proceedings of 13th International Conference on Human Computer Interaction (HCI 2009), 19-24 July 2009, San Diego, CA, 2009*, S. 345–354
- [Ahm99] AHMED, K. I.: *Modeling Drivers' Acceleration and Lane Changing Behavior*, Massachusetts Institute of Technology, Diss., 1999
- [AL98] ANDERSON, John R. ; LEBIERE, Christian J.: *The atomic components of thought*. Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1998
- [ALK01] AKYOL, Suat ; LIBUDA, Lars ; KRAISS, Karl-Friedrich: Multimodale Benutzung adaptiver Kfz-Bordsysteme. In: JÜRGENSOHN, Thomas (Hrsg.) ; TIMPE, Klaus-Peter (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*. Springer, 2001, S. 137–154
- [AM11] AUTHIÉ, Colas N. ; MESTRE, Daniel R.: Optokinetic nystagmus is elicited by curvilinear optic flow during high speed curve driving. In: *Vision Research* 51 (2011), Nr. 16, S. 1791–1800
- [And01] ANDERSON, John R. ; GRAF, Ralf (Hrsg.) ; GRABOWSKI, Joachim (Hrsg.): *Kognitive Psychologie*. Spektrum Akademischer Verlag, 2001
- [AOF97] ARNETT, Jeffrey J. ; OFFER, Daniel ; FINE, Mark A.: Reckless driving in adolescence: 'State' and 'trait' factors. In: *Accident Analysis & Prevention* 29 (1997), Nr. 1, S. 57–63

- [AS68] ATKINSON, Richard C. ; SHIFFRIN, Richard M.: Human memory: A proposed system and its control processes. In: *Psychology of learning and motivation* 2 (1968), Nr. 4, S. 89–195
- [ASM01] AL-SHIHABI, T. ; MOURANT, R. R.: A Framework for Modeling Human-like Driving Behaviors For Autonomous Vehicles in Driving Simulators. In: *Proceedings of 5th International Conference on Autonomous Agents*, 2001, S. 286–291
- [ASM03] AL-SHIHABI, T. ; MOURANT, R. R.: Toward More Realistic Driving Behavior Models for Autonomous Vehicles in Driving Simulators. In: *Transportation Research Record* 1843 (2003), Nr. 1, S. 41–49
- [Bab75] BABKOV, Valerij F.: Road conditions and traffic safety. In: *Mir Publishers* (1975)
- [Bad00] BADDELEY, Alan: The episodic buffer: a new component of working memory? In: *Trends in cognitive sciences* 4 (2000), Nr. 11, S. 417–423
- [Bal97] BALCI, O.: Verification, Validation and Testing. In: BANKS, Jerry (Hrsg.): *Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*. John Wiley & Sons, New York, 1997, S. 335–393
- [Bar04] BARTHENHEIER, Thomas: *Potenzial einer fahrertyp- und fahrsituationsabhängigen Lenkradmomentgestaltung*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2004
- [Bau11] BAUER, Colin: *A Driver-Specific Maneuver Prediction Model Based on Fuzzy Logic*, Freie Universität Berlin, Diss., 2011
- [BBD75] BERGER, Hermann-Josef ; BLIERSBACH, Gerhard ; DELLEN, Rolf G.: Fahrformen und Erlebensentwicklungen bei der Teilnahme am Straßenverkehr. In: *Buchreihe der Arbeits-und Forschungsgemeinschaft für Straßenverkehr und Verkehrssicherheit, Institut an der Universität zu Köln* (1975), Nr. 25
- [BBGV15] BUBB, Heiner ; BENGLER, Klaus ; GRÜNEN, Rainer E. ; VOLLRATH, Mark: *Automobilergonomie*. Springer-Verlag, 2015
- [BBMG06] BELLET, T. ; BAILLY, B. ; MAYENOBE, P. ; GEORGEON, O.: Cognitive Modelling and Computational Simulation of Drivers Mental Activities. In: CARLO CACCIABUE, P. (Hrsg.): *Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments*. Springer, 2006, S. 315–345
- [BCC⁺05] BARCELÓ, Jaume ; CODINA, Esteve ; CASAS, J. ; FERRER, J. L. ; GARCÍA, D.: Microscopic traffic simulation: A tool for the design, analysis and evaluation of intelligent transport systems. In: *Journal of Intelligent and Robotic Systems* 41 (2005), Nr. 2-3, S. 173–203
- [BD06] BRAESS, H. ; DONGES, E.: Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen – „Konsumierbare“ oder echte Verbesserungen? In: *Tagung „Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz“*, Garching, 2006

- [Bel98] BELLET, Thierry: *Modélisation et simulation cognitive de l'opérateur humain: une application à la conduite automobile*, Paris Université V, Diss., 1998
- [Ben04] BENMIMOUN, A.: Der Fahrer als Vorbild für Fahrerassistenzsysteme? Ein Fahrermodellbasierter Ansatz zur Entwicklung von situationsadaptiven FAS. In: *13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik*, 2004, S. 1–17
- [Ber70] BERNOTAT, Rainer: Anthropotechnik in der Fahrzeugführung. In: *Ergonomics* 13 (1970), Nr. 3, S. 353–377
- [Ber12] BERUSCHA, Frank: *Nutzerorientierte Gestaltung haptischer Signale in der Lenkung: Zum Einsatz direktonaler Lenkradvibrationen in Fahrerassistenzsystemen*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2012
- [BFK08] BAUMANN, M. ; FRANKE, Thomas ; KREMS, Josef F.: The effect of experience, relevance and interruption duration on drivers mental representation of a traffic situation. In: *Human Factors for assistance and automation* (2008), S. 141–152
- [BGR10] BAUER, Colin ; GONTER, Mark ; ROJAS, Raul: Fahrerspezifische Analyse des Fahrverhaltens zur Parametrierung aktiver Sicherheitssysteme. In: *Sicherheit durch Fahrerassistenz* 73 (2010), S. 74
- [BGSL12] BI, Luzheng ; GAN, Guodong ; SHANG, Junxing ; LIU, Yili: Queuing network modeling of driver lateral control with or without a cognitive distraction task. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 13 (2012), Nr. 4, S. 1810–1820
- [BH74] BADDELEY, Alan D. ; HITCH, Graham: Working memory. In: *Psychology of learning and motivation* 8 (1974), S. 47–89
- [BH98] BOER, Erwin ; HOEDEMAEKER, Marika: Modeling Driver Behavior with different Degrees of Automation: A Hierarchical Decision Framework of Interacting Mental Models. In: *17th European Annual Conference on Human Decision Making and Manual Control*, 1998, S. 63–72
- [Bie84] BIEDERMANN, Bodo: *Straßentrassierung auf der Grundlage von Geschwindigkeiten aus Sehfelduntersuchungen*, Technische Hochschule Darmstadt, Diss., 1984
- [BL88] BOFF, Kenneth R. ; LINCOLN, Janet E.: *Engineering Data Compendium. Human Perception and Performance*. Harry G. Armstrong Aerospace Medical Research Lab, Wright-Patterson Airforce Base, Ohio, 1988
- [BL97] BEALL, Andrew C. ; LOOMIS, Jack M.: Optic flow and visual analysis of the base-to-final turn. In: *The International Journal of Aviation Psychology* 7 (1997), Nr. 3, S. 201–223
- [Ble10] BLECH, Christine: *Komplexes Problemlösen in Situationen mit Zielkonikt*, Universität Heidelberg, Diss., 2010

- [BM99] BRACKSTONE, Mark ; McDONALD, Mike: Car-following: a historical review. In: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 2 (1999), Nr. 4, S. 181–196
- [BMB⁺12] BELLET, Thierry ; MAYENOBE, Pierre ; BORNARD, Jean-Charles ; GRUYER, Dominique ; CLAVERIE, Bernard: A computational model of the car driver interfaced with a simulation platform for future Virtual Human Centred Design applications: COSMO-SIVIC. In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 25 (2012), Nr. 7, S. 1488–1504
- [BN96] BAJCSY, R. ; NAGEL, H. H.: Descriptive and Prescriptive Languages for Mobility Tasks: Are They Different? In: *Advances in Image Understanding* (1996), S. 280–300
- [BO93a] BALL, Karlene ; OWSLEY, Cynthia: The useful field of view test: a new technique for evaluating age-related declines in visual function. In: *Journal of the American Optometric Association* 64 (1993), Nr. 1, S. 71–79
- [BO93b] BOOTSMA, Reinoud J. ; OUDEJANS, Raoul R.: Visual Information About Time-To-Collision Between Two Objects. In: *Journal of Experimental Psychology* 19 (1993), Nr. 5, S. 1041–1052
- [Bol91] BOLTE, Uwe: Das aktive Stellteil – ein ergonomisches Bedienkonzept. In: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 17*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1991
- [Bor07] BOROS, I.: Ein Spurführungs-Lenkregler in SIMPACK – Lane Control Module in SIMPACK. In: *SIMPACK User Meeting 2007, Bonn*, 2007
- [BR71] BHISE, V. D. ; ROCKWELL, T. H.: Role of peripheral vision and time-sharing in driving. In: *Proceedings: American Association for Automotive Medicine Annual Conference* Bd. 15, 1971, S. 320–341
- [Bör13] BÖRGER, Joachim: *Fahrerintentionserkennung und Kursprädiktion mit erweiterten Maschinellen Lernverfahren*, Universität Ulm, Diss., 2013
- [Bro58] BROADBENT, D.: *Perception and Communication*. London: Pergamon Press, 1958
- [Bös91] BÖSCH: *Der Fahrer als Regler*, Technische Universität Wien, Diss., 1991
- [BSB74] BURNHAM, G. ; SEO, Jinbom ; BEKEY, G.: Identification of human driver models in car following. In: *IEEE transactions on Automatic Control* 19 (1974), Nr. 6, S. 911–915
- [BSB16] BORNARD, Jean-Charles ; SASSMAN, Matthew ; BELLET, Thierry: Use of a computational simulation model of drivers cognition to predict decision making and behaviour while driving. In: *Biologically Inspired Cognitive Architectures* 15 (2016), S. 41–50

- [BSHJ09] BOYRAZ, P. ; SATHYANARAYANA, A. ; HANSEN, J. L. ; JONSSON, E.: Driver behavior modeling using hybrid dynamic systems for driver-aware active vehicle safety. In: *Proceedings of the 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety Of Vehicles*, 2009
- [BT07] BREZILLON, Juliette ; TIJUS, Charles: New representation of GADGET's matrix for a driver typology. In: *Driving Simulation Conference*, 2007
- [Bub01] BUBB, Heiner: Haptik im Kraftfahrzeug. In: JÜRGENSOHN, Thomas (Hrsg.) ; TIMPE, Klaus-Peter (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*. Springer, 2001, S. 155–164
- [Buc19] BUCHHOLZ, Peter: Modellgestützte Analyse und Optimierung / Technische Universität Dortmund. 2019. – Skript
- [Bun18] BUNDESAMT, Statistisches: Verkehr. In: *Verkehrsunfälle* Fachserie 8 Reihe 7 (2018)
- [BWWL15] BI, Luzheng ; WANG, Mingtao ; WANG, Cuie ; LIU, Yili: Development of a driver lateral control model by integrating neuromuscular dynamics into the queuing network-based driver model. In: *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 16 (2015), Nr. 5, S. 2479–2486
- [Byr01] BYRNE, Michael D.: ACT-R/PM and menu selection: Applying a cognitive architecture to HCI. In: *International Journal of Human-Computer Studies* 55 (2001), Nr. 1, S. 41–84
- [Car07] CARSTEN, Oliver: From Driver Models to Modelling the Driver: What do We Really Need to Know about the Driver? In: *Proceedings of the International Workshop on Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments*, 2007, S. 93–101
- [CC01] CAVALLO, V. ; COHEN, A.: Perception. In: BARJONET, Pierre-Emmanuel (Hrsg.): *Traffic psychology today*. Springer Science & Business Media, 2001, S. 63–89
- [CC10] CACCIABUE, Pietro C. ; CARSTEN, Oliver: A simple model of driver behaviour to sustain design and safety assessment of automated systems in automotive environments. In: *Applied ergonomics* 41 (2010), Nr. 2, S. 187–197
- [CEST13] CACCIABUE, Pietro C. ; ENJALBERT, Simon ; SÖDERBERG, Håkan ; TAPANI, Andreas: Unified Driver Model simulation and its application to the automotive, rail and maritime domains. In: *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour* 21 (2013), S. 315–327
- [Cha03] CHATZIASTROS, Astros: *Visuelle Kontrolle der Lokomotion*, Justus-Liebig-Universität Gießen, Diss., 2003
- [CL88] CAVALLO, Viola ; LAURENT, Michel: Visual information and skill level in time-to-collision estimation. In: *Perception* 17 (1988), S. 623–632

- [Coh76] COHEN, A.: Augenbewegungen des Autofahrers beim Vorbeifahren an unvorhersehbaren Hindernissen und auf freier Strecke. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 22 (1976), Nr. 2, S. 68–76
- [Cow08] COWAN, Nelson: What are the differences between long-term, short-term, and working memory? In: *Progress in brain research* 169 (2008), S. 323–338
- [CRM06] CACCIABUE, P. C. ; RE, Cristina ; MACCHI, Luigi: Simple simulation of driver performance for prediction and design analysis. In: CARLO CACCIABUE, P. (Hrsg.): *Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments*. Springer, 2006, S. 346–375
- [CRNR06] CONCHILLO, Angela ; RECARTE, Miguel A. ; NUNES, Luis ; RUIZ, Trinidad: Comparing Speed Estimations from a Moving Vehicle in Different Traffic Scenarios: Absence Versus Presence of Traffic Flow. In: *The Spanish Journal of Psychology* 9 (2006), Nr. 1, S. 32–37
- [CV95] CUTTING, James E. ; VISHTON, Peter M.: Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In: *Handbook of perception and cognition, Vol. 5: Perception of space and motion*. W. Epstein and S. Rogers, 1995, S. 69–117
- [Dam94] DAMASIO, Antonio R.: *Descartes' Irrtum: Fühlen, Denken und das menschliche Gehirn*. Ullstein, 1994
- [Deu05] DEUTSCHLE, S.: Wer fährt? – Der Fahrer oder das System? In: *SVR Straßenverkehrsrecht* 6 (2005), S. 201–206
- [Dil73] DILLING, J.: Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen auf kurvigen Strecken. In: *Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* 151 (1973), S. 1–25
- [DMRK05] DAHLEN, Eric R. ; MARTIN, Ryan C. ; RAGAN, Katie ; KUHLMAN, Myndi M.: Driving anger, sensation seeking, impulsiveness, and boredom proneness in the prediction of unsafe driving. In: *Accident Analysis & Prevention* 37 (2005), Nr. 2, S. 341–348
- [DN96] DONGES, E. ; NAAB, K.: Regelsysteme zur Fahrzeugführung und -stabilisierung in der Automobiltechnik. In: *Automatisierungstechnik* 44 (1996), Nr. 5, S. 226–236
- [DN09] DEML, Barbara ; NEUMANN, Hendrik: Menschmodelle und Verhaltenssimulation – Eine Methode zur Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen. In: 9. *Magdeburger Maschinenbau-Tage*, 2009, S. 121–130
- [Don68] DONDERS, Frans C.: Die Schnelligkeit psychischer Prozesse. In: *Reicherts's & Dubois Archiv für Anatomie, Physiologie und Wissenschaftliche Medizin* (1868), S. 657–681

- [Don77] DONGES, Edmund: *Experimentelle Untersuchung und regelungstechnische Modellierung des Lenkverhaltens von Kraftfahrern bei simulierter Straßenfahrt*, Technische Hochschule Darmstadt, Diss., 1977
- [Don78] DONGES, Edmund: A two-level model of driver steering behavior. In: *Human Factors* 20 (1978), Nr. 6, S. 691–707
- [Don82] DONGES, Edmund: Aspekte der aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen. In: *Automob-Ind* 27 (1982), Nr. 2
- [Don15] DONGES, Edmund: Fahrerhaltensmodelle. In: WINNER, Hermann (Hrsg.) ; HAKULI, Stephan (Hrsg.) ; (Hrsg.) ; LOTZ, Felix (Hrsg.) ; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Springer Vieweg, 2015, S. 3–16
- [Dör89] DÖRNER, Dietrich: *Die Logik des Misslingens: Strategisches Denken in komplexen Situationen*. Rowohlt Verlag GmbH, 1989
- [DR02] DAGLI, Ismail ; REICHARDT, Dirk: Motivation-based approach to behavior prediction. In: *Intelligent Vehicle Symposium, 2002. IEEE* Bd. 1, 2002, S. 227–233
- [DS98] DÖRNER, Dietrich ; SCHAUB, Harald: *Das Leben von PSI. Über das Zusammenspiel von Kognition, Emotion und Motivation – oder: Eine einfache Theorie für komplizierte Verhaltensweisen*. 1998
- [DS01] DELORME, Delphine ; SONG, Bongsob: Human Driver Model for SmartAHS / Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. 2001. – California PATH Research Report
- [Düs10] DÜSER, Tobias: *X-in-the-Loop – ein durchgängiges Validierungsframework für die Fahrzeugentwicklung am Beispiel von Antriebsstrangfunktionen und Fahrerassistenzsystemen*. IPEK, 2010
- [DTC72] DARWIN, Christopher J. ; TURVEY, Michael T. ; CROWDER, Robert G.: An Auditory Analogue of the Sperling Partial Report Procedure: Evidence for Brief Auditory Storage. In: *Cognitive Psychology* 3 (1972), S. 255–267
- [DW96] DE WAARD, Dick: *The measurement of drivers' mental workload*, University of Groningen, Traffic Research Center, Diss., 1996
- [DWH12] DE WINTER, JCF ; HAPPEE, Riender: Modelling driver behaviour: a rationale for multivariate statistics. In: *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 13 (2012), Nr. 5, S. 528–545
- [Ebe06] EBERSBACH, Dirk: *Entwurfstechnische Grundlagen für ein Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers bei der Wahl seiner Geschwindigkeit*, Technische Universität Dresden, Diss., 2006
- [Ede00] EDELMANN, Walter: *Lernpsychologie*. Beltz, 2000

- [Ehm01] EHMANN, D.: Simulationsmodell des menschlichen Spurwechselverhaltens. In: *Der Fahrer im 21. Jahrhundert*, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2001, S. 203–216
- [Eig10] EIGEL, Thomas: *Integrierte Längs- und Querführung von Personenkraftwagen mittels Sliding-Mode-Regelung*, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Diss., 2010
- [EK95] ERICSSON, K. A. ; KINTSCH, Walter: Long-term working memory / University of Colorado, Boulder, Institute of Cognitive Science. 1995 (2). – ICS Technical Report 94-01
- [Ekm92] EKMANN, Paul: An argument for basic emotions. In: *Cognition & emotion* 6 (1992), Nr. 3-4, S. 169–200
- [EM10a] EILERS, Mark ; MÖBUS, Claus: Learning of a Bayesian Autonomous Driver Mixture-of-Behaviors (BAD MoB) Model. In: KARWOWSKI, W. (Hrsg.) ; SALVENDY, G. (Hrsg.): *1st International Conference On Applied Digital Human Modeling, 17-20 July, 2010, Intercontinental, Miami Florida, USA*, 2010
- [EM10b] EILERS, Mark ; MÖBUS, Claus: Lernen eines modularen Bayesian Autonomous Driver Mixture-of-Behaviors (BAD MoB) Modells. In: KOLREP, H. (Hrsg.) ; JÜRGENSOHN, Th. (Hrsg.): *Fahrermodellierung – Zwischen kinematischen Menschmodellen und dynamisch-kognitiven Verhaltensmodellen*. Düsseldorf : VDI-Verlag, 2010 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 22 32), S. 61–74
- [EM13] EILERS, Mark ; MÖBUS, Claus: Discriminative Learning of a Probabilistic Driver Model Representing the Human Driving Behavior on Virtual Highways. In: JÜRGENSOHN, Thomas (Hrsg.) ; KOLREP, Harald (Hrsg.): *Fahrermodellierung in Wissenschaft und Wirtschaft* Bd. 35. Düsseldorf : VDI Verlag, 2013 (Fortschritt-Berichte VDI 22), S. 10–25
- [End95] ENDSLEY, Mica R.: Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. In: *Human factors* 37 (1995), Nr. 1, S. 32–64
- [Enk66] ENKE, K.: Überlegungen zum Zusammenwirken von Fahrzeuglenker und Automobil. In: *Automobil-Industrie* 1 (1966), S. 37–44
- [ESS00] ENDSLEY, Mica R. ; SOLLENBERGER, Randy ; STEIN, Earl: Situation awareness: A comparison of measures. In: *Proceedings of the human performance, situation awareness and automation: user-centered design for the new millennium* (2000), S. 15–19
- [Fär15] FÄRBER, Berthold: *Kommunikationsprobleme zwischen autonomen Fahrzeugen und menschlichen Fahrern*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2015. – 127–146 S.

- [Fas95] FASTENMEIER, Wolfgang: Autofahrer und Verkehrssituation. Neue Wege zur Bewertung von Sicherheit und Zuverlässigkeit moderner Strassenverkehrssysteme. In: *Mensch – Fahrzeug – Umwelt*. Verlag TÜV Rheinland GmbH, 1995 (33)
- [FBEV11] FISCHER, Rainer ; BUTZ, Torsten ; EHMANN, Martin ; VOCKENHUBER, Mario: Fahrermodell zur virtuellen Regelsystementwicklung. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 113 (2011), Nr. 12, S. 946–949
- [Fec05] FECHER, Norbert: *Analyse des stationären Folgeverhaltens von PKW Fahrzeugführern unter Berücksichtigung von Nässe und einhergehender Sichtbehinderung*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2005
- [FG92] FASTENMEIER, Wolfgang ; GSTALTER, Herbert: Driving Tasks and New Information Technologies. In: *University of Lund: Bulletin* (1992), S. 21–32
- [FHKR95] FORBES, Jeff ; HUANG, Timothy ; KANAZAWA, Keiji ; RUSSELL, Stuart: The BATmobile: Towards a Bayesian Automated Taxi. In: *IJCAI* Bd. 95, 1995, S. 1878–1885
- [Fia67] FIALA, E.: Die Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Fahrer. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 69 (1967), Nr. 10, S. 345–348
- [Fia06] FIALA, Ernst: *Mensch und Fahrzeug*. Vieweg + Teubner Verlag, 2006
- [Fil02] FILZEK, Björn: *Abstandsverhalten auf Autobahnen – Fahrer und ACC im Vergleich*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2002
- [FL05] FRENZ, Harald ; LAPPE, Markus: Absolute travel distance from optic flow. In: *Vision Research* 45 (2005), Nr. 13, S. 1679–1692
- [För92] FÖRSTER, H.-J.: Der Fahrzeugführer, ein Homo Instrumentalis. In: *VDI-Berichte* 948 (1992), S. 379–443
- [Ful84] FULLER, Ray: A conceptualization of driving behaviour as threat avoidance. In: *Ergonomics* 27 (1984), Nr. 11, S. 1139–1155
- [Ful05] FULLER, Ray: Control and Affect: Motivational Aspects of Driver Decision-Making. In: *Proceedings of the International Workshop on Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments*, 2005, S. 45–52
- [Fun06] *Kapitel Komplexes Problemlösen*. In: FUNKE, Joachim: *Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich C: Theorie und Forschung, Serie II: Kognition, Band 8: Denken und Problemlösen*. Hogrefe Verlag, 2006, S. 375–446
- [FZ94] FRESE, Michael ; ZAPF, Dieter: Action as the core of work psychology: A German approach. In: *Handbook of industrial and organizational psychology* 4 (1994), S. 271–340
- [GAA⁺12] GASSER, Tom M. ; ARZT, Clemens ; AYOUBI, Mihir ; BARTELS, Arne ; BÜRKLE, Lutz ; EIER, Jana ; FLEMISCH, Frank ; HÄCKER, Dirk ; HESSE, Tobias ; HUBER,

- Werner u. a.: Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Fahrzeugtechnik* (2012), Nr. 83
- [GBCM35] GREENSHIELDS, B. D. ; BIBBINS, J. R. ; CHANNING, W. S. ; MILLER, H. H.: A study of traffic capacity. In: *Proceedings of the Highway Research Board* Bd. 14 National Research Council (USA), 1935, S. 448–477
- [GBD10] GINDELE, Tobias ; BRECHTEL, Sebastian ; DILLMANN, Rüdiger: A probabilistic model for estimating driver behaviors and vehicle trajectories in traffic environments. In: *Proceedings of 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2010, S. 1625–1631
- [GC38] GIBSON, James J. ; CROOKS, Laurence E.: A theoretical field-analysis of automobile-driving. In: *The American journal of psychology* 51 (1938), Nr. 3, S. 453–471
- [Geg15] GEGENFURTNER, Karl R.: *Gehirn und Wahrnehmung*. Fischer Kompakt, 2015
- [Gei85] GEISER, G.: Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug. In: *Automobil-technische Zeitung* 87 (1985), Nr. 2
- [GGC87] GRÜSSER, O. J. ; GRÜSSER-CORNEHLS, U.: Gesichtssinn. In: SCHMID, R.F. (Hrsg.) ; THEWS, G (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. Springer, 1987, S. 249–290
- [GHR61] GAZIS, Denos C. ; HERMAN, Robert ; ROTHERY, Richard W.: Nonlinear follow-the-leader models of traffic flow. In: *Operations research* 9 (1961), Nr. 4, S. 545–567
- [Gib50] GIBSON, James J. ; CARMICHAEL, Leonard (Hrsg.): *The Perception of the Visual World*. The Riverside Press, Cambridge, 1950
- [Gil99] GILLET, G.: *Ergonomische Optimierung eines aktiven Stellteils*, Technische Universität München, Diss., 1999
- [GK09] GRATTENTHALER, H. ; KRÜGER, H.-P.: Bedeutung der Fahrpraxis für den Kompetenzerwerb beim Fahrenlernen. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Mensch und Sicherheit, Heft M 201*. Bremerhaven:Wirtschaftsverlag NW, 2009
- [GMB84] GODTHELP, H. ; MILGRAM, P. ; BLAAUW, G. J.: The Development of a Time-Related Measure to Describe Driving Strategy. In: *Human Factors* 26 (1984), Nr. 3, S. 257–268
- [GMR92] GARTNER, N. ; MESSER, C. J. ; RATHI, A. K.: Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art Report / Transportation Research Board, Washington, DC. 1992. – Revised Monograph on Traffic Flow Theory
- [Gol07] GOLDSTEIN, E. B. ; IRTEL, Hans (Hrsg.): *Wahrnehmungspsychologie*. Spektrum Akad. Verlag, 2007

- [GR98] GRAY, R. ; REGAN, D.: Accuracy of Estimating Time to Collision using Binocular and Monocular Information. In: *Vision research* 38 (1998), Nr. 4, S. 499–512
- [Grü05] GRÜNDL, Martin: *Fehler und Fehlverhalten als Ursache von Verkehrsunfällen und Konsequenzen für das Unfallvermeidungspotenzial und die Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen*, Universität Regensburg, Diss., 2005
- [Grz09] GRZESIK, A.: *Physiologiebasierte Simulation des Bremsverhaltens von Fahrzeugführern*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2009
- [GSF98] GOODRICH, Michael A. ; STIRLING, Wynn C. ; FROST, Richard L.: A theory of satisficing decisions and control. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans* 28 (1998), Nr. 6, S. 763–779
- [Gug97] GUGERTY, Leo J.: Situation Awareness During Driving: Explicit and Implicit Knowledge in Dynamic Spatial Memory. In: *Journal of Experimental Psychology* 3 (1997), Nr. 1, S. 42–66
- [Hac73] HACKER, Winfried: *Allgemeine Arbeits- und Ingenieurpsychologie. Psychische Struktur und Regulation von Arbeitstätigkeiten*. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1973
- [Hac98] HACKER, Winfried: *Allgemeine Arbeitspsychologie: Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten*. H. Huber, 1998
- [Hac99] *Kapitel Regulation und Struktur von Arbeitstätigkeiten*. In: HACKER, W.: *Arbeits- und Organisationspsychologie*. Psychologie Verlags Union, 1999, S. 385–397
- [Har07] HARDING, Jochen: *Modellierung und mikroskopische Simulation des Autobahnverkehrs*, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Verkehrswesen, Fakultät für Bauingenieurwesen, Diss., 2007
- [HB02] HEISSING, B. ; BRANDL, H. J.: *Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens*. Vogel Buchverlag, Würzburg, 2002
- [HBBR00] HILDRETH, Ellen C. ; BEUSMANS, Jack M. H. ; BOER, Erwin R. ; ROYDEN, Constance S.: From Vision to Action: Experiments and Models of Steering Control during Driving. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 26 (2000), Nr. 3, S. 1106–1132
- [HC86] HUGHES, PK ; COLE, Barry L.: What attracts attention when driving? In: *Ergonomics* 29 (1986), Nr. 3, S. 377–391
- [Hec89] HECKHAUSEN, H.: *Motivation und Handeln*. Springer, 1989
- [Hei16] HEINRICH, Daniel: *Modellierung des Fahrerverhaltens zur Ermittlung von Bauteilbelastungen im Fahrzeugantriebsstrang*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2016

- [Hen04] HENZE, R.: *Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe von Fahrermodellen*, TU Braunschweig, Diss., 2004
- [Hen06] HENNING, Bianca: *Analyse und Vergleich von Muskelmodellen zum Einsatz in der Mehrkörperdynamiksimulation*, TU Darmstadt, Diplomarbeit, 2006
- [Hie11] HIESGEN, Gregor: *Effiziente Entwicklung eines menschenzentrierten Querführungs-assistenzsystems mit einem Fahrsimulator*, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2011
- [Hil38] HILL, Archibald V.: The heat of shortening and the dynamic constants of muscle. In: *Proc. R. Soc. Lond. B* 126 (1938), Nr. 843, S. 136–195
- [HM90] HESS, RA ; MODJTAHEDZADEH, A.: A control theoretic model of driver steering behavior. In: *Control Systems Magazine, IEEE* 10 (1990), Nr. 5, S. 3–8
- [HM94] HOFFMANN, Errol R. ; MORTIMER, Rugolf G.: Drivers' estimates of time to collision. In: *Accident Analysis & Prevention* 26 (1994), Nr. 4, S. 511–520
- [HNL03] HOLLNAGEL, Erik ; NÅBO, Arne ; LAU, I.: A Systemic Model for Driver-in-Control. In: *2nd International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design*, 2003, S. 86–91
- [Hol93] HOLLNAGEL, Erik: Human reliability analysis. In: *Context and control* (1993)
- [Hol94] HOLTE, Hardy: Kenngrößen subjektiver Sicherheitsbewertung. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Mensch und Sicherheit* (1994), Nr. 33
- [Hol02] HOLLNAGEL, Erik: Cognition as control: A pragmatic approach to the modelling of joint cognitive systems. In: *IEEE Journal of Systems, Man and Cybernetics* (2002)
- [Hol12] HOLTE, Hardy: *Einflussfaktoren auf das Fahrverhalten und Unfallrisiko junger Fahrerinnen und Fahrer*, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, Diss., 2012
- [Hri09] HRISTOV, Borislav: *Untersuchung des Blickverhaltens von Kraftfahrern auf Autobahnen*, Technische Universität Dresden, Diss., 2009
- [HS70] HABER, R. ; STANDING, L.: Direct measures of visual short-term visual storage. In: *Quarterly Journal of Experimental Psychology* 21 (1970), S. 216–229
- [Hug88] HUGUENIN, R. D.: Fahrerverhalten im Straßenverkehr. In: *Faktor Mensch im Verkehr* 37 (1988)
- [HY12] HERMANNSTÄDTER, Peter ; YANG, Bin: Identification and validation of lateral driver models on experimentally induced driving behavior. In: *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, 2012, S. 1165–1170
- [Igu59] IGUCHI, M.: A Study of Manual Control. In: *Journal of mechanic Society of Japan* 62 (1959)

- [III15] ITOH, Makoto ; ISHIKAWA, Ryo ; INAGAKI, Toshiyuki: Evaluating Body Movements of a Drowsy Driver with Pressure Distribution Sensors. In: *FAST-zero'15: 3rd International Symposium on Future Active Safety Technology Toward zero traffic accidents, September 9-11, 2015 Gothenburg, Sweden*, 2015, S. 267–272
- [Irm01a] IRMSCHER, M.: Modellierung von Individualität und Motivation im Fahrerverhalten. In: JÜRGENSOHN, Thomas (Hrsg.) ; TIMPE, Klaus-Peter (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*. Springer, 2001, Kapitel Multimodale Benutzung adaptiver Kfz-Bordsysteme, S. 137–154
- [Irm01b] IRMSCHER, Marita: Modellierung und Simulation von Motivationseinflüssen auf das Fahrerverhalten. In: *Fortschritt-Berichte VDI Reihe 22 Nr. 6*. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2001
- [JBGS18] JÜRGENSOHN, Thomas ; BÖHM, Sandra ; GARDAS, Dorota ; STEPHANI, Tilman: Entwicklung der Fahr- und Verkehrskompetenz mit zunehmender Fahrerfahrung. In: *Mensch und Sicherheit Heft M 280*. Bundesanstalt für Straßenwesen, 2018
- [JE00] JONES, Debra G. ; ENDSLEY, Mica R.: Overcoming representational errors in complex environments. In: *Human Factors* 42 (2000), Nr. 3, S. 367–378
- [JJW97] JÜRGENSOHN, T. ; JUNG, R. ; WILLUMEIT, H.-P.: Die Handschrift des Lenkens. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 99 (1997), Nr. 9, S. 216–219
- [JK08] JÜRGENSOHN, T. ; KUPSCHICK, S.: Parametergeregelte Fahrermodelle für Standardmanöver. In: *Fahrermodellierung in Wissenschaft und Wirtschaft* Bd. 28, VDI-Verlag, 2008 (Fortschritt-Berichte VDI 22), S. 15–34
- [JLO89] JOHNSON-LAIRD, Philip N. ; OATLEY, Keith: The language of emotions: An analysis of a semantic field. In: *Cognition and emotion* 3 (1989), Nr. 2, S. 81–123
- [JNW89] JUERGENSOHN, T. ; NECULAU, M. ; WILLUMEIT, H. P.: Visual Scanning Pattern in Curve Negotiation. In: GALE, A. G. et a. (Hrsg.): *Proceedings of the 3rd Vision in Vehicles*, 1989, S. 171–178
- [Jür97] JÜRGENSOHN, T.: *Hybride Fahrermodelle*, Technische Universität Berlin, Diss., 1997
- [Jür01] JÜRGENSOHN, T.: Nichtformale Konstrukte in quantitativen Fahrermodellen. In: JÜRGENSOHN, T. (Hrsg.) ; TIMPE, K. P. (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*. Springer, 2001, S. 95–117
- [Jür07] JÜRGENSOHN, Thomas: Control Theory Models of the Driver. In: CACCIABUE, P. C. (Hrsg.): *Proceedings of the International Workshop on Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments*, 2007, S. 37–42
- [JRV03] JOOS, M. ; RÖTTING, M. ; VELICHKOVSKY, B. M.: Bewegungen des menschlichen Auges: Fakten, Methoden und innovative Anwendungen. In: RICKHEIT, Gert

- (Hrsg.) ; HERRMANN, Theo (Hrsg.) ; DEUTSCH, Werner (Hrsg.): *Psycholinguistik*. de Gruyter Verlag, 2003, S. 142–168
- [JWSD11] JIANG, Wenjuan ; WIT, Carlos C. ; SENAME, Olivier ; DUMON, Jonathan: A new mathematical model for car drivers with spatial preview. In: *18th IFAC World Congress (IFAC WC 2011), August 2011, Milan, Italy*, 2011
- [KA04] KUMAGAI, Toru ; AKAMATSU, Motoyuki: Modeling and Prediction of Driving Behavior. In: *2nd International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions, June 14-16, 2004, Genova, Italy*, 2004, S. 357–361
- [Kah73] KAHNEMAN, Daniel: *Attention and Effort*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1973
- [KB83] KARSH, R. ; BREITENBACH, F. W.: Looking at looking: The amorphous fixation measure. In: GRONER, R. (Hrsg.) ; MENZ, C. (Hrsg.) ; FISHER, D. F. (Hrsg.) ; MONTY, & R. A. (Hrsg.): *Eye movements and psychological functions: International views*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc, 1983, S. 53–64
- [KC06] KEEN, Steven D. ; COLE, David J.: Steering control using model predictive control and multiple internal models. In: *8th Symposium on Advanced Vehicle Control, August 20-24, 2006, Taipei, Taiwan*, 2006, S. 599–604
- [KE17] KLIMKE, Jens ; ECKSTEIN, Lutz: Driver Modelling. In: *Towards a Common Software/Hardware Methodology for Future Advanced Driver Assistance Systems* (2017), S. 45
- [Kee08] KEEN, Steven D.: *Modeling Driver Steering Behavior using Multiple-Model Predictive Control*, University of Cambridge, Diss., 2008
- [KH05] KLEIN, Esther E. ; HERSKOVITZ, Paul J.: Philosophical Foundations of Computer Simulation Validation. In: *Simulation & Gaming* 36 (2005), Nr. 3, S. 303–329
- [KKE15] KLIMKE, Jens ; KLAS, Christoph ; ECKSTEIN, Lutz: Konzept zur Strukturierung eines generischen Fahrermodells anhand des realen Informationsflusses. In: *Fahrermodellierung in Wissenschaft und Wirtschaft* Bd. 36, VDI-Verlag, 2015 (Fortschritt-Berichte VDI 22), S. 43–56
- [Kle82] KLEBELSBERG, Dieter: Analyse des Verkehrsverhaltens. In: *Verkehrspsychologie*. Springer, 1982, S. 23–134
- [KN05] KIENCKE, U. ; NIELSEN, L.: *Automotive Control Design*. Springer, 2005
- [Kön08] KÖNIG, Lars: *Ein virtueller Testfahrer für den querdynamischen Grenzbereich*. expert verlag, 2008
- [KOG98] KLEINDORFER, George B. ; O’NEILL, Liam ; GANESHAN, Ram: Validation in Simulation: Various Positions in the Philosophy of Science. In: *Management Science* 44 (1998), Nr. 8, S. 1087–1099

- [KOK⁺05] KIM, J.H. ; OKUMA, S. ; KIM, Y.W. ; HWANG, D.H. ; KIM, M.H. ; KIM, D.H.: Modeling of Human Driving Behavior Based on Piecewise Linear Model. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE 2005*. (2005), S. 25–30
- [Kon53] KONDO, M.: Directional stability (when steering is added). In: *Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan (JSAE)* 7 (1953), Nr. 5-6
- [KP03] KEMENY, Andras ; PANERAI, Francesco: Evaluating perception in driving simulation experiments. In: *Trends in Cognitive Sciences* 7 (2003), Nr. 1, S. 31–37
- [Kra05] KRAJZEWICZ, Daniel: A Cognitive Driver Model / German Aerospace Centre, Institute for Transportation Research. 2005. – Forschungsbericht
- [Kra11] KRATZSCH, Claudia: *Entwicklung eines Modells zur fahrerzentrierten Beschreibung der Integralen Fahrzeugsicherheit. Fallstudie: Car-to-Car und Car-to-Infrastructure Kommunikation*, Technische Universität Ilmenau, Diss., 2011
- [Kra12] KRAUS, Sven B.: *Fahrverhaltensanalyse zur Parametrierung situationsadaptiver Fahrzeugführungssysteme*, Technische Universität München, Diss., 2012
- [Kru08] KRUMM, John: A Markov Model for Driver Turn Prediction. In: *SAE 2008 World Congress, April 14-17, 2008, Detroit, MI USA*, 2008
- [KSH89] KAYSER, Hans J. ; SANDERS, A. F. ; HESS, M.: Das Wahrnehmungsverhalten des Kraftfahrers in Abhängigkeit von der gefahrenen Geschwindigkeit und der Straßenraumgestaltung. In: *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik* (1989), Nr. 557
- [KT99] KIM, Nam-Gyoon ; TURVEY, M. T.: Eye movements and a rule for perceiving direction of heading. In: *Ecological Psychology* 11 (1999), Nr. 3, S. 233–248
- [Kup59] KUPFMÜLLER, K.: Informationsverarbeitung durch den Menschen. In: *Nachrichtentechnische Zeitschrift* 12 (1959), Nr. 2, S. 68–74
- [Kut13] KUTLUAY, Emir: *Development and Demonstration of a Validation Methodology for Vehicle Lateral Dynamics Simulation Models*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2013
- [KW02] KRAJZEWICZ, Daniel ; WAGNER, Dr. P.: ACME (A Common Mental Environment) - Driver. In: *Proceedings of the 16th European Simulation Multi-conference on Modelling and Simulation*, 2002, S. 689–693
- [KW04] KRAJZEWICZ, D. ; WAGNER, P.: Ansätze zur kognitiven Simulation eines Autofahrers. In: *MMI-Interaktiv* 7 (2004), S. 84–97
- [KYSL00] KUGE, Nobuyuki ; YAMAMURA, Tomohiro ; SHIMOYAMA, Osamu ; LIU, Andrew: A Driver Behavior Recognition Method Based on a Driver Model Framework. In: *SAE transactions* 109 (2000), S. 469–476

- [Lac06] LACHENMAYR, B.: Gesichtsfeld und Verkehr. In: *Der Ophthalmologe* 103 (2006), Nr. 5, S. 373–381
- [Lan01] LAND, M. F.: Does Steering a Car Involve Perception of the Velocity Flow Field? In: ZANKER, J. M. (Hrsg.) ; J. ZEIL (Hrsg.): *Motion Vision – Computational, Neural, and Ecological Constraints*. Springer, 2001, S. 227–235
- [Lan06] LAND, M. F.: Eye movements and the control of actions in everyday life. In: *Progress in retinal and eye research* 25 (2006), Nr. 3, S. 296–324
- [Lap14] LAPPI, Otto: Future path and tangent point models in the visual control of locomotion in curve driving. In: *Journal of vision* 14 (2014), Nr. 12, S. 1–22
- [Laz91] LAZARUS, Richard S.: *Emotion and Adaptation*. Oxford University Press, 1991
- [LBv99] LAPPE, Markus ; BREMMER, Frank ; VAN DEN BERG, A. V.: Perception of self-motion from visual flow. In: *Trends in Cognitive Sciences* 3 (1999), Nr. 9, S. 329–336
- [Lee76] LEE, David N.: A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. In: *Perception* 5 (1976), Nr. 4, S. 437–459
- [Lee80] LEE, David N.: The Optic Flow Field: The Foundation of Vision. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 290 (1980), Nr. 1038, S. 169–179
- [Leo12] LEONTJEW, Aleksej N.: *Tätigkeit–Bewusstsein–Persönlichkeit*. Bd. 40. Lehmanns Media, 2012
- [Leu74] LEUTNER, R.: *Fahrraum und Fahrverhalten*, Technische Hochschule Karlsruhe, Diss., 1974
- [Lew01] LEWIS, Richard: Cognitive Theory, SOAR. In: *International Encyclopedia of the Social and Behavioural Sciences*. Amsterdam: Pergamon (Elsevier Science), 2001
- [Lew14] LEWANDOWITZ, Lars: *Markenspezifische Auswahl, Parametrierung und Gestaltung der Produktgruppe Fahrerassistenzsysteme*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Diss., 2014
- [LFT06] LIU, Yili ; FEYEN, Robert ; TSIMHONI, Omer: Queueing Network-Model Human Processor (QN-MHP): A computational architecture for multitask performance in human-machine systems. In: *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)* 13 (2006), Nr. 1, S. 37–70
- [LGB⁺00] LAPPE, Markus ; GRIGO, Antje ; BREMMER, Frank ; FRENZ, Harald ; BERTIN, Rene J. V. ; ISRAËL, Isabelle: Perception of Heading and Driving Distance from Optic Flow. In: *Proceedings of the Driving Simulation Conference DSC 2000, Paris, France*, 2000, S. 25–31

- [LL94] LAND, M. F. ; LEE, D. N.: Where we look when we steer. In: *Nature* 369 (1994), Nr. 6483, S. 742–744
- [LLR09] LANGLEY, Pat ; LAIRD, John E. ; ROGERS, Seth: Cognitive architectures: Research issues and challenges. In: *Cognitive Systems Research* 10 (2009), Nr. 2, S. 141–160
- [LM01] LAW, Averill M. ; MCCOMAS, Michael G.: How to Build Valid and Credible Simulation Models. In: *Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference* IEEE, 2001, S. 3947
- [LNR87] LAIRD, John E. ; NEWELL, Allen ; ROSENBLOOM, Paul S.: Soar: An architecture for general intelligence. In: *Artificial Intelligence* 33 (1987), Nr. 1, S. 1–64
- [Lon80] LONG, Gerald: Iconic Memory: A Review and Critique of the Study of Short-Term Visual Storage. In: *Psychological Bulletin* 88 (1980), S. 785–820
- [Lor71] LORENZ, Hans: *Trassierung und Gestaltung von Straßen und Autobahnen*. Bauverlag GmbH, Wiesbaden, Berlin, 1971
- [LP98] LIU, Andrew ; PENTLAND, Alex: Towards a Real-time Recognition of Driver Intentions. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC'97*, 1998, S. 236–241
- [LS01] LIU ; SALVUCCI: Modeling and Prediction of Human Driver Behavior. In: *9th International Conference on Human-Computer Interaction, New Orleans, LA, August 2001*, 2001, S. 1479–1483
- [LW03] LIU, Yanfei ; WU, Zhoughui: Urgent Driver Behavior Modeling in Cognitive Architecture. In: *18th ICTCT workshop*, 2003, S. 201–220
- [MA70a] MCKNIGHT, A. J. ; ADAMS, B. B.: Volume I: Task Descriptions. In: *Driver Education Task Analysis*. Human Resources Research Organization, Alexandria, Va., 1970
- [MA70b] MCKNIGHT, A. J. ; ADAMS, B. B.: Volume II: Task Analysis Methods. In: *Driver Education Task Analysis*. Human Resources Research Organization, Alexandria, Va., 1970
- [Mac65] MACKWORTH, Norman H.: Visual noise causes tunnel vision. In: *Psychonomic Science* 3 (1965), Nr. 1-12, S. 67–68
- [Mac76] MACKWORTH, Norman. H.: Stimulus density limits the useful field of view. In: *Eye movements and psychological processes* (1976), S. 307–321
- [Mac01] MACADAM, C.: Development of a Driver Model for Near/At-Limit Vehicle Handling / The University of Michigan, Transportation Research Institute, 290 1 Baxter Road, Ann Arbor, Michigan 48109. 2001. – Final Report
- [Mac03] MACADAM, C.: Understanding and Modeling the Human Driver. In: *Vehicle System Dynamics* 40 (2003), Nr. 1-3, S. 101–134

- [Mai17] MAI, Marcus: *Fahrerverhaltensmodellierung für die prospektive, stochastische Wirksamkeitsbewertung von Fahrerassistenzsystemen der Aktiven Fahrzeugsicherheit*, Technische Universität Dresden, Diss., 2017
- [MC91] MITSCHKE, Manfred ; CHEN, Zhenfu: Der Fahrer als adaptiver Regler. In: *FAT-Schriftenreihe 91*. Forschungsvereinigung Automobiltechnik, 1991
- [McC79] MCCLELLAND, James L.: On the Time Relations of Mental Processes: An Examination of Systems of Processes in Cascade. In: *Psychological review* 86 (1979), Nr. 4, S. 287–330
- [ME08] MÖBUS, C. ; EILERS, M.: First Steps Towards Driver Modelling According to the Bayesian Programming Approach. In: *Symposium Cognitive Modeling. KogWis*, 2008
- [Mes06] MESKEN, Jolieke: *Determinants and Consequences of Drivers' Emotions*, Rijksuniversiteit Groningen, Diss., 2006
- [MEZG09] MÖBUS, Claus ; EILERS, Mark ; ZILINSKI, Malte ; GARBE, Hilke: Mixture of Behaviors in a Bayesian Autonomous Driver Model. In: LICHTENSTEIN, A. (Hrsg.) ; STÖSSEL, C. (Hrsg.) ; CLEMENS, C. (Hrsg.): *Der Mensch im Mittelpunkt technischer Systeme: 8. Berliner Werkstatt – Mensch-Maschine-Systeme*. Düsseldorf : VDI Verlag GmbH, Oktober 2009 (22 29), S. 221–226
- [MG65] MCRUER, D. ; GRAHAM, D.: Human pilot dynamics in compensatory systems. Theory, models and experiments with controlled element and forcing function variations. In: *Wright-Patterson AFB (OH): Air Force Flight Dynamics Laboratory AFFDL-TR 65-15* (1965)
- [MGM⁺01] MEYER, David E. ; GLASS, Jennifer M. ; MUELLER, Shane T. ; SEYMOUR, Travis L. ; KIERAS, David E.: Executive-process interactive control: A unified computational theory for answering 20 questions (and more) about cognitive ageing. In: *European Journal of Cognitive Psychology* 13 (2001), Nr. 1-2, S. 123–164
- [MGP60] MILLER, George A. ; GALANTER, Eugene ; PRIBRAM, Karl H.: *Plans and the structure of behavior*. Holt, Rinehart and Winston, 1960
- [MH71a] MCKNIGHT, A. J. ; HUNDT, A. G.: Volume III: Instructional Objectives. In: *Driver Education Task Analysis*. Human Resources Research Organization, Alexandria, Va., 1971
- [MH71b] MCKNIGHT, A. J. ; HUNDT, A. G.: Volume IV: The Development of Instructional Objectives. In: *Driver Education Task Analysis*. Human Resources Research Organization, Alexandria, Va., 1971
- [Mic63] MICHAELS, RM: Perceptual factors in car-following. In: *Proceedings of 2nd ISTTF (London)* (1963), S. 44–59

- [Mic85] MICHON, J. A.: A Critical View of Driver Behavior Models: What Do We Know, What Should We Do? In: EVANS, L. (Hrsg.) ; SCHWING, R. C. (Hrsg.): *Human behavior and traffic safety*. Plenum Press, 1985, S. 485–520
- [Mil56] MILLER, George A.: The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information. In: *Psychological review* 63 (1956), Nr. 2
- [Mil10] MILIČIĆ, Nataša: *Sichere und ergonomische Nutzung von Head-Up Displays im Fahrzeug*, Technische Universität München, Diss., 2010
- [Miu86] MIURA, T.: Coping with situational demands: A study of eye movements and peripheral vision performance. In: *Vision in Vehicles* 1 (1986), S. 205–216
- [Moo87] MOOK, Douglas G.: *Motivation: The Organization of Action*. Norton, 1987
- [Mut90] MUTHIG, K.-P.: Informationsaufnahme und Informationsverarbeitung. In: HOYOS, C. Graf & B. Z. (Hrsg.): *Ingenieurpsychologie. Enzyklopädie der Psychologie*. Göttingen: Hogrefe, 1990, S. 92–120
- [MWB97] McDONALD, Mike ; WU, Jianping ; BRACKSTONE, Mark: Development of a fuzzy logic based microscopic motorway simulation model. In: *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, ITSC'97*, 1997, S. 82–87
- [ND11] NEUMANN, H. ; DEML, B.: The two-point steering model - new empirical evidence. In: DUFFY, V.G. (Hrsg.): *Digital Human Modeling*. Springer, 2011, S. 493–502
- [NE91] NAGEL, H. ; ENKELMANN, W.: Generic Road Traffic Situations and Driver Support Systems. In: *Proceedings of the 5th PROMETHEUS Workshop*, 1991, S. 76–85
- [Neg07] NEGELE, Hans J.: *Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahrsimulatoren für die Fahrzeugentwicklung*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2007
- [New94] NEWELL, Allen: *Unified theories of cognition*. Harvard University Press, 1994
- [NG79] NAVON, D. ; GOPHER, D.: On the economy of the human processing system. In: *Psychological Review* 86 (1979), S. 214–255
- [Nor83] NORMAN, Donald A.: Some observations on mental models. In: *Mental Models* Bd. 7. Hillsdale,, USA, 1983, S. 7–14
- [NS72] NEWELL, A. ; SIMON, H. A.: *Human Problem Solving*. Prentice Hall, 1972
- [NS74] NÄÄTÄNEN, Risto ; SUMMALA, Heikki: A model for the role of motivational factors in drivers' decision-making. In: *Accident Analysis & Prevention* 6 (1974), Nr. 3-4, S. 243–261
- [NS76] NÄÄTÄNEN, Risto ; SUMMALA, Heikki: Road-user behaviour and traffic accidents. In: *North-Holland Publishing Company* (1976)

- [NS92] NAGEL, Kai ; SCHRECKENBERG, Michael: A cellular automaton model for freeway traffic. In: *Journal de physique I* 2 (1992), Nr. 12, S. 2221–2229
- [OCC90] ORTONY, Andrew ; CLORE, Gerald L. ; COLLINS, Allan: *The cognitive structure of emotions*. Cambridge university press, 1990
- [OED⁺10] OPPENHEIM, Ilit ; ENJALBERT, Simon ; DAHYOT, Rudy ; PICHON, Marianne ; OUEDRAOGO, Abel ; LÜTZHÖFT, Margareta ; CARSTEN, Oliver ; HJÄLMDAHL, Magnus ; CACCIABUE, Carlo u. a.: Description of Unified Model of Driver behaviour (UMD) and definition of key parameters for specific application to different surface transport domains of application / ITERATE Consortium. 2010. – ITERATE deliverable
- [ÖLC⁺06] ÖZKAN, Türker ; LAJUNEN, Timo ; CHLIAOUTAKIS, Joannes E. ; PARKER, Dianne ; SUMMALA, Heikki: Cross-cultural differences in driving skills: A comparison of six countries. In: *Accident Analysis & Prevention* 38 (2006), S. 1011–1018
- [OP00] OLIVER, Nuria ; PENTLAND, Alex P.: Graphical Models for Driver Behavior Recognition in a SmartCar. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2000, S. 7–12
- [OSC⁺10] OPPENHEIM, Ilit ; SHINAR, D. ; CARSTEN, Oliver ; BARNARD, Yvonne ; LAI, Frank ; VANDERHAEGEN, F. ; POLET, P. ; ENJALBERT, S. ; PICHON, M. ; HASSEWINKEL, H. u. a.: Critical review of models and parameters for Driver models in different surface transport systems and in different safety critical situations / ITERATE Consortium. 2010. – ITERATE deliverable
- [OT08] OBERKAMPF, William L. ; TRUCANO, Timothy G.: Verification and Validation Benchmarks. In: *Nuclear engineering and Design* 238 (2008), Nr. 3, S. 716–743
- [Oza99] OZA, N.: Probabilistic Models of Driver Behavior. In: *Proceedings of Spatial Cognition Conference, Berkeley, CA*, 1999
- [PBP07] PANOU, Maria ; BEKIARIS, Evangelos ; PAPAKOSTOPOULOS, Vassilis: Modelling driver behaviour in European Union and international projects. In: *Modelling driver behaviour in automotive environments*. Springer, 2007, S. 3–25
- [PC03] PICK, A. J. ; COLE, D. J.: Neuromuscular dynamics and the vehicle steering task. In: *The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks* 41 (2003), S. 182–191
- [PC06] PICK, A. J. ; COLE, D. J.: Neuromuscular dynamics in the driver-vehicle system. In: *Vehicle System Dynamics* 44 (2006), S. 624–631
- [Pic95] PICARD, Rosalind W.: *Affective Computing*. The MIT Press, 1995
- [Pip53] PIPES, Louis A.: An operational analysis of traffic dynamics. In: *Journal of applied physics* 24 (1953), Nr. 3, S. 274–281

- [PKH03] PERÄÄHO, M. ; KESKINEN, E. ; HATAKKA, M.: Driver competence in a hierarchical perspective; implications for driver education / University of Turku, Traffic Research. 2003. – Report to Swedish Road Administration
- [PKS14] PAPE, Hans-Christian ; KURTZ, Armin ; SILBERNAGL, Stefan: *Physiologie*. Georg Thieme Verlag, 2014
- [Plö07] PLÖCHL, M.: Driver models in automobile dynamics application. In: *Vehicle System Dynamics* 45 (2007), Nr. 7, S. 699–741
- [PMS⁺12] PROKOP, Günther ; MAI, Marcus ; SCHLAG, B. ; WELLER, G. ; GRUBER, C. ; TOMASCH, Ernst ; WIMMER, Peter: Effektivitätsbewertung warnender Fahrerassistenzsysteme durch Fahrerhaltensmodelle. In: 28. VDI-VW-Gemeinschaftstagung *Fahrerassistenz und Integrierte Sicherheit*, VDI Verlag, 2012
- [Pöp97] PÖPPEL, Ernst: *Grenzen des Bewußtseins: Wie kommen wir zur Zeit und wie entsteht Wirklichkeit?* Insel-Verlag, 1997
- [PPK13] PLATHO, Christina ; PIETREK, Anna ; KOLREP, Harald: Erfassung der Fahrermüdigkeit. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Fahrzeugtechnik* (2013), Nr. 89
- [Ran94] RANNEY, Thomas A.: Models of driving behavior: a review of their evolution. In: *Accident Analysis & Prevention* 26 (1994), Nr. 6, S. 733–750
- [Ras82] RASMUSSEN, Jens: Human errors. A taxonomy for describing human malfunction in industrial installations. In: *Journal of occupational accidents* 4 (1982), Nr. 2-4, S. 311–333
- [Ras83] RASMUSSEN, Jens: Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* Bd. 13, IEEE, 1983, S. 257–266
- [Rau09] RAUCH, Nadja: *Ein verhaltensbasiertes Messmodell zur Erfassung von Situationsbewusstsein im Fahrkontext*, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Diss., 2009
- [Rea90] REASON, James: *Human error*. Cambridge university press, 1990
- [Rei83] REID, L. D.: A survey of recent driver steering behavior models suited to accident studies. In: *Accident Analysis & Prevention* 15 (1983), Nr. 1, S. 23–40
- [Rei01] REICHART, G.: *Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen*, Technische Universität München, Diss., 2001
- [Ren01] RENSKI, Andrzej: Identification of Driver Model Parameters. In: *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* 7 (2001), S. 79–92
- [Reu50] REUSCHEL, A.: Fahrzeugbewegungen in der Kolonne. In: *Österreichisches Ingenieur Archiv* 4 (1950), S. 193–215

- [RG99] RANTANEN, Esa M. ; GOLDBERG, Joseph H.: The effect of mental workload on the visual field size and shape. In: *Ergonomics* 42 (1999), Nr. 6, S. 816–834
- [Rib] RIBBECK, Erich: *Subjektiv gesehen objektiv*. <https://www.youtube.com/watch?v=YEhkGZGXXKQY>
- [RL82] RASMUSSEN, Jens ; LIND, Morten: A model of human decision making in complex systems and its use for design of system control strategies. In: *American Control Conference IEEE*, 1982, S. 270–276
- [RM05] RAKOTONIRAINY, Andry ; MAIRE, Frederic D.: Context-Aware Driving Behavioural Model. In: *Proceedings of the 19th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, 2005
- [Rot92] ROTHERY, R. W.: Car following models. In: GARTNER, N. (Hrsg.) ; MESSER, C. J. (Hrsg.) ; RATHI, A. K. (Hrsg.): *Traffic flow theory: A state-of-the-art report*. Transportation Research Board, Special Report, 1992, Kapitel Car following models, S. 1–42
- [RPFR98] REICHLE, Erik D. ; POLLATSEK, Alexander ; FISHER, Donald L. ; RAYNER, Keith: Toward a model of eye movement control in reading. In: *Psychological review* 105 (1998), Nr. 1, S. 125–157
- [RR75] ROHMERT, Walter ; RUTENFRANZ, Joseph: *Arbeitswissenschaftliche Beurteilung der Belastung und Beanspruchung an unterschiedlichen industriellen Arbeitsplätzen*. Der Bundesminister für Arbeit und Sozialordnung, 1975
- [RS40] RIEKERT, P. ; SCHUNCK, T. E.: Zur Fahrmechanik des gummibereiteten Kraftfahrzeugs. In: *Archive of Applied Mechanics* 11 (1940), Nr. 3, S. 210–224
- [RS09] RAKOTONIRAINY, Andry ; STEINHARDT, Dale: In-vehicle Technology Functional Requirements for Older Drivers. In: *Proceedings of the 1st international conference on automotive user interfaces and interactive vehicular applications ACM*, 2009, S. 27–33
- [RSB81] REID, L. D. ; SOLOWKA, E. N. ; BILLING, A. M.: A systematic study of driver steering behaviour. In: *Ergonomics* 24 (1981), Nr. 6, S. 447–462
- [RSJ90] ROSEMAN, Ira J. ; SPINDEL, Martin S. ; JOSE, Paul E.: Cognitive aspects of emotion and emotional behavior. In: *Journal of Personality and Social Psychology* 59 (1990), Nr. 5, S. 899–915
- [Rüh78] RÜHMANN, Heinzpeter: *Untersuchung über den Einfluss der mechanischen Eigenschaften von Bedienelementen auf die Steuerleistung des Menschen bei stochastischen Rollschwingungen*. Dokumentationszentrum d. Bundeswehr, 1978
- [Rus80] RUSSELL, James A.: A circumplex model of affect. In: *Journal of personality and social psychology* 39 (1980), Nr. 6, S. 1161–1178

- [Sac75] SACHSENWEGER, Rudolf: *Neuroophthalmologie*. G. Thieme, 1975
- [SAFA06] SENDLER, J. ; AUGSBURG, K. ; FETTER, R. ; AULER, F.: Analyse des Gewöhnungsverhaltens von Normalfahrern in Bezug auf die Bremspedalcharakteristik. In: *brake.tech 2006, München, 7.-8. Dezember 2006* (2006)
- [Sal01] SALVUCCI, Dario D.: An integrated model of eye movements and visual encoding. In: *Cognitive Systems Research* 1 (2001), Nr. 4, S. 201–220
- [Sal06] SALVUCCI, Dario D.: Modeling driver behavior in a cognitive architecture. In: *Human Factors* 48 (2006), S. 362–380
- [Sar10] SARGENT, Robert G.: Verification and Validation of Simulation Models. In: *Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference* IEEE, 2010, S. 166–183
- [SB93] SCHMIDTKE, Heinz ; BERNOTAT, Rainer: *Ergonomie*. Hanser München, 1993
- [SBL01] SALVUCCI, Dario D. ; BOER, Erwin ; LIU, Andrew: Toward an Integrated Model of Driver Behavior in a Cognitive Architecture. In: *Transportation Research Record* 1779 (2001), S. 9–16
- [SBM00] SEKULER, A. ; BENNETT, P. ; MAMELAK, M.: Effects of aging on the useful field of view. In: *Experimental aging research* 26 (2000), S. 103–120
- [Sch75] SCHMIDT, Richard A.: A schema theory of discrete motor skill learning. In: *Psychological review* 82 (1975), Nr. 4, S. 225–260
- [Sch99] SCHULZE, Horst: Lebensstil, Freizeitstil und Verkehrsverhalten 18-bis 34-jähriger Verkehrsteilnehmer. In: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Unterreihe Mensch und Sicherheit* (1999), Nr. 103
- [Sch02] SCHWEIGERT, Manfred: *Fahrerblickverhalten und Nebenaufgaben*, Technische Universität München, Diss., 2002
- [Sch04] SCHAEFER, Frank R.: *Generalized Feedback Control and Application to Vehicle Path Following Control*, Technische Universität Berlin, Diss., 2004
- [Sch09] SCHNEIDER, Henning: *Modellierung und Erkennung von Fahrsituationen und Fahrmanövern für sicherheitsrelevante Fahrerassistenzsysteme*, Technische Universität Chemnitz, Diss., 2009
- [Sch10] SCHIMMEL, Christian: *Entwicklung eines fahrerbasierten Werkzeugs zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke*, Technische Universität München, Diss., 2010
- [Sch11] SCHREIBER, Michael: *Konzeptionierung und Evaluierung eines Ansatzes zu einer manöverbasierten Fahrzeugführung im Nutzungskontext Autobahnfahrten*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2011

- [Sch12] SCHULZ, Ralph: *Blickverhalten und Orientierung von Kraftfahrern auf Landstraßen*, Technische Universität Dresden, Diss., 2012
- [SCM⁺11] SALEH, Louay ; CHEVREL, Philippe ; MARS, Franck ; LAFAY, Jean-François ; CLAVEAU, Fabien u. a.: Human-like cybernetic driver model for lane keeping. In: *Proceedings of the 18th World Congress of the International Federation of Automatic Control*, 2011, S. 4368–4373
- [SDCP⁺14] SADIGH, Dorsa ; DRIGGS-CAMPBELL, Katherine ; PUGGELLI, Alberto ; LI, Wen-chao ; SHIA, Victor ; BAJCSY, Ruzena ; SANGIOVANNI-VINCENTELLI, Alberto L. ; SASTRY, S. S. ; SESHIA, Sanjit A.: Data-driven probabilistic modeling and verification of human driver behavior. In: *Formal Verification and Modeling in Human-Machine Systems* (2014)
- [SDK⁺08] SCHIEBEN, Anna ; DAMBÖCK, Daniel ; KELSCH, Johann ; RAUSCH, Herbert ; FLEMISCH, Frank: Haptisches Feedback im Spektrum von Fahrerassistenz und Automation. In: *3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz*, 7.-8. April 2008, Garching, 2008
- [SDV00] SONG, Bongsob ; DELORME, Delphine ; VANDERWERF, Joel: Cognitive and hybrid model of human driver. In: *Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium, IV*, 2000, S. 1–6
- [Sei12] SEIDL, M.: *Entwicklung einer Modellstruktur des Fahrerverhaltens für eine bestehende Simulationsumgebung zur Bewertung warnender und empfehlender Fahrerassistenzsysteme*, Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2012
- [SG83] SWAIN, Alan D. ; GUTTMANN, Henry E.: Handbook of human-reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications / Sandia National Labs., Albuquerque, NM (USA). 1983. – Final report
- [SG04] SALVUCCI, Dario D. ; GRAY, R.: A two-point visual control model of steering. In: *Perception* 33 (2004), Nr. 10, S. 1233–1248
- [SHK⁺04] SHIRAISHI, Tomoyoshi ; HANABUSA, Hisatomo ; KUWAHARA, Masao ; CHUNG, Edward ; TANAKA, Shinji ; UENO, Hideki ; OHBA, Yoshikazu ; FURUKAWA, Makoto ; HONDA, Ken ; MARUOKA, Katsuyuki u. a.: Development of a Microscopic Traffic Simulation Model for Interactive Traffic Environment. In: *Proceedings of 11th World Congress on Intelligent Transport Systems and Services (ITSWC 2004)*, Nagoya, Japan, 2004
- [SHN76] SPELKE, E. ; HIRST, W. ; NEISSER, U.: Skills of divided attention. In: *Cognition* 4 (1976), S. 215–230
- [Sie03] SIEDERSBERGER, K.H.: *Komponenten zur automatischen Fahrzeugführung in sehenden (semi-) autonomen Fahrzeugen*, Universität der Bundeswehr München, Diss., 2003

- [Sil12] SILBERNAGL, Stefan: *Taschenatlas Physiologie*. Georg Thieme Verlag, 2012
- [Siv96] SIVAK, Michael: The information that drivers use: is it indeed 90% visual? In: *Perception* 25 (1996), Nr. 9, S. 1081–1089
- [SK06] SCHMIDT, Klaus H. ; KLEINBECK, Uwe: *Führen mit Zielvereinbarung*. Hogrefe Verlag, 2006
- [SL02] SALVUCCI, Dario D. ; LIU, A.: The time course of a lane change: Driver control and eye-movement behavior. In: *Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour* 5 (2002), Nr. 2, S. 123–132
- [SLH07] SCHMIDT, Robert F. ; LANG, Florian ; HECKMANN, Manfred: *Physiologie des Menschen*. Springer, 2007
- [SO11] SHINAR, David ; OPPENHEIM, Ilit: Review of models of Driver Behaviour and development of a Unified Driver Behaviour model for driving in safety critical situations. In: *Human Modelling in Assisted Transportation*. Springer, 2011, S. 215–223
- [Som13] SOMMER, Kerstin C.: *Vorausschauendes Fahren – Erfassung, Beschreibung und Bewertung von Antizipationsleistungen im Straßenverkehr*, Universität Regensburg, Diss., 2013
- [SOTA03] SAKAGUCHI, Yasuo ; OKUWA, Masayuki ; TAKIGUCHI, Kenichiro ; AKAMATSU, Motoyuki: Measuring and Modeling of Driver for Detecting Unusual Behavior for Driving Assistance. In: *Proceedings of 18th International Conference on Enhanced Safety of Vehicles*, 2003
- [SRJ01] SEIFERT, Katharina ; RÖTTING, Matthias ; JUNG, Raphael: Registrierung von Blickbewegungen im Kraftfahrzeug. In: JÜRGENSOHN, Thomas (Hrsg.) ; TIMPE, Klaus-Peter (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*. Springer, 2001, S. 137–154
- [SST89a] SIVAK, Michael ; SOLER, José ; TRÄNKLE, Ulrich: Cross-Cultural Differences in Driver Risk-Perception. In: *Accident Analysis & Prevention* 21 (1989), Nr. 4, S. 355–362
- [SST89b] SIVAK, Michael ; SOLER, José ; TRÄNKLE, Ulrich: Cross-Cultural Differences in Driver Risk-Taking. In: *Accident Analysis & Prevention* 21 (1989), Nr. 4, S. 363–369
- [SST89c] SIVAK, Michael ; SOLER, José ; TRÄNKLE, Ulrich: Cross-Cultural Differences in Driver Self-Assessment. In: *Accident Analysis & Prevention* 21 (1989), Nr. 4, S. 371–375
- [Suk97] SUKTHANKAR, R.: *Situation Awareness for Tactical Driving*, Carnegie Mellon University, Diss., 1997

- [Tay64] TAYLOR, D. H.: Drivers' galvanic skin response and the risk of accident. In: *Ergonomics* 7 (1964), Nr. 4, S. 439–451
- [Tim01] TIMPE, K. P.: Fahrzeugführung: Anmerkungen zum Thema. In: JÜRGENSOHN, T. (Hrsg.) ; TIMPE, K. P. (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*. Springer, 2001, S. 95–117
- [TJK02] TIMPE, K. P. ; JÜRGENSOHN, T. ; KOLREP, H.: *Mensch-Maschine-Systemtechnik. Konzepte, Modellierung, Gestaltung*. symposium, 2002
- [TKBA03] TOLEDO, T. ; KOUTSOPOULOS, H. N. ; BEN-AKIVA, M.: Integrated driving behavior modeling. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 15 (2003), Nr. 2, S. 96–112
- [TL03] TSIMHONI, O. ; LIU, Y.: Modeling Steering Using the Queueing Network – Model Human Processor (QN-MHP). In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* Bd. 47 SAGE Publications, 2003, S. 1875–1879
- [Tod63] TODOSIEV, Ernest P.: *The action point model of the driver-vehicle system*, The Ohio State University, Diss., 1963
- [Tod80] TODA, Masano: Emotion and Decision Making. In: *Acta Psychologica* 45 (1980), Nr. 1–3, S. 133–155
- [Töl96] TÖLLE, Winfried: *Ein Fahrmanöverkonzept für einen maschinellen Kopiloten*, Universität Düsseldorf, Diss., 1996
- [Tom83] TOMASKE, Winfried: *Einfluß der Bewegungsinformation auf das Lenkregelverhalten des Fahrers sowie Folgerungen für die Auslegung von Fahrsimulatoren*, Hochschule der Bundeswehr Hamburg, Diss., 1983
- [Tre99] TRESILIAN, James R.: Visually timed action: time-out for 'tau'? In: *Trends in cognitive sciences* 3 (1999), Nr. 8, S. 301–310
- [Tre07] TREEDE, Rolf-Detlef: Das somatosensorische System. In: SCHMIDT, Robert F. (Hrsg.) ; LANG, Florian (Hrsg.) ; HECKMANN, Manfred (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. Springer, 2007, S. 297–323
- [Tri15] TRIMMEL, Michael: *Einführung in die Psychologie*. Bd. 2. LIT Verlag Münster, 2015
- [TSS13] TOKUTAKE, Hiroshi ; SUGIMOTO, Youichi ; SHIRAKATA, Tetsuro: Real-time identification method of driver model with steering manipulation. In: *Vehicle System Dynamics* 51 (2013), Nr. 1, S. 109–121
- [Tus47] TUSTIN, A.: The Nature of the Operator's Response in Manual Control and its Implications for Controller Design. In: *Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part IIA: Automatic Regulators and Servo Mechanisms* 94 (1947), S. 190–202

- [TVBPC96] TATTEGRAIN-VESTE, Hélène ; BELLET, Thierry ; PAUZIÉ, Annie ; CHAPON, André: Computational driver model in transport engineering: COSMODRIVE. In: *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (1996), Nr. 1550, S. 1–7
- [UCB⁺03] UNDERWOOD, Geoffrey ; CHAPMAN, Peter ; BROCKLEHURST, Neil ; UNDERWOOD, Jean ; CRUNDALL, David: Visual attention while driving: sequences of eye fixations made by experienced and novice drivers. In: *Ergonomics* 46 (2003), Nr. 6, S. 629–646
- [Ull02] ULLEBERG, Pål: *Personality subtypes of young drivers. Relationship to risk-taking preferences, accident involvement, and response to a traffic safety campaign*, Psykologisk institutt, Fakultet for samfunnsvitenskap og teknologiledelse, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU, Trondheim, Diss., 2002
- [Une95] UNEMA, Pieter J. A.: *Eye movements and mental effort*. Shaker Verlag, 1995
- [UP05] UNGOREN, A. Y. ; PENG, H.: An adaptive lateral preview driver model. In: *Vehicle System Dynamics* 43 (2005), Nr. 4, S. 245–259
- [Vaa03] VAA, Truls: Survival or deviance? A model for driver behaviour / Oslo, Institute of Transport Economics. 2003 (TØI report 666/2003). – Final report
- [Vaa05] VAA, Truls: Modelling Driver Behaviour on Basis of Emotions and Feelings: Intelligent Transport Systems and Behavioural Adaptations. In: *Proceedings of the International Workshop on Modelling Driver Behaviour in Automotive Environments*, 2005, S. 53–62
- [Vel96] VELÁSQUEZ, Juan D.: *Cathexis—a computational model for the generation of emotions and their influence in the behavior of autonomous agents*, Massachusetts Institute of Technology, Diss., 1996
- [VK11] VOLLRATH, Mark ; KREMS, Josef: *Verkehrspsychologie. Ein Lehrbuch für Psychologen, Ingenieure und Informatiker*. Kohlhammer, 2011
- [Vol74] VOLPERT, W.: *Handlungsstrukturanalyse als Beitrag zur Qualifikationsforschung*. Pahl-Rugenstein, Köln, 1974
- [Vol83] VOLPERT, Walter: Das Modell der hierarchisch-sequentiellen Handlungsorganisation. In: *Kognitive und motivationale Aspekte der Handlung* (1983), S. 38–58
- [Vol00] VOLZ, H-P: *Kognitive Prozesse – eine Einführung*. Springer, 2000. – 9–49 S.
- [von08] VON VIETINGHOFF, Anne: *Nichtlineare Regelung von Kraftfahrzeugen in querdynamisch kritischen Fahrsituationen*, Universität Karlsruhe, Diss., 2008
- [VRMW78] VOLKMANN, F. C. ; RIGGS, L. A. ; MOORE, R. K. ; WHITE, K. D.: Central and peripheral determinants of saccadic suppression. In: J.W. SENDERS, D. F. Fisher

- & R. A. M. (Hrsg.): *Eye movements and the higher psychological functions*. John Wiley & Sons, 1978, S. 35–53
- [VSP97] VELICHKOVSKY, Boris M. ; SPRENGER, Andreas ; POMPLUN, Marc: Auf dem Weg zur Blickmaus: Die Beeinflussung der Fixationsdauer durch kognitive und kommunikative Aufgaben. In: *Software-Ergonomie*. Vieweg, 1997, S. 317–327
- [VT03] VOLLRATH, Mark ; TOTZKE, Ingo: Möglichkeiten der Nutzung unterschiedlicher Ressourcen für die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion. In: *VDI-Berichte* (2003), S. 47–58
- [VW17] VIEHOF, Michael ; WINNER, Hermann: Stand der Technik und der Wissenschaft: Modellvalidierung im Anwendungsbereich der Fahrdynamiksimulation / Technische Universität Darmstadt. 2017. – resreport
- [WA92] WIERDA, Marcel ; AASMAN, Jans: *Seeing and driving: computation, algorithms and implementation*. Traffic Research Centre, University of Groningen, The Netherlands, 1992
- [WB78] WOLF, James D. ; BARRETT, M. F.: *Driver-vehicle Effectiveness Model*. National Highway Traffic Safety Administration, 1978
- [WBFL03] WINNER, Hermann ; BARTHENHEIER, Thomas ; FECHER, Norbert ; LUH, Steffen: Fahrversuche mit Probanden zur Funktionsbewertung von aktuellen und zukünftigen Fahrerassistenzsystemen. In: *Fahrversuche mit Probanden, Nutzwert und Risiko. Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug. Fortschrittsberichte, VDI Reihe Bd. 12*, 2003, S. 1–25
- [WC05] WU, B. F. ; CHANG, S. M.: Lateral Steering Control System with FWLA Algorithm for FWS Vehicles. In: *Proceedings of 2005 CACS Automatic Control Conference*, 2005
- [WCB02] WALLIS, Guy ; CHATZIASTROS, Astros ; BÜLTHOFF, Heinrich: An Unexpected Role for Visual Feedback in Vehicle Steering Control. In: *Current Biology* 12 (2002), S. 295–299
- [WE92] WIELAND-ECKELMANN, Rainer: Kognition, Emotion und psychische Beanspruchung. In: *Theoretische und empirische Studien zu informationsverarbeitenden Tätigkeiten*. Göttingen: Hogrefe (1992)
- [Wer10] WERLING, M.: *Ein neues Konzept für die Trajektoriengenerierung und -stabilisierung in zeitkritischen Verkehrsszenarien*. KIT Scientific Publishing, 2010
- [WGLL98] WICKENS, Christopher D. ; GORDON, Sallie E. ; LIU, Yili ; LEE, John: *An introduction to human factors engineering*. Longman New York, 1998
- [WH00] WICKENS, Christopher D. ; HOLLANDS, Justin G.: *Engineering psychology & human performance*. Prentice-Hall, 2000

- [Wic02] WICKENS, Christopher D.: Multiple resources and performance prediction. In: *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 3 (2002), Nr. 2, S. 159–177
- [Wic08] WICKENS, Christopher D.: Multiple resources and mental workload. In: *Human factors* 50 (2008), Nr. 3, S. 449–455
- [Wie74] WIEDEMANN, R.: Simulation des Straßenverkehrsflusses. In: *Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe, Schriftenreihe des IfV* 8 (1974)
- [Wil82] WILDE, Gerald J. S.: The theory of risk homeostasis: implications for safety and health. In: *Risk analysis* 2 (1982), Nr. 4, S. 209–225
- [Win15] WINNER, Hermann: Quo vadis, FAS? In: WINNER, Hermann (Hrsg.) ; HAKULI, Stephan (Hrsg.) ; LOTZ, Felix (Hrsg.) ; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*. Springer Vieweg, 2015, S. 1167–1185
- [WJ97] WILLUMEIT, H.-P. ; JÜRGENSOHN, T.: Fahrermodelle – ein kritischer Überblick. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 99 (1997), Nr. 9, S. 424–428
- [WL00] WANN, J. ; LAND, M.: Steering with or without the flow: is the retrieval of heading necessary? In: *Trends in cognitive sciences* 4 (2000), Nr. 8, S. 319–324
- [WM70] WEIR, D. H. ; MCRUER, D. T.: Dynamics of Driver Vehicle Steering Control. In: *Automatica* 6 (1970), S. 87–98
- [Wol09] WOLF, Hagen J.: *Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls an Personenkraftwagen*, Technische Universität München, Diss., 2009
- [WP05] WEGSCHWEIDER, M. ; PROKOP, Günther: Modellbasierte Komfortbewertung von Fahrerassistenzsystemen. In: *VDI-Berichte* (2005), Nr. 1900
- [WS00] WANN, John P. ; SWAPP, David K.: Why you should look where you are going. In: *Nature neuroscience* 3 (2000), Nr. 7, S. 647–648
- [WW03] WILKIE, Richard ; WANN, John: Controlling Steering and Judging Heading: Retinal Flow, Visual Direction, and Extraretinal Information. In: *Journal of Experimental Psychology* 29 (2003), Nr. 2, S. 363–378
- [WWPK17] WITT, M. ; WANG, L. ; PROKOP, G. ; KOMPASS, K.: Kognitive Fahrerverhaltensmodellierung in der virtuellen Bewertung von Fahrerassistenzsystemen unter Berücksichtigung der Ausprägungen menschlichen Fahrens. In: *8. Tagung Fahrerassistenz, München, 2017*
- [WXC14] WANG, Wenshuo ; XI, Junqiang ; CHEN, Huiyan: Modeling and Recognizing Driver Behavior Based on Driving Data: A Survey. In: *Mathematical Problems in Engineering* (2014)
- [YK96] YANG, Qi ; KOUTSOPOULOS, Haris N.: A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. In: *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 4 (1996), Nr. 3, S. 113–129

- [YS75] YOUNG, Laurence R. ; SHEENA, David: Survey of eye movement recording methods. In: *Behavior research methods & instrumentation* 7 (1975), Nr. 5, S. 397–429
- [Zen07] ZENNER, Hans-Peter: Der Gleichgewichtssinn und die Bewegungs- und Lageempfindung des Menschen. In: SCHMIDT, Robert F. (Hrsg.) ; LANG, Florian (Hrsg.) ; HECKMANN, Manfred (Hrsg.): *Physiologie des Menschen*. Springer, 2007, S. 297–323
- [ZFB⁺99] ZAPF, Dieter ; FRESE, Michael ; BRODBECK, Felix C. ; HOYOS, C G. ; FREY, D ; STAHLBERG, D: Fehler und Fehlermanagement. In: *Arbeits-und Organisationspsychologie* (1999)
- [Zim92] ZIMBARDO, Philip G. ; HOPPE-GRAFF, Siegfried (Hrsg.) ; KELLER, Barbara (Hrsg.): *Psychologie*. Springer, 1992
- [Zim01] ZIMMER, Alf: Wie intelligent darf/muss ein Auto sein? Anmerkungen aus ingenieurpsychologischer Sicht. In: JÜRGENSOHN, Thomas (Hrsg.) ; TIMPE, Klaus-Peter (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*. Springer, 2001, Kapitel Multimodale Benutzung adaptiver Kfz-Bordsysteme, S. 137–154
- [Zöl15] ZÖLLER, Ilka M.: *Analyse des Einflusses ausgewählter Gestaltungsparameter einer Fahrsimulation auf die Fahrerhaltensvalidität*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2015
- [Zuc94] ZUCKERMAN, Marvin: *Behavioral expressions and biosocial bases of sensation seeking*. Cambridge university press, 1994