



Martin Wimmer

---

# Entwicklung und Erprobung von Mensch-Maschine- Systemen zur automatisierten Fahrzeugführung



Audi-Dissertationsreihe, Band 95





**Universität der Bundeswehr**  
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik  
Institut für Arbeitswissenschaft

Entwicklung und Erprobung von Mensch-Maschine-Systemen  
zur automatisierten Fahrzeugführung

Dipl.-Ing. Martin Wimmer

Vollständiger Abdruck der bei der  
Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik  
der Universität der Bundeswehr München  
zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. H.-J. Gudladt
1. Gutachter:	Prof. Dr. B. Färber
2. Gutachter:	Prof. Dr. H. Bubb

Diese Dissertation wurde am 21.10.2013 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik am 13.11.2013 angenommen.

Tag der Prüfung: 07.02.2014



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

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

1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2014

Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2014

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2014  
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen  
Telefon: 0551-54724-0  
Telefax: 0551-54724-21  
[www.cuvillier.de](http://www.cuvillier.de)

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

1. Auflage, 2014

Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-95404-698-0

eISBN 978-3-7369-4698-9



# Danksagung

Ich bedanke mich herzlichst bei allen Weggefährten für die außergewöhnliche Unterstützung in meiner Zeit als Doktorand der AUDI AG und des Instituts für Arbeitswissenschaft der Universität der Bundeswehr München.

Meinem Doktorvater und Erstgutachter Prof. Dr. Berthold Färber danke ich von Herzen für seine hervorragende Betreuung in unvergesslichen, intensiven Jahren als sein „größter“ Doktorand. Ich bedanke mich für inspirierende Gespräche, richtungsweisende Diskussionen, seine Geduld und Freundlichkeit, kreativen Freiraum sowie die notwendige Entschleunigung in turbulenten Zeiten.

Mein besonderer Dank geht an Prof. Dr. Hans-Joachim Gudladt für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie an Prof. Dr. Heiner Bubb für die Erstellung des Zweitgutachtens. Professor Bubb hat mein Hochschulstudium durch seine Freundlichkeit und begeisterte Lehre maßgeblich beeinflusst und meine akademische Laufbahn nachhaltig geprägt. Hierfür bedanke ich mich herzlich.

Meinem einzigartigen Betreuer-Quartett der AUDI AG Dr. Heike Sacher, Dr. Karl-Heinz Siedersberger, Dr. Christian Mergl und Dr. Dirk Blaese danke ich von Herzen für die perfekte Betreuung meiner Arbeit und nicht zuletzt für uneingeschränkten menschlichen und fachlichen Beistand während meines Doktorandenlebens.

Meinen Kollegen der Abteilung „Entwicklung Ergonomiekonzepte“, insbesondere den Mitgliedern unseres HMI FAS Teams gilt mein herzlicher Dank für die fortwährende und unverzichtbare Unterstützung während unserer gemeinsamen Jahre. Jürgen Meurle danke ich unter anderem für anregende Diskussionen und für die vertrauensvolle Aufnahme in sein Team. Den Mitarbeitern unseres unvergleichlichen Projekthauses „Fahrerassistenzsysteme“ und der Abteilung „Entwicklung Fahrerassistenzsysteme“ bin ich ebenfalls zu großem Dank verpflichtet. Ich danke insbesondere Waldemar Winter für seine Rolle als „Integratives Element“ des Projekthauses, sowie Stefan Sandig, Alexander Breu, Patrick Täuber und Dr. Michael Reichel für zahlreiche Überstunden in unserem Versuchsträger. Des Weiteren bedanke ich mich bei Martin Frank, Edgar Schwarzmann, Markus Trampisch und Hubert Denkmaier für Ihren unermüdlichen und kreativen Einsatz, auch stellvertretend für Ihre Kollegen.

Den Mitarbeitern des Instituts für Arbeitswissenschaft der Universität der Bundeswehr Ines Karl, Jun.-Prof. Verena Nitzsch, Dr. Brigitte Färber, Markus Sieber, Fabian Rüger, Prof. Dr. Michael Popp und meinem „Spezi“ Guy Berg danke ich herzlichst für ihre vielfältige Unterstützung und eine unvergessliche Zeit.

Meinen Studenten Lucas Bahle, Stephan Engert, Anton Hundsdorfer, Fabian Scheiffert, Franziska Ehrhart, Christoph Wagner, Martin Albert, Florian Bissbort, Felix Schramm, Sarah und Michael Kiehm, Stefan Matzka, Jan Gerecke und Stefan Herrmann danke ich für unermüdlichen, außerordentlichen und in jeder Hinsicht unverzichtbaren Einsatz sowie für eine einzigartige gemeinsame Zeit. Alle haben maßgeblich zum guten Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Schließlich danke ich von tiefstem Herzen meiner Familie und meinen Freunden. Danke für Geduld, für motivierende Worte und Ereignisse und für uneingeschränkte Unterstützung in allen Lebenslagen.

Meiner Liebe Julia: Danke, für Alles!





# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Einführung . . . . .	1
1.2	Ziel der Arbeit . . . . .	2
1.3	Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Ergonomische Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1	Systemergonomische Grundlagen . . . . .	5
2.1.1	Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Regelkreis . . . . .	6
2.1.2	Fahrerassistenzsysteme im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis . . . . .	22
2.2	Anthropometrische Grundlagen . . . . .	29
2.2.1	Physiologische Rahmenbedingungen . . . . .	29
2.2.2	Gestalterische Grundsätze . . . . .	31
2.3	Stand der Technik . . . . .	33
2.3.1	Fahrerassistenzsysteme der Bahnführungsebene . . . . .	33
2.3.2	Fahrerbeobachtung . . . . .	40
2.3.3	Interaktionskonzepte . . . . .	42
2.4	Resultierende Anforderungen an ein zukünftiges HMI-Konzept für Fahrerassistenzsysteme	49
2.4.1	Auslegungsprämissen der Mensch-Maschine-Interaktion . . . . .	50
2.4.2	Anforderungsliste . . . . .	55
<b>3</b>	<b>Konzepte</b>	<b>59</b>
3.1	Definition des Automationsspektrums . . . . .	59
3.1.1	Automationsmodi . . . . .	60
3.1.2	Modustransitionen . . . . .	65
3.1.3	Zusammenfassung Automationsspektrum . . . . .	66
3.2	Konzeptentwicklung Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzept "Potentialtrigger" . . . . .	67
3.2.1	Fahrerzustand im Modus VA . . . . .	67
3.2.2	Kombinierter Ansatz zur Fahrerzustandsbestimmung . . . . .	72
3.2.3	„Potentialtrigger“ . . . . .	74
3.2.4	Umsetzung des Potentialtriggers . . . . .	75
3.2.5	Zusammenfassung Potentialtrigger . . . . .	81
3.3	Konzeptentwicklung Bedienung Fahrerassistenzsysteme . . . . .	81
3.3.1	Bedienkonzept des definierten Automationsspektrums . . . . .	82
3.3.2	Reduzierte Konzepte . . . . .	89
3.3.3	Integrative Konzepte . . . . .	93
3.3.4	Aufgeteilte Konzepte . . . . .	104
3.3.5	Zusammenfassung Bedienkonzepte . . . . .	110
3.4	Konzeptauswahl . . . . .	111





3.4.1	Bewertung der Konzepte . . . . .	111
3.4.2	Methodischer Konzeptentscheid . . . . .	116
<b>4</b>	<b>Technische Umsetzung</b>	<b>121</b>
4.1	Versuchsträger . . . . .	121
4.2	Automationspektrum . . . . .	123
4.2.1	Modi MF und TA . . . . .	123
4.2.2	Modus VA . . . . .	124
4.2.3	Modus AUTON . . . . .	127
4.3	Bedienelemente . . . . .	127
4.3.1	Studie zur Auslegung integrativer Stellelemente . . . . .	127
4.3.2	Technische Umsetzung der Bedienelemente . . . . .	131
4.4	Integration des Gesamtsystems . . . . .	146
4.4.1	Framework ADTF . . . . .	146
4.4.2	Subsysteme . . . . .	147
<b>5</b>	<b>Evaluierung der Konzepte</b>	<b>151</b>
5.1	Evaluierungsstudie Potentialtrigger . . . . .	151
5.1.1	Versuchsziele . . . . .	151
5.1.2	Versuchsaufbau . . . . .	152
5.1.3	Ergebnisse . . . . .	160
5.1.4	Diskussion . . . . .	165
5.2	Evaluierungsstudie Bedienkonzepte . . . . .	167
5.2.1	Versuchsziele . . . . .	168
5.2.2	Versuchsaufbau . . . . .	168
5.2.3	Ergebnisse . . . . .	172
5.2.4	Diskussion . . . . .	180
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>187</b>
<b>Anhang</b>		<b>191</b>
	Anhang A: Fragebögen Potentialtrigger- und Bedienelementestudie . . . . .	192
	Anhang B: Coverstories Potentialtrigger- und Bedienelemente-Studie . . . . .	214
	Anhang C: Ergebnistabelle Evaluierungsstudie Bedienelemente . . . . .	218
	Anhang D: Anzeigekonzepte für die Elemente DDS und HBA . . . . .	224
	Anhang E: Vernetzung des Gesamtsystems des Versuchsträgers . . . . .	226
	Anhang F: Situationsbeschreibung Vorstudie . . . . .	228
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>231</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>233</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>235</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung

Anfang des 19. Jahrhunderts werden in England weltweit zum ersten Mal Passagiere mit Hilfe dampfbetriebener Lokomotiven auf Schienen transportiert (vgl. u.a. [97]). Zu Beginn des 20. Jahrhunderts unternehmen die Gebrüder Wright die ersten erfolgreichen verbrennungsmotorisch angetriebenen Flugversuche. In der Konsequenz erfolgt 1929 Charles' Lindbergs erster non-stop Soloflug über den Atlantik (siehe z.B. [27]). Die Ereignisse stehen exemplarisch als wegweisende Meilensteine überproportional wachsender intra- und interkultureller Möglichkeiten der Mobilität. Sie sind zu ihrer Zeit Symbole und zugleich Startschuss für weitreichende Veränderungen des menschlichen Mobilitätsverhaltens.

Ein vergleichbar großes Ereignis für das Mobilitätsempfinden der Menschen der industrialisierten Welt ist die erste Ausfahrt von Carl Benz in seinem *Benz Patent-Motorwagen Nummer 1* im Jahr 1886 (vgl. z.B. [71]). Die Grundidee des (verbrennungs-)motorischen Antriebs von Bodenfahrzeugen ist die Basis für die heutige Grundform des modernen Straßenverkehrs. Der US-amerikanische Fahrzeughersteller Ford beginnt im Jahr 1913 die Fließband-Produktion der legendären *Tin Lizzy* (Modell T) (siehe u.a. [34]). Die bis dahin weltweit einzigartige Serienfertigung eines Kraftfahrzeugs verändert das Verhältnis der Menschen zu motorgetriebenen Bodenfahrzeugen nachhaltig: individuelle Mobilität ist nicht länger ein elitäres, sondern ein allgemein verfügbares und für die breite Masse zugängliches Gut. Auf Basis der Nutzung seines Automobils ist der Mensch fortan in der Lage, sein Mobilitätsverhalten nicht nur in Abhängigkeit von öffentlichen Verkehrsmitteln wie Schiffen oder Zügen zu gestalten. Er gestaltet seine Wege und Reisen gemäß seinen eigenen Präferenzen und Plänen. Das Streben nach uneingeschränkter und selbstbestimmter Bewegungsfreiheit verkörpert eine zentrale Eigenschaft des modernen Menschen. Entsprechend hoch ist der Stellenwert des Automobils in der heutigen Gesellschaft.

Seit nunmehr 125 Jahren im Fokus intensiver Entwicklungsarbeit stehend, entsprechen moderne Personenkraftwagen im Kern weiterhin dem Konzept von Carl Benz' Patent-Motorwagen. Zum Antrieb eines Kraftfahrzeugs wird fossile oder auch zunehmend elektrische Energie in - unter anderem - mechanische Energie umgewandelt. Das Getriebe ermöglicht die Wandlung dieser mechanischen in kinetische Energie. Diese beschreibt den längs- und querdynamischen Zustand des Fahrzeugs. Neben den technischen Fortschritten in Bereichen wie der Fahrwerkstechnik, der Antriebstechnik oder der Werkstoffkunde repräsentiert die Optimierung der Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation einen weiteren zentralen Baustein der Forschung und Entwicklung in der Fahrzeugtechnik.

Die zentrale Rolle des Fahrers ist seit jeher die Steuerung und die Kontrolle des fahrdynamischen Zustands des Fahrzeugs nach seinen Wünschen. Mit dem übergeordneten Reiseziel als Navigationsvorgabe versucht der Fahrer, durch die Manipulation der etablierten Stellteile Lenkrad, Pedalerie und Schalthebel einen fahrdynamisch sicheren Zustand und das kollisionsfreie Manövrieren des Fahrzeugs innerhalb seiner unmittelbaren Umgebung zu gewährleisten. Entsprechend der aktuellen Gesetzgebung muss der Fahrer jederzeit die Kontrolle über das Fahrzeug innehaben (siehe [115]).

Mit zunehmendem technischen Fortschritt werden Automaten entwickelt, die den Fahrer bei der Ausführung der Fahraufgabe auf unterschiedliche Weise unterstützen. Neben der *sicherheitsorientierten* Unterstützung hochfrequenter Stabilisierungstätigkeiten (z.B. das Anti-Blockier-System (ABS)) sind *komfortorientierte* Fahrerassistenzsysteme (FAS) in der Lage, die Fahrzeugführung zur Komfortsteigerung und zur Entlastung des Fahrers teilweise oder komplett zu automatisieren. Stand der Technik sind *teilautomatisierte* FAS wie *Adaptive Cruise Control* mit *Stop&Go*-Funktionalität (ACC S&G) zur Automation der Längsführung oder *Lane Keeping Assistance Systeme (LKAS)* zur aktiven Unterstützung der Querverführung. Diese Systeme automatisieren Teilaufgaben der Fahrzeugführung. Aktuell werden Systeme entwickelt, die dem Fahrer die Fahraufgabe vollständig abnehmen können: bei der Nutzung dieser *vollautomatisierten* Systeme erfolgt keine Fahrer-Fahrzeug-Interaktion über die herkömmlichen Bedienelemente. Visionäres Ziel dieser Entwicklung von Komfortsystemen der Fahrerassistenz ist die Umsetzung *autonom*er Funktionen. Mögliche Einstiegsfunktionen des autonomen Fahrens sind Systeme für Park- oder Stausituationen. Diese müssen - im Gegensatz zu vollautomatisierten Systemen - über eine autonome Rückfallebene verfügen. Die Rückfallebene ist dafür verantwortlich, das Fahrzeug beim Überschreiten von Systemgrenzen selbstständig in einen *sicheren Zustand* zu überführen.

Die notwendige Interaktion mit den Standard-Bedienelementen zur Fahrzeugführung wird entsprechend der funktionalen Kompetenz dieser Assistenzsysteme verändert bzw. reduziert. Die zukünftigen Formen der Interaktion mit diesen Automaten, d.h. das zugrundeliegende, generische Bedienprinzip sowie die konkrete Ausgestaltung und Form neuartiger Betätigungselemente sind ein weitgehend offenes Feld. Diese Themen werden auch in Zukunft Bestandteil intensiver Entwicklungsarbeiten sein. Die Rolle des Fahrers im Verbund mit Fahrzeug und Umwelt wird sich mit zunehmender Systemverfügbarkeit innerhalb der Automationsstufen weiter verändern. Diese Veränderungen müssen für eine nutzerzentrierte Entwicklung des Mensch-Maschine-Systems antizipiert und sinnvoll unterstützt werden.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Die Automatisierung der Fahrzeugführung bringt neben vielen Risiken auch entsprechende Chancen für die Entwickler. Neben der funktionalen Weiterentwicklung der Assistenzfunktionen und des Ausbaus der sensorischen Umfeldwahrnehmung besteht immenses Entwicklungspotential hinsichtlich der *nutzerzentrierten* Gestaltung eines zukünftigen Mensch-Maschine-Systems.

Zentrales Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Mensch-Maschine-Systems zur automatisierten Fahrzeugführung mit dem Fokus der Entwicklung eines konsistenten und durchgängigen Bedien- und Anzeigekonzepts für Fahrerassistenzsysteme der Fahrzeugführungsebene.

Existierende teilautomatisierte Systeme werden in kommenden Fahrzeuggenerationen voraussichtlich durch vollautomatisierte (Zusatz-)Funktionen erweitert oder ersetzt. Auch die Darstellung autonomer Systeme ist aus funktionaler Sicht in mittelbarer Zukunft denkbar. Eine entsprechend große Systemvielfalt und in der Konsequenz große Systemkomplexität erwartet die Autofahrer der Zukunft.

Anliegen des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Bedienkonzepts ist die Sicherstellung der Handhabbarkeit dieser Komplexität. Eine hohe anthropometrische und systemergonomische Bediengüte wird angestrebt, zusätzlich steht die transparente Kommunikation des aktuell gewählten Automationsgrades im Fokus. Eine spezielle Herausforderung an ein Bedienkonzept der Teil- und Vollautomation besteht darin, den Fahrer trotz Übernahme der Fahraufgabe durch Automaten durch die Gestaltung der Bedienung und Anzeige als Überwacher und Rückfallebene des Systems verfügbar zu halten. Gleichzeitig soll die Systembedienung die Möglichkeit bieten, durch die Assistenz freiwerdende kognitive und physische

Kapazitäten sinnfälliger auf andere Tätigkeiten zu verteilen. Ein autonomes System ermöglicht dem Fahrer durch die autonome Rückfallebene, sich vollständig von der Fahraufgabe zurückzuziehen und sich mit alternativen Inhalten zu beschäftigen. Die neuartigen Bedienkonzepte deuten zusätzlich Möglichkeiten zur alternativen Gestaltung und Erweiterung des Fahrzeuginnenraums an.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Kapitel 2 dieser Arbeit beschreibt die systemergonomischen und anthropometrischen Grundlagen der Entwicklung eines Mensch-Maschine-Systems im Kontext der automatisierten Fahrzeugführung. Zusätzlich wird der Stand der Technik zu relevanten Fahrerassistenzsystemen, Fahrerbeobachtung und Interaktionskonzepten aus anderen technischen Disziplinen erläutert. Abschließend werden auf Basis der dargestellten Grundlagen Anforderungen für die Gestaltung einer zukünftigen Mensch-Maschine-Schnittstelle abgeleitet.

Kapitel 3 präsentiert das auf Basis der Anforderungsanalyse entwickelte Konzept zur Gestaltung des Automationsspektrums. Ein Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzept zur Handhabung der spezifischen Anforderungen der vollautomatisierten Fahrt wird vorgestellt. Zur Bedienung des gesamten Automationsspektrums werden ein generisches Bedienprinzip und konkrete technische Umsetzungen entwickelt und diskutiert. Die Bedienkonzepte werden analysiert und hinsichtlich ihres zukünftigen Potentials bewertet. Drei Konzepte mit großem Potential werden auf Basis dieser Bewertung technisch umgesetzt.

Kapitel 4 umfasst den Aufbau und die Integration der drei Prototypen in ein Erprobungsfahrzeug. Mit Hilfe des Versuchsträgers wird das beschriebene Automationsspektrum in verschiedenen Ausprägungen im Realfahrzeug umgesetzt. Das Fahrzeug und die Aufbauten dienen als Grundlage einer Evaluation der entwickelten Konzepte im Rahmen von Probandenstudien.

Kapitel 5 beschreibt die Planung, die Durchführung und die Ergebnisse zweier experimenteller Fahrversuche zur Evaluierung der umgesetzten Konzepte. Im ersten Fahrversuch wird das Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzept für die vollautomatisierte Fahrt erprobt. Im zweiten Fahrversuch werden die prototypischen Bedienkonzepte des Automationsspektrums bewertet und verglichen.

Im abschließenden Kapitel 6 werden die Ergebnisse zusammengefasst. Anhand der entwickelten Konzepte und der Ergebnisse ihrer realitätsnahen Evaluierung wird ein Ausblick auf weiterführende Entwicklungsschwerpunkte der Mensch-Maschine-Interaktion im Kontext der automatisierten Fahrzeugführung diskutiert.



## 2 Ergonomische Grundlagen und Stand der Technik

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines neuartigen Mensch-Maschine-Systems im Kontext aktueller Entwicklungen auf dem Gebiet der automatisierten Fahrzeugführung. Die Entwicklung eines neuartigen Bedienkonzepts für Fahrerassistenzsysteme (FAS) erfolgt mit dem Ziel einer optimierten Gestaltung des Informationsflusses im Mensch-Maschine-System. Der Optimierungsprozess erfolgt auf Basis einer zielgerichteten Gestaltung dieses Systems und einer Anpassung seiner einzelnen Bestandteile. Dies erfordert eine sorgfältige und detaillierte Analyse der Aufgabe, der ausführenden Elemente und der Rahmenbedingungen der Aufgabenerfüllung. Zu Beginn werden in Kapitel 2.1 die relevanten systemergonomischen Grundlagen betrachtet. Die grundlegenden Eigenschaften und Merkmale der einzelnen Elemente des allgemeinen Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Regelkreises werden im Kontext der Fahrzeugführung beschrieben. Als gesonderter Aspekt wird die Integration von Fahrerassistenzsystemen als weiteres Element des Regelkreises dargestellt. Kapitel 2.2 beschreibt die Grundlagen einer planmäßigen Entwicklung und Anpassung der Mensch-Maschine-Schnittstelle an die anatomischen Merkmale einzelner Nutzerpopulationen. Der Stand der Technik (Kapitel 2.3) detailliert relevante Fahrerassistenzsysteme der Bahnführungsebene, erläutert verschiedene Möglichkeiten zur Fahrerzustandsermittlung und behandelt themenübergreifende Interaktionskonzepte aus unterschiedlichen Disziplinen. Abschließend spezifiziert Kapitel 2.4 die Grundlagen der *HMI-Gestaltung (Human-Machine-Interface)* anhand konkreter Prämissen für die Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle für den Anwendungsfall der automatisierten Fahrzeugführung. Die Vorgaben werden als Hilfsmittel zur nachgelagerten Entwicklung (Kapitel 3) des Mensch-Maschine-Systems in einer Anforderungsliste zusammengefasst.

### 2.1 Systemergonomische Grundlagen

Dieser Abschnitt beschreibt die systemergonomischen Grundlagen zur Bedienung von Fahrerassistenzsystemen. Die Grundlage einer effektiven und zweckmäßigen Gestaltung neuartiger Systemstrukturen und Kommunikationsstrategien von Mensch und Maschine bildet die Analyse und Beschreibung der Elemente des in Abbildung 2.1 dargestellten allgemeinen Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Regelkreises (Abschnitt 2.1.1). Für den Anwendungsfall der automatisierten Fahrzeugführung ergeben sich inhaltliche und strukturelle Veränderungen der Systemstruktur dieses Regelkreises, diese Aspekte werden in Abschnitt 2.1.2 detailliert.

Eine Vielzahl der in Kapitel 2.1 beschriebenen Grundlagen zur Systemergonomie ist Beiträgen aus [106] entnommen. Auf die relevanten Kapitel dieses Buches wird in den einzelnen Abschnitten gesondert verwiesen.

### 2.1.1 Mensch-Maschine-Interaktion im Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Regelkreis

Ein Mensch-Maschine-System bezeichnet nach [65] die zweckmäßige Abstraktion eines zielgerichteten Informationsaustausches von Menschen mit technischen Systemen. Dieser Informationsaustausch dient der Erfüllung eines selbst- oder fremdgestellten Auftrages innerhalb festgelegter Grenzen. Im Kontext der Fahrzeugführung besteht dieser Auftrag in der zweckgebundenen Erfüllung der Fahraufgabe. Zur Beschreibung dieses Mensch-Maschine-Systems ist neben der Bewertung der Interaktionen zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umgebung eine Analyse der ergonomischen Gestaltung des Informationsaustausches zwischen den Systemen notwendig. Zudem erfolgt eine konkrete Definition der Fahraufgabe und des Fahrzwecks. Zusätzlich zur aktuellen Verkehrssituation schließt dies die Kenntnis der allgemeinen und aktuell verfügbaren individuellen Dispositionen des Fahrers mit ein. Diese ergeben sich aus grundlegenden Gesetzmäßigkeiten im Wahrnehmungs-, Informationsverarbeitungs- und Informationsumsetzungsprozess des Menschen, sowie aus seinem aktuellen Zustand innerhalb des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises. (vgl. [65])

Die vielfältigen Beziehungen zwischen Fahrer und Fahrzeug sowie deren Wechselwirkungen mit der Umwelt sind im regelungstechnischen Sinn anhand des allgemeinen Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Regelkreises beschrieben. Die Struktur wird in der vorliegenden Arbeit in Übereinstimmung der Literatur zu dem Thema vereinfacht als Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis umschrieben. Die einzelnen Komponenten dieses Regelkreises und ihre Beziehungen illustriert Abbildung 2.1. Die *Fahraufgabe* dient als Eingangsgröße der Regelung. Sie beschreibt das Bestreben des Fahrers, sein Fahrzeug innerhalb eines vorgegebenen Zeitfensters auf einer bestimmten Route kollisionsfrei vom aktuellen Ort zum Zielort zu bewegen. Ausgangsgröße des Regelkreises ist der *Erfüllungsgrad der Fahraufgabe*. Auf Basis eines Abgleichs der Ein- und Ausgangsgrößen ist es die Aufgabe des Reglers *Fahrer* die Regelstrecke *Fahrzeug* mittels der gegebenen Bedienelemente nach seinen Wünschen zu beeinflussen. *Umwelteinflüsse* (z.B. Seitenwind) wirken als Störfaktoren auf den Menschen, auf das Fahrzeug sowie den Informationsfluss zwischen Fahrer und Fahrzeug. Über die an der Fahraufgabe beteiligten Sinneskanäle nimmt der Fahrer die relevanten Parameter der Fahrzeugumgebung wahr. Neben der Dynamik sensiert der Fahrer die Lage und Orientierung des eigenen Fahrzeugs (*Egofahrzeug*) in Relation zu den umgebenden statischen und dynamischen Objekten. (vgl. [11], [73])

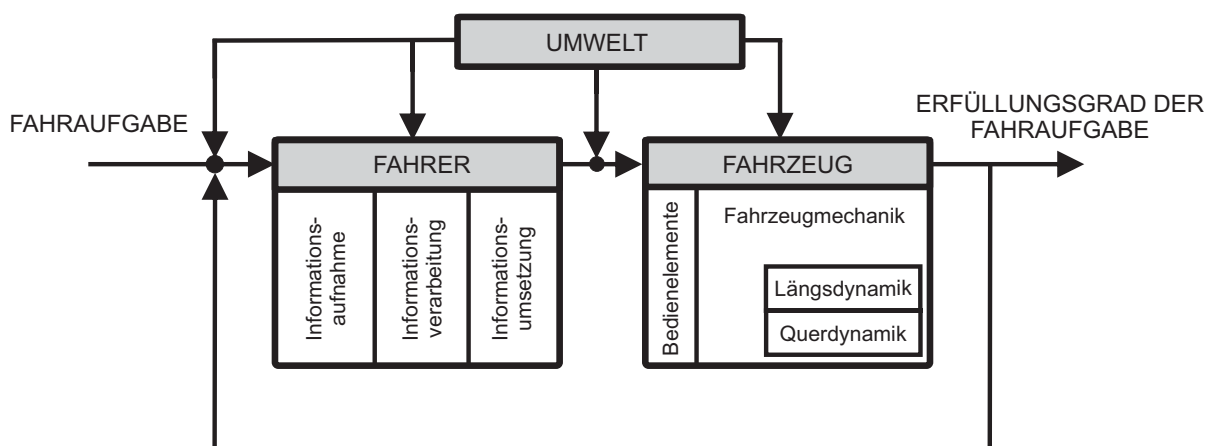


Abbildung 2.1: Allgemeiner Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis, adaptiert nach [73]

In den folgenden Abschnitten erfolgt eine detaillierte Beschreibung der Bestandteile des allgemeinen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises.

### 2.1.1.1 Fahraufgabe

Als Eingangsgröße des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises ist die *Fahraufgabe* nach [47] und [33] in drei Kategorien unterteilt. Die *primäre Fahraufgabe* beschreibt die Längs- und Querführungsaufgabe des Fahrers mit dem Ziel der kollisionsfreien Fahrt zwischen zwei Orten innerhalb der dynamischen Grenzen des Fahrzeugs. *Sekundäre Aufgaben* beschreiben die Bedienung von Systemen, die zur Unterstützung des Fahrers bei der Ausführung der primären Fahraufgabe dienen. Die Anpassung des Fahrlichts an die Umgebungsbedingungen (Aktivierung des Abblend- oder Fernlichts, Einschalten der Nebelscheinwerfer oder der Nebelschlussleuchte etc.), die multimodale Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern durch Blinken, Hupen oder Gesten oder das Bedienen und Einstellen von Navigationssystemen repräsentieren Beispiele für sekundäre Aufgaben. Sie dienen nicht unmittelbar dem Halten des Fahrzeugs auf der Straße, unterstützen den Fahrer dabei jedoch essentiell. Auch die Bedienung von aktuellen Seriensystemen der Fahrerassistenz der Führungsebene, wie etwa einem Adaptive Cruise Control System mit Stop&Go-Funktionalität (ACC S&G) zur Längsführungsassistenz sind sekundäre Aufgaben. (vgl. [65]) *Tertiäre Aufgaben* stehen in keinem direkten Zusammenhang mit der eigentlichen Fahraufgabe. Sie entstehen aus Komfort-, Informations- und Sozialbedürfnissen des Fahrers. Das Lesen und Verfassen von Kurzmitteilungen oder die Nutzung des mobilen Internets, Gespräche mit Fahrzeuginsassen oder die Einstellung von Sitzheizung, Lüftung und Klimaanlage sind Beispiele für tertiäre Aufgaben im Fahrzeug.

Nach [33] wird die *primäre Fahraufgabe* in drei hierarchisch strukturierte Ebenen unterteilt. Abbildung 2.2 zeigt die Aufteilung der primären Fahraufgabe in die Ebenen der *Navigation*, der *Führung* und der *Stabilisierung*. Die Fahrtroute sowie der zeitliche Rahmen werden auf der Navigationsebene festgelegt. Auf Basis der Vorgaben aus der Navigationsebene wird auf der Führungsebene das kollisionsfreie Führen des Fahrzeugs im unmittelbaren Streckenabschnitt realisiert. Dazu werden ein Sollkurs, eine Sollgeschwindigkeit und die notwendigen Fahrmanöver festgelegt. Die Anpassung des Zustandes der Regelstrecke *Fahrzeug* erfolgt auf der Stabilisierungsebene auf Basis der Vorgaben aus der Führungsebene durch den Regler *Fahrer* durch Betätigung der Stellteile. (vgl. [33])

Für eine exemplarische Fahrt von Ingolstadt nach Nürnberg legt der Fahrer auf der Navigationsebene die A9 als Fahrtroute fest. Geplant ist, die Strecke in etwa einer Stunde zurückzulegen. Zum Erreichen des Fahrziels führt der Fahrer verschiedene Manöver der Führungsebene durch. Er wählt die richtigen Straßen und Abzweigungen in Richtung Autobahn, er fädelt sein Fahrzeug an der Autobahnauffahrt in den fließenden Verkehr ein und führt abhängig von der Verkehrssituation Spurwechsel- und Überholmanöver durch. Zusätzlich führt er Parametereinstellungen durch, d.h. er wählt eine nach den zeitlichen Vorgaben der Navigationsebene geeignete Geschwindigkeit und einen passenden Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern. Die konkrete Umsetzung dieser Parametereinstellungen und Fahrmanöver erfolgt durch Betätigung des Lenkrads, des Bremspedals und des Gaspedals des Fahrzeugs.

### 2.1.1.2 Regler Fahrer

Bei der manuellen Fahrt fungiert der Fahrer im allgemeinen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis als Regler. Seine Aufgabe besteht darin, auf der Basis eines Ist-/Sollgrößenabgleichs die Erfüllung der Fahraufgabe sicherzustellen. Im Kontext der vorliegenden Arbeit erweitert sich das Aufgabenspektrum des Fahrers



in Abhängigkeit der gewählten Automationsstufe, die grundlegenden Eigenschaften des Fahrers bleiben jedoch identisch. Das Subsystem Fahrer wird nach [18] modellhaft in die drei Bereiche der Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung unterteilt. Der Fahrer nimmt über seine Sinneskanäle die relevanten Umweltinformationen auf. Diese werden zu einer konsistenten internen Repräsentation des Fahrzeugs und der Umwelt integriert (vgl. [44]). Anschließend wird diese Repräsentation einem Analyse- und Entscheidungsprozess zugeführt. Die getroffenen Entscheidungen werden in Handlungen umgesetzt. Als Grundlage der multidirektionalen Kommunikation des Fahrzeugs, seiner Bedienelemente und der Umwelt mit dem Fahrer beschreiben die folgenden Abschnitte die Bereiche der menschlichen Informationsverarbeitung.

**Informationsaufnahme** Der Bereich der Informationsaufnahme des Menschen wird oft mit dem Begriff *Wahrnehmung* zusammengefasst. Wesentlich ist hierbei, dass die Wahrnehmung des Menschen mehr als die bloße Summe der aktuell aufgenommenen Situationen ist. Die menschliche Wahrnehmung von Informationen umfasst zusätzlich die Prozesse der Selektion, der Reduktion, der Kategorisierung und der Synthese. Die Verarbeitung innerhalb der Sinnessysteme erfordert im Gegensatz zu Denkprozessen keinen kognitiven Aufwand. Dem nachgelagerten Prozess der Informationsverarbeitung werden bereits gefilterte, verdichtete Resultate übergeben. (vgl. [50])

Die Rezeptoren der menschlichen Sinneskanäle wandeln äußere physikalische Reize in physiologische Empfindungen um. Hierbei wird der jeweiligen Reizstärke eine entsprechende Folge unterschiedlicher elektrischer Potentiale zugeordnet. Die Reizstärke wird auch als *Intensität* bezeichnet, die resultierende Potentialfolge als *Frequenz*. Rezeptoren reagieren hierbei primär auf adäquate Reize, nicht-adäquate Reizung oberhalb einer rezeptorspezifischen Schwelle führt jedoch ebenfalls zu einer Empfindung. Diese entspricht dem jeweiligen Rezeptorkanal. So kann zum Beispiel ein mechanischer Schlag auf ein Ohr die Wahrnehmung eines hohen Pfeiftons zur Folge haben. Der Geruchs- und Geschmackssinn des Menschen spielen im Bezug auf die Fahrzeugführung eine untergeordnete Rolle. Zwar tragen Gerüche im Fahrzeuginneren stark zum Empfinden von Komfort oder Diskomfort der Fahrzeuginsassen bei, diese Komfortaspekte der tertiären Fahraufgabe werden in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht berücksichtigt. Maßgeblich für eine uneingeschränkte Wahrnehmung des Menschen in der Rolle als Fahrzeugführer sind der optische, der akustische und der haptische Informationsaufnahmekanal.

Der haptische Kanal unterteilt sich nach [85] weiter in die taktile und die kinästhetische Wahrnehmung. Taktile Empfindungen beschreiben die Druck-, Berührungs-, Temperatur- und Schmerzempfindungen der Haut. Sie spielen unter anderem beim Greifen und Halten von Bedienelementen eine wichtige Rolle. Kinästhetische Wahrnehmungen werden in der Literatur häufig auch als *propiozeptive* Wahrnehmungen bezeichnet (vgl. [35], [11]). Sie sind Eindrücke aus körperinneren Signalen der Gelenk- und Sehnenrezeptoren, der Muskelspindeln und des Vestibularorgans. Während Gelenkrezeptoren die Winkelstellungen und Änderungen in Gelenken rückmelden, sensieren Sehnenrezeptoren (sog. Golgi-Organ) Spannungen und Spannungsänderungen in den Sehnen. Muskelspindeln geben Auskunft über den aktuellen Dehnungsgrad der Muskulatur. Die Finger- und Handmuskulatur ist durch besonders viele Muskelspindeln gekennzeichnet und entsprechend empfindsam für kinästhetische Reize. Das Vestibularorgan sensiert und verarbeitet durch die Beschleunigungskräfte auf die Lymphflüssigkeit in seinen Bogengängen Rotationsbewegungen des Kopfes. Die sensierte Beschleunigung auf den Kalksteinchenbelag der Maculaorgane verarbeiten Translationsbewegungen des Kopfes. Während optische und akustische Signale nach einer Reaktionszeit von etwa 200 ms verarbeitet werden, bedingen propiozeptive Reize eine Reaktionszeit von lediglich 50 ms. Die Reaktionen des Unterregelkreises zur haptischen Wahrnehmung laufen nicht im

Gehirn, sondern vornehmlich im Rückenmark ab. Im Vergleich ermöglicht dies eine schnellere Verarbeitung des Reizes gegenüber Reizreaktionen auf Umgebungswahrnehmungen. (vgl. [11])

Nach [11] wird unter Einbeziehung einer propriozeptiven Rückmeldung eine Verbesserung der Regelleistung des Menschen bei Steueraufgaben festgestellt.

Die haptische Wahrnehmung spielt eine wichtige Rolle bei der Sensierung des Systemzustands des eigenen Fahrzeugs und bei der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Durch die bewusste Gestaltung des Informationsflusses zwischen Mensch und Fahrzeug kann der Fahrer bei der Informationsaufnahme unterstützt werden. Eine Entkopplung der Dynamik von Stellteilen von der tatsächlichen Fahrzeugdynamik durch eine „by-Wire“-Ausgestaltung kann die Freiheitsgrade des bidirektionalen Informationsflusses zwischen Fahrer und Fahrzeug erhöhen. Beispielsweise können durch haptische Rückmeldungen an einem Stellteil zusätzliche Umgebungsinformationen kommuniziert werden. (vgl. [11])

Dem optischen Kanal kommt bei der Informationsaufnahme des Menschen ebenfalls eine wichtige Rolle zu. In [95] (nach [82] und [73]) liegt der visuellensierte Anteil der vom Menschen wahrgenommenen Informationen bei 90%. Diese Informationen wirken als elektromagnetische Strahlung des Wellenlängenbereichs zwischen 400-780 nm auf das visuelle Rezeptorsystem ein und werden dort verarbeitet. Die auf die Netzhaut projizierten Bilder werden zur Schaffung einer Repräsentation der Umwelt im visuellen Cortex selektiv mit Erlebtem und Bekanntem verknüpft. Auf Basis innerer Modelle des Menschen werden als irrelevant klassifizierte Informationen auf diese Weise gefiltert und nicht weiterverarbeitet. Die Vorgaben einer adäquaten, zielgerichteten Ausrichtung des Auges werden auf Basis von Informationen aus fovealer und peripherer Umfeldwahrnehmung abgeleitet. Das periphere Sehen zeichnet sich durch die unscharfe Wahrnehmung der Umwelt mittels helligkeitssensitiver Stäbchen aus. Farbsensitive Zäpfchen in der Netzhautgrube ermöglichen das foveale Sehen, eine scharfe Wahrnehmung bestimmter Punkte der Umwelt. Folglich ermöglicht das menschliche Auge auf Basis einer Vorfilterung von Informationen durch die gezielte Ausrichtung des Sehens eine selektive Aufmerksamkeitssteuerung. (vgl. [18])

Bei der Gestaltung von Schnittstellen von Fahrer und Fahrzeug ist diesen Besonderheiten des optischen Kanals Rechnung zu tragen. Systeminitiierte Anzeigen im peripheren Sichtfeld sind durch Anpassung ihrer Helligkeitsverläufe verstärkbar, Anzeigen im primären Sichtfeld bedienen sich sinnvollerweise einer prägnanten Farbgebung zur Optimierung Ihres Nutzens.

Neben der visuellen und der haptischen Wahrnehmung stellt der akustische Sinneskanal einen weiteren Bestandteil der Umfeldwahrnehmung eines Fahrzeugführers dar. Wie in [18] ausgeführt, verarbeitet das menschliche Ohr als adäquate Reize Luftschwingungen im Frequenzbereich von 20 Hz - 20 kHz. Infolge der durch die Luftschwingungen erzeugten Reize wird im Innenohr die Basilarmembran in entsprechende Bewegungen versetzt. Anhand der Analyse von Laufzeitdifferenzen und Resonanzen ist das Ohr in der Lage, Schallquellen in Relation zum Wahrnehmungsapparat zu lokalisieren. Da mit zunehmender Entfernung der Schallquelle vom Rezeptor Schallwellen einer frequenzabhängigen Dämpfung unterliegen, wird anhand der Wahrnehmung von Pegelunterschieden eine Entfernungsschätzung vorgenommen. (vgl. [82])

Bei der Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle werden die Eigenschaften des Hörsinns für alle Ebenen der Fahraufgabe unterschiedlich genutzt. Einerseits nutzt die Mensch-Maschine-Schnittstelle vieler Fahrzeuge akustische Signale zur Aufmerksamkeitssteuerung des Fahrers. Signale können informativ oder warnend auf Zustände des eigenen Fahrzeugs bzgl. der primären, sekundären und tertiären Fahraufgabe (Wischwasser, Tankinhalt, Serviceintervalle etc.) hinweisen. Ebenso wird der Kanal als Warnmedium für fahrsituationsspezifische Gefahren verwendet. Die Übernahmeaufforderung eines Abstandsregeltempomaten beim Erreichen der Regelgrenzen dient hier als Beispiel. Akustische Signale

dienen in diesen Fällen zur Aufmerksamkeitssteuerung, eine genaue Spezifikation der vom Fahrzeug zu übermittelnden Information erfolgt ergänzend über den optischen Kanal durch Anzeigen im Kombi. Zusätzlich nutzt der Fahrer den akustischen Kanal zur Abschätzung der Verkehrssituation. Die Geräusche des Fahrtwindes, des Motors oder anderer Verkehrsteilnehmer nutzt der Fahrer als zusätzliche Informationen zur Schaffung einer validen Umweltrepräsentation.

**Informationsverarbeitung** Ziel der Informationsverarbeitung ist die Integration der aus der Informationsaufnahme übermittelten Sinneswahrnehmungen zu einer „kognitiven Gesamtvorschau“ ([18], S.346). Anhand dieser Vorschau wird eine passende Reaktion abgeleitet, die im Rahmen der Informationsumsetzung als Vorgaben an die Motorik weitergegeben werden. Die dafür nötigen Mechanismen laufen hauptsächlich im Gedächtnis ab. Dieses besteht aus dem sensorischen Gedächtnis, dem Kurzzeit- und dem Langzeitgedächtnis. In der sensorischen Gedächtnisstufe korreliert die Vergessenszeit mit dem exponentiellen Abfall der Rezeptorerregung. In [76] (nach [18]) wird die Vergessenszeit des sensorischen Gedächtnisses auf ca. 150 ms beziffert. Unser aktives Bewusstsein wird durch das Kurzzeitgedächtnis repräsentiert. Die Begriffe *primäres Gedächtnis* oder *Arbeitsgedächtnis* werden in der Literatur häufig synonym verwendet, eine weiterführende Theorie zu Prozessen und Funktionsweisen im Arbeitsgedächtnis findet sich z.B. in [6]. Informationen werden hier für einen Zeitraum von 3-4s gespeichert. Das Kurzzeitgedächtnis hat eine Kapazität von  $7 \pm 2$  psychologischen Einheiten. Diese Einheiten können je nach individueller Vorerfahrung des betreffenden Menschen aus unterschiedlichen Einzelinformationen zusammengesetzt sein. Analytisch erfahrenere Menschen sind in der Lage, vergleichsweise große Datenmengen im Kurzzeitgedächtnis abzuspeichern. Dies beruht auf der Möglichkeit zur komplexeren Verkettung von Einzelinformationen innerhalb der verarbeiteten psychologischen Einheiten. Der Übergang vom Kurzzeit- ins Langzeitgedächtnis erfolgt mittels häufiger Wiederholungen der Verarbeitung ähnlicher Inhalte. Im Langzeitgedächtnis werden die Daten für Zeiträume von Minuten bis hin zu Jahren abgespeichert. Die Aufteilung in sekundäres und tertiäres Gedächtnis nach [104] (nach [18]) erfolgt auf Basis unterschiedlicher Zugriffsgeschwindigkeiten auf gespeicherte Informationen. Während im sekundären Gedächtnis bei mangelnder Nutzung der Information ein Vergessen prinzipiell möglich ist und die Zugriffszeiten entsprechend groß sind, kann der Mensch auf Inhalte aus dem tertiären Gedächtnis sehr schnell zugreifen. Inhalte des tertiären Gedächtnisses sind beispielsweise der eigene Name oder die Fähigkeit des Schreibens und Lesens. Diese sind in der Regel lebenslang gespeichert. (vgl. [18]) Das Konzept der menschlichen Informationsverarbeitung wird durch das Reafferenzprinzip (vgl. [55] nach [11]) beschrieben: Die über das sensorische Gedächtnis transportierten Reize stoßen unmittelbar einen Vergleich mit im Langzeitgedächtnis gespeicherten inneren Modellen der Welt an. Ein Bestandteil eines derartigen Modells ist die zu erwartete Wahrnehmung bei einer bestimmten Handlung. Ein zweiter Teil beschreibt sinnvolle Reaktionen auf mögliche Wahrnehmungen. Bei einer Übereinstimmung der wahrgenommenen Informationen mit dem aktuell aktiven inneren Modell läuft der Vergleich unbewusst ab. Wird eine Differenz zwischen erwarteter und tatsächlicher Wahrnehmung festgestellt, geht der Prozess ins Bewusste über und ein Entscheidungsmechanismus zur Suche nach einem adäquateren inneren Modell wird aktiv. Die maximale Anzahl innerer Modelle, die an dieser Stelle miteinander verglichen werden können entspricht  $7 \pm 2$  Einheiten. Wird anhand dieser Suche kein passendes Modell gefunden, wird die wahrgenommene Situation in ihre Einzelereignisse aufgeschlüsselt. Auf dieser niedrigeren Komplexitätsebene wird aus den inneren Modellen für diese Einzelereignisse ein neues Handlungsmuster konstruiert. Dieser Prozess beansprucht vergleichsweise viel Zeit und kann ein hemmender Faktor in dynamischen Mensch-Maschine-Systemen sein. Der Mechanismus tritt bei einer für den Menschen unbekanntem Aufgabenstellung in Kraft, ungeübte und zeitkritische Aufgabenstellungen sind daher in der Kombination zu vermeiden. (vgl. [11])

In [92] werden diese Grundlagen der menschlichen Informationsverarbeitung im 3-Ebenen-Modell der menschlichen Informationsverarbeitung nach Rasmussen zusammengefasst. Das menschliche Verhalten wird hierbei in drei Kategorien unterteilt. Die zeitlich effektivste Verhaltensweise ist demnach das *fertigkeitsbasierte* Verhalten. Basierend auf einem längeren Lernprozess handelt es sich dabei um reflexartige Verhaltensmuster ohne bewusster Kontrolle. Das 3-Ebenen-Modells nach Rasmussen korreliert mit der Beschreibung des menschlichen Gedächtnisses nach [104] (nach [18]), die Reaktionsmechanismen werden entsprechend im tertiären Teil des Langzeitgedächtnisses mit minimaler Zugriffszeit hinterlegt. *Regelbasiertes* Verhalten greift hingegen auf gespeicherte Regeln aus dem sekundären Langzeitgedächtnis zurück. Bei erfolgreicher Bewältigung vorhergehender Problemlösungsprozesse werden die angewandten Regeln als zielführend gespeichert. Bei Bedarf wird die erfolgversprechendste Verhaltensweise erneut abgerufen. Beim Auftreten einer für den Menschen unbekannt Situation ist keine passende Regelbasis für die Handhabung der Situation im Gedächtnis hinterlegt. In diesem Fall wird das *wissensbasierte* Verhalten aktiviert. Dabei wird auf der nächst höheren kognitiven Ebene ein wissensbasierter Problemlösungsprozess durchgeführt. Auf Basis der prognostizierten Konsequenzen verschiedener Handlungsstrategien wird ein adäquates Verhaltensmuster ausgewählt. Durch den notwendigen Zugriff auf das langsamere sekundäre Langzeitgedächtnis und der Beanspruchung des Kurzzeitgedächtnisses stellt das wissensbasierte Verhalten die zeitlich aufwendigste Kategorie des 3-Ebenen-Modells dar. Aufgaben der Navigationsebene der primären Fahraufgabe (2.1.1.1) sind aufgrund der Notwendigkeit einer bewussten Planung und des vergleichsweise großen zur Verfügung stehenden Zeitkontingents dem wissensbasierten Verhalten zuzuordnen. Bezüglich der Zuordnung von Führungs- und Stabilisierungsaufgaben ist die individuelle Erfahrung des Fahrers von Bedeutung. Fahranfänger bewältigen die Fahraufgabe wissensbasiert. Mit zunehmender Erfahrung werden für häufige Aufgaben erfolgreiche Verhaltensmuster gespeichert. Ein zu Beginn regelbasiert und später fertigkeitsbasiert geprägtes Verhaltensmuster ist die Folge. Allerdings können auch bei erfahrenen Fahrern unbekannt Situationen auftreten. In der Konsequenz wird zur Bewältigung auf regel- oder wissensbasiertes Verhalten zurückgegriffen. Dies bedingt einen im Vergleich größeren zeitlichen Aufwand zur Informationsverarbeitung. In vielen Fällen treten für einen Fahrzeugführer unbekannt Fahrsituationen in ohnehin zeitkritischen Szenarien auf. Die beschriebenen Charakteristika der menschlichen Informationsverarbeitung haben in solchen zeitkritischen Situationen eine weitere Erhöhung der Kritikalität zur Folge. Die Abhängigkeiten zwischen dem 3-Ebenen-Modell nach Rasmussen und der 3-Ebenen-Hierarchie der primären Fahraufgabe sind in Abbildung 2.2 dargestellt.

**Informationsumsetzung** Ohne zusätzlichem technischen Aufwand stehen dem Menschen sein Bewegungsapparat sowie akustische Signale als Ausgabemedien zur Verfügung. Der Bewegungsapparat wird genutzt, um die von der Informationsverarbeitung vorgegebenen Handlungen durch die Ausübung von Kräften oder durch die Ausführung von Bewegungen umzusetzen. Die Erzeugung von akustischen Signalen dient vornehmlich der Kommunikation und nimmt im Kontext der primären Fahraufgabe eine untergeordnete Rolle ein. Spracheingabesysteme gewinnen aktuell an Bedeutung, aufgrund der oft unsicheren Datenlage eignen sich diese Systeme eher für Anwendungen aus dem Bereich der sekundären und tertiären Fahraufgabe. Systemseitige Fehlinterpretationen sind zwar auch hier ein Ärgernis, allerdings bewegen sich die Konsequenzen von Systemfehlern in einem akzeptablen Rahmen.

Nach [18] und [11] sind die Ausgangsgrößen der Informationsverarbeitung *alpha*- und *gamma*-Innervationen. Während die *alpha*-Innervation als Basis der Grobmotorik anzusehen ist, ermöglicht eine *gamma*-Innervation die Fein- und Stützmotorik. Beide Impulse werden über das Rückenmark zu den Muskelfasern weitergeleitet und dort in exakte Bewegungen umgesetzt. Kontrollierte Bewegungen werden

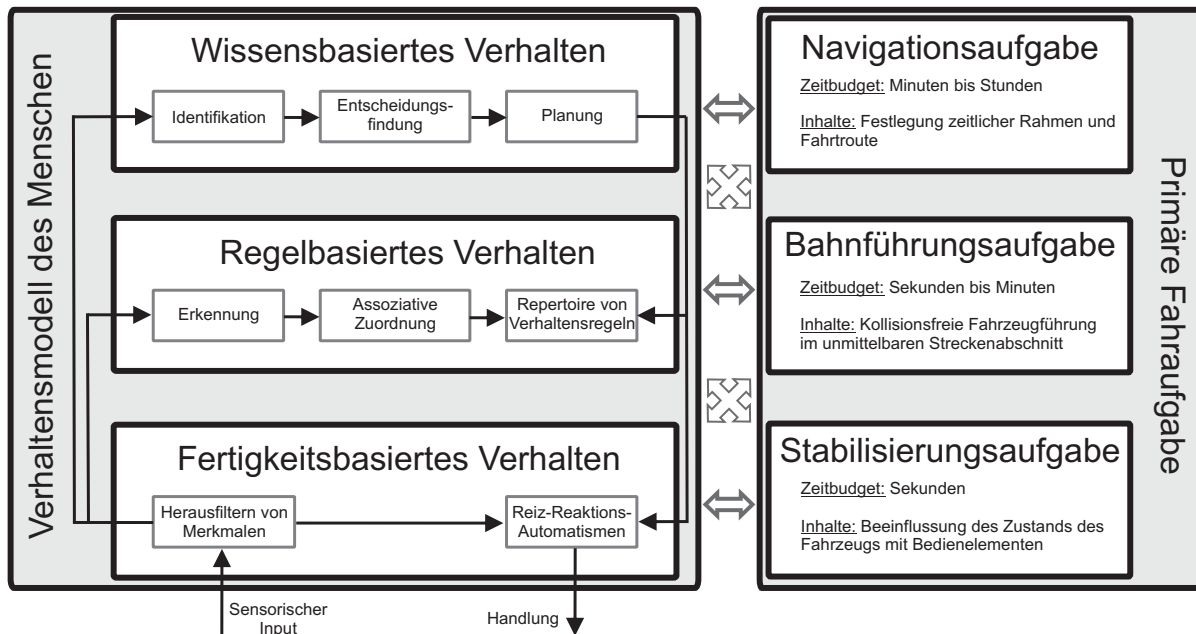


Abbildung 2.2: 3-Ebenen-Modell nach [92] und 3-Ebenen-Hierarchie der primären Fahraufgabe, adaptiert nach [36]

durch den *Wegservomechanismus* ermöglicht: Durch eine alpha-Innervation kommt es zu einer Kontraktion der Muskelstränge und einer Längenänderung der Muskelspindeln. Durch die Rückmeldung dieser Längenänderung wird der antagonistische Muskel bei diesem Vorgang gegenläufig durch den durch alpha-Innervation angeregten Muskelstrang entspannt. Die Verschaltung zu einem Regelkreis ermöglicht bei statischen wie dynamischen Vorgängen die Stellung der betroffenen Extremität beizubehalten. Eine gamma-Innervation hat eine intrafusale Kontraktion der Muskelspindeln zur Folge. Diese verursacht zwar keine Längenänderung des Muskels, versetzt die Spindeln allerdings in eine Art vorgespannten, sensibleren Zustand. Dies ermöglicht unbewusst die Steuerung der Stützmuskulatur und bewusst die Feinmotorik für fein abgestufte Bewegungen. Der *Kraftservomechanismus* beruht auf der Krafterückmeldung der Sehnen oder der Golgi-Elemente. Als passive Kraftsensoren erhöhen diese bei einer Dehnung durch eine äußere Kraft ihre Impulsfrequenz und dämpfen eine alpha-Innervation ab. Die Antagonisten werden gleichzeitig angeregt. Dieser Regelkreis sorgt für die Einstellung eines konstanten Kraftwerts am Muskel. Der Mensch kann Bewegungen weitaus feiner regeln als Kräfte. Diese Annahme basiert auf der größeren Gewichtung des Wegservomechanismus gegenüber dem Kraftservomechanismus. Zusätzlich ergeben sich daraus grundlegende gestalterische Vorgaben für Mensch-Maschine-Schnittstellen, die Güte der Kommunikationswege zwischen Fahrer und Fahrzeug kann durch eine Aktorik im Stellelement mit Weg- und Krafterückmeldung verbessert werden. (vgl. [18], [11])

### 2.1.1.3 Regelstrecke Fahrzeug

Die vorliegende Arbeit verfolgt unter anderem das Ziel, ein neuartiges, ergonomisch optimiertes Mensch-Maschine-System im Kontext der automatisierten Fahrzeugführung zu entwickeln und zu untersuchen.

Die hierfür entwickelten Schnittstellenkonzepte verfolgen nicht das Anliegen, Alternativen zu den etablierten Bedienelementen der Fahrzeugführung zu sein. Der Ansatz beschäftigt sich vielmehr damit, neuartige Formen der Interaktion mit heutigen und zukünftigen *Fahrerassistenzsystemen* zu schaffen. Der Abschnitt beschreibt das Fahrzeug als grundlegendes Element des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises. Hierfür werden die Dynamik handelsüblicher Kraftfahrzeuge, sowie die strukturelle Integration von Fahrerassistenzsystemen der Führungsebene in eine Fahrzeugarchitektur detailliert. Die Bewegung eines Fahrzeugs wird durch die in Abbildung 2.3 dargestellten Freiheitsgrade beschrieben.

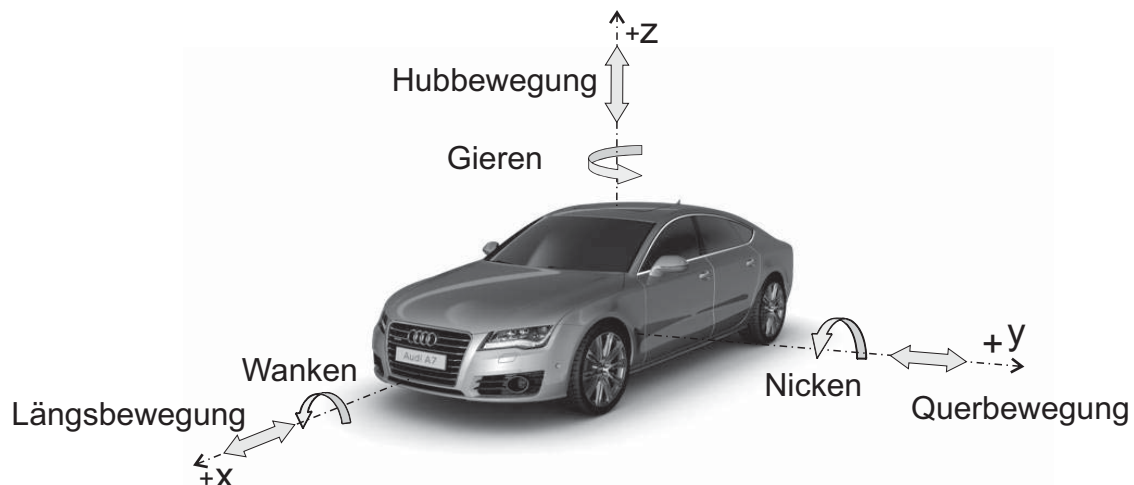


Abbildung 2.3: Bewegungsmöglichkeiten eines Fahrzeugs, adaptiert nach [131]

Durch die Abstimmung und die Beschaffenheit des Fahrwerks wird die *Vertikaldynamik* eines Fahrzeugs bestimmt. Wank-, Nick- und Hubbewegungen repräsentieren einen zentralen Bestandteil der Fahrwerksentwicklung, werden aber an dieser Stelle aufgrund der mangelnden Möglichkeit zu Manipulation durch den Benutzer von den Betrachtungen ausgenommen. Von größerer Relevanz ist im Kontext der vorliegenden Arbeit die Beschreibung der Fahrzeugbewegung durch die verkoppelte Dynamik des Fahrzeugs in *Längs-* und *Querrichtung*. Diese können mittels der vorhandenen Interaktionsmöglichkeiten im Kraftfahrzeug vom Nutzer unmittelbar beeinflusst werden. In einem Fahrzeug mit Automatikgetriebe haben sich das Lenkrad, das Gas- und das Bremspedal als Standardbedienelemente etabliert.

Die Querdynamik umfasst alle Bewegungen und deren Änderungen quer zur Fahrtrichtung. Eine vereinfachte, jedoch für Querbeschleunigungen bis zu  $4 \frac{m}{s^2}$  hinreichend genaue Modellbeschreibung der Querdynamik liefert z.B. das lineare Einspurmodell nach [131]. Im Normalfall werden die Lenkvorgaben des Fahrers am Lenkrad in Abhängigkeit der Übersetzung des Lenkgetriebes als Radlenkwinkel an den Vorderrädern umgesetzt. Sonderfälle, wie Hinterachslenkungen oder Lenkungen mit dynamischen Lenkübersetzungen, werden nicht näher betrachtet. Der interessierte Leser sei beispielsweise auf [88] verwiesen. Der Schräglaufwinkel beschreibt die Abweichung zwischen der realen Fahrtrichtung und der durch den Radlenkwinkel vorgegebenen Richtung an Vorder- und Hinterachse, der Schwimmwinkel beziffert die Verdrehung des gesamten Fahrzeugs zur Bewegungsrichtung. Der Winkel zwischen einem raumfesten und einem fahrzeugbezogenen Koordinatensystem wird als Gierwinkel bezeichnet. Die Gier-

rate ist ein wichtiges Maß zur Beschreibung des Zustandes der Regelstrecke Fahrzeug. Beispielsweise benutzt das *Electronic Stability Control (ESC)* die Gierrate als wichtigen Regelparameter. Nach [14] beschreibt die Längsdynamik sämtliche Bewegungen und Bewegungsänderungen in Fahrzeuginnenrichtung. Das Gaspedal steuert die Drosselklappenstellung, in Abhängigkeit der Gangwahl beeinflusst diese die Antriebs- bzw. die Vortriebskraft an den Antriebsrädern. Durch eine Betätigung des Bremspedals wird eine entgegengesetzte Antriebskraft erzeugt, das Fahrzeug verzögert. Wie in [35] ausgeführt, sind die Bremspedalkraft, die entsprechende Bremskraft und die resultierende Längsverzögerung über nichtlineare, geschwindigkeitsabhängige Zusammenhänge miteinander verknüpft. Die Vortriebskraft hängt von der Fahrpedalstellung, der gewählten Fahrstufe, der Fahrzeuggeschwindigkeit und der Motordrehzahl in ebenfalls nichtlinearer Weise ab. Als Folge dieser Nichtlinearität verursachen identische Betätigungen der Pedale daher situationsspezifisch unterschiedliche Fahrzeugreaktionen.

In realen Fahrsituationen wirkt meist eine Kombination von Längs- und Querdynamik mit unterschiedlich großen Anteilen. Diese Kopplung kann an einfachen Beispielen illustriert werden: Der Radius eines Kamm'schen Kreises beschreibt die über die Aufstandsfläche der Reifen (*Latsch*) maximal auf die Straße übertragbare Kraft. Dieses  $F_{max}$  ergibt sich in Abhängigkeit der Normalkraft (Radlast) und der Reibungszahl der Straße. Ein instabiler Fahrzustand während einer Kurvenfahrt liegt vor, wenn die Resultierende der längsdynamischen Komponente Umfangskraft  $F_U$  und der querdynamischen Komponente Seitenführungskraft  $F_S$  größer als die maximal übertragbare Kraft  $F_{max}$  wird. Nähert sich eine der beiden Kraftkomponenten dem Maximum, verbleiben zur Sicherstellung eines fahrdynamisch stabilen Zustandes geringe bzw. keine Reserven für die korrespondierende Komponente. Als Folge eines starken Bremsvorgangs während einer Kurvenfahrt mit  $F_U$  am Maximum kann keine Seitenführungskraft  $F_S$  übertragen werden. Das Fahrzeug bricht entweder aus, oder der Fahrer kann das Fahrzeug nicht mehr lenken. (vgl. [53])

Ein weiteres Beispiel zur Veranschaulichung der Verkoppelung von Längs- und Querdynamik stellen die u.a. in [131] beschriebenen Lastwechselreaktionen dar. Wird etwa während einer Kurvenfahrt plötzlich der Fuß vom Gaspedal genommen, entsteht durch die plötzliche Veränderung der Drosselklappenstellung ein Motorschleppmoment. Die resultierende Erhöhung der Normalkräfte an der Vorderachse verursacht eine leichte Zunahme von  $F_S$ . Durch die Abnahme der Normalkraft an der Hinterachse verringert sich hier die Seitenkraft  $F_S$ . In Kombination mit dem vergrößerten Schräglaufwinkel an der Hinterachse dreht das entstehende Giermoment das Fahrzeug in Richtung Kurveninnenseite ein. Die Beispiele veranschaulichen die Verkoppelung von Längs- und Querdynamik. Aus fahrdynamischer Sicht beschreibt eine singuläre Betrachtung einer Komponente der Fahrzeugdynamik den Zustand der Regelstrecke Fahrzeug nur unzulänglich. Dennoch unterteilt die im Kraftfahrzeug etablierte Ausprägung der Benutzerschnittstelle in Pedale zur Beeinflussung der Längsdynamik und dem Lenkrad als Stellelement der Querdynamik der Regelstrecke. Diese historisch bedingte, in ihrem Ursprung technikgetriebene Aufteilung stellt aufgrund der breiten Nutzerakzeptanz sowie des folglich weit fortgeschrittenen Entwicklungsstandes für die manuelle Fahrt den Stand der Technik dar. Alternative Ansätze mit aktiven Sidesticks (vgl. z.B. [35]) oder anderen Bedienelementen (vgl. z.B. [17]) repräsentieren vielversprechende, aus ergonomischer Sicht hinsichtlich der verkoppelten Dynamik optimierte Ansätze. Die historische Bedienstruktur ist jedoch auf Basis der weltumfassenden Akzeptanz das dominierende Paradigma zur manuellen Fahrzeugführung.

Eine Möglichkeit zur Beschreibung der Eigenschaften der Regelstrecke Fahrzeug im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis ist die Darstellung durch Differenzialgleichungen. Neben zeitlich invarianten *Systemparametern* sind zeitlich veränderliche *Zustandsgrößen* Bestandteile dieser Gleichungen. Aufgrund der Änderungen der Zustandsgrößen mit der Zeit sind auch die Ableitungen dieser Zustandsgrößen nach der Zeit zu betrachten. Im mechanischen Fall stellt die einfachste Zustandsgröße die örtliche Lage  $x$  dar, entspre-

chend werden auch die Geschwindigkeit  $\dot{x}$  und die Beschleunigung  $\ddot{x}$  als unabhängige Zustandsgrößen eingeführt. Durch die Veränderung eines Potentials  $y$  kann der Mensch steuernd oder regelnd auf ein mechanisches System einwirken. Ein offenes, dynamisches System ist demnach näherungsweise allgemeingültig beschrieben durch seine Systemparameter  $s_i$ , die unabhängigen Zustandsgrößen  $x$ ,  $\dot{x}$  und  $\ddot{x}$  sowie durch ein veränderliches Potential  $y$ . In realen Anwendungsfällen sind häufig mehrere Subsysteme hintereinandergeschaltet, durch den daraus folgenden höheren Ordnungsgrad der systembeschreibenden Differentialgleichung ergibt sich ein variierendes Gesamtübertragungsverhalten des technischen Systems. (vgl. [18], S.367 ff.)

Der *Typ* beschreibt dabei den eingeschwungenen Zustand der Regelstrecke und unterscheidet zwischen Positions- (0), Geschwindigkeits- (1) oder Beschleunigungssystem (2). Typ (4) beschreibt ein Rucksystem. Dieses wird an dieser Stelle aufgrund seiner geringen Relevanz hinsichtlich einer Umsetzung im Mensch-Maschine-System nicht näher betrachtet. Der Typ einer Differentialgleichung wird durch die niedrigste Ableitung nach der Zeit bestimmt.

Der *Ordnungsgrad* hingegen legt das Anfangsverhalten der Regelstrecke fest. Er wird durch die höchste Ableitung nach der Zeit bestimmt und unterscheidet zwischen einer Lagesteuerung (0), einer Geschwindigkeitssteuerung (1) oder einer Beschleunigungssteuerung (2). Eine Regelstrecke vom Typ 1 und Ordnungsgrad 2 entspricht in dieser Nomenklatur folglich einem „Geschwindigkeitssystem mit Beschleunigungssteuerung“. Die Regelstrecke reagiert auf bestimmte Eingangssignale zuerst mit einer Beschleunigungsänderung am Systemausgang, nach Ablauf einer gewissen Zeitspanne regelt das Eingangssignal die Geschwindigkeit am Systemausgang.

Die strukturelle Integration von Fahrerassistenzsystemen zur Übernahme von Aufgaben der Fahrzeugführungsebene in die Fahrzeugarchitektur stellt nicht nur Anforderungen an die Entwickler der Fahrerassistenzfunktionen und der notwendigen Modalitäten der Umfeldwahrnehmung. Ebenso muss es ein zentrales Anliegen sein, die Bedienkonzepte der Funktionen an die veränderten Kommunikationswege im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis anzupassen. Hier bietet sich den Entwicklern die Gelegenheit, in einer zeitlich sehr frühen Phase des Entwicklungsprozesses die zukünftige Gestaltung der Benutzerschnittstelle von Fahrerassistenzsystemen zu beeinflussen. Die Rolle von Fahrerassistenzsystemen in diesem Regelkreis sowie die Implikationen auf die Mensch-Maschine-Schnittstelle werden in 2.1.2 erläutert.

#### 2.1.1.4 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Die Ausgestaltung der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis kann anhand unterschiedlicher Merkmale beschrieben und analysiert werden. Die folgenden Abschnitte geben die Systematik nach [19] wieder. Hierbei sind zum einen die aufgabenspezifischen Kriterien *Bedienung*, *Führungsart* und *Dimensionalität* zu detaillieren. Diese Merkmale beschreiben den *Aufgabeninhalt*, also die vom Entwickler nicht mehr beeinflussbare Gestalt und Komplexität der Aufgabe an sich. Die ergonomischen Anstrengungen bestehen darin, den Schwierigkeitsgrad der Aufgabe durch die Bedienung nicht weiter zu erhöhen und nach Möglichkeit zu reduzieren.

Die Kriterien *Aufgaben-* und *Darstellungsart*, *Rückmeldung* und *Kompatibilität* beschreiben die vom Entwickler gestaltbare *Auslegung* einer Aufgabe.

Die Analyse einer Aufgabenstellung anhand dieser Kriterien gibt unter anderem Hinweise zur systemergonomischen Ausgestaltung von Bedien- und Anzeige Konzepten. Zusätzlich liefert sie die Grundlagen einer gegenseitigen Annäherung des dynamischen Verhaltens einer Maschine und der Leistungsfähigkeit des Operators.



**Bedienung** Das Kriterium beschreibt die „sachlich notwendige zeitliche Ordnung“ ([19], S.391) einer Aufgabe. Die Bearbeitung von (Teil-)Aufgaben kann *simultan* oder *sequentiell* erfolgen. Bei einer simultanen Bedienung stehen mehrere Aufgaben gleichzeitig zur Abarbeitung. Simultane Bearbeitung ist jedoch nicht gleichzusetzen mit der Notwendigkeit einer simultanen Betätigung. Die Teilaufgaben können sequentiell abgearbeitet werden. Die Reihenfolge der Bearbeitung bleibt dem Nutzer überlassen. Ein Beispiel für eine simultane Aufgabe ist die Aktivierung einer Geschwindigkeitsregelanlage mit automatischer Abstandsregelung eines Personenkraftwagen (PKW). Befindet sich das System im aktivierbaren Zustand, bieten sich dem Fahrer zur Aktivierung des Systems die Möglichkeit der Übernahme einer gespeicherten Sollgeschwindigkeit (*RESUME*) sowie die Möglichkeit zur Übernahme der aktuell gefahrenen Geschwindigkeit als Setzgeschwindigkeit (*SET*). Zur Aktivierung des Systems stehen beide Aufgaben zeitgleich zur Bearbeitung an, die Auswahl des Vorgehens ist dem Fahrzeugführer überlassen. In der Konsequenz ist die Bediensicherheit bei simultanen Bedienungen von der Leistungsfähigkeit des menschlichen Kurzzeitgedächtnisses abhängig. Entsprechend liegen die Grenzen einer effizienten Entscheidungsfindung bei Bedienungsaufgaben bei einer Zahl simultan anstehender Teilaufgaben von  $7 \pm 2$  psychologischen Einheiten (vgl. 2.1.1.2). Die Schaffung integrativer Anzeigen und Stellelemente zur Reduktion der Anzahl der zur Verarbeitung stehenden Einheiten, sowie die Möglichkeit der freien Auswahl von Teilaufgaben stellen systemergonomische Ansätze zur Vereinfachung von Bedienungsaufgaben dar. Bei einer sequentiellen Bedienung hingegen ist die Reihenfolge der Bearbeitung der einzelnen Teilaufgaben genau festgelegt. Ein Beispiel einer sequentiellen Aufgabe ist die Gangwahl bei einem Fahrzeug mit Handschaltung. Für einen erfolgreichen manuellen Wechsel der Fahrstufe mittels des Schaltknüppels ist zwangsläufig eine zeitlich vorgelagerte Betätigung der Kupplung notwendig. Die Reihenfolge der Abarbeitung ist im menschlichen Langzeitgedächtnis gespeichert, entsprechend hängt die Güte der Aufgabenerfüllung maßgeblich von den Leistungsdaten des Langzeitgedächtnisses ab. Unterstützend wirken hierbei eine einfache Gestaltung der Teilaufgaben sowie deren handhabbare Anzahl (weniger als fünf Einzelschritte). Auch eine Teilautomatisierung der Bedienschritte kann aus systemergonomischer Sicht zu einer Reduktion der Bedienkomplexität führen. (vgl. [19])

**Führungsart** Die Führungsart ist durch die räumliche und zeitliche Beschaffenheit der Aufgabenstellung gekennzeichnet. Bei *dynamischen* Aufgabenstellungen ist vom Operator eine Nachführgröße mit einer zeitveränderlichen Führungsgröße nach Möglichkeit in Deckung zu halten. Eine *statische* Aufgabenstellung verfolgt ein über die Zeit unveränderliches Ziel. Im Gegensatz zu einer dynamischen Führungsart ist bei einer Aufgabe mit statischer Aufgabenstellung der Weg zur Aufgabenerfüllung in räumlicher und zeitlicher Hinsicht nicht vorgegeben bzw. weiter gefasst.

Wie in 2.1.1.1 beschrieben, setzt sich die primäre Fahraufgabe aus den hierarchischen Ebenen der Navigation, Führung und Stabilisierung zusammen. Auf der Navigationsebene liegt mit dem definierten Fahrziel und dem zeitlichen Rahmen ein statisches Ziel vor, die Navigationsaufgabe ist demnach als statische Aufgabe mit großem verfügbarem Zeitkontingent anzusehen. Eine dynamische Aufgabenstellung liegt hingegen auf der Stabilisierungsebene vor. Der Fahrer muss das Fahrzeug mittels der zur Verfügung stehenden Stellteile innerhalb starker räumlicher und zeitlicher Grenzen handhaben. Die Führungsarten der verschiedenen Aufgaben der Führungsebene sind in Abhängigkeit der situationspezifisch zur Verfügung stehenden Zeit und der Zeithorizonte, innerhalb derer sich die geltenden Zielvorgaben verändern, sowohl statischer als auch dynamischer Natur. Diese Art der Kombination der beiden Führungsarten ist aufgrund der dynamischen Randbedingungen in der Realität bei vielen Aufgabenstellungen mit statischen Zielsetzungen gegeben. Wie in [19] weiter ausgeführt, ermöglicht die Teilautomatisierung die Erweiterung der zeitlichen Einschränkungen bei statischen Aufgabenstellungen, bei dynamischen Aufgabenstellun-

gen bietet die Automatisierung ebenfalls verschiedenen Möglichkeiten zur besseren Handhabbarkeit der Aufgabe. Ergänzende Anzeigeelemente sind ein weiterer Ansatz zur ergonomischen Unterstützung des menschlichen Operators. Diese Elemente unterstützen die innere Modellbildung durch Antizipation oder durch zusätzliche Informationen und können sowohl über den visuellen als auch über den haptischen Kanal („Aktives Stellteil“) kommuniziert werden.

**Dimensionalität** Die Zahl der vom Operator unabhängig beeinflussbaren Freiheitsgrade ergibt die Dimensionalität einer Bedienung. Sechs Freiheitsgrade stellen die höchste Dimensionalität dar. Sie ergeben sich aus den drei Translations- und den drei Rotationsmöglichkeiten eines beweglichen Objekts im dreidimensionalen Raum. Das Führen eines Zuges stellt für den Lokführer eine eindimensionale Aufgabe dar: der einzige Freiheitsgrad, den der Lokführer beeinflussen kann, ist die Längsdynamik des Zuges. Folglich stellt die Steuerung eines Kraftfahrzeugs mittels der verkoppelten Dynamik in Längs- und Querrichtung (vgl. 2.1.1.3) den Fahrzeugführer vor eine zweidimensionale Aufgabe. Eine systemergonomische Prämisse zur optimierten Handhabung der Dimensionalität verschiedener Bedienungsaufgaben besteht darin, die Anzahl der Stellteile nach Möglichkeit auf die Größe der Dimensionalität zu beschränken. Bewusste Reduktion der Dimensionalität durch Zwangsführungen, sowie Entkopplung einzelner Freiheitsgrade zur Unterstützung der inneren Modellbildung des Bedieners stellen weitere Möglichkeiten der ergonomischen Auslegung von Bedienungen dar. (vgl. [19], [11])

Mit Brems-, Gaspedal und Lenkrad stehen dem Führer eines Fahrzeugs mit Automatikgetriebe für die manuelle Fahrt insgesamt drei Betätigungselemente zur Bewältigung einer zweidimensionalen Aufgabe zur Verfügung. Diese aus ergonomischer Sicht zu große Anzahl von Stellteilen hat sich im Laufe der Jahrzehnte in der Kraftfahrzeugtechnik durchgesetzt und ist heute Stand der Technik. In der vergleichsweise jungen Disziplin der Fahrerassistenzsysteme der Führungsebene existiert kein vergleichbarer, breiter Konsens zur Bedienung. Die Entwicklung zukünftiger Bedienkonzepte und Assistenzsysteme kann sich am ergonomischen Kriterium der Dimensionalität und den resultierenden Anforderungen orientieren.

**Aufgabenart** Die Art einer Aufgabe ist durch die Rolle des Menschen im Arbeitsprozess gekennzeichnet. Bei *monitiven* Aufgaben ist der Mensch ein passiver Beobachter eines automatisierten Arbeitsprozesses. Es liegt ein paralleles Wirkungsgefüge im Mensch-Maschine-Regelkreis vor. Eine serielle Verschaltung von Mensch und Maschine kennzeichnet eine *aktive* Aufgabenart, der Mensch ist ein ausführendes Element im Regelkreis (vgl. [19]). Die Bewältigung der primären Fahraufgabe ist bei manueller Ausführung der Steuer- und Regelungstätigkeiten eine aktive Aufgabe mit serieller Wirkstruktur. Der Einsatz von Fahrerassistenzsystemen kann diese Wirkstruktur beeinflussen: ein teilautomatisiertes System zur Längsführung verlangt vom Fahrer die *aktive* Ausführung der übrigen Elemente der primären Fahraufgabe, unter anderem die verbleibende Führungstätigkeit in Fahrzeugquerrichtung. Die Aktivierung und anschließende Parametrierung des Längsführungssystems erfordern ebenfalls die *aktive* Einbindung des Fahrers in den Regelkreis, während hingegen die Überwachung des System hinsichtlich seiner Systemgrenzen sowie eine Plausibilisierung der Regeltätigkeit des Systems eine *monitive* Aufgabe für den Fahrer darstellt. Die Veränderungen durch die Integration verschiedener Fahrerassistenzsysteme in die Struktur des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises ist in Abschnitt 2.1.2.2 detailliert beschrieben. In [19] finden sich Leitlinien einer sinnvollen Gestaltung der Aufteilung zwischen Mensch und Maschine: Eine Maschine wird aufgrund ihrer hohen und determinierten Zuverlässigkeit und Verarbeitungskapazität primär zur Verarbeitung klar definierter Informationen und fest strukturierter Aufgabeninhalte eingesetzt werden. Als Beispiel dient ein Stauassistent zur Übernahme der Fahrzeugführung in einer kontrollierbaren Stau-

situation auf der Autobahn. Der Assistent muss vom Menschen aktiviert werden, die korrekte Ausführung der Funktion muss vom Fahrer anschließend überwacht werden. Aktiv handelnde Menschen werden hingegen für dynamische, situationspezifische Aufgaben eingesetzt. Ein Beispiel ist die Führung eines Fahrzeugs im dichten Stadtverkehr. Aufgrund der hohen Dynamik dieser Fahrsituation ist der Mensch als aktives Handlungsglied derzeit nicht zu ersetzen. Die stetige Weiterentwicklung der sensorischen Umfeldwahrnehmung ermöglicht jedoch eine maschinelle, monotive Unterstützung des aktiven Fahrers. So kann beispielsweise vor stehenden Hindernissen oder vor Kollisionen mit anderen Verkehrsteilnehmern (z.B. Fußgänger, Radfahrer) gewarnt oder stabilisierend eingegriffen werden. In Abhängigkeit der aktuell maßgeblichen Umgebungsparameter sind die jeweiligen Rollen von Fahrer und Maschine also zwischen aktiven und monitiven Ausprägungen vom Entwickler situationspezifisch variabel und sinnfälliger zu verteilen.

**Kompatibilität** Der vom Menschen im Rahmen eines Informationsverarbeitungsprozesses aufzubringende Aufwand zur Umcodierung von Informationen wird mittels des Kriteriums der *Kompatibilität* beschrieben. Dabei gliedert sich das Kriterium in die *primäre* und *sekundäre* Kompatibilität. Die primäre Kompatibilität ist ein Kriterium der Sinnfälligkeit zwischen Informationen bezüglich der Wirklichkeit, Anzeigen, Bedienelementen und inneren Modellen. Die Sinnfälligkeit von Anzeigen, Stellteil(en) und Wirklichkeit meint die *primäre äußere* Kompatibilität. Wie exemplarisch in [93] dargelegt, wird der Zusammenhang durch das Fahren einer Rechtskurve infolge der Drehung eines Fahrradlenkers verdeutlicht: ein verständlicher Zusammenhang zwischen der Drehrichtung am Stellteil und der Reaktion des Fahrrads ist gegeben.

Die *primäre innere* Kompatibilität bezieht sich hingegen auf die Sinnfälligkeit zwischen den vorhandenen inneren Modellen des Menschen und den wahrgenommenen Informationen aus der Peripherie. Der Nutzer hat aufgrund seiner Erfahrungen und Vorkenntnisse bestimmte Erwartungen an die Funktionsweise einer Maschine-Maschine-Schnittstelle. Nach [49] steht das Kriterium für den Anspruch der Erwartungskonformität hinsichtlich Funktion, Bewegung und Lage der Schnittstelle. Die jeweiligen Erwartungen sind nicht allgemeingültig, sondern gelten abhängig vom jeweiligen Kulturkreis. Beispielsweise steht die Betätigung eines Stellelements nach vorne, nach oben oder nach rechts, sowie eine Drehung eines Bedienelements im Uhrzeigersinn für eine Zunahme, eine Erhöhung oder eine Verstärkung eines korrespondierenden Effekts (vgl. [11]). Durch die Betrachtung eines fahrerinduzierten Bremsvorgangs im Kraftfahrzeug wird der Unterschied zwischen primärer innerer und äußerer Kompatibilität deutlich. Die Stellteilbewegung in Fahrzeuginnenraumrichtung infolge der Betätigung des Bremspedals entspricht nicht der resultierenden Fahrzeugverzögerung, die primäre äußere Kompatibilität ist bezüglich dieses Wirkzusammenhangs nicht gegeben - wohl aber bezüglich des Zusammenhangs zwischen Pedalbetätigung und Zunahme der Bremskraft. Die in unserem Kulturkreis gleichzeitig geltenden Stereotypen zwischen einer Bremspedalbetätigung und einer resultierenden Fahrzeugverzögerung stellen jedoch gleichzeitig die primäre innere Kompatibilität sicher.

Die *sekundäre* Kompatibilität gibt Auskunft über den Zusammenhang zwischen rotatorischen und translatorischen Bewegungsanteilen von Anzeigen und Stellelementen. Entsprechend ist es das Bestreben eines Interface-Designers, Drehsinn und Drehrichtung von Anzeigen und Stellteilen in Einklang zu bringen. Beispielsweise sollte eine Zunahme jedweder Art (Tankfüllung, Temperatur etc.) nicht durch die Linksdrehung eines Zeigers angezeigt werden, selbst wenn diese Zunahme durch eine Bewegung von links nach rechts angezeigt wird. Eine derartige Anzeige ist sekundär inkompatibel.

**Rückmeldung** Ein weiterer Einflussfaktor auf den Informationsfluss im Mensch-Maschine-System ist die *Rückmeldung*. Dieses Kriterium ist von großer Wichtigkeit, weil es einen Teil der vom Entwickler direkt beeinflussbaren Systemauslegung darstellt. Die Rückmeldung des Systems wird vom Bediener über die beteiligten Sinneskanäle aufgenommen und dient als Regelgröße für den Erfüllungsgrad der gestellten Aufgabe. Um dem Menschen durch die Art der Rückmeldung bei der Bildung einer validen Umfeldrepräsentation zu unterstützen, ist eine sorgfältige und adäquate Gestaltung der Rückmeldungsmodalitäten nötig. Zum einen ist die Kommunikation der eben vom Operator vorgenommenen Bedienungshandlung, zum anderen die Darstellung des aktuellen Systemzustands der Regelstrecke von Bedeutung. Die Zeit, innerhalb der eine verständliche Rückmeldung durch das System auf Eingaben des Bedieners erfolgen muss, orientiert sich an der Verarbeitungszeit der menschlichen Informationsverarbeitung (100-200 ms). Die technischen Effekte, die einer Nutzereingabe folgen, werden vom Benutzer als einheitliche Abläufe erlebt, wenn sie innerhalb einer Zeitspanne von 2s nach der Betätigung ablaufen. Hier ist jedoch zusätzlich eine Rückmeldung des Prozessfortschrittes oder eines ablaufenden Prozesses notwendig. Als Beispiel sei die Sanduhr genannt, die während der Verarbeitung von zeitaufwendigeren Prozessen am PC statt der üblichen Anzeige des Mauszeigers eingeblendet wird. (vgl. [19])

Optische Rückmeldung kann durch ein Anzeigeelement oder die Zeigerwirkung eines Stellteils erfolgen. Akustische Rückmeldung wird meist durch „Knacken“ bei einer Bedienelementbetätigung und durch Bestätigungstöne realisiert. Haptische Rückmeldung wird über Variationen im Kraft-Weg-Verlauf der Betätigung von Bedienelementen ermöglicht. Auch die Vibrationen von Touchdisplays oder Stellteilen wie dem Lenkrad oder Joysticks unterstützen diese Modalität. Auch die propriozeptiv wahrgenommene Beschleunigung eines Fahrzeugs in Folge einer Pedalbetätigung dient als Rückmeldesignal.

**Darstellungsart** Wird die Aufgabe und das Maß der Aufgabenerfüllung mittels einer Anzeige dargestellt, sind die beiden Ausprägungen des Mensch-Maschine-Regelkreises durch die vom Menschen erfahrbare Information über das System gekennzeichnet. Wird eine Aufgabe als *Folgeaufgabe* dargestellt, sind für den Menschen sowohl die Führungs- als auch die Nachführgröße eines Systems getrennt voneinander wahrnehmbar. Der Mensch als Regelement versucht die Nachführgröße an die Führungsgröße anzugleichen. Als Beispiel sei das Beleuchten des beweglichen Objekts (Schauspieler) auf einer halbdunklen Bühne mittels eines sog. *Verfolgers* genannt: dem menschlichen Regler, also dem Bediener des Verfolgers, ist jederzeit die aktuelle Position des Lichtkegels (Nachführgröße) sowie die Position des Schauspielers (Führungsgröße) bekannt, seine Aufgabe ist durch das Ausregeln der Differenz der beiden Größen beschrieben.

Stellt sich eine Aufgabe hingegen als Kompensationsaufgabe dar, ist für den Menschen lediglich die Differenz zwischen Führungs- und Nachführgröße erkennbar. Gekennzeichnet ist eine Kompensationsaufgabe auch durch das Fehlen eines absoluten Systemwerts. Die Regelaufgabe des Menschen besteht darin, eine Differenz durch Manipulation der Nachführgröße möglichst zu minimieren. Ein Anwendungsbeispiel ist nach [67] die Gewichtsbestimmung eines Objekts mit einer Balkenwaage. Ein unbekanntes Objektgewicht stellt die Führungsgröße des Regelkreises dar, durch die Vergrößerung bzw. Verkleinerung der Ausgleichsgewichte wird versucht, den Ausschlag der Waage (Differenz) auf Null zu regeln. Bei der manuellen Fahrzeugführung stellt sich dem Fahrer eine Kompensationsaufgabe, wenn er die Differenz aus einem Abgleich zwischen tatsächlicher und gewünschter Fahrzeugbewegung zu kompensieren versucht. Ein erfahrener Fahrer kann auf Basis vorliegender innerer Modelle den zukünftigen Verlauf des Fahrzeugverhaltens oder anderer maßgeblicher Faktoren abschätzen. Diese Nachführgröße wird an die Führungsgröße - den zukünftigen Straßenverlauf - angeglichen. Der Fahrer kennt beide Größen, in diesem Fall liegt also eine Folgeaufgabe vor. (vgl. [35])

Wie in [11] festgestellt wird, stellen die Aufgaben der Stabilisierungsebene der primären Fahraufgabe aufgrund der kurzen zur Verfügung stehenden Zeitspannen Kompensationsaufgaben dar, während die Navigationsaufgabe aufgrund des außergewöhnlich großen perspektivischen Wechsels bei der maßstabgetreuen Routendarstellung auf Displays oder Landkarten eine Folgeaufgabe repräsentiert. Die Teilaufgaben der Fahrzeugführungsebene ergeben ein differenzierteres Bild:

Die Analyse der *Querführungsaufgabe* eines Kraftfahrzeugführers nach [61] lässt bezüglich der Darstellungsart der Aufgabe unterschiedliche Schlüsse zu. Im niedrigen Geschwindigkeitsbereich bis etwa 25 km/h beeinflusst ein Fahrer die Krümmung seiner Trajektorie auf Basis eines Ist-/Soll-Abgleichs. Ein erfahrener Fahrer kann sich jedoch mittels innerer Modelle die Position des Ego-Fahrzeugs vorstellen, ebenso sieht er den Sollkurs entlang des Straßenverlaufs. In diesem Fall ist die Fahrzeugquerführung eine Folgeaufgabe. Im höheren Geschwindigkeitsbereich ab etwa 45 km/h kompensiert der Fahrer den Gierwinkelfehler. Die Querführung entspricht in diesem Bereich einer Kompensationsaufgabe. Im diffusen Übergangsbereich vermutet [61] eine Verwendung beider Regelgrößen (Krümmung und Gierwinkelfehler) durch den Fahrer.

Mögliche Erklärungen für die mit der Geschwindigkeit veränderlichen Darstellungsart der Querführungsaufgabe liegen in der zunehmenden Beanspruchung des Fahrers durch die höhere Geschwindigkeit. Diese bedingt eine Einengung des Blickfeldes des Fahrers durch den nach vorne wandernden Vorausschaupunkt. Er sieht lediglich die Seitenabweichung und den Gierwinkelfehler und stellt vermutlich zur Optimierung seiner kognitiven Belastung keine Vergleiche mit inneren Modellen an. (vgl. [61])

Daher wird angenommen, dass die Fahraufgabe in (stark) beanspruchenden Situationen „eher eine Kompensationsaufgabe“ ([61], S.107) darstellt.

Eine Analyse der *Längsführungsaufgabe* nach [61] legt die Vermutung nahe, dass sich die Geschwindigkeitsregelung aus Folge- und Kompensationsaufgaben zusammensetzt. Bezüglich der Geschwindigkeitsregelung sind dem Fahrer durch aus der Informationsverarbeitung vorliegenden Informationen jederzeit die Führungsgröße und die Nachführgröße des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises bekannt. Die Wunschgeschwindigkeit des Fahrers repräsentiert hierbei die Führungsgröße. Sie ergibt sich einerseits aus explizit oder implizit vorliegenden Geschwindigkeitsbegrenzungen. Explizit werden Begrenzungen der erlaubten Geschwindigkeit auf Verkehrsleitsystemen oder Schildern kommuniziert, implizite Geschwindigkeitsbeschränkungen ergeben sich beispielsweise aus allgemeinen Grundsätzen der Straßenverkehrsordnung (z.B. die 100 km/h-Grenze auf Landstraßen). Einen zusätzlichen Einfluss auf die Führungsgröße *Wunschgeschwindigkeit* stellt die Risikoakzeptanz dar. Aspekte wie Straßenzustand oder Sichtverhältnisse, fahrdynamische Grenzen des eigenen Fahrzeugs als Stellgrößen für das objektive Risikoempfinden und das persönlichkeitsorientierte, personenspezifische subjektive Risikoempfinden gehen in die Bildung der Führungsgröße ein. Die aktuell gefahrene Geschwindigkeit bildet die Nachführgröße des Regelkreises. Diese ergibt sich konkret durch das Ablesen des Tachometers, oder durch Schätzungen anhand multimodal erfasster Erfahrungswerte. Hierbei spielen unter anderem die visuelle Wahrnehmung durch Interpretation des Geschwindigkeitsvektorfelds auf der Retina und die akustische Wahrnehmung durch Verarbeitung des Geräuschespektrums (Windgeräusche, Motordrehzahl etc.) eine Rolle. Bei der Kurvenfahrt wird die kinästhetische Wahrnehmung mittels der Vestibularorgane in die Fahrgeschwindigkeitsschätzung mit einbezogen (vgl. 2.1.1.2). Ein Absolutwert der Fahrgeschwindigkeit wird vom Tachometer abgelesen. (vgl. [61], [35])

Die Abstandsregelung vermittelt hinsichtlich der Darstellungsart der Längsführungsaufgabe ein abweichendes Bild. Um beispielsweise im Stadtverkehr hinter einem stehenden PKW zum Stillstand zu kommen, versucht der Fahrer im Rahmen einer Kompensationsaufgabe direkt die sichtbare Differenz zwischen seinem Fahrzeug und dem Vorderfahrzeug auf ein sinnvolles Maß zu reduzieren. Stellt sich der

Fahrer mittels innerer Modelle die Position des Ego-Fahrzeugs vor, ist die Darstellungsart der Abstandsregelung aufgrund des ebenfalls sichtbaren Sollwerts (Position hinter dem Vorderfahrzeug) eine Folgeaufgabe.

Ein Wechsel zwischen den Darstellungsarten erfolgt bei Längs- und Querführungsaufgaben zum einen durch situationsabhängige Verteilung der kognitiven Ressourcen. Beanspruchende Situationen erfordern intensive Regeltätigkeit mit hoher Regelfrequenz. Auf diese Weise verbleibt weniger kognitive Kapazität für die aufgrund der notwendigen inneren Modellbildung aufwendigere Verarbeitung von Folgeaufgaben. Der Fahrer neigt in solchen Situationen dazu, die direkt sichtbare Differenz zwischen Führungs- und Nachführgröße auszuregulieren. Zusätzlich ist die vorliegende Darstellungsart einer Fahraufgabe aber auch stets eine Folge des individuellen Erfahrungsschatzes des Fahrers. Erfahrene Fahrer sind in der Lage, durch die Bildung sinnvoller Situationsrepräsentationen bzgl. des Straßenverlaufs oder der Position des Egofahrzeugs und anderer Verkehrsteilnehmer diskrete, interne Führungsgrößen zu bilden und Aufgaben als Folgeaufgaben zu bewältigen. (vgl. [61], [35])

Auf Basis der Analyse der beschreibenden Differentialgleichungen ergibt sich nach [61] für die Abstandsregelung als Regelung der Antriebskraft durch die Gaspedalstellung vereinfachend ein Geschwindigkeitssystem (Typ 1) mit einer Beschleunigungssteuerung (Ordnungsgrad 2). Durch das Bremspedal stellt sich die Abstandsregelung als ein Beschleunigungssystem (Typ 2) mit Beschleunigungssteuerung (Ordnungsgrad 2) dar. Eine Geschwindigkeitsregelung durch das Gaspedal verkörpert ein Positionssystem (Typ 0) mit einer Geschwindigkeitssteuerung (Ordnungsgrad 1) dar. Die Geschwindigkeitsregelung durch das Bremspedal verkörpert ein Geschwindigkeitssystem (Typ 1) mit Geschwindigkeitssteuerung (Ordnungsgrad 2). Weitere Parameter, mit deren Hilfe der Fahrer die Längsdynamik beeinflussen kann sind beispielsweise Roll- und Steigungswiderstände oder das Motorschleppmoment. Diese indirekten Stellgrößen werden an dieser Stelle vernachlässigt.

Für Folgeaufgaben eignet sich laut [61] und [18] besonders eine Positions- bzw. Lagesteuerung (0. Ordnung), der Regelfehler ist hier minimal. Für Kompensationsaufgaben ist eine Geschwindigkeitssteuerung (1. Ordnung) besonders gut geeignet. Aus den Betrachtungen zur Darstellungsart der Fahraufgabe und dem korrespondierenden Ordnungsgrad wird deutlich, dass die Dynamik zwischen Fahrer und Fahrzeugreaktion bei unveränderter Regelstrecke Fahrzeug aufgrund der unterschiedlichen Darstellungsarten bei verschiedenen Fahraufgaben und Fahrsituationen vom Fahrer unterschiedlich interpretiert werden. Diese Unterschiede und Wechselwirkungen sind bei der Entwicklung neuartiger Bedienelemente nach Möglichkeit zu berücksichtigen:

Einerseits sollte die Steuerung (d.h. der Ordnungsgrad) des Regelkreises den situationsabhängig vorherrschenden Aufgabentyp so weit wie möglich unterstützen. Andererseits sollte die Anzeige- und Bedienelementgestaltung die Darstellungsart der Aufgabe unterstützen. Für Kompensationsaufgaben ist eine Unterstützung der Differenzwertanzeige anzustreben, für Folgeaufgaben ist eine Unterstützung der inneren Modellbildung vorzusehen. Für neuartige Fahrsituationen, wie beispielsweise eine vollautomatische Fahrzeugführung im Stau, sind diese inneren Modelle für eine bessere Anpassung der Mensch-Maschine-Schnittstelle zu analysieren.

### 2.1.1.5 Umwelt

Als weiteres zentrales Element des Fahrer-Fahrzeug-Umwelt-Regelkreises wirkt die *Umwelt* auf die internen Informationsflüsse der Systemstruktur. Das Element beschreibt zusammenfassend die Einflüsse aus der Umgebung, die auf die Eingangsgröße des Regelkreises, den Regler Fahrer, die Regelstrecke

Fahrzeug sowie den Informationsaustausch zwischen diesen beiden Elementen einwirken. Der Informationsfluss zwischen Umwelt und den Elementen des Regelkreises ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

Störende Einflüsse auf den Fahrer können zum Beispiel durch die herrschenden Lichtverhältnisse gegeben sein. So können etwa zu geringe Ausleuchtung der Umgebung oder starker Niederschlag die Sicht nach außen einschränken. Ein weiterer Störfaktor der Umgebung auf das Element Fahrer ist die Blendung. Diese kann durch andere Verkehrsteilnehmer oder die Verkehrsinfrastruktur (Baustellen, Einflugschneisen von Flughäfen etc.) erfolgen. Sie wird unter Umständen durch die Witterungsbedingungen und daraus resultierenden Lichtreflexionen an Wasser in seinen Aggregatzuständen (Schnee, Regen, Nebel) zusätzlich verstärkt.

Im Fahrzeuginnenraum können die herrschenden Lichtverhältnisse ebenfalls den Informationsfluss im Regelkreis beeinträchtigen. Die Störgröße wirkt an dieser Stelle jedoch nicht direkt auf den Fahrer, sondern auf die Mensch-Maschine-Schnittstelle. Blendungen und Spiegelungen, aber auch fehlende oder schwache Hinterleuchtung von Bedienelementen wie Hebel und Tasten behindern die Orientierung und Bedienung des Fahrers im Fahrzeug-Cockpit.

Verminderte oder stark unterschiedliche Reibschlusswerte zwischen Reifen und Fahrbahn aufgrund der infrastrukturell- oder witterungsbedingten Oberflächenbeschaffenheiten der Fahrbahn verringern den Radius des Kamm'schen Kreises. In der Folge sinken die Beträge der übertragbaren Kräfte. Auch starke Seitenwinde zählen zu Störfaktoren, die einen unmittelbaren Einfluss auf die Regelstrecke Fahrzeug nehmen. Durch die in Abbildung 2.1 dargestellten, verkoppelten Informationsflüsse im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis wirken sich störende Umwelteinflüsse auf alle Elemente und deren Schnittstellen des Regelkreises aus.

Bei der Entwicklung von Bedienkonzepten ist daher Sorge zu tragen, die negativen Einflüsse aus der Umwelt auf die Mensch-Maschine-Schnittstelle nicht zu verstärken bzw. nach Möglichkeit zu minimieren. Blendungen und Spiegelungen in hochglänzenden Materialien oder den Fahrzeugscheiben sind zu vermeiden. Zusätzlich sollen die Bedienkonzepte die Möglichkeit adäquater Fahrerreaktionen auf die Umgebungsbedingungen gewährleisten und nach Möglichkeit unterstützen.

Die Ausführungen zum Element *Umwelt* umfassen die im Kontext der Schnittstellengestaltung relevanten Einflüsse der Umwelt auf die Elemente und Schnittstellen im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis. Das Element ist in diesem Rahmen lediglich zweckgebunden und folglich in seiner Komplexität nicht vollständig beschrieben. Weiterführende Informationen finden sich z.B. in [82].

### 2.1.2 Fahrerassistenzsysteme im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis

Der Begriff Fahrerassistenzsysteme umfasst eine Vielzahl von Systemen unterschiedlicher Ausprägung zur Unterstützung des Fahrers. Sicherheitsorientierte Systeme assistieren dem Fahrer durch die Übernahme komplexer und zeitkritischer Aufgaben. Komfortorientierte Systeme ermöglichen dem Fahrer eine Delegation belastender und/oder monotoner Aufgaben an die Automation. Diese Aufteilung in Sicherheits- und Komfortsysteme repräsentiert *eine* Möglichkeit zur Kategorisierung von FAS. Der folgende Abschnitt erläutert im Detail die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Klassifikation bzw. zur Kategorisierung von FAS. In der Literatur finden sich die aufgeführten Kategorisierungsmöglichkeiten z.B. in [79]. Die Integration von FAS in den allgemeinen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis verlangt nach Anpassungen der ursprünglichen Systemstruktur. Diese Anpassungen stehen in starker Abhängigkeit zur Kategorie und folglich zur Funktionsausprägung des jeweiligen Assistenzsystems. Im Anschluss an die

Beschreibung der FAS-Kategorien werden die verschiedenen Kooperationsformen von FAS und Fahrer beschrieben und die Folgen für die Struktur des Mensch-Maschine-Systems dargestellt.

### 2.1.2.1 Kategorisierung von Fahrerassistenzsystemen

Eine Möglichkeit zur Kategorisierung von FAS besteht in einer Einteilung nach der Art ihrer *Systemausgabe*. *Informierende* und *warnende* FAS kommunizieren über ihre verschiedenen Informationsaufnahme Kanäle mit dem Fahrer oder anderen Verkehrsteilnehmern. Sie versuchen die Aufmerksamkeit auf relevante Situationen mit unterschiedlicher Kritikalität zu lenken.

Ein *Lane Departure Warning (LDW)* bzw. eine *Spurverlassenswarnung* warnt den Fahrer beispielsweise durch eine visuelle Anzeige und/oder durch eine Vibration des Lenkrads vor einem unbeabsichtigten Verlassen des Fahrstreifens. Ein Beispiel für ein *informierendes* FAS ist die *Verkehrszeichenerkennung (VZE)*. Diese informiert den Fahrer über Beschilderungen, wie etwa aktuell vorliegende Geschwindigkeitsbegrenzungen oder Überholverbote.

Im Gegensatz hierzu stehen die *agierenden* oder *eingreifenden* Systeme. Diese FAS haben über unterschiedliche Aktoren die Möglichkeit, direkt in die Fahrzeugführung einzugreifen. Die Weiterentwicklung eines LDW-Systems stellt die aktive Spurverlassenswarnung in Form von *Lane Keeping Assistance Systemen (LKAS)* dar. Analog der informierenden LDW-Variante erfolgt die Systemausgabe beim unbeabsichtigten Verlassen des Fahrstreifens. Die Ausgabe erfolgt mittels eines gerichteten Lenkmoments zur Spurmitte. Das FAS greift demnach direkt in die Fahrzeugführung ein.

Eine weitere Möglichkeit zur Kategorisierung besteht in einer Unterscheidung der *Ebene der primären Fahraufgabe* (vgl. 2.1.1.1), innerhalb welcher das FAS wirkt. Navigationssysteme sind Beispiele für FAS der Navigationsebene.

Das *Electronic Stability Control* zur Stabilisierung des Fahrzeugs bremst einzelne Räder ab und drosselt bei Bedarf die Motorleistung, um einem Über- oder Untersteuern des Fahrzeugs entgegenzuwirken. Ein *Anti-Blockier-System (ABS)* dient unter anderem zum Erhalt der Lenkbarkeit des Fahrzeugs während Vollbremsungen. Diese Systeme wirken auf der Stabilisierungsebene der primären Fahraufgabe. Sie unterstützen den Fahrer in zeitkritischen Situationen, in denen eine die menschliche Leistungsfähigkeit überschreitende Regelfrequenz zur Stabilisierung des Fahrzeugs nötig ist.

FAS der Führungsebene unterstützen den Fahrer hingegen beim kollisionsfreien Manövrieren des Fahrzeugs im unmittelbar vorliegenden Streckenabschnitt. Ein exemplarisches System der *Längsführungsassistenz* stellt demnach eine *Geschwindigkeitsregelanlage (GRA)* dar. Diese kann bei Bedarf dem Fahrer die Aufgabe des Beschleunigens auf und des Haltens einer Wunschgeschwindigkeit abnehmen. Ein *Adaptive Cruise Control System (ACC)* als Weiterentwicklung einer GRA ermöglicht zusätzlich zur aktiven Geschwindigkeitsregelung die Regelung eines Sollabstands zu regelrelevanten Vorderfahrzeugen (vgl. z.B. [40]). Eine *Querführungsassistenz* wird durch eine Ausbaustufe der aktiven Spurverlassenswarnung repräsentiert. Ein System zur Spurmittenführung, wie beispielsweise der in [45] detaillierte *AUDI active lane assist (AALA)* (mit der Parametrierung „Lenkzeitpunkt früh“) versucht durch kontinuierliche Lenkeingriffe das Fahrzeug in Richtung Spurmitte zu führen. Eine detaillierte funktionale und technische Beschreibung der Systeme ACC, AALA und im Rahmen dieser Arbeit betrachteter Evolutionsstufen dieser Systeme erfolgt in Kapitel 2.3.

Eine weitere Möglichkeit zur Kategorisierung von Fahrerassistenzsystemen besteht in einer Einteilung nach dem *Automationsgrad*. In dieser Arbeit wird dabei ein Spektrum von der *manuellen Fahrt* bis hin



zu *autonomer Fahrzeugführung* betrachtet. Die manuelle Fahrt beschreibt einen Modus, innerhalb dessen ein Fahrer die komplette Fahrzeugführung selbst ausführt. Eingreifende FAS agieren lediglich im Bedarfsfall auf der Stabilisierungsebene (z.B. ABS oder ESC), informierende und warnende FAS können übergreifend auf allen Ebenen der primären Fahraufgabe Ausgaben für den Fahrer generieren. Die Systemausgaben werden automatisiert ausgelöst (auch: *getriggert*), die Aktivierung des Systems erfolgt beim Start des Fahrzeugs automatisch oder durch den Fahrer vor oder während der Fahrt. Im *autonomen* Modus wirken Systeme mit dem höchsten Automatisierungsgrad. Der Fahrer gibt die komplette Fahrzeugführung an einen Automaten ab. Die Vision eines perfekten autonomen Systems führt - ausgenommen der Zielvorgabe durch den Fahrer auf der Navigationsebene - sämtliche Aufgaben der drei Ebenen der primären Fahraufgabe aus. Beim Erreichen von Systemgrenzen ist ein autonomes FAS selbstständig in der Lage, einen sicheren Zustand zu erreichen. Für die Abstufung innerhalb dieses Spektrums finden sich in der Literatur unterschiedliche Ansätze:

In [51] wird ein kontinuierliches Spektrum zwischen der rein manuellen und der vollautomatisierten Fahrt beschrieben. Die Übergänge zwischen den Modi *manuell*, *assistiert*, *semiautomatisiert*, *hochautomatisiert* und *vollautomatisiert* innerhalb dieses beispielhaften Spektrums sind kontinuierlich und determinieren die prozentuale Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Maschine. Die Fahrt mit einem ACC oder LKAS ist laut [51] aufgrund der beim Fahrer verbleibenden Aufgaben einem semiautomatischen Modus zuzuordnen. Integrierte Längs- und Querführungssysteme sind in der Konsequenz der Hoch- bzw. der Vollautomation zugeordnet. Der feine Unterschied zwischen einer hoch- und einer vollautomatisierten Fahrt besteht darin, dass bei der hochautomatisierten Fahrt der Fahrer weiterhin die Trajektorie auf der Führungsebene beeinflusst. Diese Teilaufgabe der Fahrzeugführung übernimmt in der Vollautomation ebenfalls der Automat. Ein komplett autonomer Modus wird nicht konkret beschrieben.

Nach der Systematik aus [59] wird das Automationsspektrum in die Modi der *Teil-* und der *Vollautomation* unterteilt. Diese Kategorisierung repräsentiert einen nutzerzentrierten Ansatz. Hier steht eine für den Fahrer klar untergliederte und nachvollziehbare Aufteilung der Bestandteile der primären Fahraufgabe zwischen Mensch und Maschine im Vordergrund.

In der *Teilautomation* wird die Fahraufgabe über einen längeren Zeitraum hinweg zwischen Fahrer und Fahrzeug aufgeteilt. Wesentlich ist hierbei, dass ein Teil der Fahraufgabe stets beim Fahrer verbleibt. Eine Autobahnfahrt mit aktivem ACC zur Längsführungsautomation in Kombination mit einem Querführungsassistenten mit aktiver Spurmittenführung ist in dieser Nomenklatur ebenfalls der Teilautomation zuzuordnen. Während die Längsführungsaufgabe komplett vom System übernommen wird, liegt ein Teil der Querführungsaufgabe auch bei einer systemseitigen Spurmittenführung weiterhin beim Fahrer. In [57] wird der *teilautomatische* Modus durch die *automatisch unterstützenden* und *semiautomatischen* FAS repräsentiert. Diese Aufteilung erfolgt anhand der funktional bedingten Kooperationsformen von FAS und Fahrer (vgl. Abschnitt 2.1.2.2) und detailliert den Modus der *Teilautomation* nach [59].

Nach [57] *vollautomatische* FAS sind in der Lage, dem Fahrer die komplette Fahrzeugführungsaufgabe abzunehmen. Sämtliche Steuer- und Regelungstätigkeiten werden vom FAS ausgeführt, dem Fahrer wird eine rein monitive Aufgabe zuteil. Er muss das Systemverhalten des FAS überwachen und ein potentiell kritisches Fehlverhalten erkennen. Erachtet der Fahrer einen Eingriff als notwendig oder wird er vom System zur Übernahme aufgefordert, ist er dafür verantwortlich die Fahrzeugführung zu übernehmen und einen sicheren Zustand herzustellen. Um eine adäquate Fahrerreaktion zu gewährleisten, muss der Fahrer analog der rein manuellen Fahrt aufmerksam und reaktionsfähig sein. Ein Stauassistent nach [118] ist ein Beispiel für ein vollautomatisches FAS dieser Nomenklatur. Die detaillierte Systembeschreibung eines vollautomatischen Stauassistenten findet sich in Abschnitt 2.3.1.

Als Erweiterung verfügt ein *autonomes* System der Fahrzeugführungsebene nach [57] und [59] über eine eigenständige Rückfallebene. Redundante Überwachungsmechanismen sind in der Lage, das Systemverhalten zu überwachen. Erkennt das System unplausibles Verhalten des FAS oder werden seine Systemgrenzen erreicht, wird der Fahrer zur Übernahme des Fahrzeugs aufgefordert. Bei ausbleibender Fahrzeugübernahme durch den Fahrer nach systemseitiger Aufforderung führt das autonome FAS das Fahrzeug selbstständig in einen sicheren Zustand. Die Autonomie stellt eine umfangreiche, visionäre Weiterentwicklung von vollautomatischen Systemen dar. Technische Umsetzungen sind derzeit nicht bekannt, als Anwendungsbeispiel dient ein autonomer Stauassistent. Im Unterschied zur Vollautomation dient der Fahrer hier nicht mehr zwangsläufig als Rückfallebene und kann sich theoretisch mit Nebentätigkeiten beschäftigen.

In [86] wird für eine Simulatorstudie zur Nutzererwartung und zum Nutzerverhalten ein ähnliches Spektrum wie in [59] appliziert. Neben einer *teilautomatisierten* ACC-Fahrt repräsentieren hier die Modi *Assistent* und *Pilot* den Bereich der *Hochautomation*. Im *Pilot*-Modus wird dem Fahrer zusätzlich zur Längs- die Querführungsaufgabe komplett abgenommen. Im *assistierten* Modus greift das FAS lediglich unterstützend in die Querführung ein.

Die *Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)* schlägt in [46] als Aufteilung des Automationsspektrums eine Gliederung in die Untergruppen *Driver Only*, *Assistiert*, *Teilautomatisiert*, *Hochautomatisiert* und *Vollautomatisiert* vor. Der Projektbericht beschäftigt sich primär mit den Rechtsfolgen eines Einsatzes von hochautomatisierten FAS im Automotive-Bereich, der Ansatz kategorisiert diese Systeme anhand einer Verteilung der Verantwortlichkeiten innerhalb des Mensch-Maschine-Systems. Die Kategorisierung beschränkt sich dabei auf eingreifende Systeme der Führungsebene. FAS, die dem Fahrer über einen längeren Zeitraum hinweg in gewissen Grenzen einen Teil der Fahrzeugführung - also entweder die Quer- oder die Längsführungsaufgabe - abnehmen, werden als *assistiert* deklariert. Ein *teilautomatisiertes* System übernimmt hingegen für einen längeren Zeitraum die Längs- und Querführung des Fahrzeugs, der Fahrer muss *im Loop* bleiben und jederzeit zur Übernahme des Fahrzeugs bereit sein. Im *hochautomatisierten* Betrieb ist eine Systemüberwachung einer integrierten Längs- und Querführungsfunktion durch den Fahrer nicht mehr dauerhaft notwendig. Wird der Fahrer zur Fahrzeugübernahme aufgefordert, erfolgt dies mit ausreichend großem zeitlichen Puffer. Das System kann jedoch nicht selbstständig aus allen denkbaren Situationen einen sicheren Zustand erreichen. Diese Erweiterung ist den *vollautomatisierten* FAS vorbehalten, der Fahrer muss nicht mehr zwingend als Rückfallebene der Funktion zur Verfügung stehen.

Für weitere Möglichkeiten zur Kategorisierung von FAS (z.B. nach der Art des Aktors oder nach Art der genutzten Sensorik) sei der interessierte Leser auf [79] oder [74] verwiesen. Ziel der Arbeit ist die Entwicklung eines systemergonomisch optimierten Mensch-Maschine-Systems. Die von der BASt gewählte Nomenklatur zur Kategorisierung dieser FAS stellt die rechtlichen Aspekte der Automatisierung der Fahrzeugführung in den Vordergrund. In dieser Arbeit steht im Gegensatz hierzu der Informationsfluss innerhalb des Mensch-Maschine-Systems im Zentrum der Entwicklung. Daher erfolgen die weiteren Entwicklungsschritte auf Basis einer nutzerzentrierten Kategorisierung der FAS nach dem Automatisierungsgrad analog [59]. Zudem erfolgt eine weitere Klassifizierung der Fahrzeugführungssysteme in die Modi der Teilautomation (TA), der Vollautomation (VA) und der Autonomie (AUTON). Eine Zuordnung von Systemen zu den einzelnen Modi erfolgt in Kapitel 2.3, die konzeptionelle Definition des Automationsspektrums findet sich in Kapitel 3.1.

### 2.1.2.2 Kooperationsformen

Die Rollenverteilung zwischen FAS und Fahrer wird als *Kooperationsform* bezeichnet. Wesentliche Kriterien zur Beschreibung der verschiedenen Formen von Kooperation zwischen Fahrern und Assistenzsystemen sind die Anordnung von Fahrer und Automat innerhalb des Regelkreises sowie deren zeitliche Wirkreihenfolge. Die nachfolgend beschriebenen, theoretischen Grundlagen zu den Ausprägungen paralleler und serieller Kooperation entstammen [51].

Bei einer *parallel* angeordneten Struktur von Fahrer und FAS wirken beide Elemente über einen parallelen Wirkungspfad gleichzeitig auf das Fahrzeug. Bei einer *seriell* angeordneten Assistenz hingegen wirkt der Fahrer durch ein Assistenzsystem über einen seriellen Wirkungspfad auf das Fahrzeug, eine direkte Kommunikation zwischen Fahrer und Fahrzeug ist nicht vorgesehen.

Die zeitliche Wirkreihenfolge unterscheidet zwischen *simultaner* und *sequentieller* Verarbeitung von Eingaben durch den Nutzer und des Assistenzsystems. *Simultane* Wirkreihenfolge liegt bei zeitgleicher Umsetzung von Fahrer- und Systemeingaben sowie bei Umsetzung der Eingaben ohne Zeitverzug vor. Bei einer *sequentiellen* Assistenz werden Eingaben durch den Nutzer und durch das System abwechselnd verarbeitet. Auch die Verarbeitung von ereignisdiskreten Fahrereingaben meint eine *sequentielle* Kooperationsform. Diese Beschreibung ist abzugrenzen vom Kriterium *Bedienung* aus 2.1.1.4 einer systemergonomischen Aufgabenanalyse. Hier beschreiben die Begriffe *simultan* und *sequentiell* die notwendige zeitliche Wirkreihenfolge bei der Bedienung eines Systems. Im Kontext der Kooperationsformen wird damit die Wirkstruktur von Fahrer und FAS auf das Fahrzeug beschrieben.

**Parallele Kooperationsformen** Eine Möglichkeit der Kombination von Anordnung und zeitlicher Wirkreihenfolge ist die *parallel-simultane* Kooperation zwischen Mensch und Maschine. Eine Eingabe des Fahrers über die Benutzerschnittstelle wird sowohl an das Fahrzeug wie auch an das Fahrerassistenzsystem übermittelt. In Abhängigkeit sensierter Informationen über den Fahrzeugzustand trifft das FAS eine Eingriffsentscheidung. Die Bedienhandlung des Fahrers wird gegebenenfalls ergänzt. Die Wirkweise einer parallelen-simultanen Kooperationsform ist in Abbildung 2.4 illustriert. Die Verarbeitung von Fahrereingaben und Eingaben des FAS werden in einem Summenpunkt überlagert. Als Beispiel für ein parallel-simultanes Wirkungsgefüge zwischen Fahrer und FAS dient das Querführungsassistenzsystem AALA. Zeitgleiche Eingaben von Fahrer und FAS werden überlagert und über einen Summenpunkt an das Fahrzeug weitergegeben.

Eine weitere Kombinationsmöglichkeit ist die *parallel-sequentielle* Kooperation. Fahrer und Assistenzsystem wirken hier alternierend auf das Fahrzeug ein, parallele Eingaben werden entsprechend einer festgelegten hierarchischen Struktur über eine logische „ODER“-Verknüpfung abgearbeitet: entweder die Eingabe des Fahrers *oder* die Eingabe des Assistenzsystems dient als Eingangsparameter für das Fahrzeug (vgl. [51]). Abbildung 2.4 veranschaulicht die Wirkweise des Regelkreises über einen logischen „ODER“-Schalter. Ein ACC-System zur Unterstützung des Fahrers bei der Längsführung setzt eine parallel-simultane Kooperationsform um. Aufgrund der hierarchischen Struktur von Fahrer und FAS werden die Pedalbetätigungen des Fahrers stets an das Fahrzeug weitergegeben, das aktivierte System ordnet sich den Fahrereingaben unter. Betätigt der Fahrer die Pedale nicht, werden ausschließlich die Regelbefehle des ACC an das Fahrzeug weitergegeben.

**Serielle Kooperationsformen** Bei einer seriellen Anordnung von Fahrer und Assistenzsystem ergeben sich erneut zwei Möglichkeiten der zeitlichen Wirkreihenfolge:

Eine *seriell-simultane* Kooperationsform schließt eine direkte Kommunikation zwischen Fahrer und Fahrzeug aus. Fahrereingaben werden an das Assistenzsystem übermittelt, dort weiterverarbeitet und ohne Zeitverzug an das Fahrzeug weitergegeben. Als Beispiel dienen hier sämtliche „by-Wire“-Systeme, also Bediensysteme ohne mechanischer Kopplung von Stellteil und Maschine. Ein elektronisches Gaspedal repräsentiert eine seriell-simultane Verkoppelung von Fahrer und FAS: Benutzereingaben werden über einen Pedalwertgeber gemessen, an das Motorsteuergerät übergeben, verarbeitet und in Form von Steuerbefehlen an die Drosselventile (beim Ottomotor) oder das Einspritzsystem (beim Dieselmotor) weitergeleitet.

Im Gegensatz dazu sind bei einer *seriell-sequentiellen* Kooperationsform Eingaben des Fahrers lediglich zu diskreten Zeitpunkten nötig, eine Fahrereingabe triggert eine bestimmte Routine des Assistenten. Diese wird dann selbstständig vom FAS abgearbeitet. Entsprechend erfolgt hierbei lediglich eine ereignis- bzw. zeitdiskrete Kommunikation zwischen Fahrer und Fahrzeug. Ein Navigationssystem dient als Beispiel für eine seriell-sequentielle Kooperation von Fahrer und FAS auf der Navigationsebene. Die internen Routinen eines Navigationsgerätes werden durch zeitlich diskrete Fahrereingaben (Zieleingabe, Starten der Zielführung) getriggert und laufen im Anschluss ohne weiteres Zutun des Nutzers ab.

Die seriellen Kooperationsformen finden sich in Abbildung 2.4. Wie abgebildet erfolgt die Kommunikation von Mensch und Maschine ausschließlich über einen seriellen Wirkpfad, dem stets das FAS zwischengestaltet ist.

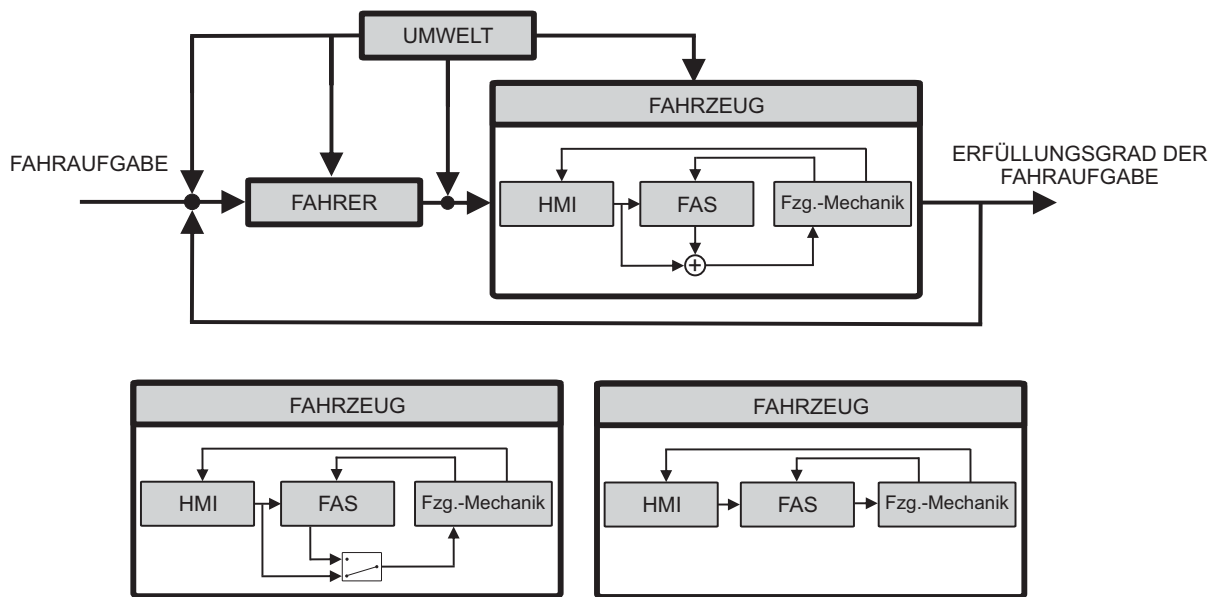


Abbildung 2.4: Parallel-simultane (oben), parallel-sequentielle (unten links), seriell-sequentielle und -simultane Kooperationsformen zwischen Mensch und Maschine, adaptiert nach [51]

Als Basis der Entwicklung von Mensch-Maschine-Systemen muss der Nutzer laut [51] „[...] ein mentales Modell eines jeden vorhandenen Fahrerassistenzsystems mit dessen spezifischer Mensch-Maschine-Schnittstelle aufbauen und dessen funktionale Grenzen verinnerlichen[...]“ (S.647). Da die systembedingte Kooperationsform ein wesentliches Charakteristikum eines FAS ist, postuliert diese Aussage

implizit eine verständliche, konsistente und durchgängige funktionale Gestaltung der Fahrer-Fahrzeug-Kooperation im Kontext der automatisierten Fahrzeugführung. Dadurch wird die Ausbildung eines inneren Modells der jeweiligen Kooperation und folglich die Schaffung eines Bewusstseins der jeweiligen Systemgrenzen gefördert. Zudem ist eine konsistente Kooperationsform die Grundlage einer transparenten und leicht erlernbaren Mensch-Maschine-Schnittstelle.

### 2.1.2.3 Auswahl eines Automationsgrades und einer Kooperationsform

Die rasante Entwicklung von Assistenzsystemen bietet auch zukünftig die Möglichkeit funktionaler Systemintegration. Die Bandbreite an verfügbaren Automatisierungsstufen und damit auch der korrespondierenden Mensch-Maschine-Kooperationsformen nimmt folglich zu. Nach [81] existieren zwei verschiedene Ansätze, den Unterstützungsgrad an die situationsspezifischen Anforderungen der Elemente des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises anzupassen:

Bei einer *adaptiv* ausgeprägten Assistenz ermittelt das Assistenzsystem den optimalen Grad an Unterstützung für den Fahrer. Wird beispielsweise durch geeignete Sensorik eine Verminderung der Fahrleistungen detektiert (Indikatoren sind z.B. ein Nachlassen der Spurhaltegröße oder eine unverhältnismäßige Veränderung von Regel- und Steueranteilen im Querführungsverhalten, vgl. [25]), können intelligente Algorithmen Müdigkeit und/oder Nachlassen der Vigilanz des Fahrers diagnostizieren. Ein adaptives System delegiert in der Folge dem Fahrer vermehrt Teilaufgaben der primären Fahraufgabe, die Kooperationsform und der Automationsgrad werden in Richtung einer stärkeren Einbindung des Fahrers in die Fahraufgabe verändert. Ziel der systeminitiierten Adaption ist es, den Fahrer durch die höhere Frequenz der notwendigen Bedienhandlungen verstärkt zurück in die Fahrverantwortung zu holen. Adaptive Systeme bergen das Risiko, durch systeminitiierte Zustandsänderungen den Nutzer zu stark zu fordern und die Erlernbarkeit und Transparenz des Systems einzuschränken. (vgl. [81])

Im Gegensatz zu diesem adaptiven Ansatz ermöglicht eine *adaptierbare* Automation die selbstständige Auswahl des gewünschten Unterstützungsgrades und der gewünschten Kooperationsform durch den Benutzer. Die Adaption ist benutzerinitiiert. Wie in [81] beschrieben, delegiert der Mensch die Aufgaben an die Automation und koordiniert den Automationsgrad und die Kooperationsform. Diese benutzerinitiierte Aufgabendelegation birgt das Risiko einer erhöhten mentalen Beanspruchung des Nutzers.

In [81] werden die *Trade-offs* sowohl adaptiver als auch adaptierbarer Ansätze durch die Relation der Parameter *Unvorhersagbarkeit* (Unpredictability), *Kompetenz* (Competency) und *Beanspruchung* (Workload) beschrieben. Die Kompetenz beschreibt in diesem Zusammenhang die Fähigkeit von Mensch-Maschine-Systemen, sich in den relevanten Situationen korrekt zu verhalten. Die Höhe der Unvorhersagbarkeit des Systemverhaltens verhält sich reziprok zum Grad der Beanspruchung: Je genauer zukünftige Systemzustände antizipiert werden können, desto höher wird der Grad an Beanspruchung für den Menschen. Es werden entsprechend mehr Interaktionen vom Menschen verlangt. Eine Vergrößerung der Kompetenz des Mensch-Maschine-Systems kann zu einer Steigerung der Beanspruchung führen, das Mehr an Funktionalität muss durch den Menschen gesteuert werden. Wird die größere Systemkomplexität vom Automaten gesteuert, führt dies zu größerer Unvorhersagbarkeit des Systems.

## 2.2 Anthropometrische Grundlagen

Die Gestaltung des Arbeitsplatzes und der zugehörigen Arbeitsmittel eines technischen Arbeitsvorgangs verfolgt das Ziel einer planmäßigen Anpassung der Tätigkeit und ihrer Rahmenbedingungen an den Menschen. Die Systemergonomie beschäftigt sich mit der Optimierung des Informationsflusses innerhalb des Arbeitsprozesses, die Anthropometrie hingegen strebt nach der Optimierung der räumlichen Auslegung von Mensch-Maschine-Arbeitssystemen. Eine menschengerechte Konfiguration dieser räumlichen Anordnung von Mensch und Maschine besteht in einer bestmöglichen Anpassung der Mensch-Maschine-Schnittstelle an die anatomischen Voraussetzungen einer potentiellen Nutzerpopulation. Die anthropometrischen Grundlagen sind neben den systemergonomischen Grundlagen ein entscheidender Faktor für die Güte und Akzeptanz einer Mensch-Maschine-Schnittstelle. (vgl. [103], [96], [102])

Im Folgenden werden die anthropometrischen Grundlagen im Kontext der Fahrzeugführung beschrieben. Diese Beschreibung umfasst einerseits die physiologischen Rahmenbedingungen (Abschnitt 2.2.1) sowie die sich daraus ergebenden gestalterischen Grundsätze der Anthropometrie (Abschnitt 2.2.2) zur Entwicklung einer angepassten Benutzerschnittstelle. Die Grundlagen entstammen zu einem großen Teil aus [106], zusätzlich werden Inhalte aus [20] und [102] vorgestellt. Die relevanten Auszüge werden in den einzelnen Abschnitten gekennzeichnet.

### 2.2.1 Physiologische Rahmenbedingungen

Aufgrund der Beschaffenheit der menschlichen Anatomie ergeben sich Rahmenbedingungen für die ergonomische Gestaltung der Arbeit und von Arbeitsmitteln. Eine wesentliche Herausforderung ergibt sich dabei durch die inhomogene Beschaffenheit der Nutzerpopulation in Bezug auf ihre physiologischen Voraussetzungen. Als Auslegungskriterien stehen neben den interindividuell variablen *Körpermaßen* und *-kräften* des Menschen insbesondere die *Funktionsräume* des Menschen im Vordergrund. (vgl. [102], [20])

#### 2.2.1.1 Körpermaße und Körperkräfte

*Körpermaße* beschreiben in diesem Zusammenhang die statistischen Werte spezifischer Bevölkerungsgruppen, die einer bestimmten Summenhäufigkeit und damit einer entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilung unterworfen sind. Auf Basis der Zuteilung von Körpergrößen zu Körpergrößenklassen werden in der Regel die Grenzen des relevanten Verteilungsbereiches zwischen den Maßen der 5-Perzentil-Frau (F05) und dem 95-Perzentil-Mann (M95) festgelegt. Diese Festlegung umfasst damit ca. 95% der betrachteten Bevölkerungsgruppe und repräsentiert diese für die meisten Anwendungsfälle mit hinreichender Genauigkeit. Für sicherheitskritische Auslegungen wird hingegen der Verteilungsbereich zwischen dem 1. und dem 99. Perzentil gewählt. (vgl. [102])

Die menschlichen Körpermaße werden in die räumlichen Begrenzungsmaße und die Funktionsmaße unterteilt. Die räumlichen Begrenzungsmaße werden aus den Skelett- und Umrissmaßen abgeleitet. Diese physisch-geometrischen Parameter sind z.B. in [28] verzeichnet. Eine wichtige Einschränkung dieser Unterteilung der Bevölkerungsgruppe besteht darin, dass eine einfache Addition der angegebenen Körpermaße kein valides Summenmaß berechnet. Beispielsweise entspricht die Armlänge eines Mannes mit der Körperhöhe des 95. Perzentils nicht zwangsläufig dem Mittelmaß des 95. Perzentils. Die Funktions-

maße ergeben sich beispielsweise aus Bewegungsbereichen, Reichweiten und Sichtmaßen. Sie bilden die Grundlage zur Beschreibung der Funktionsräume (vgl. Abschnitt 2.2.1.2).

Zusätzlich sind für eine ganzheitliche Auslegung die für die gewählten Betätigungsarten notwendigen *Körperkräfte* relevant. Diese sind in Relation zur vorgesehenen Betätigungsart und des Aktors (Hand-Arm- oder Fuß-Bein-System) zu setzen. Diese Stellkraftvorgaben finden sich unter anderem in [21] oder [98] für verschiedene Stellelemente wie Steuerhebel, Steuerknüppel, Schieberegler oder Stellräder. Zusätzlich wird hier zwischen verschiedenen Arten der Betätigung und verschiedenen Körperstellungen und -haltungen (vgl. Abschnitt 2.2.2) differenziert. Die Angaben der Literatur beziehen sich auf Experimente, ein direkter Übertrag der angegebenen Größen auf vergleichbare, aber nicht identische Mensch-Maschine-Schnittstellen ist daher unter Umständen nicht ohne einer situationsspezifischen Anpassung möglich. Bedienelement-unabhängige Richtwerte für die Benutzergruppe der 5-Perzentil-Frau bis zum 95-Perzentil-Mann für die Griffarten Umfassungs- und Zufassungsgriff finden sich außerdem in [30]. Des Weiteren muss die Frequenz der vorgesehenen Betätigung bestimmt werden: gelegentliche Betätigungen unterscheiden sich bezüglich der zulässigen Betätigungskraft von Dauerbetätigungen.

### 2.2.1.2 Funktionsräume

Menschliche Bewegungen bestehen aus mehreren zusammengesetzten und komplexen Bewegungsabläufen, für die Raumauslegung werden daher nach [102] *Funktionsräume* herangezogen. Die wichtigsten Funktionsräume des Menschen sind die Sicht-, Greif- und Bewegungsräume. Durch die Rahmenbedingungen einer konkreten Tätigkeit sowie den anatomischen Gegebenheiten wird ein Funktionsraum bestimmt: die maximale Reichweite ergibt sich aus den statistischen Körpergrößen, den räumlichen Gegebenheiten zwischen Ort der Arbeitsverrichtung und der ausführenden Person und den notwendigen Körperhaltungen mit den jeweiligen Bewegungsmöglichkeiten. Für die Positionierung von Betätigungselementen im Fahrzeuginnenraum ergeben sich für die übliche Auslegung für die 5-Perzentil-Frau und den 95-Perzentil-Mann die Betätigungsbereiche durch unterschiedliche Sitzpositionen. Die räumliche Anordnung zwischen der Arbeitsperson und der Arbeitsfläche (Mittelkonsole, Lenkrad, Pedalerie etc.) variiert entsprechend. Maßgebend für eine Betätigung mittels der oberen Extremitäten sind schließlich auch noch die Bewegungsmöglichkeiten des Arm-Hand-Apparates und gegebenenfalls der Schulter. Falls durch die Gestalt der Arbeitsaufgabe eine Überschneidung verschiedener Funktionsräume notwendig ist, muss durch den Entwickler eine optimierte Überdeckung dieser Funktionsräume angestrebt werden. Im Kontext der ergonomischen Gestaltung des Fahrerarbeitsplatzes sollen z.B. Betätigungselemente in Abhängigkeit ihrer Wichtigkeit im Sichtbereich des Fahrers und gleichzeitig innerhalb des Greifraums der auslegungsrelevanten Nutzerpopulation positioniert sein. Zusätzlich ist der Bewegungsraum so zu gestalten, dass die Bewegungsfreiheit der Nutzerpopulation nicht bzw. in akzeptablem Maß eingeschränkt wird.

Der Sehraum setzt sich nach [103] aus Gesichts-, Blickgesichts- und Umblickgesichtsfeld zusammen. Das Gesichtsfeld kann ohne Augen- und Kopfbewegungen wahrgenommen werden, zur Wahrnehmung des Blickgesichtsfeldes müssen bei feststehendem Kopf die Augen bewegt werden. Das Umblickgesichtsfeld kann nur bei Bewegung des Kopfes und der Augen abgedeckt werden. Ein weiteres den Sehraum beschreibendes Merkmal ist die Sehachse. Diese ist abhängig von der Kopf- und Augenstellung und ist im entspannten Normalfall um  $25^{\circ}$ - $35^{\circ}$  (augenbezogen) gegen die Horizontale geneigt. Diese Gegebenheiten müssen bei der Gestaltung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle im Fahrzeug mit ihren besonderen Randbedingungen berücksichtigt werden. Wichtige Warnanzeigen müssen für den Fahrer je-

derzeit sichtbar angeordnet sein. Sind zur Bedienung von Betätigungselementen häufige Orientierungs- oder Positionierungsblicke nötig, so sind diese mit möglichst geringer Blickabwendungsdauer bedienbar zu gestalten. Im Umkehrschluss bedeutet dies für die Bedienelementgestaltung die Prämisse einer blickabwendungsarmen Bedienbarkeit. Im Optimalfall ermöglicht ein Bedienkonzept eine Blindbedienung ohne Blickabwendung vom Fahrgeschehen.

## 2.2.2 Gestalterische Grundsätze

Eine Analyse der Körpergrößen einer relevanten Nutzerpopulation und der sich dadurch ergebenden Funktionsräume bilden die Rahmenbedingungen für die weitere Gestaltung der Arbeitsaufgabe. Die Körperstellung ist somit durch den Arbeitsprozess vorgegeben, die Körperhaltung kann jedoch bei ansonsten vergleichbaren Bedingungen von Person zu Person variieren. Auf Basis ergonomischer Prinzipien können der nun genauer spezifizierten Arbeitsaufgabe auf Basis der Systematik nach [20] geeignete Bewegungsabläufe zugeordnet werden. Die übrigen Gestaltungsmerkmale der Benutzerschnittstelle, wie die Gestaltung der Oberfläche oder eine Zuweisung von Materialien, ergeben die finale, vom Nutzer erlebte Ausprägung des Arbeitsmittels. (vgl. [20])

### 2.2.2.1 Bewegungszuordnung anhand der Körperhaltung und -stellung

Die *Körperhaltung* wird durch die Auslenkung der Gelenke beschrieben. Die häufigsten Arbeitsformen sind das Stehen und das Sitzen, im Kontext der Fahrzeugbedienung beschränkt sich diese Arbeit auf die Betrachtung der sitzenden Körperhaltung im Fahrzeugcockpit. Die *Körperstellung* hingegen meint die Ausrichtung der Körperebenen (Median-, Frontal-, Horizontal- und Saggitalebene, vgl. Abbildung 2.5) relativ zur Arbeitsaufgabe.

Bei der Auslegung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle hinsichtlich der *Körperbewegungen* ist darauf zu achten, dass die Körperstellung und -haltung bzgl. der anatomisch günstigen Bewegungsrichtungen zur Bedienung möglichst übereinstimmend gewählt werden (*Bewegungszuordnung*). Das Hand-Arm-System verfügt über 11 Freiheitsgrade, die Bewegungs- und Greifräume werden durch die maximal möglichen Gelenkausschläge bestimmt. Abbildung 2.5 zeigt unter anderem die Freiheitsgrade des Hand-Arm-Systems und illustriert die maximalen Gelenkausschläge. Besonders zu beachten sind die größere Volarflexion und Ulnarabduktion im Vergleich zu Dorsalextension und respektive Radialabduktion. Translatorische Bewegungen sind ebenso wie Rotationen mit horizontaler Drehachse in der saggital-horizontalen Richtung am günstigsten, Rotationen mit einer vertikalen Drehachse sind am besten in einer frontal-sagittalen Richtung mit der menschlichen Anatomie in Einklang zu bringen.

### 2.2.2.2 Arbeitsmittelgestaltung

In [20] wird bzgl. der Greifart zwischen einem *Kontaktgriff*, einem *Zufassungsgriff* und einem *Umfassungsgriff* unterschieden. Beim Kontaktgriff liegen die Kopplungsglieder auf dem Arbeitsmittel auf. Die Kopplung erfolgt bei dieser offenen Greifart mit der ganzen Hand oder Teilen davon und ist besonders geeignet für schnelle Betätigungen mit hoher Frequenz. Wie in [41] festgestellt wird, sollen Querbelastrungen möglichst vermieden werden. Als Beispiel aus der Kraftfahrzeugbedienung wird die Betätigung des Blinkerhebels per Kontaktgriff realisiert. Ein Zufassungsgriff hingegen ist ein geschlossener Griff



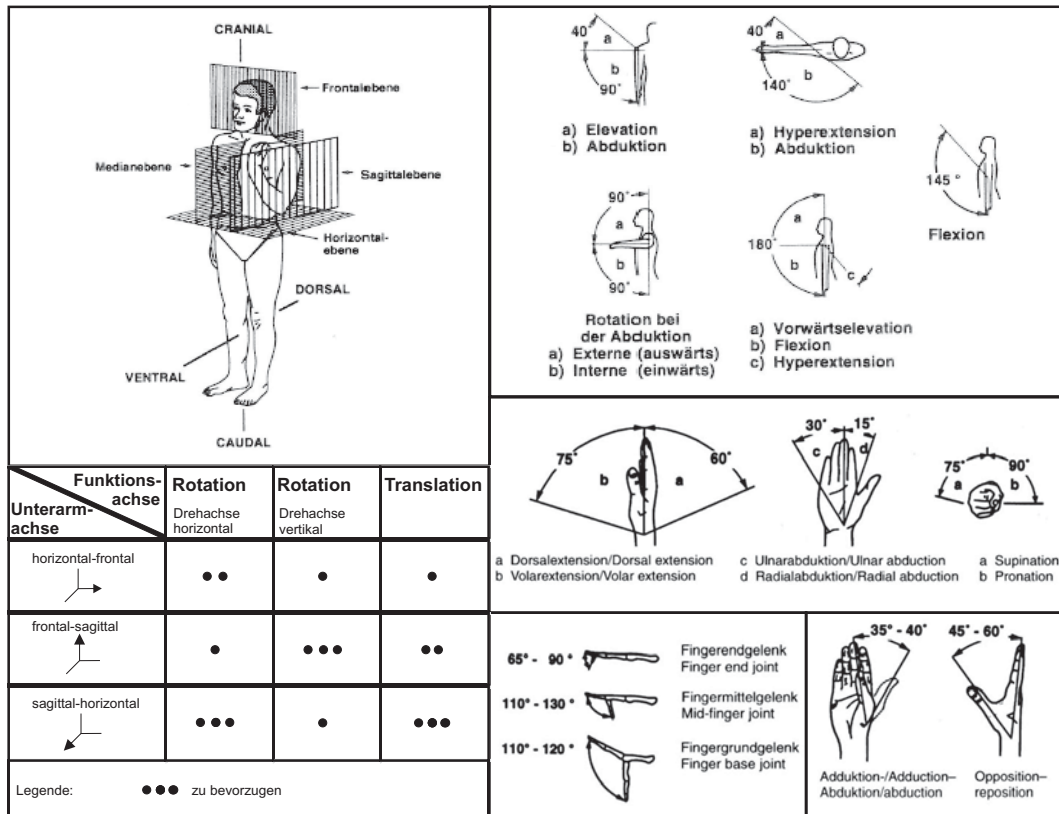


Abbildung 2.5: Körperebenen, Bewegungsmöglichkeiten des Hand-Arm-Systems, Gelenkausschläge der Hand und Bewegungszuordnung von funktionellen und anatomischen Achsen nach [20]

und beschreibt das Greifen mit den Fingern. Die Kopplungsglieder liegen hier lediglich punktuell am Medium an, das Bedienelement wird mittels den beweglichen Zeigefinger und Daumen geführt. Zusätzlich werden meist „[...]feine Anpassungen in der Orientierung des Bedienelements durch das Handgelenk benötigt[...]“ ([105], S.164-165). Die Greifart eignet sich besonders für Betätigungen mit hohen Präzisionsanforderungen. So erfolgt beispielsweise die Bedienung eines Drehdruckstellers der Multimedia-Schnittstellen vieler moderner PKW mittels eines Zufassungsgriffes. Ein Umfassungsgriff liegt bei einer Greifart mit mindestens einem Finger und einem Gegenlager vor. Das Gegenlager kann ein anderer Finger oder die gesamte Handfläche sein. Der Umfassungsgriff eignet sich nach [20] für Betätigungen mit hohen Arbeitswiderständen, wie beispielsweise die Betätigung eines Lenkrades im fahrdynamischen Grenzbereich.

Die *Kopplungsart* analysiert die Art der Kraftübertragung zwischen Arbeitsmittel und Betätigungsmedium. Ein Formschluss liegt bei einer unmittelbaren Kraftübertragung in einer senkrecht zur Berührungsfläche stehenden Ebene vor, ein Reibschluss ist durch die mittelbare Kraftübertragung in der Berührungsfläche gekennzeichnet. Die Betätigung eines Drehstellers mit tangentialer Betätigungsrichtung und radialer Krafteinwirkung dient als Beispiel einer reibschlüssigen Betätigung. Das Drücken von Tasten mit übereinstimmender Betätigungsrichtung und Krafteinwirkung stellt ein Beispiel für eine formschlüss-

sige Kraftübertragung dar. Auf Basis der Festlegung einer Greifart unter Berücksichtigung der übrigen Rahmenbedingungen werden im weiteren Verlauf der Schnittstellenentwicklung die Form, das Material sowie die geeignete Dimensionen an die jeweilige Aufgabe adaptiert. (vgl. [20])

## 2.3 Stand der Technik

Der Begriff Fahrerassistenzsysteme umfasst ein weites Feld unterschiedlicher Systeme mit vielfach variierenden Funktionalitäten. Die für diese Arbeit gewählte Art der Kategorisierung anhand der Ebene des Eingriffs, die deduzierte Terminologie und die relevanten Fahrerassistenzfunktionen werden im Detail beschrieben. Aktuell verfügbare FAS der Fahrzeugführungsebene und deren mögliche, zukünftige Ausprägungen erlauben innerhalb der Kategorie von eingreifenden FAS der Führungsebene eine weitere Klassifizierung anhand des Automatisierungsgrades.

### 2.3.1 Fahrerassistenzsysteme der Bahnführungsebene

Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben existieren mehrere Möglichkeiten zu Kategorisierung von FAS. Diese Arbeit beschränkt sich in ihren Ausführungen auf die eingreifenden Komfortsysteme der Bahnführungsebene der primären Fahraufgabe (vgl. Kapitel 2.1). Die folgenden Abschnitte beschreiben ausgewählte Fahrerassistenzsysteme dieser Kategorie. Komfortorientierte Fahrerassistenzsysteme automatisieren durch kontinuierliche Eingriffe auf der Ebene der Fahrzeugführung variierende Anteile der Längs- und Querverführung der primären Fahraufgabe. Die Fahrzeugführungsaufgabe ist in der Folge bei dieser Teilautomation zwischen dem Fahrer und dem FAS aufgeteilt.

#### 2.3.1.1 Abstandsregeltempomat mit Stop&Go-Funktion

Adaptive Cruise Control repräsentiert ein FAS der Bahnführungsebene zur Automation der Fahrzeuglängsführung. Die folgenden Details und Begrifflichkeiten finden sich beispielsweise in [63], [45] oder [44].

Als Weiterentwicklung einer Geschwindigkeitsregelanlage (GRA) regelt das ACC im *Free Mode* die aktuelle Fahrgeschwindigkeit auf eine vom Fahrer einstellbare Wunschgeschwindigkeit. Zusätzlich hat der Fahrer die Möglichkeit zur Vorgabe eines Wunschabstandes zum Vorderfahrzeug in Form eines zeitlichen Abstandes (*Sollzeitlücke*). Detektiert die Fahrzeugsensorik ein regelrelevantes Objekt (*Follow Mode*), regelt das ACC die Sollzeitlücke durch selbstständige Eingriffe in die Längsdynamik. Neben den Bremsen stehen dem ACC als längsdynamische Stellglieder die Drosselklappensteuerung sowie das Motorschleppmoment zur Verfügung. Ein Moduswechsel zwischen einer Abstands- und einer Geschwindigkeitsregelung sowie die Selektion regelrelevanter Vorderfahrzeuge wird selbstständig vom System vorgenommen. Hierbei ist zu beachten, dass eine Abstandsregelung sinnfälligerweise nur innerhalb der vom Fahrer vorgegebenen Geschwindigkeitsgrenzen durchgeführt wird.

Während erste ACC-Systeme für einen Geschwindigkeitsbereich von 30-180 km/h ausgelegt sind, wird dieser Bereich durch aktuell auf dem Markt verfügbare *Full Speed Range Adaptive Cruise Control (FSRA)*-Systeme erweitert. Als Weiterentwicklung eines herkömmlichen ACC-Systems erstreckt sich der Funktionsbereich dieses ACC S&G (ACC mit Stop&Go-Funktionalität) über einen Geschwindigkeitsbereich von 0-250 km/h. Neben der Erhöhung der Maximalgeschwindigkeit stellt die wesentliche

Erweiterung dieses Systems die Stop&Go-Funktionalität dar. Wie in [45] beschrieben, wird durch die ESC-Hydraulikeinheit das Egofahrzeug hinter einem anhaltenden Vorderfahrzeug bis zum Stillstand abgebremst. Setzt sich die Kolonne bzw. das Vorderfahrzeug erneut in Bewegung, fährt das System in Abhängigkeit der Dauer des Stillstands systeminitiiert oder fahrergetriggert erneut an.

Die Höhe der vom ACC forderbaren Verzögerung ist begrenzt. Ist zur Einhaltung eines Mindestabstandes zum Vorderfahrzeug eine Verzögerung außerhalb der Systemgrenzen erforderlich, wird der Fahrer mittels einer Fahrerübernahmeaufforderung (*Takeover Request*) durch visuelle und akustische Signale zur Übernahme des Fahrzeugs aufgefordert. Diese akute Übernahmeaufforderung ist ein warnendes, diskret wirkendes Kommunikationselement und wird im Kontext der kontinuierlich eingreifenden FAS der Führungsebene an dieser Stelle nicht näher beschrieben.

**Sensorik** Die beidseitige Erweiterung des verfügbaren Geschwindigkeitsbandes heutiger FSRA-Systeme basiert unter anderem auf einer schnelleren Datenverarbeitung von Informationen aus der Umfeldwahrnehmung und innerhalb des Funktionsalgorithmus, auf Verbesserungen und Erweiterungen der Sensorik und der Fusion von Daten verschiedener Sensoren (*Sensordatenfusion*). Abbildung 2.6 illustriert nach [45] am Beispiel eines Fahrzeugs der oberen Mittelklasse die Sensorik moderner ACC-Systeme: Zwei Long-Range-Radarsensoren (LRR) sensieren mit einer Frequenz von 76-77 GHz und einem Öffnungswinkel von jeweils 30° den Frontbereich des Fahrzeugs. Die Messweite dieses Doppelradarkonzepts beträgt 250 m, die beidseitige Anbringung der Sensoren im Bereich der Frontschürze ermöglicht eine Vergrößerung des Messbereichs. Die mittige Redundanz ermöglicht höhere Systemzuverlässigkeit und größere Vorhersagegenauigkeit.

Die im Bereich des Rückspiegels verbaute Videokamera liefert Winkelinformationen und antizipiert auf Basis einer Blinkerererkennung das Spurwechselverhalten vorausfahrender Fahrzeuge. Zusätzlich wird anhand der erkannten Spurmarkierungen der Straßenverlauf bestimmt. Die Kamera ermöglicht eine Erfassungsreichweite von 60 m mit einem Öffnungswinkel von 40°. Vier Ultraschallsensoren ergänzen die Sensorik im Nahbereich für ein automatisches Anfahren nach einem Stillstand im Stop&Go-Verkehr. Heckradar und Daten aus Navigationssystemen können die im ACC-Steuergerät zur Verfügung stehende Informationsdichte zusätzlich erhöhen.

**Funktionslogik** Die grundlegende Funktionalität moderner ACC-Systeme wird anhand [63] für ACC-Systeme und nach [64] für FSRA-Systeme ausgelegt. Aus dem Zustand *ACC Off* erfolgt system- oder nutzerinitiiert die Aufschaltung in den Zustand *ACC Stand-by*, entsprechend der in Abschnitt 2.1.2.3 beschriebenen Nomenklatur also adaptiv oder adaptierbar. Der Übergang in den Zustand *ACC Aktiv* soll nutzerinitiiert (adaptierbar) erfolgen. Dieser Zustand unterteilt sich weiter in die Modi *Follow Mode* und *Free Mode*, die Auswahl eines adäquaten Modus erfolgt automatisch. Als weiteren Modus bieten FSRA-Systeme den dem *Follow Mode* untergeordneten *Hold Modus*, der einen Stillstand des Fahrzeugs im Stop&Go-Verkehr beschreibt. Die Parametereinstellungen innerhalb des Zustands *ACC Aktiv* sind vom Nutzer adaptierbar, die Einstellung einer Wunschgeschwindigkeit sowie die Auswahl eines Wunschabstandes (Sollzeitlücke) werden entsprechend vom Fahrzeugführer durchgeführt.

Die Systemübergänge zur schrittweisen Deaktivierung zwischen *ACC Aktiv*, *ACC Stand-by* und *ACC Off* sind sowohl adaptiv als auch adaptierbar gestaltet. Eine Betätigung der Bremse muss eine Deaktivierung der Längsregelung zur Folge haben, ein Übertreten des ACC durch den Fahrer mittels des Gaspedals überstimmt für die Dauer der Betätigung die Längsregelung.

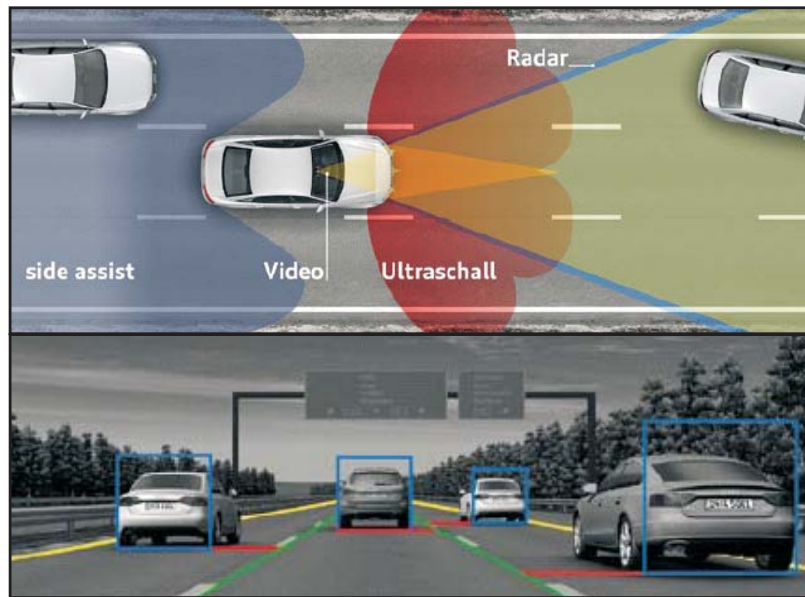


Abbildung 2.6: Sensorik und zugehörige Messbereiche für FAS am Beispiel AUDI A6 nach [45]

**Mensch-Maschine-Schnittstelle** Die Vielzahl von Möglichkeiten zur Bedienung eines ACC-Systems werden im Folgenden exemplarisch anhand einer lenkradfesten Bedieninsel in der Lenkradspeiche (BMW AG, Baureihe 5er, ab Modelljahr 2010) und anhand eines lenkstockfesten Bedienhebels (AUDI AG, Baureihe A6, ab Modelljahr 2011) erläutert.

Bedienkonzepte für Abstandsregelautomaten bieten die Möglichkeit zur Aktivierung und Deaktivierung des Systems. Das Konzept des AUDI verfolgt einen Ansatz über einen lenkstockfesten Bedienhebel. Wie in Abbildung 2.7 dargestellt, ist dieser in Fahrtrichtung auf der „8 Uhr“ Position hinter dem Lenkrad angebracht. Der Hebel hat zwei Raststellungen zur Steuerung der Zustände *ACC Off* und *ACC Stand-by*. Die Raststellung *ACC OFF* (gerastet) schaltet das ACC in den Zustand *ACC Off*. Gegebenenfalls gespeicherte Setzgeschwindigkeiten oder Sollzeitlücken werden in diesem Zustand gelöscht. Die Aktivierung erfolgt durch Heranziehen des Hebels in die Raststellung *ACC STAND-BY*, das System wechselt in den Zustand *ACC Stand-by*. Ist keine Setzgeschwindigkeit im System hinterlegt, wird durch Betätigung der Taste SET an der Stirnseite des Hebels die aktuell gefahrene Geschwindigkeit als Setzgeschwindigkeit übernommen und das System in den Zustand *ACC Aktiv* gesetzt. Beträgt zum Zeitpunkt der Aktivierung die gefahrene Geschwindigkeit weniger als 30 km/h, wird das System auf die kleinstmögliche Setzgeschwindigkeit von 30 km/h gesetzt. Wird das System durch Betätigung der Bremse oder durch leichtes Wegdrücken des Hebels (CANCEL) in den Zustand *ACC Stand-by* geschaltet, bleibt die letzte Setzgeschwindigkeit des Systems gespeichert. Betätigungen von Brems- und Gaspedal haben unterschiedliche Systemreaktionen zur Folge. Betätigt der Fahrer das Bremspedal, wird das ACC deaktiviert und geht in den Stand-by-Zustand. Die Setzgeschwindigkeit bleibt gespeichert. Bei einer Betätigung des Gaspedals wird das ACC lediglich für die Dauer der Pedalbetätigung überstimmt (*Override*). Das Fahrzeug setzt den Fahrerwunsch um, nach Ende der Pedalbetätigung übernimmt erneut das ACC die Längsführungsaufgabe.



Abbildung 2.7: ACC-Bedienelemente der BMW AG und der AUDI AG, adaptiert nach [10], [5] und [130]

Durch eine Betätigung der RESUME-Funktion (Wiederaufnahme, einmaliges Ziehen des Hebels zum Fahrer) im *Stand-by* wird das System aktiviert und eine gespeicherte Setzgeschwindigkeit übernommen. Wird im *aktiven* Zustand der Hebel gezogen und in der gezogenen Stellung gehalten, wird die BOOST-Funktionalität angetriggert. Dies entspricht einem manuellen Übertreten des ACCs mit dem Gaspedal, die Beschleunigung erfolgt jedoch anhand eines im ACC-Steuergerät hinterlegten Kennfeldes. Eine weitere Funktionalität der RESUME-Betätigung am Hebel ist der Anfahrtrigger im Stop&Go-Betrieb. Bleibt das Fahrzeug hinter einem anhaltenden Vorderfahrzeug stehen, verbleibt es für einen kurzen Zeitraum im anfahrbereiten Zustand. Nach dem Stillstand folgt es automatisch dem Vorderfahrzeug. Überschreitet die Stillstandszeit einen vorgegebenen Zeitraum, muss der Fahrer durch Betätigen des Anfahrtriggers das Fahrzeug erneut in einen anfahrbereiten Zustand versetzen (PRE-TRIGGER). Nach der Betätigung verbleibt das ACC S&G für einen Zeitraum von 15s anfahrbereit und reagiert auf ein Anfahren des Vorderfahrzeugs.

Die Geschwindigkeitseinstellung erfolgt mittels monostabiler Betätigung des Hebels um seine Drehachse (entspricht der Drehachse des Lenkrads). Bis zu einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h hat eine singuläre Hebelbetätigung eine Änderung der Setzgeschwindigkeit in 5 km/h Schritten zur Folge, oberhalb dieser Geschwindigkeit wird die Schrittweite auf 10 km/h vergrößert. Eine Abstandseinstellung erfolgt über ein monostabiles Wippelement auf der Oberseite des Hebels, der Fahrer hat die Wahl zwischen vier verschiedenen Zeitlücken.

Als weiteres Element der Mensch-Maschine-Schnittstelle unterstützen verschiedene Anzeigeelemente den Fahrer bei der Bedienung des ACC. Exemplarisch ist das Anzeigekonzept in Abbildung 2.8 dargestellt: Bei aktivem ACC im *Free Mode* wird das Egofahrzeug in Form eines grünen LED-Icons mit symbolischen Radarwellen im Bereich des Tachometers symbolisiert. Im *Follow Mode* wird dem Fahrer zusätzlich das Vorhandensein eines Zielobjekts über ein weiteres, grünes LED-Icon dargestellt (Abbildung 2.8, A). Die Anzeige der Sollzeitlücke erfolgt über eine temporäre Einblendung zweier Fahrzeuge in der Seitenansicht im Kombi-Display (Abbildung 2.8, B), ein Verstellen der Setzgeschwindigkeit hat ebenfalls eine temporäre Anzeige der gewählten Setzgeschwindigkeit im Kombi-Display zur Folge (nicht dargestellt). Zusätzlich kommuniziert ein segmentierter LED-Tachokranz dem Fahrer die gewählte Setzgeschwindigkeit und den Systemzustand. Ein rotes Glimmen des gesamten Kranzes symbolisiert in Kombination mit den grünen ACC-Icons den Zustand *ACC Aktiv*, die gewählte Setzgeschwindigkeit wird durch eine höhere Leuchtstärke der korrespondierenden LED(s) hervorgehoben (Abbildung 2.8, C).



Abbildung 2.8: ACC-Anzeigekonzept eines AUDI A6 nach [4]

AUDI verfolgt mit dem lenkstockfesten Hebelkonzept einen Ansatz, bei dem durch die Intuitivität der Betätigungen für den geübten Benutzer eine Bedienung ohne Blickabwendung erfolgen kann. Zusätzlich lässt die Hebelbedienung Freiheiten für alternative Bedieneinheiten auf den Lenkradspeichen. Ungeübte Benutzer bemängeln bei Fahrzeugen älterer Baureihen zum Teil die leicht verdeckte Positionierung des Hebels hinter der Lenkradspeiche und die Verwechslungsgefahr des ACC-Bedienhebels mit dem benachbarten Blinkerhebel.

Im Gegensatz zum Lenkstockhebelkonzept der AUDI AG verfolgt die BMW AG seit dem Modellwechsel im Jahr 2010 unter anderem für die 5er Baureihe ein lenkradfestes Konzept. Die Bedienung des ACC erfolgt über eine Bedieneinsel auf der Lenkradspeiche des Multifunktionslenkrads (siehe Abbildung 2.7). Die Einstellung der Wunschgeschwindigkeit des ACC erfolgt hierbei über ein zentral angeordnetes, monostabiles Wippelement. Das zweistufige Element erlaubt zum einen die bidirektionale Einstellung von 1 km/h Schritten. Bei Betätigungen über einen Rastpunkt hinaus erfolgt eine Verstellung der Setzgeschwindigkeit in 10 km/h Schritten. Die Einstellung der Sollzeitlücke kann der Nutzer mittels zwei über und unterhalb des Wippelements angeordneten Tasten vornehmen, der Wechsel der Systemzustände erfolgt durch Betätigung der Taste RESUME und der ACC-(De-)Aktivierungstaste (vgl. Abbildung 2.7). Eine Besonderheit stellt in diesem Konzept der Systemwechsel aus dem Zustand *Stand-by* in den aktiven Zustand bei Betätigung der Geschwindigkeitseinstellung dar. Wird die Wippe im Zustand *ACC Stand-by* betätigt, wird die aktuell gefahrene Geschwindigkeit als Setzgeschwindigkeit übernommen und das ACC in den Zustand *ACC Aktiv* versetzt (Funktion SET). Eine weitere Betätigung hat eine Verstellung der Setzgeschwindigkeit im Zustand *ACC Aktiv* zur Folge. Eine Einstellung der Wunschgeschwindigkeit im Zustand *ACC Stand-by* ist folglich nicht möglich. Die „Lim“-Taste aktiviert eine *Speedlimiter* Funktion, welche an dieser Stelle nicht weiter detailliert wird. Kennzeichnend für das Bedienelement ist die Anordnung im Sichtfeld des Fahrers. Die Illustration der Tasten mit Icons sowie die Kennzeichnung der Tasten durch Hinterleuchtung gewährleisten die Sichtbarkeit und erleichtern gegebenenfalls durch Sichtkontrolle dem ungeübten Nutzer die Bedienung des Systems. Die gute Sichtbarkeit der Bedieneinsel kann das Risiko der Vergrößerung von Blickabwendungszeiten für Kontrollblicke während der Fahrt erhöhen.

### 2.3.1.2 Spurverlassenswarnung und Spurhalteassistentz

Erste Systeme zur Querführungsassistentz warnen den Fahrer vor einem unbeabsichtigten Verlassen seines Fahrstreifens. Als Modalitäten dieser Spurverlassenswarnung werden Warntöne oder Vibrationen von Sitz oder Lenkrad genutzt. Eine Evolutionsstufe der *Lane Departure Warning (LDW)*-Systeme sind aktive Spurhalteassistenten. Die wesentliche Erweiterung dieser *Lane Keeping Assist Systeme (LKAS)* stellt der aktive Eingriff des Querführungsassistentzsystems in die Lenkung des Fahrzeuges dar. Die technische Umsetzung des Lenkeingriffes erfolgt mittels elektromechanischer Lenksysteme (*Electronic Power Steering (EPS)*, vgl. [89]). Wie in [26] gezeigt, stellt ein Eingriff in die Querdynamik durch die Verwendung der Aktorik von ESC-Systemen eine alternative Möglichkeit dar. Als Ergänzung zu einer bloßen Warnung greifen LKAS bei einer unbeabsichtigten Annäherung an die Fahrstreifenmarkierungen in die Querführung ein und lenken das Fahrzeug in Richtung Spurmitte zurück. Nach [90] und [45] induzieren die für den Fahrer über das Lenkrad wahrnehmbaren Lenkmomente intuitiv eine korrigierende Lenkbewegung. LKAS sind in der Literatur auch unter dem Namen *Heading Control Assist (HCA)* geläufig (vgl. [79]).

Erfolgt die Systemausgabe des FAS lediglich kurz vor oder an den Rändern des Fahrstreifens, ist das System sowohl in der warnenden als auch in der eingreifenden Ausprägung den situativ warnenden FAS der Führungsebene zuzuordnen. Querführungsassistentzsysteme zur kontinuierlichen Spurmittenführung lenken das Fahrzeug bereits bei geringer Abweichung des Egofahrzeugs in Abhängigkeit der detektierten Spurmarkierungen durch gerichtete Lenkmomente in Richtung Spurmitte. Durch die kontinuierliche Wirkweise sind diese *Heading Control Center Assist (HCCA)*-Systeme den eingreifenden Komfortsystemen der Fahrzeugführungsebene zuzuordnen.

**Technische Umsetzung** Wie in [45] ausgeführt, ist eine z.B. im Innenspiegelfuß verbaute Monokamera in der Lage, verschiedene Arten von Spurmarkierungen (z.B. durchgezogen oder gestrichelt) in unterschiedlichen Farben (weiß oder gelb) wahrzunehmen. In einem geeigneten Steuergerät wird die tatsächliche Trajektorie des Egofahrzeugs errechnet und mit der vom Regelalgorithmus vorgegebenen Trajektorie verglichen. Auf Basis dieses Abgleichs wird der Bedarf an Unterstützung bestimmt und gegebenenfalls durch die EPS erzeugt. Zusätzlich werden im Steuergerät weitere Einschaltbedingungen des Systems überprüft. Die Krümmung eines detektierten, regelrelevanten Fahrstreifens muss ebenso wie seine Breite hinreichend groß sein. Sind diese Bedingungen erfüllt, ist das System ab einer Grenzschnwindigkeit funktionsbereit (vgl. [90]). Die Grenzschnwindigkeit wird in der Regel auf einem Niveau festgelegt, das aus Sicherheitsgründen ein Aktivieren des Systems im innerstädtischen Verkehr verhindert.

**Funktionslogik und Mensch-Maschine-Schnittstelle** Das gerichtete Lenkmoment unterstützt den Fahrer bei der Spurhaltung. Die eigentliche Querführungsaufgabe verbleibt weiterhin beim Fahrer, die uneingeschränkte Funktionalität des Systems ist nur bei einem kooperativen Zusammenspiel zwischen Fahrer und FAS gegeben. Ist das System aktiviert, wirken sowohl Fahrer als auch FAS im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis durch die Überlagerung ihrer Eingaben in einem Summenpunkt auf das Fahrzeug. Es liegt eine parallel-simultane Kooperationsform im Zusammenspiel von Mensch und Maschine vor, beide Systemelemente wirken zeitgleich über einen parallelen Wirkungspfad auf die Regelstrecke (vgl. Abschnitt 2.1.2.2).

Der AUDI active lane assist steht exemplarisch für LKAS mit unterschiedlichen Parametrierungsmöglichkeiten. Als Grundeinstellung ermöglicht der AALA die Einstellung einer weiten Spurführung mit *spätem Lenkzeitpunkt*. Bei einer Annäherung an die Fahrbahnmarkierungen erfolgt zeitdiskret ein gerichtetes Lenkmoment zurück zur Spurmitte. Die Alternative ist die Parametrierung des Systems als LKAS mit Spurmittenführung, respektive in einer Ausprägung als HCCA-System mit *frühem Lenkzeitpunkt*. Bereits bei geringen Abweichungen von der Spurmitte versucht das System durch kontinuierliche Eingriffe das Fahrzeug auf die Spurmitte zu regeln. Die Auswahl zwischen den Parametrierungen „Lenkzeitpunkt: früh“ und „Lenkzeitpunkt: spät“ erfolgt über das Multimedia Interface (MMI) des Fahrzeugs. Das System kann mit einer Taste an der Stirnseite des Blinkerhebels jederzeit (de-)aktiviert werden. Bei aktiviertem System überprüft der AALA die Gültigkeit der Einschaltbedingungen und beginnt gegebenenfalls selbstständig zu Regeln.

Eine permanente Rückmeldung des Systemzustands erfolgt über eine Rückmelde-LED im Bereich des Kombiinstrumentes. Ein gelbes Icon signalisiert den Stand-by-Zustand des AALA, das grüne Icon symbolisiert ein aktives System. Als optionalen Zusatz kann sich der Fahrer im Kombi- und Head-Up-Display Informationen über aktuell verfügbare Spurinformatoren einblenden.

### 2.3.1.3 Stauassistentz

Bereits FSRA-Systeme unterstützen den Fahrer maßgeblich in Stausituationen. Das Fahrzeug bremst im Kolonnenverkehr bis zum Stillstand ab und folgt anschließend teilweise selbstständig einem anfahrenen Vorderfahrzeug (vgl. Abschnitt 2.3.1.1). Da in Stausituationen im Niedriggeschwindigkeitsbereich in der Regel in der Relation zur Fahrgeschwindigkeit unwesentliche Kurvenradien auftreten, sind die vom Fahrer geforderten Querführungsaufgaben gering. Folglich unterstützen FSRA-Systeme den Fahrer auch in Stausituationen und repräsentieren eine Form der teilautomatisierten Stauassistentz. Die Kombination von Systemen zur Längs- und Querführungsautomation im Niedriggeschwindigkeitsbereich in kontrollierbaren Umgebungen beschreibt einen Stauassistenten (STA) zur integrierten Längs- und Querführung. Prototypische Stauassistentensysteme sind in [118] oder [99] beschrieben.

Der Stauassistent nach [118] beschreibt ein im Rahmen des INVENT-Projektes (siehe [48]) entwickeltes System mit kombinierter Längs- und Querführungsunterstützung. Aus heutiger Sicht kombiniert das von der Fa. *Robert Bosch GmbH* entwickelte FAS ein FSRA-System mit dem bekannten Spektrum der Systeme zur Querführungsunterstützung innerhalb des eigenen Fahrstreifens (vgl. Abschnitt 2.3.1.2). Der Grad der Querführungsunterstützung ist vom Fahrer wählbar und reicht von warnenden Systemen mit akustischer oder haptischer Rückmeldung bis hin zu Systemen zur „autonomen Querführung“ ([118], S. 791). Als *autonome* Fahrzeugquerführung wird in diesem Zusammenhang der Hands-Off-Betrieb der Querführung beschrieben, das Fahrzeug ist in der Lage, ohne zusätzliche Eingriffe des Fahrers die komplette Querführungsaufgabe zu übernehmen. Im höheren Geschwindigkeitsbereich ( $v \geq 50 \text{ km/h}$ ) stellt das System eine Kombination aus ACC und LKAS dar, Führungsmomente am Lenkrad unterstützen den Fahrer bei der Querführung, die Längsregelung erfolgt unter Ausschluss stehender Objekte. Die Hands-Off-Funktionalität ist lediglich im Geschwindigkeitsbereich unter 50 km/h verfügbar. Bei aktivem System mit geringem Unterstützungsgrad wird durch die Wegnahme der Hände des Fahrers vom Lenkrad der Modus mit höherer Unterstützung aktiviert.

Der in [99] beschriebene Stauassistent stellt eine Erweiterung des beschriebenen INVENT-Stauassistenten nach [118] dar. Zusätzlich zu den Fahrspurmarkierungen werden zur Bestimmung der Solltrajektorie Informationen über Fahrzeuge im Front- und Seitenbereich des Egofahrzeuges verwendet. Somit soll die



Assistenzfunktion auch außerhalb eines Autobahnszenarios auf Straßen mit geringerer Fahrstreifenbreite und weniger detaillierten Fahrstreifenmarkierungsdaten möglich sein. Als Beispiele werden breite Stadtstraßen, Landstraßen und Baustellenszenarios genannt. Zusätzlich wird die Entwicklung eines HMI-Konzepts zur verständnisoptimierten Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation vorgestellt. Eine Aktivierung der Querführung setzt eine aktive Längsführungsassistenten voraus. Die Bedienung und Funktion der Längsführung orientiert sich an herkömmlichen FSRA-Systemen (vgl. Abschnitt 2.3.1.1). Die Aktivierung der Querführungsunterstützung erfolgt mittels einer Taste des Multifunktionslenkrades. Die System- und Parametereinstellungen des ACC werden über einen ACC-Bedienhebel vorgenommen. Eine Betätigung des Bremspedals deaktiviert das Gesamtsystem, ein manuelles Übersteuern der Lenkunterstützung deaktiviert die Querführung. Neben einer Visualisierung der Systemzustände über Icons im Bereich des Kombiinstrumentes kommuniziert ein grüner Leuchtring im Bereich des Airbagmoduls am Lenkrad den Zustand der Querführungsunterstützung. Funktionsseitig ist der STA für den Hands-Off-Betrieb ausgelegt, wünscht der Fahrer jedoch haptische Rückmeldung über den Systemzustand der Querführung ist es möglich die Hände am Lenkrad zu belassen. Weitere Details zur HMI-Gestaltung des in [99] entwickelten Stauassistenten finden sich in [75].

## 2.3.2 Fahrerbeobachtung

Beim Betrieb hochautomatisierter FAS ist das Systemverhalten an den Betriebsgrenzen ein wesentlicher Auslegungsgesichtspunkt. Besondere Relevanz hat dieses Kriterium für den Bereich der nach [59] *vollautomatisierten* FAS. Beim Erreichen von Systemgrenzen ist hier der Fahrer per Definition die Rückfallebene des Systems. Ist das System nicht in der Lage, Situationen adäquat zu erkennen, zu interpretieren und in passende Systemreaktionen umzusetzen, obliegt es der Verantwortung des Fahrers, den fehlerhaften Systemzustand zu erkennen, die Fahrzeugführung zu übernehmen und adäquat zu reagieren. Die Aufgabe der Rückfallebene *Fahrer* ist also die Herstellung eines sicheren Systemzustands. Eine detaillierte Analyse des Konzepts des sicheren Zustands findet sich in [57].

Hierfür ist es Voraussetzung, dass der Fahrer in ausreichendem Maß das Fahrerassistenzsystem und die relevanten Umgebungsparameter überwacht. Gleichzeitig muss er körperlich in der Lage sein, die Fahrzeugführung zu übernehmen. Um den Zustand des Fahrers zu überwachen und gegebenenfalls die Verfügbarkeit bzw. die Funktionsweise des Assistenzsystems adaptieren zu können, existieren verschiedene Ansätze zur Fahrerüberwachung. Diese Ansätze bilden die Grundlagen für die Entwicklung des Interaktionskonzepts zur Fahrerzustandsbestimmung *Potentialtrigger* aus Kapitel 3.2.

Ein Ansatz besteht in der Beobachtung des *Fahrerverhaltens*. Ein weiterer Ansatz besteht darin, den Fahrer im Rahmen eines Bedienkonzepts zu zusätzlichen Bedienhandlungen aufzufordern. Diese *erzwungenen Bedienhandlungen* werden als Nachweis für einen aufmerksamen Fahrer angesehen. Die nachfolgenden Abschnitte detaillieren die beiden Ansätze.

### 2.3.2.1 Direkte und indirekte Fahrerbeobachtung

Die Methode der Fahrerbeobachtung umfasst die *direkte* und die *indirekte* Überwachung des Fahrerverhaltens. Im Fahrzeug verbaute Sensorik liefert den Fahrer beschreibende Messdaten. Anhand dieser Daten wird versucht, eine Aussage über den Fahrerzustand und seine Aufmerksamkeit zu treffen. Über *direkte* Messverfahren gewonnene physiologische Messgrößen, wie zum Beispiel die Pulsfrequenz, der Hautleitwert oder die Gehirnaktivität, ermöglichen Aussagen über den aktuellen Fahrerzustand. Ein kurz-

bis mittelfristiger Serieneinsatz dieser verhältnismäßig intrusiven Art der Fahrerbeobachtung scheitert jedoch an der Verfügbarkeit geeigneter, automotive-tauglicher Sensorik. (vgl. [112])

Im Rahmen der Kraftfahrzeugtechnik wird zur *direkten* Fahrerbeobachtung häufig eine im Bereich des Kombiinstrumentes oder der A-Säule verbaute Fahrerüberwachungskamera verwendet. Der videobasierten Fahrerbeobachtung wird innerhalb bestimmter Rahmenbedingungen ein gewisses Potential zugeschrieben. So wird etwa in [9] das Potential einer videobasierten Blickrichtungsdetektion zur Fahreraufmerksamkeitsbestimmung beschrieben. Auch hier wird jedoch der technische Aufwand für eine Detektion der Blickrichtung einen baldigen Einsatz im Kraftfahrzeug verhindern. Alternativ bietet die weniger aufwendige Bestimmung der Kopforientierung die Möglichkeit einer kurzfristigen Umsetzung für einen Einsatz im Fahrzeug. Nach [9] besteht zwar ein schwacher Zusammenhang zwischen der Kopforientierung und der Aufmerksamkeitsverteilung des Fahrers. Allerdings können zumindest große Kopfrotationen (und in der Konsequenz Blickabwendungen) auf Basis der Kopforientierung zuverlässig gemessen werden. Eine Übersicht über Kamera- und Softwaresysteme zur videobasierten Fahrerüberwachung und eine Analyse der Möglichkeiten wissenschaftlicher und kommerzieller Lösungen findet sich in [57]. Als bisher einziger Hersteller von Personenkraftwagen bietet Lexus zur Adaption der Warnzeitpunkte eines Pre-Crash-FAS eine Fahrerüberwachungskamera im Serieneinsatz an (siehe [111]).

*Indirekte* Fahrerbeobachtung meint die unterschiedlichen Formen der Detektion und Interpretation von Fahrerhandlungen. Hierzu zählen die Betätigungen der Bedienelemente der primären Führungs- und Stabilisierungsaufgabe wie Pedale und Lenkrad. Allerdings können auch Eingaben über Bedienelemente tertiärer Bedienungsaufgaben - wie beispielsweise Drehdrücksteller oder Touchscreens zur Bedienung von Infotainmentsystemen - als Messgrößen herangezogen werden. Für die Hands-On-Erkennung von LKAS überwacht ein Lenkmomentensensor kontinuierlich die vom Fahrer aufgebrachten Handlenkmomente. Wird über einen gewissen Toleranzzeitraum im einstelligen Sekundenbereich keine Fahreraktivität detektiert, deaktiviert sich in der Folge das Assistenzsystem (vgl. [90]). Das „Attention Assist“-System von Mercedes-Benz verarbeitet neben zahlreichen anderen Parametern der primären und sekundären Fahraufgabe auch den Lenkradwinkelverlauf. Geht das System auf Basis der verarbeiteten Parameter von einem müden Fahrer aus, wird analog [25] eine visuelle und akustische Pausenempfehlung ausgegeben. Eine weitere Möglichkeit der Ausgestaltung einer indirekten Fahrerbeobachtung ist der Rückschluss aus der Bedienfrequenz und der Anzahl der Betätigungen auf die Aufmerksamkeitsverteilung des Fahrers. Wie in [16] gezeigt, können Sicherheitssysteme für den Fall eines unaufmerksamen Fahrers ihre Warnstrategie anpassen: beispielsweise können Warnzeitpunkte zeitlich vorversetzt oder andere Ausgabemodalitäten für die Warnung gewählt werden.

### 2.3.2.2 Fahrerbeobachtung durch erzwungene Bedienhandlung

Die im Schienenverkehr geläufige Sicherheitsfahrerschaltung „Sifa“ nach [31] ist ein typisches Beispiel für eine Überwachung des Fahrzeugführers durch *erzwungene Bedienhandlung*. Ein Zug ist nur in Abhängigkeit der „reaktiven Interaktion“ ([59], S. 128) des Zugführers mit einem Betätigungselement im Führerstand des Zuges betriebsbereit. Die Variation der Zeitabstände zwischen den angeforderten Betätigungen hängt vom zurückgelegten Weg und/oder der verstrichenen Zeit ab. (vgl. [59])

Die in Abschnitt 2.3.1.1 beschriebene Kopplung des ACC im Stop&Go-Betrieb an einen Anfahrtrigger ist ein weiteres Beispiel einer Fahrerüberwachung durch erzwungene Bedienhandlung. Als Betätigungselement ist hier eine Betätigung des Gaspedals oder der RESUME-Bedienhandlung als Trigger zulässig.

Steht das Fahrzeug bei aktiver Regelung länger als drei Sekunden, signalisiert der Fahrer durch Setzen eines Triggers seine Bereitschaft zur Weiterfahrt.

### 2.3.3 Interaktionskonzepte

Neben Ansätzen und Entwürfen zur Bedienung hochautomatisierter FAS existieren Interaktionskonzepte aus anderen technischen Disziplinen. Im folgenden Abschnitt 2.3.3.1 werden drei verschiedene Konzepte zur kooperativen Fahrzeugführung vorgestellt. Im Einzelnen werden in Abschnitt 2.3.3.1 als Beispiele einer manöverbasierten Fahrer-FAS-Interaktion das Interaktionskonzept *Conduct-by-Wire* zur seriell-sequentiellen Kooperation von FAS und Fahrzeugführer und die Playbook-Metapher erläutert. Das Interaktions-Paradigma *H-Mode* als ganzheitlicher Lösungsansatz zur Bedienung eines zukünftigen Automationspektrums dient zur intuitiven Aufteilung der Führungsaufgaben im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis. In Abschnitt 2.3.3.2 werden als Ideenspeicher der Konzeptentwicklung ausgewählte technische Lösungen für komplexe Bedienvorgänge aus dem Bereich der Life-Style-Produkte, der Automobilentwicklung und anderen Forschungsbereichen vorgestellt.

#### 2.3.3.1 Interaktionskonzepte zur Bedienung des automatisierten Fahrens

**Manöverbasiertes Fahren** Voraussetzung für eine manöverbasierte Kommunikation von Fahrer und FAS ist ein funktionsfähiges, vollautomatisches FAS. Das System muss in der Lage sein, die Fahrzeugführung ohne Unterstützung des Fahrers vollständig zu übernehmen (*Vollautomation*). Der Fahrzeugführer ist im Sinne einer seriell-sequentiellen Assistenz (vgl. Abschnitt 2.1.2.2) in die Fahrzeugführung eingebunden. Er wählt lediglich ereignisdiskret aus einem Manöverkatalog die von ihm gewünschten Fahrmanöver aus.

Das unter anderem in [128], [51] und [66] beschriebene *Conduct-by-Wire* ist ein Umsetzungsbeispiel einer manöverbasierten Fahrerassistenz der Bahnführungsebene. Der Fahrer kann über eine *Manöverschnittstelle* verschiedene Manöver auswählen. Die in Form eines Manöverkatalogs hinterlegten Fahraufgaben sollen das Spektrum an denkbaren Manöverwünschen des Fahrers abdecken. Manöverbeispiele sind „Fahrstreifen wechseln!“ oder „Überholen!“. Diese werden über die Manöverschnittstelle an das FAS übergeben, im Steuergerät geplant und bei passenden Umgebungsparametern durchgeführt.

Eine geeignete Benutzerschnittstelle für das manöverbasierte Fahren ermöglicht die bidirektionale Kommunikation zwischen Fahrer und Fahrzeug bzw. FAS. Zum einen soll es dem Fahrer möglich sein, auf intuitive Weise dem FAS den Manöverwunsch zu kommunizieren. Zum anderen soll die Bedienschnittstelle kontinuierlich über den aktuellen Zustand des Assistenzsystems informieren und eine nachträgliche Parametrierbarkeit der Manöver gewährleisten. Beispielsweise kann durch die Parametrierung die Möglichkeit zur Beschleunigung von Überholmanövern vorgesehen werden. Die seriell-sequentielle Assistenz ist an einen hohen Automationsgrad gekoppelt. Verhindern beispielsweise fehlende Spurmarkierungen oder zu hohe Kurvenradien eine vollautomatische Fahrzeugführung, ist im *Conduct-by-Wire* eine seriell-simultane Benutzerschnittstelle vorgesehen. Folglich muss eine geeignete Benutzerschnittstelle ebenso eine seriell-simultane Fahrzeugführung erlauben. (vgl. [51], [129])

Ein konkreter Vorschlag eines Bedienelements zur prototypischen Implementierung einer Manöverschnittstelle findet sich in [66]. Der Designvorschlag beschreibt ein kombiniertes Bedienelement aus einem statischen Touchdisplay mit der Möglichkeit der taktilen Betätigungsrückmeldung und einem aktiven *Steer-by-Wire*-Lenkrad zur Zustandsrückmeldung. Das Touchdisplay wird unter anderem zur

Auswahl der gewünschten Fahrmanöver genutzt. Diese sind in Form von Icons auf der Anzeigefläche hinterlegt.

Ein weiterer manöverbasierter Ansatz wird in [81] durch die *Playbook-Metapher* beschrieben. Das Konzept ist durch die Kommunikation eines American-Football Trainers mit seinem Quarterback inspiriert: Der Trainer gibt seinem Spielführer dabei einen Spielzug aus einem Taktikkatalog vor, dem sog. *Playbook*. Der Quarterback gibt diesen Spielzug anschließend an seine Mitspieler weiter. Jeder Spieler kennt die Spielzüge des Playbooks und seine jeweilige Aufgabe im Rahmen der einzelnen Spielzüge. Durch die gemeinsame Wissensbasis können so auf Basis einer bloßen Kommunikation mit Codewörtern zwischen Trainer und Spieler komplexe Verhaltensabläufe koordiniert werden. Nach [81] kann dieser Zusammenhang unter anderem auf die kooperative Fahrzeugführung bei hoch- bzw. vollautomatisierten FAS angewandt werden. Allgemein präsentiert die *Playbook-Metapher* einen Lösungsansatz für viele Arten von menschlich-kontrollierter Automation, wie z.B. für die Automation von Luftfahrzeugen oder die Steuerung automatisierter (Fertigungs-)Prozesse. Der Operator steuert die Automation durch die Auswahl bestimmter Manöver (Spielzüge). Diese Manöverauswahl hat den Ablauf weiterer Prozesse zur Folge. Der Fahrzeugführer kennt im Idealfall diese hinterlegten Prozesse. Aufgrund des eher generischen Ansatzes der *Playbook-Metapher* wird hier kein konkreter Vorschlag für eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle vorgestellt. Eine möglicher Lösungsansatz ist eine Manöverdelegation über ein Touchdisplay analog [66], das durch seine Variabilität und Flexibilität eine erste prototypische Umsetzung erleichtern kann. Nach [81] wird zudem postuliert, einen Fokus der Schnittstellenentwicklung auf der Balance zwischen der mentalen Beanspruchung des Bedieners, der Erlernbarkeit und der Transparenz der Systembedienung zu legen (vgl. Abschnitt 2.1.2.2).

**H-Mode** Der *H-Mode* nach [42] beschreibt die Applikation der *Horse-Metapher* auf die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug im Kontext der automatisierten Fahrzeugführung. Die Kooperation von Fahrer und Fahrzeug orientiert sich an der Beziehung eines Reiters zu seinem Pferd (engl.: *horse*). Führt der Reiter sein Pferd am langen Zügel (*Loose Rein*), ist das Pferd aufgrund seiner natürlichen Voraussetzungen in den meisten Fällen in der Lage, die vom Reiter kommunizierten Zielvorgaben (z.B. Richtungsvorgaben, Wegvorgaben) zu erfüllen. Durch die Verbindung mit dem Pferd über die Zügel und die Trense wird der Reiter weiterhin haptisch über das Verhalten des Pferdes informiert.

Im *Loose Rein* liegt im Kontext der kooperativen Fahrzeugführung der überwiegende Anteil der Fahrzeugführungsaufgaben beim Automaten. Das Fahrzeug erfüllt mit Hilfe seiner Sensorik und auf Basis intelligenter Funktionsalgorithmen die Fahrzeugführungsaufgabe weitgehend selbstständig aus. Im Extremfall gibt der Fahrer in Form einer Manöverschnittstelle ereignisdiskret Anweisungen an das FAS und entsprechend an das Fahrzeug weiter. Bei diesen hohen Automationsgraden ist eine seriell-sequentielle Kooperation von Fahrer und Fahrzeug umgesetzt (vgl. Abschnitt 2.1.2.2). Durch die haptische Kopplung von Fahrzeug und Fahrer über ein geeignetes Bedienelement wird der Fahrer jedoch weiterhin über den Zustand der Regelstrecke Fahrzeug informiert.

Am kurzen Zügel geführt, setzt ein Pferd die Vorgaben seines Reiters hingegen direkter um. Dieser *Tight Rein* steht für eine parallel-simultane Fahrer-Fahrzeug-Kooperation. Der Fahrer fährt manuell, wird jedoch kontinuierlich durch FAS unterstützt. Die Eingaben des Fahrers und des Assistenzsystems wirken überlagert auf das Fahrzeug ein (vgl. Abschnitt 2.1.2.2), wobei ein Übergewicht der Verantwortlichkeiten beim Fahrer liegt.

Diese dynamische Verteilung (oder auch *Transition*), d.h. die Gewichtung der Eingaben von Fahrerassistenzsystem und Fahrer in der Struktur des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises (siehe Abbildung 2.1) wird

durch einen „für Transitionen sensitiven Summenpunkt vor dem Fahrzeug realisiert“ ([51], S.653). Mögliche Bedienelemente für eine Umsetzung der H-Metapher müssen entsprechend eine bidirektionale, haptische Kommunikation von Automation und Fahrer ermöglichen. Dieser Anforderung kann durch aktive Sidesticks oder durch die Erweiterung der herkömmlichen Benutzerschnittstelle im PKW (Pedale, Lenkrad) mit Force-Feedback-Funktionalität nachgekommen werden. Geeignete Bedienelemente können durch Variationen im Kraft-Weg-Verlauf Rückmeldung über den Zustand des Fahrzeugs an den Fahrer geben. Die vom Fahrer eingebrachten Griff- bzw. Betätigungskräfte kommunizieren über diese Schnittstelle den Grad der vom Fahrer angeforderten Automation an das System. Visuelle und akustische Signale ergänzen die Kommunikationsstrategie des H-Mode.

### 2.3.3.2 Marktanalyse

**Life-Style-Produkte** Nach [100] ergibt sich die Attraktivität von Life-Style-Produkten durch eine Kombination aus ansprechendem Design und einem hohen technischen Innovationsgrad. Der zusätzliche Nutzen der Anwendungen ist ebenfalls ein wesentlicher Faktor. Kritische Aspekte, wie Systemausfälle oder Fehlbedienungen sind häufig von untergeordneter Wichtigkeit. Die Bedienung von Touchdisplays der neuesten Smartphone- oder Tablet-Generation belegen dies: Aufgrund der hohen Attraktivität der Produkte werden die gelegentlichen Fehlbetätigungen beim Tippen mit der virtuellen Tastatur zwar als ärgerlich, aber dennoch als akzeptabel empfunden. Dies begünstigt eine schnelle Markteinführung neuer Technologien für den Bereich der Life-Style-Produkte. Für die Bedienung sicherheitskritischer Funktionen gelten höhere Anforderungen bzgl. Fehlbetätigungen und Zuverlässigkeit. Die Durchdringung dieses Bereichs durch innovative Technologien erfolgt oftmals vergleichsweise langsam.

Die Spielekonsole *Wii* der Fa. *Nintendo* wird mit einem kabellosen Controller bedient. Durch die bewegungssensitive Steuerung überträgt das Bedienelement die Bewegungen des Bedieners direkt an die Konsole. Ergänzt wird die Bewegungssensitivität durch eine Kreuzwippe und verschiedenen Tasten auf der Controller-Oberfläche. Die Benutzereingaben werden je nach Art des Spiels in passende Bewegungen eines Avatars umgesetzt. So ist es dem Nutzer möglich, durch geeignete Manipulation des Controllers den Avatar Schwünge mit einem Golf- oder Tennisschläger ausführen, virtuelle Schwertkämpfe ausfechten oder Fahrzeuge fahren zu lassen. Hierfür steht als Zusatz ein Lenkradadapter zur Kopplung mit dem Controller zur Verfügung. Die Bedienung erfolgt auf Basis eines Master-Slave-Prinzips (vgl. [35]), die Gestalt des Benutzers wird auf die Gestalt eines virtuellen Gegenparts übertragen. Bewegungen des virtuellen Slaves werden durch Bewegungen des Stellelements durch den Master initiiert. Durch einen integrierten Vibrationsmotor verfügt der Controller zusätzlich über die Möglichkeit zur haptischen Rückmeldung von Systemzuständen an den Nutzer. (vgl. [100], [84])

Die Fa. *Microsoft* bietet ein vergleichbares kabelloses Lenkrad für die Spielekonsole Xbox 360 an. Das *Wireless Speed Wheel* überträgt analog dem Wii-Controller die Lenkbewegungen des Bedieners direkt auf ein virtuelles Fahrzeug. Die Navigation durch Menüs sowie die Geschwindigkeitsregelung werden über Tastenelemente auf dem Bedienelement vorgenommen. Auch bei diesem Konzept wird die Kopplung von Master (Bediener) und Slave (virtuelles Fahrzeug) über ein bewegungssensitives Bedienelement vorgenommen. Neben einer grafischen Rückmeldung über eine separate Anzeigefläche hat auch das *Wireless Speed Wheel* die Möglichkeit, durch Vibrationen mit dem Nutzer zu kommunizieren. (vgl. [100], [80]).

Ein fortgeschrittenes System zur Kopplung realer Bewegungen mit virtuellen Inhalten repräsentiert das *Kinect*-System der Fa. *Microsoft*. Das kamerabasierte Trackingsystem bildet Körper und -bewegungen

innerhalb des Erfassungsbereichs detailliert in einer virtuellen Welt ab. Durch Verarbeitung von Gesten oder die Eingaben über virtuelle Betätigungsflächen und Bedienelemente kann die virtuelle Abbildung des Masters die virtuelle Welt manipulieren. Wie z.B. in [68] ersichtlich, können durch definierte Gesten oder Körperhaltungen Fahrzeuge gesteuert, Musikinstrumente gespielt oder Computer-Anwendungen bedient werden. Der Fokus dieses Produkts der Fa. Microsoft liegt derzeit im Bereich der Unterhaltungselektronik. Jedoch existieren bereits zahlreiche experimentelle Anwendungen zur Erweiterung und Verbesserung verschiedener Office-Anwendungen. Als Beispiel sei die Augmentierung einer Videokonferenz durch zusätzlich eingeblendete Informationen oder Steuerbefehlen mittels Gesten genannt. (vgl. [69])

Ein etablierter technischer Standard zur Bedienung vielfältiger Multimedia-Inhalte sind Touchdisplays. Diese integrieren Anzeige- und Bedienfläche in einem Element und ermöglichen dem Nutzer auf diese Weise eine Bedienung ohne zusätzlichen kognitiven Aufwand für die Umcodierung. Das Feedback über eine erfolgte Bedienhandlung wird direkt am Ort der Betätigung visualisiert und kann durch eine taktile Rückmeldung der Bedienoberfläche (Vibration) erweitert werden. Das Smartphone „iPhone“ der Fa. *Apple* steht stellvertretend für eine Vielzahl verfügbarer Endgeräte, die hauptsächlich über eine Touch-Bedienoberfläche mit integrierter Anzeige bedient werden. Hier können durch das Ausführen spezifischer, oftmals intuitiver Fingergesten bestimmte Aktionen ausgeführt werden. Wichtige Gesten sind das Tippen zur Bestätigung, das Auf- und Zuziehen zum Zoomen oder das Streichen zum Bewegen der Anzeigehalte. (vgl. [100], [3])

**Automotive Lösungen** Im Automotive-Bereich werden einerseits unterschiedliche Bedienkonzepte und -elemente für die Fahrzeugführung entwickelt und untersucht. Andererseits erfordert die Zunahme an Funktionsdichte und Komplexität von Infotainment- bzw. Multimediainhalten in modernen PKWs die stetige Weiterentwicklung von Eingabegeräten, Anzeigelogiken und -inhalten.

Einen guten Überblick über alternative Bedienkonzepte zur Fahrzeugführung bieten [61] oder [129]. Es zeigen sich verschiedene Entwicklungstendenzen:

Ein Bestreben besteht in der Weiterentwicklung und Funktionsintegration von Lenkrädern und lenkradähnlichen Bedienelementen. Beispiele finden sich zum Beispiel in [114], [17] und [23]. Abbildung 2.9 zeigt unter anderem ein lenkradähnliches Bedienelement aus [114]. Der feststehende Mittelteil des Bedienelements wird von zwei gekoppelten, gegeneinander verschiebbaren Handgriffen flankiert. Das Element bedient Querführungsfunktionen. Das *Guida-Filo* Bedienelement (vgl. Abbildung 2.9) hingegen ermöglicht eine Bedienung von Quer- und Längsführungsaufgaben. Zwei gekoppelte Handgriffe dienen analog [114] zur Beeinflussung der Fahrzeugquerführung. Ein Drehen der Griffe um ihre Längsachse führt zu einer Fahrzeugbeschleunigung, ein Quetschen bremst das Fahrzeug ab. In [17] wird die Designstudie eines weiteren lenkradähnlichen Bedienelements gezeigt (vgl. Abbildung 2.9). Die beiden mechanisch gekoppelten Scheiben sind die Bedienelemente für die Querführung, die Längsführung erfolgt durch ein Verschieben des Elements entlang einer Führung an der Mittelkonsole. Einen weiteren Entwicklungsschwerpunkt bilden die Joysticks bzw. stickähnlichen Bedienelemente. In Land- und Baumaschinen sind diese Elemente häufig wesentliche Bestandteile des Bedienkonzepts, ebenso steht der Ansatz im Fokus vieler prototypischer Bedienkonzepte zur Fahrzeugführung im Automotive-Bereich. Auch für die Bedienung von PKWs durch Personen mit körperlichen Handicaps bieten Stick-Bedienelemente Potential. Abbildung 2.10 zeigt das *Vario*-Bedienelement der Fa. *Fendt* aus dem Bereich der Landmaschinen (vgl. [1]), ein Einhand-Bedienkonzept zur Fahrzeugführung der spanischen Forschungsgemeinschaft Asociación RUVID, die idealisierte Darstellung einer Master-Slave-Schnittstelle sowie die Umsetzung eines Bedienkonzepts mit zwei Sidesticks (beide nach [35]).



Abbildung 2.9: Lenkradähnliche Bedienelemente aus [23] (oben), [114] (unten links) und [17]

Exemplarisch für Sidestick-Bedienkonzepte für den Betrieb von Land- und Baumaschinen steht die *Vario-Joystick*-Bedienung der Fa. Fendt für Traktoren der *Vario*-Baureihe (vgl. [1]). Der Stick bietet die Möglichkeit zur direkten Übernahme von Aufgaben der Fahrzeuglängsführung durch bidirektionale Betätigung des Elements in Fahrzeuglängsrichtung. Innerhalb eines vorgegebenen Geschwindigkeitsbereichs (20-60 km/h) ermöglicht das Element eine stufenlose Geschwindigkeitsregelung. Durch eine Betätigung des Sticks nach rechts wird ein Tempomat aktiviert, die aktuelle Geschwindigkeit wird als Setzgeschwindigkeit übernommen. Durch eine Betätigung nach links wechselt das Getriebe zwischen Vorwärts- und Rückwärtsfahrt. Der Stick integriert damit Steuerelemente zur Fahrzeuglängsführung (Gas- und Bremspedal, Getriebewählhebel) mit Bedienelementen zur Zustandssteuerung eines Fahrerassistenzsystems (GRA). Die Querführungsaufgabe führt der Benutzer weiterhin mittels eines herkömmlichen Lenkrades aus.

In [35] wird ein Bedienkonzept zur Steuerung der Längs- und Querführung eines PKW mittels zweier Sidesticks beschrieben. Durch die isometrische Betätigungscharakteristik in Längsrichtung bestimmt der Bediener mittels der aufgebrachten Kraft auf die elektronisch gekoppelten, aktiven Stickelemente die Fahrzeugsollbeschleunigung. Die in Querrichtung über den Weg aufgebrachte Kraft bestimmt eine geschwindigkeitsabhängige Radlenkwinkelverstellung. In Längsrichtung erfolgt keine Rückmeldung der Fahrzeugdynamik, in Querrichtung wird die Kurskrümmung rückgemeldet (vgl. [129], [35]). Zusätzlich wird in [35] das Konzept eines fahrzeuganalogen Bedienkonzepts nach dem Master-Slave-Prinzip vorgestellt. Das Bedienelement repräsentiert eine Miniatur der Regelstrecke Fahrzeug. Betätigungen am Bedienelement werden durch das Fahrzeug nachempfunden. Eine Fahrzeugbeschleunigung wird durch eine Längsverschiebung des Masters realisiert, Lenkbewegungen werden durch Drehen des Masters gesteuert. Die idealisierte Darstellung nach [35] skizziert den Master als maßstabgetreue Miniatur der Regelstrecke.

Die Einhand-Steuerung für einen PKW nach [113] stellt ein weiteres Konzeptbeispiel für die Fahrzeugführung mit stickähnlichen Bedienelementen dar. Für Menschen mit fehlenden Gliedmaßen soll der Prototyp eine Steuerung der Längs- und Querführung mit nur einer Hand ermöglichen, zur Kommunikation des Zustands der Regelstrecke ist das Bedienelement mit einer Force-Feedback-Funktionalität ausgestattet.

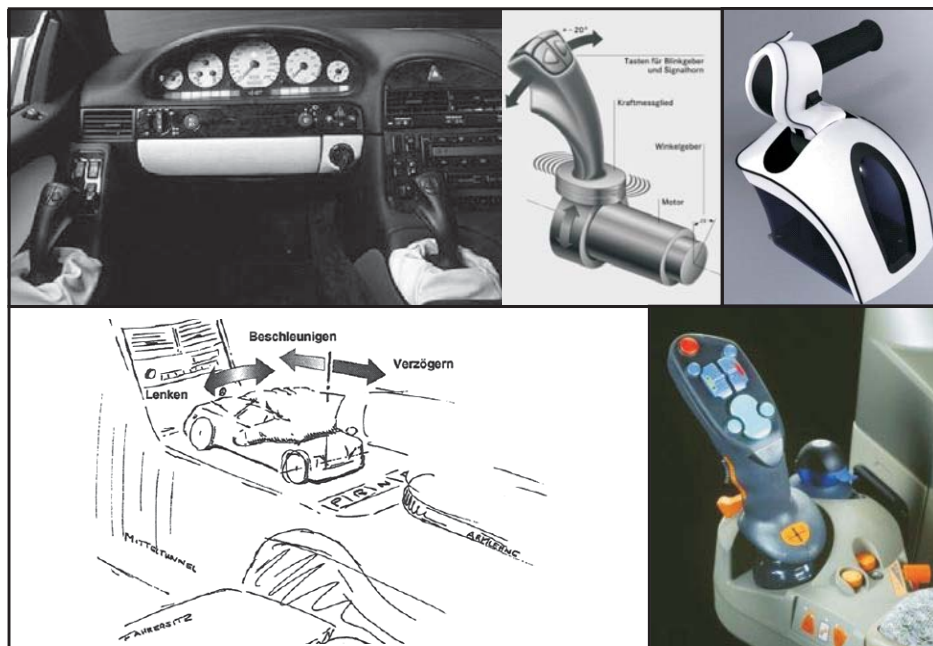


Abbildung 2.10: Bedienkonzepte mit stickähnlichen Betätigungselementen nach [35] (oben links, unten links), [113] (oben rechts) und [1]

Im Automotive-Bereich erfordern die verfügbare Funktionsvielfalt und Informationsdichte von *Infotainmentsystemen* vieler moderner Fahrzeuge vielseitige, intuitive und integrative Bedienelemente zur Handhabung dieser Komplexität im alltäglichen Fahrbetrieb. Diese Infotainment-Bedienelemente ermöglichen dem Fahrer die Bedienung klassischer Inhalte der sekundären und tertiären Fahraufgabe wie Navigations-, Komfort- oder Kommunikationsaufgaben. Durch die Möglichkeit der Parametrierung von Fahrerassistenzsystemen (z.B. die Auswahl eines frühen oder eines späten Lenkeingriffs des AALA, vgl. Abschnitt 2.3.1.2) oder Fahrwerkseinstellungen beeinflusst der Fahrer mittels der Infotainmentbedienung auch Aspekte der primären Fahraufgabe. Um die Blickabwendungszeiten vom Straßengeschehen minimal zu halten, ist eine hohe Intuitivität der Bedienkonzepte anzustreben. Als zentrale, integrative Stellelemente mit integrativem Charakter haben sich neben Touchscreen-Konzepten in der Instrumententafel vor allem Drehdrücksteller und Maus-ähnliche Bedienelemente etabliert. Abbildung 2.11 zeigt neben einer Touchscreen-Bedieneinheit der Volkswagen AG (vgl. [116]) die Serienumsetzungen verschiedener Varianten von Drehdrückstellern zur Infotainmentbedienung der BMW AG und der AUDI AG (nach [10] und [83]). Des Weiteren wird das Maus-ähnliche *Commander*-Konzept von Hyundai [22] abgebildet.

Die Aspekte von Touchscreens werden in diesem Kapitel im Abschnitt *Life-Style-Produkte* näher beschrieben. Ein zusätzliches Feature von Touchscreens im Automotive-Bereich ist die Bereitstellung hybrider Infotainmentbedienkonzepte. Die virtuellen Interaktionsflächen im Anzeigebereich des Touchdisplays werden durch verschiedene physikalische Tasten ergänzt. So ist z.B. bei [116] ein Kontextwechsel (Radio, Navigation etc.) über Hardkeys möglich, die am Rahmen des Touchscreens positioniert sind. Ein anderer Ansatz wird mittels zentral in der Mittelkonsole positionierter, integrativer Bedienelemente verfolgt. Anzeige und Ort der Bedienung sind hierbei getrennt. [10] verfolgt mit dem *iDrive* Controller ein Konzept mit zentralem *Dreh-Drück-Schiebe*-Steller und zusätzlichen Hardkeys zur Kontextauswahl



(CD, Radio etc.) und Menünavigation (Menü, Back etc.). Das aktive Stellelement ist nach [100] in der Lage, durch systeminitiierte Variation des Kraft-Weg-Verlaufs der Betätigung spürbare Rastpunkte oder feste Anschläge darzustellen. Dies unterstützt die haptische Kommunikation von Menüstrukturen an den Bediener.

Ein weiteres integratives Infotainment-Bedienelement ist die MMI-Bedieneinheit des AUDI A3 (ab Modelljahr 2012) (vgl. [83]). Dieses kombiniert unterschiedliche Bedienmodalitäten in einem Element. In die Oberseite eines MMI-Dreh-Drück-Stellers ist ein Touchpad integriert. Dieses ermöglicht unter anderem die intuitive Eingabe von Zeichen zum Suchen von Telefonkontakten, die einfache Zieleingabe oder die Navigation innerhalb der Karte des Navigationssystems. Zusätzlich stehen zur Menübedienung der Drehdrücksteller, Softkeys mit kontextabhängigen Inhalten sowie verschiedenen Hardkeys zur Verfügung (monostabile Wippen, Tasten).

Das in [22] präsentierte, Maus-ähnliche *Commander*-Konzept kombiniert ebenfalls verschiedene Bedienmodalitäten. Einfache Steuerbefehle können mittels Freihand-Gesten über dem Element getriggert werden (z.B. *Vor* und *Zurück* zur Menübedienung), die übrigen Bedienschritte erfolgen durch Betätigungen des Scrollrades und des Joysticks. Dieser ist der Form einer Computermaus nachempfunden.



Abbildung 2.11: Bedienkonzepte zur Infotainmentbedienung aus [116] (oben links), [22] (oben rechts), [10] (unten links) und [83]

**Forschung und Entwicklung** Ein Forschungszweig der Mensch-Maschine-Interaktion beschäftigt sich mit der Entwicklung von Bedienelementen, die in Bezug auf Ihre Formgebung adaptierbar gestaltet sind. Die Erfahrungsschätze von Benutzerpopulationen bauen auf wiederkehrenden Betätigungsmustern

auf. Der Benutzer assoziiert mit bestimmten Formen von Bedienelementen ganz spezifische Betätigungsarten. Dieses Grundidee macht sich z.B. das in [110] gezeigte *Haptic Chameleon* der Fa. *Sony* zunutze. Das aktive und formlich adaptierbare Bedienelement kann drei verschiedene Zustände repräsentieren, jedem Zustand ist eine spezifische haptische Rückmeldung zugeordnet. Auf diese Weise ändert der Benutzer die Betätigungscharakteristik und die jeweils hinterlegte Funktionalität von einer kontinuierlichen Verstellbarkeit hin zu einer diskreten Einstellung mit festen Anschlägen (siehe [100]). Als Ausführungsbeispiel wird ein Video-Controller aus dem Heim-Entertainment-Bereich vorgestellt. Eine Translation der Erkenntnisse auf den Automotive-Bereich ist ebenfalls vorstellbar.

In [87] und [109] werden formlich-adaptive Bedienelemente vorgestellt. Das in [87] vorgestellte Dreh-Schiebe-Element ist in diesem Entwurfsvorschlag durch ausfahrbare Lamellen in der Lage, seine Oberfläche von konkav zu ebenförmig zu verändern. Die konkave Form veranlasst einen Bediener zu einer translatorischen Betätigung des Elements, in der ebenmäßigen Form betätigt der Benutzer das Element rotatorisch. In [109] wird der Prototyp eines adaptiven Bedienelements präsentiert, welches durch variable Lamellen seine Gestalt verändern kann. In der quaderförmigen Darstellung kodiert das Element eine translatorische Verstellmöglichkeit, in einer zylindrischen Darstellung wird vom Element eine rotatorische Betätigungsmöglichkeit kommuniziert.

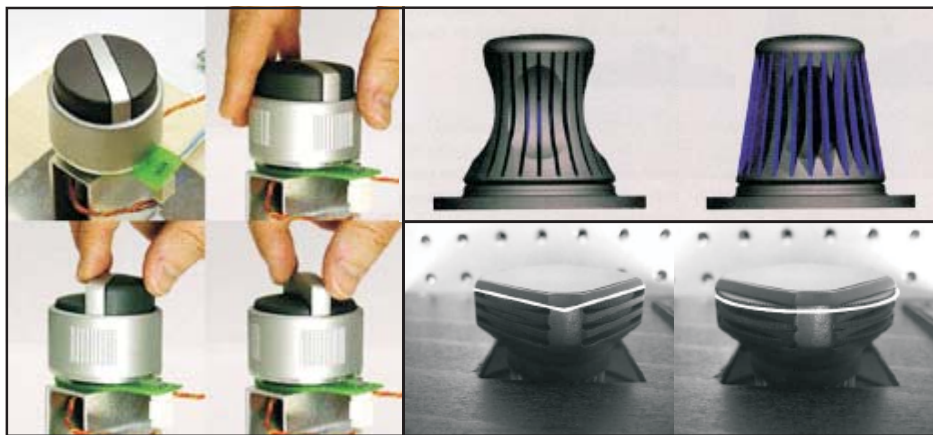


Abbildung 2.12: Forschungsansätze für form-variable Bedienelemente nach [110] (links), [87] (rechts oben) und [109]

## 2.4 Resultierende Anforderungen an ein zukünftiges HMI-Konzept für Fahrerassistenzsysteme

Zur Entwicklung von Bedien- und Anzeigekonzepten für Fahrerassistenzsysteme sind verschiedene Einflussfaktoren relevant. Kapitel 2.1, Kapitel 2.2 und Kapitel 2.3 beschreiben die Grundlagen der nachfolgenden HMI-Entwicklung und dienen somit als Basis zur Formulierung konkreter Prämissen und Anforderungen an ein neuartiges Interaktionskonzept. Dieses strebt nach einem aus systemergonomischer Sicht optimierten Informationsfluss zwischen Mensch und Maschine. Zusätzlich wird eine gezielte Anpassung der Mensch-Maschine-Schnittstelle an die anatomischen und die physiologischen Rahmenbedingungen der relevanten Nutzerpopulation verfolgt. Abschnitt 2.4.1 formuliert die aus den Grund-

lagen abgeleiteten Rahmenbedingungen der HMI-Entwicklung. Abschnitt 2.4.2 fasst diese Prämissen und Rahmenbedingungen in Form einer Anforderungsliste zusammen. Die Liste dient als Werkzeug zur Bewertung der in Kapitel 3 beschriebenen Konzeptvorschläge.

### 2.4.1 Auslegungsprämissen der Mensch-Maschine-Interaktion

Die Entwicklung neuer Fahrerassistenzsysteme und zugehöriger Bedienkonzepte erfolgt unter der Beachtung bestimmter Richtlinien und Normen: Der *Code of Practice (CoP)* nach [94] zur Entwicklung und Validierung von FAS stellt ein Werkzeug für Funktions- und HMI-Entwickler im Automotive-Bereich dar. Schwerpunkt ist hierbei die Systemauslegung sowie die Kontrollierbarkeit des Systems durch den Nutzer an Systemgrenzen und bei Fehleingaben. Die Gestaltungsleitsätze aus [29] sind im Gegensatz zu den Richtlinien des CoP generischer Natur. Ziel dieser Norm ist die Festlegung von „allgemeinen Grundsätzen für die Benutzer-Interaktion mit Anzeigen und Stellteilen“ ([29], S.5) in Mensch-Maschine-Systemen zur Gestaltung einer robusten und effektiven Schnittstelle. Abschnitt 2.4.1.1 fasst die teilweise komplementären Vorgaben nach [94] und [29] zusammen. Im Rahmen dieser Arbeit werden sie zur Vervollständigung der aufgabenspezifischen, aus Kapitel 2 abgeleiteten Vorgaben für die Mensch-Maschine-Interaktion (Abschnitt 2.4.1.2) im Kontext der automatisierten Fahrzeugführung aufgeführt.

#### 2.4.1.1 Allgemeine Gestaltungsleitsätze für die Mensch-Maschine-Interaktion

Eine gewichtige Rolle spielt die *Aufgabenangemessenheit* eines Mensch-Maschine-Systems. Der Mensch soll durch die Beschaffenheit des Systems bei der „sicheren, effizienten und wirkungsvollen“ Aufgabenerfüllung unterstützt werden. Eine geeignete *Funktionszuweisung* stellt eine Aufgabenverteilung zwischen Mensch und Maschine sicher, die die Stärken und Schwächen beider Elemente sinnvoll berücksichtigt. Dieses Ziel verfolgt auch die bewusste Minimierung der *Systemkomplexität*. Ein Werkzeug hierfür stellt unter anderem die *Gruppierung* von Stellteilen und Anzeigen dar. Maßgeblich hierfür können Aspekte wie die Wichtigkeit für den sicheren Betrieb einer Maschine, die prädiizierte Häufigkeit der Bedienung oder ein funktionaler Zusammenhang der einzelnen Betätigungselemente und/oder Anzeigen sein. Die *Unterscheidbarkeit* der einzelnen Elemente soll dabei natürlich erhalten bleiben. (vgl. [29])

Der Bediener eines Mensch-Maschine-Systems soll die Anzeigen und Stellteile jederzeit erkennen und den ablaufenden Prozess verstehen können. Für diese *Selbsterklärungsfähigkeit* ist auch der ungehinderte und schnelle Zugang zu Informationen über den Systemzustand nötig. Andere Prozesse dürfen durch diesen Prozess nicht beeinträchtigt werden.

Die *Steuerbarkeit* eines Mensch-Maschine-Systems ist dann gegeben, wenn der Maschinenführer die Maschine beherrscht. Der Operator muss seine Tätigkeiten also nicht dem Rhythmus der Maschine anpassen, sondern wird von der Benutzerschnittstelle der Maschine lediglich durch die Aufgabe geführt. Ein Werkzeug hierfür ist zum Beispiel die Positionierung von Stellelementen im Greif- bzw. Bewegungsraum des Operators im Gegensatz zu einer aus technischer oder ästhetischer Sicht optimierten Positionierung.

Zusätzlich entsprechen die Lage und die Bewegungen von *erwartungskonformen* Schnittstellen den inneren Modellen der Nutzer. Diese basieren auf den bisherigen Kenntnissen, der Ausbildung oder der Erfahrung der Nutzerpopulation. Neben der inneren und äußeren *Kompatibilität* (vgl. Abschnitt 2.1.1.4) ist hierbei auch die *Konsistenz* eines Mensch-Maschine-Systems von Bedeutung. Diese fordert eine abgestimmte Funktionsweise ähnlicher Elemente des Systems (vgl. Abschnitt 2.4.1.2).

Eine weitere Vorgabe aus [29] besteht in dem Bestreben nach *Anpassbarkeit* und *Erlernbarkeit* einer Schnittstelle. Das System passt sich den individuellen Benutzerbedürfnissen und -fähigkeiten an. Zusätzlich ist die Systemnutzung leicht zu erlernen, die Einstiegshürde ist so niedrig wie möglich zu gestalten.

#### 2.4.1.2 Spezifische Gestaltungsanforderungen an die HMI-Gestaltung des automatisierten Fahrens

Aus den spezifischen Rahmenbedingungen der Beschaffenheit der Bedienkonzeptentwicklung für das automatisierte Fahren ergeben sich besondere Anforderungen an die HMI- und die Systemgestaltung. Diese stehen nicht im Widerspruch zu den Leitsätzen aus Abschnitt 2.4.1.1, sondern konkretisieren diese im Kontext der automatisierten Fahrzeugführung und ergänzen für den Anwendungsfall wichtige Aspekte.

**Konsistenz** Im Rahmen der automatisierten Fahrzeugführung innerhalb eines heterogenen Automationspektrums ist die *Konsistenz* der Systemstruktur von zentraler Bedeutung. Konsistente Systemausprägungen unterstützen den Benutzer beim Verständnis von Automationsprozessen der Fahrzeugführung und in der Konsequenz bei der Ausbildung innerer Modelle von Automationsmodi und zugehöriger FAS-Strukturen.

Diese Prämisse betrifft einerseits die *intra-strukturelle* Konsistenz innerhalb einzelner Modi. Innerhalb eines Modus soll sich dem Nutzer ein konsistentes Interaktionsschema mit den agierenden FAS bieten. Semantisch zusammengehörige Betätigungen bewirken also zusammengehörige Systemreaktionen. Bei der Bedienung moderner ACC-Systeme (vgl. Abschnitt 2.3.1.1) ist nach dieser Vorgabe eine Inkonsistenz zu beobachten. Betätigungen des Brems- und des Gaspedals dienen dem Fahrer als Stellglied der Längsführung, beide Pedale steuern das Längsbeschleunigungsverhalten des Fahrzeugs. Bei aktivem ACC haben Betätigungen von Gas- und Bremspedal unterschiedliche Systemreaktionen zur Folge. Die Betätigung des Gaspedals führt zum temporären *Override*-Zustand des ACC-Systems, während der Betätigung bestimmt der Fahrer das Beschleunigungsverhalten des Fahrzeugs, nach Beendigung der Betätigung regelt wieder das ACC. Eine Betätigung der Bremse hingegen schaltet das ACC-System in den Zustand *Stand-by*. Nach dem Bremsvorgang ist die Längsregelung nicht mehr aktiv und muss wieder aktiviert werden. Eine intra-strukturell konsistente Systemausprägung ist hingegen für den Fall gegeben, dass das ACC Fahrereingaben über die Pedale einheitlich handhabt. Eine Möglichkeit zur konsistenten Systemgestaltung besteht entsprechend darin, das ACC bei Betätigung der Pedale immer in den *Stand-by* zu schalten. Die Alternative ist ein durchgängiger *Override*-Zustand des Systems bei Betätigung der Pedale. Im Anschluss der Fahrereingabe verbleibt das System im Zustand *Aktiv*. Diese inkonsistente, herstellerübergreifend etablierte Serienausprägung von ACC-Systemen ist durch Sicherheits- und Komfort-Aspekte motiviert und etablierter Stand der Technik (vgl. [63]). Durch die weite Verbreitung und die breite Nutzerakzeptanz repräsentiert sie also einen Standard, der durch die konsequente Anwendung ebenfalls die innere Modellbildung des Nutzers unterstützt.

Eine weitere Anforderung betrifft die *inter-strukturelle* Konsistenz innerhalb eines Modus. Setzt sich ein Modus aus verschiedenen FAS zusammen, ist ein übergreifend konsistentes Interaktionsschema von Mensch und FAS anzustreben. Die Systeme AALA mit Spurmittelführung und ACC sind beide dem Modus der TA zuzuordnen (vgl. Abschnitt 2.1.2.1). Beide übernehmen einen Teil der primären Fahrzeugführungsaufgabe. Selbst wenn beide Systeme aktiv regeln, muss der Fahrer einen Teil der Fahrzeug-

querführung selbst ausführen. Der Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis liegt im Fall des AALA in einer parallel-simultanen Struktur vor, Fahrer und FAS wirken gleichzeitig über einen Summenpunkt auf das Fahrzeug ein. Das ACC repräsentiert eine parallel-sequentielle Assistenzform, entweder der Fahrer oder das FAS wirken im Regelkreis, die Verschaltung erfolgt über einen logischen „ODER“-Schalter. Innerhalb des Modus TA sind die beiden Systeme bzgl. der vorliegenden Kooperationsform und in der Konsequenz bzgl. des wirkenden Interaktionsschemas zwischen Mensch und Maschine inkonsistent. Diese Inkonsistenz erschwert es dem Nutzer, sich ein inneres Modell des Modus TA zu schaffen. Ein Lösungsvorschlag für dieses Dilemma für den Modus der Vollautomation wird in Kapitel 3.1 vorgestellt.

**Möglichkeit zur Anpassung der Schnittstelle an verändertes Nutzerempfinden** Vollautomatische Systeme wie beispielsweise ein Stauassistent sind realistische, mittelfristige Entwicklungsziele der Automobilindustrie. Aktuell existieren lediglich prototypische Umsetzungen der Systeme. Eine Beurteilung dieser Prototypen durch Kunden ist bisher nur in eingeschränktem Maß möglich. Daher gibt es wenig valide Aussagen über bevorzugte Funktionsausprägungen und Interaktionsformen mit realen, vollautomatischen Systemen. Auf Basis von Erkenntnissen aus der Nutzung teilautomatischer Systeme wird von einer veränderten Wahrnehmung der Fahrzeugführungsaufgabe im Kontext höherer Automationsstufen ausgegangen. Die Hypothese sagt aus, dass mit steigendem Automationsgrad die Anpassung der FAS-Funktionsausprägung am realen Regel- und Steuerungsverhalten des Menschen in geringerem Maß erfolgen kann.

Beispielsweise erfährt der Mensch die manuelle Querführungsaufgabe mit Hinblick auf die Darstellungsart (vgl. Abschnitt 2.1.1.4) in Abhängigkeit des Geschwindigkeitsbereichs unterschiedlich. Im Niedriggeschwindigkeitsbereich ( $v \leq 25 \text{ km/h}$ ) stellt sich dem erfahrenen Fahrer eine Folgeaufgabe, im höheren Geschwindigkeitsbereich ( $v \geq 45 \text{ km/h}$ ) stellt sich die Querführung als Kompensationsaufgabe dar. Außerdem liegen für die manuelle Fahrt in Abhängigkeit der zu beeinflussenden Fahrzeugdynamik und des dafür verwendeten Stellteils verschiedene System- und Steuerungsarten vor. Aus ergonomischer Sicht existieren Vorgaben für die zu wählende Darstellungsart dieser Teilaufgaben.

Als Prämisse für die Konzeptentwicklung in Kapitel 3 soll das Bedienelement den Fahrer in Abhängigkeit der vorliegenden Aufgabenart unterstützen. Für Kompensationsaufgaben ist eine unterstützende Sollwertanzeige zielführend. Folgeaufgaben werden durch die Unterstützung des Fahrers bei der inneren Modellbildung erleichtert. Zusätzlich sind die System- und Steuerungsarten auf die gewählte Darstellungsart abzustimmen. Unter Beachtung der Hypothese des veränderten Nutzerempfindens bei zunehmendem Automationsgrad ist eine sinnvolle Abstraktion bzw. Integration der Darstellungsart der Aufgabe umzusetzen.

**Anpassung des Automationsgrades** Ein weiterer Aspekt bei der Gestaltung eines durchgängigen Automationspektrums ist die Frage, ob die Umschaltungen zwischen Automationsmodi *adaptiv* oder *adaptierbar* gestaltet werden. Wie in Abschnitt 2.1.2.3 erläutert, bestimmt die Applikation adaptiver und adaptierbarer Ansätze die Relationen zwischen der *Unvorhersagbarkeit*, der *Kompetenz* und der *Beanspruchung* innerhalb eines Mensch-Maschine-Systems. Bei zunehmender Kompetenz des Mensch-Maschine-Systems mit zunehmendem Automationsgrad ist es das Ziel, die Beanspruchung des Menschen bei der Modusanpassung und der Bedienung der Modi bei zunehmender Unvorhersehbarkeit zu verringern. Diese Gratwanderung erfordert potente und zuverlässige FAS sowie ein solides inneres Modell der einzelnen Modi. Dieses solide Modell ermöglicht dem Bediener stets sämtliche zukünftigen Systemzustände und -parameter antizipieren zu können. Der Aspekt findet sich auch bei [15] wieder, der

eine „Balance zwischen Unterforderung und Überforderung“ (S.320) fordert. In [15] bezieht sich dies primär auf die Bedienung einzelner Systeme, kann aber in der Konsequenz auch auf die Moduswechsel innerhalb eines Automationsspektrums angewandt werden.

Als Ausgangspunkt möglicher Gestaltungsansätze von Adaption und Adaptierbarkeit bietet sich die Serienauslegung heutiger FAS der MF und TA an. Diese sind bzgl. ihrer *bottom-up*<sup>1</sup> Aktivierung vom Benutzer adaptierbar. Im Gegensatz hierzu ist die *top-down*<sup>1</sup>-Modusauswahl sowohl adaptierbar als auch adaptiv. Einerseits repräsentieren die Hands-On-Überwachung des AALA und der Anfahrtrigger des ACC S&G-Systems Methoden einer unidirektionalen, adaptiven top-down-Auswahl der verfügbaren Automationsmodi. Zum Betrieb des Assistenten wird vom Automaten mittels verschiedener Eingangsdaten das aktuelle Nutzerverhalten interpretiert. Die Verfügbarkeit der Automation richtet sich nach den Schlussfolgerungen des Systems. Andererseits steht es dem Nutzer natürlich jederzeit frei, einen Wechsel des Modus MF in den Modus TA selbst zu initiieren. Die Erweiterung dieses Ansatzes auf die Modi VA und AUTON erscheint konsequent und sinnfällig. Zusätzlich soll die Beanspruchung des Bedieners verringert werden, indem die Systeme für die bottom-up-Aktivierung selbstständig ihre Einschaltbedingungen überprüfen und als funktionale Erweiterung dem Fahrer gegebenenfalls ihre Verfügbarkeit kommunizieren.

Ein realisierbares, vom Nutzer akzeptiertes HMI-Konzept zur Bedienung des gesamten Automationsspektrums baut auf den aktuellen Gegebenheiten und damit bestehenden inneren Modellen auf und führt die kausale Kette des nutzer- und systeminitiierten Moduswechsels auch für höhere Automationsstufen fort.

**Klare Kommunikation des Systemzustands** Die Unterstützung der *Mode Awareness* ist ein zentraler Aspekt der Schnittstellengestaltung in Mensch-Maschine-Systemen. Mit zunehmender Anzahl von Modi über das Automationsspektrum und in der Konsequenz aus Nutzersicht zunehmender Systemkomplexität gewinnt dieses Anliegen weiter an Bedeutung. Aus Sicht des System- und HMI-Entwicklers stellt sich die ausstehende endgültige Festlegung der Ausprägung der Modi des Automationsspektrums sowie der zugehörigen FAS als Vorteil dar. Mit der Vision des autonomen Fahrens als wegweisenden Rahmen steht es dem Entwickler frei, die Systeme an die Eigenheiten, Fähigkeiten und Bedürfnisse des Fahrers anzupassen. Während der Fahrer also in heutigen Fahrzeugen bei Verfügbarkeit der entsprechenden FAS lediglich die Modi MF und TA kennen und unterscheiden muss, kann das Spektrum mittelfristig durch den Modus VA ergänzt werden. Die potentielle Häufigkeit und die Reichweite der Konsequenzen einer *Mode Confusion*, also die Annahme eines falschen Systemzustands, nehmen entsprechend zu. Ein zentrales Anliegen der Auslegung des Automationsspektrums sowie der Gestaltung des Bedienkonzepts soll es also sein, den Fahrer bei der Schaffung einer validen Repräsentation des Systemzustands mit allen Möglichkeiten zu unterstützen.

Dieses Ansinnen wird durch eine Begrenzung der Anzahl sowie einer klaren Abgrenzung der Modi untereinander unterstützt. Die Abgrenzung der Modi innerhalb des Automationsspektrums kann zum einen durch ein geeignetes Anzeigekonzept, zum anderen durch passende, sich prägnant unterscheidende Ausprägungen der jeweils wirkenden Funktionen erfolgen. Das Anzeigekonzept orientiert sich im Idealfall

<sup>1</sup>Die der Prozesstheorie entlehnten Begriffe *top-down* und *bottom-up* (vgl. [119]) entsprechen in diesem Zusammenhang nicht ihrer ursprünglichen Bedeutung einer Entwicklung vom Abstrakten zum Konkreten (respektive vom Konkreten zum Abstrakten); vielmehr werden die Begriffe im Rahmen dieser Arbeit dafür verwendet, die inter-strukturellen Übergänge zwischen den Modi eines Automationsspektrums zu spezifizieren. Ein *top-down*-Modusübergang stellt entsprechend einen Übergang aus einem Modus höherer in einen Modus niedrigerer Automation dar. Ein *bottom-up*-Übergang beschreibt einen Übergang aus einer niedrigeren in eine höhere Automationsstufe

an den Rahmenbedingungen im Fahrzeug sowie den Eigenschaften des Menschen zur Informationsaufnahme (vgl. Abschnitt 2.1.1.2). Aufgrund der im Regelfall starken Beanspruchung des visuellen Kanals bei der Fahrzeugführung sind unter Umständen auch andere Sinneskanäle zur Zustandskommunikation zwischen Automation und Fahrer erforderlich.

**Integration der Längs- und Querführung** Abschnitt 2.1.1.3 beschreibt die Verkopplung der Längs- und Querdynamik. Eine Aufteilung der Bedienung dieser verkoppelten Dynamik auf unterschiedliche Stellelemente hat sich auf Basis der großen Entwicklungstiefe und der breiten Akzeptanz innerhalb der Nutzerpopulation durchgesetzt, stellt allerdings nicht das systemergonomische Optimum dar. Die Bedienung eines FAS der VA, das dem Fahrer neben der Fahrzeuglängsführung auch die komplette Querführungsaufgabe abnimmt, sollte diesen Grundsatz berücksichtigen. Im Idealfall wird die Bedienung eines Systems zur integrierten Längs- und Querführung durch eine Integration der beiden Dimensionen der Bedienungsaufgabe in einem Element oder zumindest einer zusammengehörigen Bedieneinheit ermöglicht.

**Anthropometrie** Zusätzlich zu den systemergonomischen Aspekten soll die Benutzerschnittstelle zur Bedienung des automatisierten Fahrens an die anatomischen Gegebenheiten einer potentiellen Nutzerpopulation angepasst sein. Diese Nutzerpopulation erstreckt sich von der 5-Perzentil-Frau bis zum 95-Perzentil-Mann. (vgl. Kapitel 2.2)

Ein HMI-Konzept setzt sich stets aus Bedien- und Anzeigeelementen zusammen. Eine Positionierung relevanter optischer Anzeigen erfolgt nach Möglichkeit im Blickgesichtsfeld dieser Nutzergruppe. Wichtige Zustands- oder Warnanzeigen sollen im Gesichtsfeld erkennbar sein. Hier bietet sich eine Positionierung im peripheren Bereich und eine Akzentuierung durch bewusste Steuerung der Helligkeit der Anzeige an (vgl. Abschnitt 2.1.1.2). Die Bedienelemente eines HMI-Konzepts können auch im Umblickgesichtsfeld positioniert sein. Nach Möglichkeit soll für diesen Fall jedoch eine Blindbetätigung der Bedienelemente möglich sein, um unzulässig große Blickabwendungszeiten vom relevanten Fahrgeschehen um das Egofahrzeug auszuschließen. Der Bewegungsraum der Nutzerpopulation soll durch das Bedienkonzept nicht eingeschränkt werden, zusätzlich sind die Elemente im Greifraum der relevanten Perzentile zu positionieren. Eine Überschneidung der Funktionsräume kann in Abhängigkeit des gewählten Bedienkonzepts nötig sein. Beispielsweise verlangt die Bedienung von Touchscreens eine Positionierung des kombinierten Anzeige- und Bedienelements innerhalb des Greifraums und des Blickgesichts- bzw. Umblickgesichtsfeld der Nutzergruppe. Die Bedienelemente innerhalb dieser Funktionsräume sollen von allen Personen der Nutzergruppe mit komfortablem Kraftaufwand zu bedienen sein.

Ein weiterer Aspekt der Gestaltung der Benutzerschnittstelle für das automatisierte Fahren nach anthropometrischen Gesichtspunkten ist die konkrete Ausgestaltung des Arbeitsmittels. Beispielsweise sollen für Bedienhandlungen mittels des Hand-Arm-Apparates bei einer durch die Aufgabenstellung vorgegebenen Körperhaltung (im Fahrzeug sitzend) die Körperstellung, die Greifart und die Kopplungsart an die Spezifikationen der Aufgabe angepasst werden. Nach Möglichkeit erfolgt außerdem eine anthropometrische Anpassung der Benutzerschnittstelle an die Rahmenbedingungen der einzelnen Modi des Automationspektrums. Beispielsweise werden Fahrer im Modus VA eine entspanntere Sitzposition wählen als aktive Fahrer im Modus TA. Sollte dies ohne Einschränkung der Funktionssicherheit möglich sein, kann das HMI-Konzept die Besonderheiten der Modi berücksichtigen.

Die Entwicklung eines Bedienkonzepts des automatisierten Fahrens stellt kontextspezifische Anforderungen an die Gestaltung der Struktur des Mensch-Maschine-Systems und im Speziellen an die eigentli-

che Schnittstellenentwicklung zwischen den Systemelementen Fahrer und FAS. Neben der Beschreibung generischer Anforderungen an eine Mensch-Maschine-Schnittstelle führt Abschnitt 2.4.1 die aufgabenspezifischen Prämissen für die in dieser Arbeit behandelten Randbedingungen auf.

### 2.4.2 Anforderungsliste

In der folgenden Tabelle 2.1 werden die einzelnen Aspekte der strukturellen Systemgestaltung und der ergonomischen Schnittstellenentwicklung im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis für den Sonderfall der automatisierten Fahrzeugführung innerhalb eines Automationspektrums mit diskreten Modi beschrieben. Tabelle 2.1 umfasst dabei neben technisch-physikalischen und ästhetischen Anforderungen auch die resultierenden Vorgaben aus der Systemergonomie und der Anthropometrie. Technisch-physikalische Prämissen tragen der Forderung nach einer mittelfristigen technischen Realisierbarkeit und der Möglichkeit zur Integration des entwickelten Bedienkonzepts in ein Fahrzeug-Package Rechnung. Die ästhetischen Aspekte beschreiben den Anspruch an das Bedienkonzept, vom Fahrer gerne betrachtet und benutzt zu werden.

Tabelle 2.1: Anforderungsliste für ein Bedienkonzept des automatisierten Fahrens, adaptiert nach [100]

Nr.	Anforderung	Beschreibung
<b>1.</b>	<b>Systemergonomische Anforderungen</b>	
1.1	Aufgabenangemessenheit	
1.1.1	Grad der Komplexität	gering; klare Aufgabenstruktur; dem Benutzer nur die für die Bedienung notwendigen Bedienelemente anbieten
1.1.2	Grad der Integration	hoher Integrationsgrad bei niedriger Komplexität; geringe Anzahl an Bedienelementen
1.1.3	Sensorische Ressourcen	Entlastung des visuellen Kanals; Verlagerung der Wahrnehmung von Information auf den haptischen und akustischen Kanal
1.1.4	Situationsbewusstsein und motorische Reaktionsfähigkeit in der Vollautomation	einsatzbereite Hände sicher stellen; Aufmerksamkeitsfokussierung des Fahrers auf <i>Region of Interest (RoI)</i>
1.2	Unterscheidbarkeit	Anordnung nach funktionalem Zusammenhang zur sicheren Benutzung
1.3	Selbsterklärungsfähigkeit	
1.3.1	Kommunikation aktueller Systemzustände	visuell oder haptisch; klare Kommunikation des Automationsgrades; schnelle Systemrückmeldung
1.4	Steuerbarkeit	keine Bevormundung des Benutzers durch das System; keine Soll-Bearbeitungszeiten
		...



Tabelle 2.1: Anforderungsliste für ein Bedienkonzept des automatisierten Fahrens, adaptiert nach [100]

Nr.	Anforderung	Beschreibung
1.5	Primäre äußere Kompatibilität	
1.5.1	Sinnfälligkeit	die Bewegungsrichtung von Stellteilen und Anzeigen muss mit der Umwelt übereinstimmen
1.6	Primäre innere Kompatibilität	
1.6.1	Betätigungsrichtung	Bewegungen und Lage des Bedienelementes müssen mit bisherigen Kenntnissen und Erfahrungen der Benutzer übereinstimmen (Stereotypen aus der Praxis); Auslegung der Betätigungsrichtung anhand der Bewegungs-Effekt-Stereotypen
1.7	Sekundäre Kompatibilität	bei der Überlagerung einer translatorischen und einer rotatorischen Bewegung dürfen diese nicht im Widerspruch zueinander stehen
1.8	Konsistenz	Anordnung, Funktion und Bewegung der Stellteile des Systems müssen innerhalb des ganzen Systems übereinstimmen; Kooperationsgrad der Modi des Spektrums soll intrastrukturell konsistent sein
1.9	Fehlerrobustheit	Fehlinterpretation, Fehlentscheidung, fehlerhafte Ausführung ausschließen; einfache und verständliche Fehlerkorrektur
1.10	Anpassbarkeit und Erlernbarkeit	sinnvolle Kombination von Adaptierbarkeit und Adaption; intuitive Bedienung: kurze Zeitspanne vom Erstkontakt bis zur Beherrschung
1.11	Bedienbarkeit des gesamten Spektrums	
1.11.1	MF	keine Einschränkung oder tiefgreifende Veränderung des Status Quo
1.11.2	TA	Erhalt aktueller TA-Serienfunktionalität
1.11.3	VA	Erhalt der Flexibilität
1.11.4	AUTON	Kommunikation des Systemzustands
<b>2.</b>	<b>Anthropometrische Anforderungen</b>	
2.1	Handlungsorgan	Gestenbetätigung; Fingerbetätigung; Handbetätigung; Fußbetätigung
		...

Tabelle 2.1: Anforderungsliste für ein Bedienkonzept des automatisierten Fahrens, adaptiert nach [100]

Nr.	Anforderung	Beschreibung
2.2	Häufigkeit und Dauer der Betätigung	Gelegentliche Betätigung (< 1 min)
2.3	Greifart	Kontaktgriff; Zufassunggriff; Umfassunggriff
2.4	Kopplungsart	form- oder reibschlüssig
2.5	Formgestaltung	anthropomorphe Form des Bedienelements; form-variabel
2.6	Erreichbarkeit	Anordnung im Greifraum
2.7	Sichtbarkeit	Anordnung von Anzeigen im Gesichtsblickgesichtsfeld, Stellteile im Umblickgesichtsfeld; Blindbetätigung des Bedienelements ermöglichen
2.8	Blindbedienung	
2.8.1	Haptische Unterscheidbarkeit zu anderen Bedienelementen	durch Form/Größe/Lage/Gestalt
2.8.2	Haptische Unterscheidbarkeit der Automationsstufen	durch prägnante Veränderung von Aufbau/Form/Position/Rückmeldung
2.9	Bedienkomfort	
2.9.1	Körperhaltung und -stellung	Bewegungszuordnung anhand anatomisch günstiger Bewegungsrichtungen
2.10	Bediensicherheit	
2.10.1	Fehlbedienung	unbeabsichtigte Betätigung mit Beinen oder Armen (Bedienelement in Tür oder Mittelkonsole) sowie durch Mitfahrer ausschließen
2.10.2	Verletzungsgefahr	scharfe Kanten vermeiden; Ausschluss von Materialien, die sich durch Sonneneinstrahlung stark erhitzen
2.10.3	Quetschgefahr	keine Quetschungen der Gliedmaßen bei der Bedienung
<b>3</b>	<b>Technisch-physikalische Anforderungen</b>	
3.1	Technische Realisierbarkeit	mittelfristige Möglichkeit zur Integration in ein Fahrzeug-Package
3.2	Adaptivität und Adaptierbarkeit des Systems	schnelles Wechseln zwischen den einzelnen Automationsstufen
3.3	Mechanischer Aufbau	notwendige Wege, Drehwinkel und Kräfte
		...

Tabelle 2.1: Anforderungsliste für ein Bedienkonzept des automatisierten Fahrens, adaptiert nach [100]

Nr.	Anforderung	Beschreibung
<b>4.</b>	<b>Ästhetische Anforderungen</b>	
4.1	Bedienerlebnis	attraktiv ( <i>Joy of Use</i> ); unverwechselbar
4.2.	Design	ansprechendes, stilprägendes Design

## 3 Konzepte

Auf Basis der ergonomischen Grundlagen und des Standes der Technik zur Mensch-Maschine-Interaktion aus verschiedenen Disziplinen beschreibt das folgende Kapitel die im Kontext dieser Arbeit entwickelten Konzeptideen zur Bedienung des automatisierten Fahrens. Kapitel 3.1 definiert ein Automationspektrum mit vier diskreten Modi. Der Fokus liegt auf einer aus Nutzersicht sinnvollen Struktur, einer ergonomisch günstigen Modusgestaltung sowie einer klaren Abgrenzbarkeit zwischen den Modi. Kapitel 3.2 beschreibt das kombinierte Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzept *Potentialtrigger* zur Fahrerzustandsbestimmung für den Bereich der Vollautomation. Kapitel 3.3 zeigt die entwickelten Konzepte zur Bedienung des automatisierten Fahrens. Abschließend werden die Konzepte bewertet und eine Auswahl für den weiteren Fokus dieser Arbeit getroffen (Kapitel 3.4).

### 3.1 Definition des Automationspektrums

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer konsistenten und durchgängigen Mensch-Maschine-Schnittstelle für ein spezifisches Automationspektrum. Aus funktionaler Sicht liegt der Fokus auf der Bedienung komfortorientierter, kontinuierlich eingreifender FAS. Der Eingriff der Systeme erfolgt auf der Bahnführungsebene der primären Fahraufgabe. Aufgrund der hierarchischen Struktur des 3-Ebenen-Modells übernehmen die betrachteten FAS auch die Aufgaben der unterlagerten Stabilisierungsebene. Abschnitt 3.1.1 beschreibt das gewählte Automationspektrum mit den für diese Arbeit gewählten Modusausprägungen. Abschnitt 3.1.2 legt die Systemstruktur mit Hinblick auf die Transitionen zwischen den einzelnen Modi fest.

Die Klasse der kontinuierlich eingreifenden Fahrerassistenzsysteme der Führungsebene wird analog der nutzerzentrierten Einteilung aus [59] anhand des Automatisierungsgrades in die Unterklassen MF, TA, VA und AUTON unterteilt (vgl. Abschnitt 2.1.2.3). Abbildung 3.1 illustriert diese vier voneinander abgegrenzten Modi. Auf Basis der Systembeschreibungen aus Kapitel 2.3 werden die relevanten FAS dem betreffenden Modus zugeordnet. Die einzelnen Modi werden in den folgenden Abschnitten detailliert.

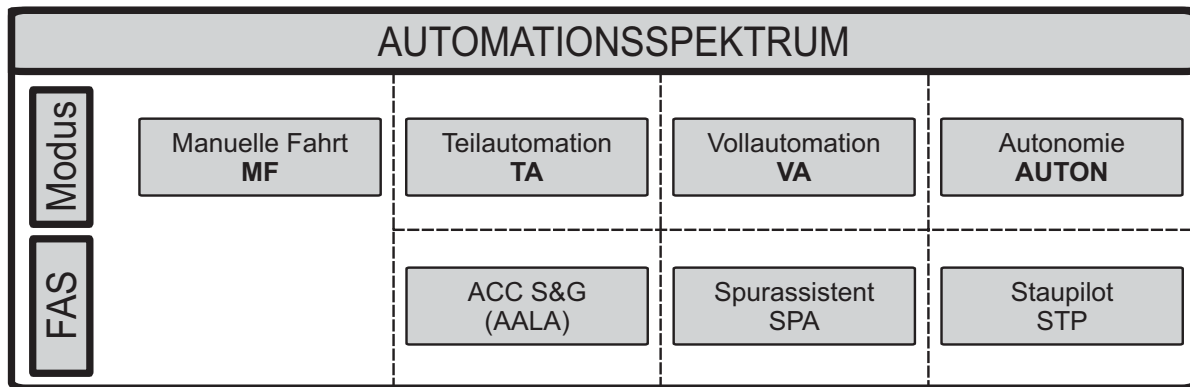


Abbildung 3.1: Festlegung eines Automationspektrums und Zuordnung von FAS

### 3.1.1 Automationsmodi

Als Grundlage aller nachfolgenden Entwicklungsschritte beschreiben die folgenden Abschnitte die vier Modi, aus denen sich das gewählte Automationspektrum zusammensetzt.

#### 3.1.1.1 Manuelle Fahrt (MF)

Im Modus MF führt der Fahrer selbstständig alle Längs- und Querführungsaufgaben *ohne* kontinuierliche Unterstützung auf der Führungsebene durch eingreifende FAS aus. Er nutzt dazu die etablierten Standardbedienelemente *Lenkrad*, *Brems-* und *Gaspedal* mit jeweils gewohnter Betätigungscharakteristik. Unterstützende Eingriffe in die Fahrdynamik erfolgen lediglich zeitdiskret durch unterlagert wirkende FAS der Stabilisierungs- und Führungsebene. Als Beispiel für einen stabilisierenden Eingriff dient die Regelung eines ESC bei einem über- oder untersteuernden Fahrzeug. Notbremssysteme greifen bei Bedarf auf der Fahrzeugführungsebene ein, um das kollisionsfreie Führen des Fahrzeugs im unmittelbar vorliegenden Streckenabschnitt zu unterstützen. Das zur Spurmitte rückführende Lenkmoment eines AALA mit der Parametrierung „Lenkzeitpunkt: spät“ wird ebenfalls den situativ eingreifenden FAS der Führungsebene zugeordnet. Diese unterlagert wirkenden Systeme sind i.d.R. auch im Modus der Teil- und Vollautomation einsetzbar, sofern die Systeme nicht ohnehin Bestandteil einer höheren funktionalen Kompetenz sind. LKAS mit Spurmittenführung ersetzen logischerweise Systeme mit korrigierendem Eingriff an den Rändern des Fahrstreifens. Das ACC S&G-System befindet sich während der MF im Zustand *ACC Off*. Der Modus erstreckt sich über den gesamten, in Abhängigkeit der Fahrzeugkonfiguration zur Verfügung stehenden Geschwindigkeitsbereich.

#### 3.1.1.2 Teilautomation (TA)

Trägersystem des Modus TA sind im Rahmen dieser Arbeit FSRA-Systeme zur Automation der Längsführung. Der Modus TA wird folglich durch ein ACC S&G für einen Geschwindigkeitsbereich von 0-250 km/h repräsentiert.

Querführungssysteme mit kontinuierlicher Spurmittenführung sind per Definition dem Modus TA zugeordnet. Aufgrund verschiedener Arbeitshypothesen werden diese jedoch bei der Festlegung der Modusstruktur der TA von weiteren Betrachtungen ausgeschlossen:

- **Bedienverhalten:** Die Art der Informationsverarbeitung bei der Querführungsaufgabe basiert für einen geübten Fahrer auf fertigkeitbasiertem Verhalten. Im 3-Ebenen-Modell nach [92] stellt dies die zeitlich effektivste Form der Informationsverarbeitung dar (vgl. Abschnitt 2.1.1.1). Durch die parallel-serielle Wirkstruktur des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises bei aktiv regelndem AALA mit frühem, kontinuierlichem Lenkeingriff werden die Eingaben von Fahrer und FAS über das Lenkrad bzw. die EPS in einem Summenpunkt überlagert. Der AALA definiert sich als Unterstützungssystem, der Fahrer muss die Hände am Lenkrad belassen. Die Regeleingriffe des FAS sind für den Fahrer daher stets spürbar. Die Arbeitshypothese besteht darin, dass diese spürbaren Eingriffe eine Veränderung in der Art der Informationsverarbeitung des Fahrers verursachen. Die vormals fertigkeitbasierte Querführungstätigkeit kann sich aufgrund der spürbaren Systemeingriffe unter Umständen als regelbasierte, beim Erstkontakt sogar als wissensbasierte Tätigkeit darstellen. Diese Verhaltensweisen heben die Querführungstätigkeit in eine *bewusste* kognitive Ebene und erfordern ein größeres Zeitkontingent zur Verarbeitung. Die Tatsache, dass sich bei längerer Nutzung des Systems eine fertigkeitbasierte Informationsverarbeitung einstellen wird, birgt wiederum die Gefahr eines signifikanten *Übungsverlusts* bzgl. manueller Querführungstätigkeiten (vgl. folgender Punkt).

Für Systeme der Längsführungsautomation trifft dieser Zusammenhang der Bedienverhaltensänderung aufgrund des parallel-seriellen Wirkungspfades nur in verringertem Maß zu. Die Rückmeldungen des Systems erfolgen kinästhetisch durch das Regelverhalten des Fahrzeugs sowie über optische Anzeigen, nicht jedoch über propriozeptive Rückmeldung der Muskelspindeln und Sehnenrezeptoren der Gliedmaßen. Die Wirkstruktur bewirkt eine stärkere Entkopplung des Fahrers aus dem Regelkreis.

- **Übungsverlust:** Es besteht ein Zielkonflikt zwischen einer langfristigen Gewöhnung an kontinuierliche Querführungsunterstützung zur Entwicklung eines fertigkeitbasierten Querführungsverhaltens und dem einhergehenden Übungsverlust mit Hinblick auf die manuelle Querführungstätigkeit des Fahrers. Wenn auch in abnehmendem Maß, wird die Spurmittenführung - etwa aufgrund eingeschränkter Vorausschau der Sensorik oder Witterungseinflüssen - auch in Zukunft zeitweise nicht verfügbar sein. Für diese seltener werdenden Situationen können dem Fahrer in der Folge unter Umständen mangelhafte innere Modelle zur manuellen Querführung zur Verfügung stehen.
- **Funktionales Differenzierungsmerkmal TA zu VA:** Eine Anforderung an das Automationspektrum ist die klare Struktur und die damit einhergehende gute Differenzierbarkeit der einzelnen Stufen innerhalb des Spektrums für den Fahrer. Systeme der TA sind für den Einsatz auf Autobahnen und gut ausgebauten Landstraßen konzipiert, die Kurvenradien auf diesen Straßentypen sind limitiert. Die Ausdehnung des verfügbaren Geschwindigkeitsbereiches im Laufe der Entwicklung heutiger ACC-Systeme lässt eine vergleichbare Entwicklung für LKAS erwarten. Im Niedriggeschwindigkeitsbereich auf Straßen mit großen Kurvenradien werden die vom Fahrer im Rahmen der kooperativen, teilautomatisierten Fahrzeugführung geforderten Lenkradbetätigungen sehr gering sein.

Systeme der VA (Stau- oder Spurassistent) werden unter vergleichbaren Rahmenbedingungen betrieben werden. Als Unterscheidungsmerkmal zwischen teil- und vollautomatisierten Systemen verbleibt für den Fahrer - neben Einschaltbedingungen wie Geschwindigkeitsgrenzen, Stauerken-

nung etc. - der Hands-On-Zwang der Teilautomation. Ein vollautomatisches FAS ist in der Lage, dem Fahrer die komplette Fahraufgabe abzunehmen. Die weiterentwickelten Systeme der TA sind in der Lage, dem Fahrer die Fahraufgabe *nahezu* komplett abzunehmen.

Eine klare funktionale Modusunterscheidung und die Ausbildung sinnvoller innerer Modelle der einzelnen Modi wird durch diesen marginalen Unterschied erschwert. Die Sicherstellung der Mode Awareness durch den Fahrer ist für diesen Fall nur eingeschränkt gegeben.

- **intra-strukturelle Konsistenz:** Der Fahrer soll durch eine konsistente Struktur der einzelnen Automationsmodi dabei unterstützt werden, sich ein passendes Bild der FAS-Trägerfunktion und der Systemgrenzen der Modi des Spektrums zu bilden (vgl. Abschnitt 2.4.2). Eine Kombination der parallel-seriellen Wirkstruktur eines LKAS und der parallel-sequentiellen Wirkstruktur eines ACC S&G innerhalb des Modus TA widerspricht dieser Anforderung. Eine parallel-sequentielle Querführungsassistenz muss in der Lage sein, ohne Wirken des Fahrers die komplette Querführungsaufgabe zu übernehmen. Dies ist mit der Funktionsdefinition eines teilautomatisierten FAS nicht vereinbar: die Kombination eines parallel-sequentiellen LKAS mit einem ebenfalls teilautomatisierten, parallel-sequentiellen ACC S&G stellt ein vollautomatisiertes System dar. Eine Angleichung der Kooperationsformen durch die Schaffung einer parallel-simultanen Längsführungsassistenz ist prinzipiell denkbar. Ein Ansatz besteht beispielsweise in der Unterstützung der Längsführungsassistenz durch ein aktives Gaspedal analog [73]. Allerdings hat dies eine grundlegende Veränderung der auf Basis der GRA historisch gewachsenen Wirkstruktur zur Folge. Des Weiteren ist ein derartiges System nicht klar der TA, sondern durch seinen unterlagert wirkenden, unterstützenden Charakter eher dem Modus MF zuzuordnen.
- **Systemverfügbarkeit:** Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, bedienen sich LKAS detektierten Fahrbahnmarkierungen, die durch eine im Innenspiegelfuss verbaute Kamera erfasst werden. Diese dienen als Basis der Generierung der Führungsgröße (Sollkurs) des Reglers. Die Detektionsgüte des Sensors hängt von zahlreichen äußeren Einflüssen ab. Starker Niederschlag oder Blendung durch tiefstehende Sonne sind Beispiele für negative Einflüsse aus der Umwelt auf die Kamera. Fehlende oder kontrastarme Fahrbahnmarkierungen, schwer zu plausibilisierende Markierungsverläufe an Autobahnausfahrten oder markante Schattenverläufe auf der Fahrbahn stellen infrastrukturell bedingte Herausforderungen für die Sensorik von LKAS dar.  
Im direkten Vergleich ermöglicht die Radar-basierte Sensorik von FSRA-Systemen (vgl. Kapitel 2.3) weitaus höhere Verfügbarkeiten der Längsführungsautomation.  
Dem unbedarften Nutzer dieser Systeme sind diese Zusammenhänge in der Regel nicht geläufig, die geringere Verfügbarkeit von LKAS im Vergleich zu FSRA-Systemen sowie die damit einhergehende intra-strukturelle Inkonsistenz sind für ihn nicht nachvollziehbar.

Bei den Ausführungen handelt es sich durchgängig um Arbeitshypothesen auf Basis einer ergonomischen Betrachtung des Modus TA. Eine empirische Untersuchung der aufgeführten Zusammenhänge wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Ein Gegenargument zur beschriebenen Ausgestaltung der TA ist die bereits erfolgte Markteinführung und Etablierung von teilautomatischen, seriell-simultanen LKAS wie dem AALA.

### 3.1.1.3 Vollautomation (VA)

Ein vollautomatisches System ist in der Lage, dem Fahrer die komplette Fahrzeugführungsaufgabe abzunehmen. Als Überwacher des Systems und seiner Grenzen muss der Fahrer jedoch im Modus VA als Rückfallebene zur Verfügung stehen. Er muss unplausibles Systemverhalten erkennen und situationsabhängig adäquat eingreifen können. Ein exemplarisches System der VA ist der Stauassistent (vgl. Kapitel 2.3). Dieser ist in der Lage, dem Fahrer in Stausituationen auf Autobahnen für die quasi-stationäre Fahrt innerhalb des eigenen Fahrstreifens sämtliche Aufgaben der Längs- und Querverführung abzunehmen. Eine naheliegende Ausprägung eines vollautomatischen Systems besteht in einer Kombination der teilautomatischen Systeme FSRA und LKAS, bei einer gleichzeitigen Erweiterung der Kompetenz des LKAS für den Hands-Off-Betrieb und den Niedriggeschwindigkeitsbereich. Die Aktivierung einer kombinierten Übernahme der Längs- und Querverführungsaufgaben durch das System kann folglich durch ein separates Zuschalten oder einer hierarchischen Aufschaltung der beiden Systeme erfolgen (vgl. [99]).

Auf Basis einer ergonomischen Analyse ergibt sich jedoch eine abweichende Idealstruktur für ein System der VA. Dem Fahrer stellen sich die Dynamiken des Fahrzeugs in Längs- und Querrichtung nicht als singuläre Elemente, sondern als verkoppeltes Gesamtsystem dar (siehe Abschnitt 2.1.1.3). Ein FAS zur Automation dieses Systems ist für den Fahrer folglich ebenfalls als geschlossene Einheit darzustellen. Diese Einheit verkörpert der Modus VA des Automationspektrums. Innerhalb dieses Modus ist es von Bedeutung, die intra-strukturelle Wirkstruktur einheitlich zu gestalten, d.h. das Interaktionsschema des agierenden FAS mit dem Menschen soll konsistent sein (vgl. Abschnitt 2.4.1.2). Als zusätzliches Differenzierungsmerkmal zum Modus TA, wird eine von der TA abweichende Kooperationsform gewählt. Für diese Arbeit wird für das FAS der VA ein seriell-sequentieller Wirkungspfad vorgesehen. Der Fahrer übergibt bei der Aktivierung die komplette Fahrzeugführungsaufgabe an *ein* Assistenzsystem mit spezifischen Funktionsgrenzen. Ist das System aktiv, kommuniziert der Fahrer ausschließlich zu ereignisdiskreten Zeitpunkten mit dem Assistenten, beispielsweise zur Beauftragung von Manövern oder zur Einstellung von Parametern.

Für die weiteren Betrachtungen im Rahmen dieser Arbeit wird ein *Spurassistent (SPA)* als Trägersystem des Modus VA vorgestellt. Als Evolutionsstufe eines vollautomatischen Stauassistenten (STA) bietet dieser SPA dem Fahrer vergleichbare Funktionen. Die Differenzierung erfolgt unter anderem anhand der funktionalen Systemgrenzen. Der SPA ist nicht nur in Stausituationen auf Autobahnen im Niedriggeschwindigkeitsbereich einsetzbar. In der mittelfristig realisierbaren, finalen Ausprägung kann das System in einem Geschwindigkeitsbereich von 0-130 km/h verfügbar sein. Innerhalb dieses Bereichs führt es den Fahrer vollautomatisiert innerhalb seines Fahrstreifens auf autobahnähnlichen Landstraßen oder Autobahnen. Während dieses quasi-stationären Betriebs ist es dem Fahrer möglich, das Assistenzsystem über eine geeignete Schnittstelle (siehe Kapitel 3.3) zu parametrieren. Beispielsweise soll der Fahrer den Lateralversatz innerhalb des eigenen Fahrstreifens verändern können. Eine weitere Interaktionsmöglichkeit für den Fahrer ist die Beauftragung des Assistenzsystems mit verschiedenen Manövern. Vorstellbar sind z.B. das Antriggern von Überholvorgängen oder Spurwechseln. Diese Manöver bewirken einen Zustandswechsel des Fahrzeugs, etwa vom quasi-stationären Zustand „Folgefahrt mit 80 km/h hinter einem LKW auf der rechten Fahrspur einer zweispurigen Autobahn“ in den quasi-stationären Zustand „Freifahrt mit 130 km/h auf der linken Spur einer zweispurigen Autobahn“.

Grundvoraussetzung für den Betrieb dieses vollautomatischen SPA ist das Vorhandensein eines aufmerksamen und eingriffsbereiten Fahrers. Treten Situationen auf, die vom System nicht korrekt oder nur unvollständig interpretiert und antizipiert werden können, ist stets der Fahrer für die Herstellung eines fahrdynamisch sicheren Zustands verantwortlich. Die Verantwortung für das Fahrzeug liegt also analog den Modi MF und TA beim Fahrer.



Es liegt in der Eigenverantwortung des Fahrers, in allen denkbaren Situationen psychisch und physisch in der Lage zu sein, die Fahrzeugführung adäquat und ohne qualitative Einschränkungen übernehmen zu können. Die Aufgabe der HMI-Entwicklung besteht darin, den Fahrer dabei durch die Gestaltung der Schnittstelle im Mensch-Maschine-System bestmöglich zu unterstützen. Zum einen soll der Fahrer immer über den aktuellen Zustand der Regelstrecke Fahrzeug informiert sein. Dies kann über ein haptisches oder optisches Interface erfolgen. Vollautomatisierte Systemstrukturen drängen den Fahrer außerdem in eine Überwacherrolle, für die er grundsätzlich nur eingeschränkt geeignet ist. Daher soll durch ein geeignetes Überwachungskonzept während des Betriebs zusätzlich der Fahrerzustand beobachtet werden. Diese Fahrerbeobachtung dient gegebenenfalls als Eingangsgröße einer systeminitiierten top-down-Adaption des Systemverhaltens in Abhängigkeit des Fahrerverhaltens (siehe Kapitel 3.2): Wird von der Fahrerbeobachtung ein unaufmerksamer Fahrer festgestellt, kann das Modul eine Deaktivierung des Modus VA veranlassen.

#### 3.1.1.4 Autonomie (AUTON)

Das herausragende Merkmal des Modus AUTON ist nach [57] die automatisierte, autonome Rückfallebene. Mittels redundanter Sensorik und unabhängiger Überwachungsmodule werden die Funktion und die Systemgrenzen des FAS überwacht. Wird unplausibles Systemverhalten festgestellt und/oder nähert sich das FAS seinen Systemgrenzen oder überschreitet diese, muss die Rückfallebene dies erkennen und selbstständig einen sicheren Zustand herstellen können (vgl. [57]). Die Verfügbarkeit eines sicheren Zustands spielt bei der Modusdefinition eine entscheidende Rolle. Während des Betriebs des Modus AUTON muss der sichere Zustand erreicht werden können. Als mögliches Einstiegssystem komfortorientierter, autonomer FAS der Führungsebene wird im Rahmen dieser Arbeit ein *Staupilot (STP)* vorgestellt. Der Fahrer kann in Stausituationen auf der Autobahn im Niedriggeschwindigkeitsbereich (z.B. 0-60 km/h) die komplette Fahrzeugführungsaufgabe an den STP übergeben. Das System übernimmt - in Anlehnung an die Funktionsausprägung eines STA - die Längs- und Querführungsaufgaben innerhalb des eigenen Fahrstreifens. Als zentraler Unterschied zum STA muss der Fahrer eines STP jedoch nicht mehr durchgängig als Rückfallebene und Überwacher der FAS-Funktion zur Verfügung stehen und nicht mehr mit dem System interagieren. Sollten die Einschaltbedingungen für den STP aufgrund dynamischer Umgebungsparameter nicht mehr erfüllt sein, wird der Fahrer durch eine *Fahrerübernahmeaufforderung (FÜA)* zur Übernahme des Fahrzeugs aufgefordert. Dies kann mit ausreichend zeitlichem Vorlauf aufgrund einer erwartungsgemäßen Annäherung an die Systemgrenzen erfolgen. Eine Stauauflösung oder die Annäherung an das nahende Ende einer Autobahn sind Beispiele für diesen Fall. Die FÜA mit höherer zeitlicher Kritikalität kann bei unplausiblen Systemverhalten erfolgen. Als Beispiel dient eine unzulässig große Lenkwinkelanforderung durch den STP an die EPS.

Erfolgt nach einer FÜA durch den STP keine Fahrerübernahme, wird vom System selbstständig der sichere Zustand angesteuert. Eine unverzichtbare Anforderung an ein autonomes FAS wie dem STP besteht folglich darin, dem Nutzer ausreichend große Zeiträume zur Fahrerübernahme zu garantieren. Erfordert eine Situation eine sofortige Reaktion, muss ein STP selbst in der Lage sein ohne Zeitverzug und adäquat zu reagieren.

Stausituationen garantieren aufgrund des in der Regel niedrigen Niveaus der auftretenden Geschwindigkeitsverläufe eine durchgängige Verfügbarkeit des sicheren Zustands *Stillstand*. Diese Tatsache ergibt sich aus der Beobachtung, dass der Stillstand von Vorderfahrzeugen in Stausituationen häufig auftritt

und für den nachfolgenden Verkehr keine außergewöhnliche Situation darstellt. Zusätzlich sind die auftretenden Relativgeschwindigkeiten in Stausituationen gering.

Wird vom System die Notwendigkeit der Übernahme des Fahrzeugs durch den Fahrer oder die Rückfallebene erkannt und kommuniziert, ist eine Übernahme durch den Fahrer einer systemseitigen Überführung in den sicheren Stillstand zu bevorzugen.

Um den unter Umständen stark abgelenkten Fahrer im Bedarfsfall innerhalb kurzer Zeit in den Loop zurückzuholen, kann eine zweckorientierte Aufmerksamkeitssteuerung durch das Assistenzsystem vorgenommen werden. Ein STP bietet daher im Idealfall die Möglichkeit zur Visualisierung und Beeinflussung vielfältiger Multimediainhalte. Hierfür wird dem Nutzer ein zentrales, integratives Anzeigelement mit zugehöriger Bedieneinheit zur Verfügung gestellt. Der Fahrer kann aus vielfältigen Enter- und Infotainmentanwendungen aus dem Bereich der sekundären und tertiären Fahraufgabe auswählen. Eine Interaktion des Fahrers mit diesen Inhalten erleichtert eine Interpretation des Fahrerzustands, die Anzeigehalte des Multimediasystems können im Bedarfsfall durch den STP an die aktuelle Aufmerksamkeitsverteilung des Fahrers angepasst werden. Betrachtet der Fahrer etwa zum Zeitpunkt einer FÜA aufgrund einer Stauauflösung ein Video, so kann die Wiedergabe des Videos gestoppt und die FÜA eingeblendet werden.

Der Fokus eines Bedien- und Anzeigekonzepts liegt für den autonomen Fall auf der Kommunikation des Systemzustands und der FÜA bei auftretenden Übernahme-situationen. Eine Bedienung beschränkt sich auf das Aktivieren und das Deaktivieren des Systems. Weitere Möglichkeiten zur Einstellung von Parametern oder zum Antriggern von Manövern sind nicht vorgesehen.

### 3.1.2 Modustransitionen

Das für diese Arbeit definierte Automationspektrum bedient sich analog Abschnitt 2.1.2.3 für die bottom-up-Aktivierung der Automationsmodi einer *adaptierbaren* Aktivierung. Der Automationsgrad wird benutzerinitiiert und entlang einer *hierarchischen* oder einer *gleichberechtigten* Aktivierungskette angepasst. Top-down erfolgt der Wechsel der Automationsmodi *adaptiv* oder *adaptierbar* mit hierarchisch übergeordneter Rückfallebene.

**Kommunikation der Systemverfügbarkeit** Der Übergang von der MF zur TA erfolgt analog der heutigen Serienaulegung ohne systemseitige Kommunikation der Systemverfügbarkeit. Während der MF wird dem Fahrer also die Verfügbarkeit der TA nicht explizit mitgeteilt. In der für die Arbeit festgelegten Systemstruktur ist der Stand-by-Zustand der TA trotz fehlender aktiver Regelung dem Modus TA zugeordnet. Wird etwa eine gespeicherte Setzgeschwindigkeit über einen LED-Tachokranz angezeigt, so erfolgt diese implizite Verfügbarkeitsanzeige innerhalb des Modus TA.

Im Gegensatz hierzu werden dem Fahrer in der für diese Arbeit betrachteten Systemstruktur die Verfügbarkeiten der Modi VA und AUTON im jeweils vorhergehenden Modus explizit kommuniziert. Sind beide Modi verfügbar, wird jeweils der höchste verfügbare Automationsgrad angezeigt.

Der Bruch mit der Kontinuität zur aktuellen Serienaulegung bei niedrigen Automationsstufen stellt einen weiteren Schritt zur deutlichen Abgrenzung dieser Modi mit ihren stark erweiterten Systemkompetenzen dar.

**bottom-up-Aktivierung** Wird das Fahrzeug beispielsweise im Modus VA bewegt, übernimmt im Rahmen der Systemgrenzen (Straßentyp, verfügbarer Geschwindigkeitsbereich etc.) ein Spurassistent die komplette Fahrzeugführung. Werden aufgrund der dynamischen Umgebungsparameter die Einschaltbedingungen des Staupiloten gültig, wird dem Fahrer in der Folge die Verfügbarkeit des STP kommuniziert. Dieser kann den STP durch eine bewusste Handlung aktivieren. Die bottom-up-Aktivierung von der TA in die VA erfolgt analog über eine bewusste Bedienhandlung des Fahrers. Eine systeminitiierte Aufschaltung höherer Automationsmodi ist nicht möglich.

**top-down-Deaktivierung** Die top-down-Deaktivierung erfolgt im definierten Automationspektrum sowohl *adaptiv* als auch *adaptierbar*. Sowohl der nutzer- als auch der systeminitiierte Moduswechsel erfolgen über den Rückfallmodus TA im Zustand *Stand-by*. Übernimmt der Nutzer z.B. im Modus VA die Fahrzeugführung vom seriell-sequentiellem SPA, wechselt das System in den Modus TA und schaltet in den Zustand *Stand-by*. Dieser Wechsel erfolgt unabhängig von der Quelle der Deaktivierung, sowohl zur Abschaltung der VA führende Fahrereingaben über die Standardbedienelemente oder spezielle FAS-Bedienelemente, als auch die systemseitige Deaktivierung der VA aufgrund nicht mehr geltender Einschaltbedingungen bewirken diesen Systemübergang. Die Systemauslegung für den Modus AUTON erfolgt analog: system- und nutzerinitiierte top-down-Moduswechsel schalten das System ebenfalls in den Stand-by-Zustand des Modus TA. Von diesem Zustand ausgehend, steht dem Fahrer die systemseitig definierte bottom-up-Aktivierungsstrategie offen. Ein nutzerinitiiertes Wechsel in einen anderen Automationsmodus, also beispielsweise von AUTON nach VA ist entsprechend nicht möglich. Es erfolgt keine Kommunikation der top-down verfügbaren Automationsmodi.

**Hierarchische oder gleichberechtigte Aktivierung** Die benutzerinitiierte Aufschaltung der Automationsmodi des definierten Spektrums kann bzgl. der zeitlichen Wirkreihenfolgen durch eine *sequentielle* oder eine *simultane* Bedienung erfolgen (vgl. Abschnitt 2.1.1.4). Bei einer simultanen Auslegung bietet sich dem Fahrer ausgehend vom Modus MF aufgrund der gewählten Systemauslegung und des Bedienkonzepts die Möglichkeit zur gleichberechtigten (bzw. unabhängigen) Aktivierung der einzelnen ansteuerbaren Modi TA, VA und AUTON. Eine sequentielle Bedienung hingegen ermöglicht in einer hierarchischen Systemstruktur die aufeinanderfolgende Aufschaltung von abhängigen Einzelsystemen. Ein Wechsel in die VA kann folglich nur bei aktivem ACC erfolgen, ein Wechsel von der VA zu AUTON erfolgt ebenfalls hierarchisch auf Basis eines aktiven SPA. Um die Bedienkonzepte hinsichtlich ihrer Freiheitsgrade nicht einzuschränken, werden für die Konzeptentwicklung sowohl hierarchische als auch unabhängige Systemausprägungen des Automationspektrums betrachtet.

### 3.1.3 Zusammenfassung Automationspektrum

Das festgelegte Automationspektrum beschreibt die Modi MF, TA, VA und AUTON. Eine klare und verständliche interne Beschaffenheit der einzelnen Modi, sowie eine deutliche Abgrenzung der Modi zueinander ist die Triebfeder dieses Ansatzes. Die vier diskreten Modi umfassen ein mögliches Spektrum an verschiedenen komfortorientierten, kontinuierlich eingreifenden Assistenzfunktionen der Fahrzeugführungsebene. Im Modus MF wirken keine FAS dieser Kategorie, es wirken situativ eingreifende FAS. Der Modus TA des Spektrums besteht aus dem FSRA zur teilautomatisierten Fahrzeuglängsführung. Im

idealisiertem Spektrum repräsentiert ein Spurassistent zur vollständigen Übernahme der Fahrzeugführung im quasi-stationären Zustand innerhalb der Systemgrenzen den Modus VA. Der Spurassistent bietet Möglichkeiten zur Parametrierung dieses Zustands und zum Wechsel zwischen zwei Zuständen. Der Fahrer muss jederzeit die Fahrzeugführung adäquat übernehmen können. Die Autonomie wird durch den Staupiloten repräsentiert. Dieser bietet dem Fahrer durch eine autonome Rückfallebene die Möglichkeit, nicht mehr durchgängig als Systemüberwacher und Rückfallebene zur Verfügung stehen zu müssen. Die Transitionen innerhalb dieser hierarchisch oder gleichberechtigt gestalteten Systemstruktur erfolgen in der bottom-up-Aktivierung adaptierbar. Der top-down-Moduswechsel erfolgt adaptiv und adaptierbar.

## 3.2 Konzeptentwicklung Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzept “Potentialtrigger“

Voraussetzung für den Betrieb des Modus VA des Automationsspektrums aus Kapitel 3.1 ist die Verfügbarkeit der Rückfallebene *Fahrer*. Beim Erreichen oder Überschreiten der Systemgrenzen des Modus, respektive der Grenzen des *Spurassistenten* aus Abschnitt 3.1.1.3, ist der Fahrer dafür verantwortlich, die Fahrzeugführung zu übernehmen und einen sicheren Systemzustand herzustellen. Das folgende Kapitel beschreibt die Entwicklung eines kombinierten Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzepts für den Betrieb vollautomatischer FAS. Abschnitt 3.2.1 beschreibt die spezifischen Anforderungen, die sich durch den Betrieb von FAS der VA ergeben. Der *motorischen Reaktionsfähigkeit* und dem *Situationsbewusstsein* als maßgeblichen Parametern zur Bestimmung des Fahrerzustands werden als Grundlage einer automatisierten Evaluierung Beschreibungsgrößen zugeordnet. Abschnitt 3.2.2 leitet auf Basis verfügbarer Möglichkeiten der beobachtungs- und interaktionsbasierten Messung der relevanten Beschreibungsgrößen den kombinierten Ansatz *Potentialtrigger* ab. Dieser beruht auf der Idee einer reaktiven Interaktion des Fahrers mit dem Assistenzsystem. Die Frequenz der vom System geforderten Interaktionen hängt von Informationen der direkten und indirekten Fahrerüberwachung sowie von dynamischen, situationsabhängigen Umgebungsparametern ab. Abschnitt 3.2.4 beschreibt die informationstechnische Realisierung sowie die Integration des Konzepts in das Mensch-Maschine-System. Die Inhalte des *Potentialtriggers* werden in verschiedenen Veröffentlichungen vorgestellt und mit variierendem Fokus diskutiert (vgl. [60], [59], [57], [124]). [59] beschreibt in einer ersten Veröffentlichung des Konzepts das theoretische Grundgerüst. [57] erläutert das Konzept als Bestandteil eines umfassenden Sicherheitskonzepts für hochautomatisierte FAS. [124] beschreibt die Umsetzung und Erprobung des Konzepts in einem Fahrversuch (siehe Kapitel 5.1).

### 3.2.1 Fahrerzustand im Modus VA

Die Rolle des Systembestandteils *Fahrer* im allgemeinen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis verändert sich mit steigendem Automationsgrad der Modi des Automationsspektrums. Als ausführendes Element führt er im Modus MF weitgehend alle Regel- und Steuerungstätigkeiten zur Bahnführung aus. Zeitlich diskrete Eingriffe, etwa eines LKAS mit Eingriffen an den Rändern des Fahrstreifens, stellen eine Ausnahme dar. Im Modus TA übernimmt ein FSRA in einer parallel-sequentiellen Ausprägung des Regelkreises die komplette Längsführung, die Querverführung verbleibt beim aktiv eingebundenen Fahrer. Im Modus VA hingegen übergibt der Fahrer in einem seriell-sequentiellen Wirkgefüge die komplette Fahrzeugführung

an den Spurassistenten. Der Fahrer verbleibt in der Folge als Überwachungsinstanz und Rückfallebene im Regelkreis.

### 3.2.1.1 Anforderungen an das Mensch-Maschine-System

Die in Tabelle 2.1 (vgl. Anforderung Nr. 1.1.4) formulierte Anforderung eines Fahrers *im Loop* im Modus VA repräsentiert eine Herausforderung für die HMI-Entwicklung für Fahrerassistenzsysteme. Ziel der Entwickler ist die bestmögliche Auflösung des Zielkonflikts zwischen einer komfortorientierten, vollautomatisierten Systemauslegung auf Basis einer interaktionsarmen Einbindung des Fahrers und der Forderung nach einem aufmerksamen, eingriffsbereiten Fahrer.

**Fahrer *im Loop*** An die Stelle der Fahrzeugführungsaufgabe tritt für den Fahrer während der VA die Herausforderung, das FAS und seine Systemgrenzen zu überwachen, unplausibles Systemverhalten oder ein Annähern an die Systemgrenzen zu erkennen, korrekt zu interpretieren, bei Bedarf die Fahrzeugführung zu übernehmen und das Fahrzeug in einen sicheren Zustand zu überführen. Erkennt und kommuniziert das FAS die Notwendigkeit der Übernahme des Fahrzeugs durch den Fahrer, muss der Fahrer auf diese systeminitiierte Fahrerübernahmeaufforderung reagieren. Erkennt der Fahrer eine unzulässige Abweichung zwischen Ist- und Soll-Zustand des Regelkreises, ist ein sofortiger physischer Eingriff des Fahrers notwendig. Ein Indikator hierfür ist z.B. eine Abweichung des Zustands des Fahrzeugs mit dem systemseitig kommunizierten Zustand des FAS. Als Beispiel dient ein Entfall der automatisierten Spurmittenführung eines SPA ohne subsequenter Deaktivierung des SPA. Ursachen können Hard- oder Softwarefehler des Assistenzsystems oder strukturelle Schwachstellen der Systemarchitektur sein. Ein weiterer exemplarischer Fall ergibt sich durch unerwartete, hochdynamische Veränderungen des Verkehrsgeschehens: beispielsweise kann ein Ladungsverlust eines Vorderfahrzeugs bei mittleren Geschwindigkeiten und kleinen Zeitlücken unter Umständen vom SPA nicht antizipiert werden. Der Fahrer muss diese und viele weitere Grenzsituationen erkennen und gegebenenfalls reagieren. Der Fahrer dient innerhalb dieses Konzepts eines vollautomatischen FAS als Rückfallebene und Plausibilitätsmonitor (vgl. [58]). In dieser Eigenschaft muss er sich stets in einem *motorisch reaktionsfähigen* und *situationsbewussten* Zustand befinden.

Das *Situationsbewusstsein* im Kontext der Automation der Fahrzeugführungsaufgabe orientiert sich an der Beschreibung durch [38]: Ein *situationsbewusster* Fahrer ist in der Lage, alle relevanten Elemente der Umgebung wahrzunehmen und deren Bedeutung zu verstehen. Den zukünftigen Zustand dieser Objekte kann er antizipieren.

Auf Basis der Unterteilung des Subsystems *Fahrer* in die Bereiche der Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung (vgl. Abschnitt 2.1.1.2) muss für den Fahrer als Basis einer umfassenden Situationswahrnehmung folglich der ungehinderte Zugang zu allen relevanten Umgebungsinformationen gewährleistet sein. Der Fahrzeugführer nutzt zur Informationsaufnahme primär den haptischen, den akustischen und den optischen Informationsaufnahmekanal (vgl. Abschnitt 2.1.1.2). Als Grundlage der Ausbildung eines ausreichenden Situationsbewusstseins sollen die relevanten Systemausgaben des FAS unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften dieser Informationsaufnahmekanäle erfolgen. Dies erfordert die Nutzung adäquater physikalischer Reize und die Berücksichtigung der optimalen Reizstärke. Zusätzlich soll die Systemauslegung eine ungehinderte Aufnahme von Umgebungsinformationen unterstützen, respektive Einschränkungen der individuellen Umfeldwahrnehmung des Fahrers ausschließen.

Eine systembasierte Anreicherung der vorliegenden Informationsdichte über gering belastete Informationsaufnahme Kanäle bietet die Möglichkeit zur Unterstützung des Fahrers. Die Überladung einzelner Aufnahme Kanäle (z.B. des ohnehin stark belasteten optischen Kanals) ist zu vermeiden.

Im Rahmen der Informationsverarbeitung muss ein nach [38] als *situationsbewusst* klassifizierter Fahrer außerdem in der Lage sein, die detektierten Informationen zu einer validen Repräsentation der Umwelt zu integrieren und geeignete Handlungsmuster abzuleiten. Dieser Vorgang ist durch das Reafferenzprinzip aus [55] (nach [11]) beschrieben. Zeitlich effektive Vorgänge basieren auf einer fertigkeit- oder regelbasierten Verarbeitung von Informationen nach [92].

Die Fähigkeit zur uneingeschränkten Informationsumsetzung der generierten Handlungsmuster ist durch die *motorische Reaktionsfähigkeit* beschrieben. Dies beschreibt einen Zustand, in dem der Fahrer - jederzeit und uneingeschränkt - physisch in der Lage ist, die Fahrzeugführung zu übernehmen. Systemseitig muss also stets eine Zugriffsmöglichkeit für die zur Übernahme der Fahrzeugführung notwendigen Bedienelemente gegeben sein. Beim Systembestandteil *Fahrer* muss die Einsatzbereitschaft des zur Bedienung nötigen Hand-Arm- und Fuß-Bein-Systems gewährleistet sein.

Situationsbewusstsein und motorische Reaktionsfähigkeit sind komplementäre Voraussetzungen für einen als *im Loop* klassifizierbaren Fahrer. Dieser zeichnet sich entsprechend durch die Eigenschaft aus, das Fahrzeug im Falle einer Übernahme sicher und situationsadäquat übernehmen zu können. Im Kontext der Bedienung vollautomatisierter Fahrerassistenzsysteme ist ein Fahrer also *im Loop*, wenn er den Zustand seines Mensch-Maschine-Systems (HMI und Regelverhalten des FAS) sowie die ihn unmittelbar umgebende, dynamische Verkehrssituation überwacht, antizipiert und folglich jederzeit in der Lage ist, die Fahrzeugführung durch Betätigung des Lenkrads und der Pedale zu übernehmen.

**Monitoringaufgaben** Im Allgemeinen stellt die Überwachung automatisierter Systeme eine kognitiv belastende Aufgabe für den Menschen dar. Bereits nach kurzer Zeit wird ein deutlicher Abfall der Qualität der Aufgabenerfüllung beobachtet. Dies äußert sich durch die Zunahme der Anzahl falscher Systemeingaben und die abfallende Wahrscheinlichkeit der Detektion von Inkonsistenzen oder Systemfehlern (vgl. [77] nach [8], [59]). Diese „Ironies of Automation“ ([8], S.1) führen zu der Schlussfolgerung, dass Menschen nur eingeschränkt für reine Überwachungsaufgaben in automatisierten Prozessen geeignet sind. Die Aussage betrifft im konkreten Anwendungsfall in starkem Maß den Betrieb von FAS der VA. Durch die Übernahme der kompletten Fahrzeugführung durch das FAS verbleibt der Fahrer in einer reinen Überwachungsaufgabe. Neben dem Monitoring des Mensch-Maschine-Systems ist die Folge der zusätzlich notwendigen Umfeldüberwachung eine Zunahme der Komplexität der beim Fahrer verbleibenden Aufgabe. Diese Komplexitätszunahme kann die negativen Aspekte der Monitoringtätigkeiten verstärken. Als Prämisse der funktionalen Auslegung der Mensch-Maschine-Interaktion im Wirkgefüge der VA ist deshalb eine Systemauslegung als reine Monitoringaufgabe (vgl. Abschnitt 2.1.1.4) zu vermeiden. Um die Güte der Systemüberwachung und der Systemeingaben des Fahrers zu gewährleisten, ist der Fahrzeugführer vom Systementwickler nach Möglichkeit als *aktives Element* in den Regelkreis zu integrieren.

**Nebentätigkeiten** FAS wie ein STA oder ein SPA zielen per Definition auf eine Unterstützung des Fahrers in beanspruchenden und/oder monotonen Situationen. Prämisse ist also ein Zugewinn an Komfort für den Fahrer. Neben der Übernahme von Aufgaben in monotonen Verkehrssituationen kann dieser Gewinn auch darin bestehen, während des Modus VA zusätzliche Infotainmentfunktionen anzubieten. Durch den Wegfall der Notwendigkeit der Ausführung der primären Fahrzeugführungsaufgabe beim Be-

trieb eines FAS der VA ist diese Verlagerung von kognitiven und motorischen Kapazitäten des Fahrers auf sekundäre und tertiäre Tätigkeiten ohnehin zu erwarten. Beispielsweise ist es vorstellbar, während der Fahrt mit einem STA über das fahrzeugeigene Infotainmentsystem Videotelefonate zu ermöglichen oder Inhalte eines mobilen Büros (Emails, Kalenderfunktionen etc.) verfügbar zu machen. Voraussetzung hierbei ist natürlich, dass die Nebentätigkeiten den Fahrer nicht aus dem Loop nehmen und er weiterhin als Rückfallebene zur Verfügung steht. Trotz der erwarteten, in ihrem Ausmaß akzeptabel zu gestaltenden Abnahme des Situationsbewusstseins ist bei einer Interaktion des Fahrers mit fahrzeugeigenen Inhalten der Vorteil gegeben, Rückschlüsse über die aktuelle Aufmerksamkeitsverteilung des Fahrers ziehen und diese gegebenenfalls steuern zu können. Außerdem ist bei geeigneter Gestaltung der Bedienelemente die motorische Reaktionsfähigkeit nicht eingeschränkt.

Einen unkontrollierbaren Einfluss stellt diesbezüglich die Verbreitung mobiler Endgeräte wie Smartphones oder Tablets mit Internetzugang dar. Bei deren Nutzung sind weder die Immersionstiefe in die Inhalte, noch die Verfügbarkeit der Hände für den Fall einer Übernahmeaufforderung abgesichert.

Ein Verstärkungsfaktor für den Effekt abnehmender Erfüllungsgüte der Überwachungsaufgabe ist demnach durch die ungehinderte Verfügbarkeit von Nebenbeschäftigungen im Fahrzeug gegeben. Das Mensch-Maschine-System soll daher so ausgelegt werden, dass die Interaktion mit sekundären und tertiären Inhalten in einem akzeptablen Maß und über die fahrzeugeigenen Kanäle möglich ist. Der Fahrer muss trotz der Beschäftigung mit Nebentätigkeiten im Loop verbleiben.

Aus den aufgeführten Betrachtungen ergeben sich als Konkretisierung von Tabelle 2.1, Nr. 1.1.4 folgende Anforderungen an die Gestaltung des Mensch-Maschine-Systems unter den spezifischen Rahmenbedingungen des Modus VA:

- Gewährleistung der *motorischen Reaktionsfähigkeit*
  - Verfügbarkeit der Bedienelemente zur Fahrzeugführung
  - Verfügbarkeit des Hand-Arm- und des Fuß-Bein-Systems
- Gewährleistung des *Situationsbewusstseins*
  - Keine Einschränkung der Umfeldwahrnehmung
  - Beachtung der physiologischen Besonderheiten des Fahrers
  - Sicherung einer ausreichenden Kapazität zur Informationsverarbeitung
  - Informationsverarbeitung nach Möglichkeit fertigungs- oder regelbasiert
- Einbindung des Fahrers als aktives Element des Regelkreises
- Nebentätigkeiten
  - Vorhaltung zur Interaktion mit spezifischen Nebenaufgaben in fahrzeugeigenen Anzeige- und Bedieneinheiten
  - Möglichkeit der systemseitigen Aufmerksamkeitssteuerung
- Möglichkeit der mittelfristigen technischen Realisierbarkeit

### 3.2.1.2 Überwachungsparameter

Anhand dieser Anforderungen lassen sich konkrete Überwachungsparameter für das Situationsbewusstsein und die motorische Reaktionsfähigkeit ableiten. Ein System zur Fahrerzustandsbestimmung ist in der Lage, diese Kontrollparameter zu detektieren und zu interpretieren. Das Ergebnis dieser Interpretation dient als eine Eingangsgröße zur Bestimmung des Fahrerzustandes. (vgl. [59])

**Blick in freie *Region of Interest*** Eine zentrale Voraussetzung für ausreichendes Situationsbewusstsein ist die Möglichkeit zur uneingeschränkten Wahrnehmung der Umgebung und ihrer relevanten Parameter. Dies bedingt zum einen eine hauptsächliche Ausrichtung des Blickgesichtsfeldes (vgl. Kapitel 2.2) auf die umgebende Verkehrssituation. Ist das Blickgesichtsfeld in diese *Region of Interest (RoI)* gerichtet, sind alle relevanten Umgebungsinformationen foveal oder peripher wahrnehmbar. Zusätzlich darf der Blick in die RoI nicht verdeckt sein. Konkret bedeutet dies, dass der Sehraum nicht durch Objekte im Freiraum zwischen Windschutzscheibe und den Augen des Fahrers eingeschränkt werden darf. Der kombinierte Kontrollparameter *Blick in freie RoI* erfasst damit Einschränkungen des freien Sehraums und der Aufmerksamkeitszuwendung in die RoI.

Eine detektierbare Beeinträchtigung kann beispielsweise durch das Lesen einer Zeitung oder eines Buches auftreten. Ebenso sind durch die einhergehende Blickabwendung aus der RoI Nebentätigkeiten wie die Interaktion mit mobilen Endgeräten wie Smartphones oder Tablets zu antizipieren.

**Starrer Blick, Müdigkeit und Schlaf** Nach [32] beschreibt das Phänomen des *Starren Blicks* den unfokussierten Blick des Fahrers in eine RoI. Die wahrnehmungstypische, selektive Verknüpfung der unscharfen, auf die Netzhaut projizierten Bilder mit Erlebtem und Bekanntem (vgl. Abschnitt 2.1.1.2) findet nicht statt. Im Grunde werden keine Informationen aus der visuellen Wahrnehmung an die Informationsverarbeitung weitergeleitet. Alle Anforderungen an den Kontrollparameter *Blick in freie RoI* sind dabei erfüllt, der Fahrer ist als visuell aufmerksam klassifiziert. Relevante Umgebungsinformationen werden dennoch nicht weiterverarbeitet. Diese Situation kann außerdem bei zu starker *Müdigkeit* oder *Schlaf* auftreten. Für eine Evaluierung des Situationsbewusstseins müssen diese Fahrerzustände überwacht werden.

**Einsatzbereite Extremitäten und Verfügbarkeit der Bedienelemente** Zur Einschätzung der motorischen Reaktionsfähigkeit sind die Einsatzbereitschaft der Extremitäten sowie die Verfügbarkeit der entsprechenden Bedienelemente von Bedeutung. Folglich werden Kontrollparameter für die uneingeschränkte Verfügbarkeit des Hand-Arm-Systems zur Übernahme der Querverführung mittels des Lenkrads, sowie des Fuß-Bein-Systems zur Übernahme der Längsverführung mittels der Pedale bestimmt. *Einsatzbereite Hände* und *Einsatzbereite Füße* beschreiben die Verfügbarkeit der Extremitäten zur Übernahme der Bedienelemente. Die Parameter *Verfügbares Lenkrad*, *Freier Fußraum* sowie *Erreichbares Lenkrad* bzw. *Sitzverstellung* beurteilen die Zugänglichkeit der Pedale und des Lenkrads. Die ungehinderte Zugriffsmöglichkeit auf das Lenkrad wird anhand der Beschreibungsgröße *Freies Lenkrad* evaluiert. Während nach einer unzulässig langen Einstellung der Sitzposition die Erreichbarkeit des Lenkrads nicht mehr sichergestellt sein kann, darf beispielsweise auch der Zugriff auf das Lenkrad nicht durch die Nutzung eines aufgeklappten Laptops oder einer ausgebreiteten Straßenkarte eingeschränkt werden. Ebenso ist eine Einschränkung der Bewegungsfreiheit innerhalb des Fußraums, wie z.B. durch Ausziehen der Schuhe, unzulässig.



**Nebentätigkeiten** Als Basis einer Beurteilung des Immersionsgrades des Fahrers in fahrzeugeigene Infotainmentinhalte muss die *Infotainmentnutzung* erfasst und evaluiert werden. Das Kriterium ist für die Bewertung des Situationsbewusstseins und der motorischen Reaktionsfähigkeit gleichermaßen von Bedeutung. Eine Interaktion mit Infotainmentinhalten bindet sowohl motorische als auch kognitive Ressourcen. Zusätzlich kann das Kriterium eine Aussage über die aktuelle Aufmerksamkeitszuteilung des Nutzers liefern.

Für eine gesamtheitliche Beurteilung des Fahrerzustandes müssen folgende Kontrollparameter überwacht werden (vgl. [59]):

- Blick in freie Rol
- Starrer Blick
- Müdigkeit
- Schlaf
- Infotainmentnutzung
- Einsatzbereite Hände
- Einsatzbereite Füße
- Erreichbares Lenkrad bzw. Sitzverstellung
- Freies Lenkrad
- Freier Fußraum

Der folgende Abschnitt beschreibt auf Basis des Stands der Technik zur Fahrerüberwachung aus Kapitel 2.3 und der einhergehenden Möglichkeiten zur Überwachung der einzelnen Kontrollparameter die Herleitung eines kombinierten Ansatzes zur Fahrerzustandsbestimmung aus Elementen der direkten und indirekten Fahrerüberwachung und erzwungener Bedienhandlungen zwischen Fahrer und Fahrzeug.

### 3.2.2 Kombiniertes Konzept zur Fahrerzustandsbestimmung

Um für den Betrieb der VA eine zuverlässige Aussage über die Fähigkeit des Fahrers zur situationsadäquaten Übernahme des Fahrzeugs zu treffen, müssen die in Abschnitt 3.2.1.2 erläuterten Überwachungsparameter komplett und zuverlässig detektiert werden können. Ebenso sind bei der Gestaltung eines Konzepts zur Antizipation des Fahrerzustands die zu diesen Parametern komplementären Anforderungen zu beachten, die sich aus den spezifischen Randbedingungen des Modus VA ergeben:

Die Ausführungen zum Stand der Technik der Methoden zur Fahrerbeobachtung aus Abschnitt 2.3.2 führen zu dem Schluss, dass kein verfügbares Konzept der Fahrerbeobachtung singular in der Lage ist, sämtliche aufgeführten Parameter zufriedenstellend zu überwachen. Die Interpretation von Fahrerhandlungen, vor allem die Eingaben über die Bedienelemente der primären Fahraufgabe als *indirekte* Methode zur Fahrerbeobachtung ist für den Modus VA nicht anwendbar. Der Fahrer ist von den Fahrzeugführungsaufgaben entbunden, es existiert keine interpretierbare Kopplung zwischen Fahrer und den Stellteilen zur Fahrzeugführung. Bedienelemente der sekundären und tertiären Fahraufgabe werden vom Fahrer weiterhin betätigt. Die Möglichkeit zur indirekten Beobachtung des Fahrerverhaltens über die Detektion seines

Interaktionsverhaltens mit Stellelementen zur Bedienung des Infotainmentsystems oder der elektrischen Sitzverstellung ist für die VA weiterhin gegeben.

Im Kontext der Kraftfahrzeugtechnik wird als Konzept zur *direkten* Fahrerbeobachtung eine im Bereich des Kombiinstrumentes oder der A-Säule verbaute Fahrerüberwachungskamera verwendet. Die technischen Umsetzungen des Ansatzes sind hinsichtlich ihrer Detektionsgenauigkeit und der Unabhängigkeit von störenden Umwelteinflüssen Gegenstand intensiver Entwicklungsbemühungen. Aktuell verfügbare Kameras und Bildverarbeitungsalgorithmen sind in der Lage, die Kopforientierung und damit große Blickabwendungen des Fahrers zuverlässig zu detektieren. Detaillierte Rückschlüsse auf das Blickverhalten des Fahrers sind mit vertretbarem technischen Aufwand noch nicht möglich. (vgl. [9])

Die Fahrerbeobachtung durch *erzwungene Bedienhandlung* deckt in geeigneter Ausprägung verschiedene der relevanten Kontrollparameter ab. Jedoch ist es nicht möglich, Aussagen über das Fahrerverhalten zwischen den zeitdiskreten Bedienhandlungen zu treffen. Eine akzeptable Aussage zur kognitiven Aufmerksamkeitsverteilung oder aufmerksames Blickverhalten sind durch diese Art der Fahrerbeobachtung nicht abgesichert.

Keines der bekannten Konzepte ist in der Lage, alle relevanten Parameter zufriedenstellend abzudecken. Eine *Kombination* von Methoden der direkten und indirekten Fahrerbeobachtung mit Aspekten der Fahrerüberwachung durch erzwungene Bedienhandlungen ermöglicht hingegen eine ganzheitliche Erfassung des Fahrerzustands (vgl. [59]). Das Potential einer Kombination verschiedener Paradigma der Fahrerüberwachung findet sich - mit jeweils verschiedenem Anwendungshintergrund - auch in der Literatur (z.B. [9], S.110 ff.; [25]).

Die auf Basis einer systeminitiierten Handlungsaufforderung erfolgte Interaktion des Fahrers mit dem System liefert Aufschluss über die Beschreibungsgrößen *Müdigkeit*, *Schlaf* und *Starrer Blick*. Diese aus Entwicklersicht negativen Phänomene können bei erfolgter Fahrerreaktion auf eine Interaktionsaufforderung durch das System ausgeschlossen werden. Der Fahrer nimmt die Aufforderung wahr und verarbeitet sie korrekt. Bei einer Systemauslegung, die eine passend gestaltete Interaktion des Fahrers mit der Hand erfordert, ist durch die erzwungene Bedienhandlung zudem die Antizipation des Parameters *Einsatzbereite Hände* möglich.

Eine Fahrerüberwachungskamera als Sensor einer direkten Fahrerüberwachung kann den Kontrollparameter *Blick in freie RoI* singular nicht vollständig evaluieren. Der Kamera ist es mithilfe eines geeigneten Bildverarbeitungsalgorithmus einerseits möglich, Verdeckungen des Sehraums im Bereich zwischen den Augen des Fahrers und der Kamera zu detektieren. Eine Blickrichtungsdetektion ist mit heutigen technischen Mitteln mit ausreichender Aussagekraft noch nicht möglich. Jedoch kann die Kopforientierung hinreichend genau und stabil detektiert werden. Eine Antizipation und Steuerung des Blickverhaltens des Fahrers im Modus VA ist aktuell nur durch eine Kombination dieser videobasierten Überwachung der Kopforientierung und der gezielten Positionierung der Interaktionsaufforderung möglich. Die Interaktionsaufforderung muss *innerhalb* oder im nahen Umfeld der RoI positioniert sein. Auf diese Weise ist bei erfolgter Fahrerreaktion auf die Interaktionsaufforderung des Systems ein vorhergehender Blick in die RoI sichergestellt. Diesen kann der Wahrnehmungsapparat zur selektiven Wahrnehmung des peripheren Sichtfeldes nutzen.

Die Parameter *Verfügbares Lenkrad*, *Freies Lenkrad*, *Freier Fußraum* und *Einsatzbereite Füße* können über zusätzliche Sensorik im Fahrzeuginnenraum oder im Lenkrad überprüft werden. Heutige, parallel-sequentiell ausgelegte Seriensysteme zur Längsführungsautomation übernehmen über längere Zeiträume hinweg einen Teil der Fahrzeugführung. Die Rückfallebene ist ebenso wie beim Modus VA der Stand-

by-Zustand des Modus TA. Diese teilautomatisierten Systeme sind in dieser Form herstellerübergreifend zulassungsfähiger Stand der Technik und sind durchgängig *ohne* videogestützte Überwachung des Fußraums und der Fußstellung des Fahrers verfügbar. Folglich wird ein vergleichbares System der VA ebenfalls ohne zusätzliche Überwachungsmodalitäten des Fußraums und der Fußstellung zulassungsfähig sein. Zusätzlich ist eine vorsätzliche Einschränkung der Bewegungsfreiheit innerhalb des Fußraums sowie der Zugänglichkeit des Lenkrads als Misuse des verantwortlich handelnden Fahrers zu verstehen. Die Überwachung des *Freien Fußraums* und des *Freien Lenkrads* ist daher nicht zwangsläufig Bestandteil eines ganzheitlichen Konzepts zur Fahrerüberwachung.

Dem besonderen, differenzierten Charakter des Modus VA wird durch die Überwachung des Kontrollparameters *Sitzverstellung* Rechnung getragen. Während im Modus TA der Fahrer zumindest seiner Querrührungsaufgabe über das Lenkrad nachkommen muss, liegt diese Fahrerinformation für die VA durch die Entkopplung des Fahrers von der primären Fahraufgabe nicht mehr vor. Der Parameter muss systemseitig über eine Rückmeldung des Steuergeräts der elektrischen Sitzverstellung überwacht werden. Verstellt der Fahrer den Sitz in einer Weise, die eine Erreichbarkeit des Lenkrads beeinträchtigen kann, muss dies vom System erkannt werden.

### 3.2.3 „Potentialtrigger“

Wie in [59] beschrieben, besteht die Grundidee des kombinierten Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzepts „Potentialtrigger“ in der Definition eines Automatisierungspotentials. Dieses Potential entspricht vom Prinzip dem Füllstand einer Wassersäule. In Abhängigkeit ausgewählter Kontroll- und Umgebungsparameter sinkt dieses Potential mit variierender Sinkgeschwindigkeit ab. Unterschreitet der Füllstand des Potentials einen minimalen Schwellenwert, fordert das System den Fahrer zum Setzen eines Triggers auf. Erfolgt die vom Fahrer geforderte Interaktion, wird das Potential aufgefüllt. Setzt der Fahrer den Trigger nicht, wird der Modus VA in der Folge deaktiviert.

Die Höhe der Sinkgeschwindigkeit hängt von verschiedenen Kontrollparametern und situationsspezifischen Umgebungsparametern der Fahrerüberwachung ab. Sie bestimmt die Frequenz der vom Fahrer geforderten Interaktionen. Je größer der Betrag der Sinkgeschwindigkeit, desto häufiger muss der Fahrer den Trigger setzen.

Als Eingangssparameter für ihre Berechnung dient der Kontrollparameter *Blick in freie RoI*. Dieser wird durch die Kombination aus Fahrerüberwachungskamera und ortsgesteuerter Anzeige der Triggeraufforderung innerhalb oder an der RoI überwacht. Die Interaktion des Fahrers mit dem fahrzeugeigenen Infotainmentsystem geht durch die Beschreibungsgröße *Infotainmentnutzung* in die Berechnung der Sinkgeschwindigkeit ein. Die Anzahl und Frequenz der Interaktionen können am Bedienelement, die Immersionstiefe anhand der Menüstruktur gemessen werden.

Als externer, vom Verhalten des Fahrzeugführers unabhängiger Faktor beeinflusst der Parameter *Kritikalität der Verkehrssituation* die Sinkgeschwindigkeit des Automatisierungspotentials. Diese wird anhand von Umfeldwahrnehmungsdaten, wie der Anzahl, den Abständen und den Relativgeschwindigkeiten relevanter Objekte in der Fahrzeugumgebung bestimmt. Ein geeigneter Kennwert zur Abschätzung der Kritikalität von Verkehrssituationen ist die *Time-to-Collision (TTC)* (vgl. [56], [39]). Sie ist durch das Verhältnis des Abstandes  $d$  und der Relativgeschwindigkeit  $v - v_i$  zweier Fahrzeuge beschrieben. Die TTC gibt die Zeitspanne an, nach der es bei unveränderter Trajektorie und Geschwindigkeit zweier Fahrzeuge zur Kollision kommt. Die TTC ist vom System unabhängig und ein dynamischer, situationsab-

hängiger Parameter. Verkehrssituationen sind mit abnehmenden, positiven TTCs als zunehmend kritisch einzustufen.

Als Erweiterung des ursprünglichen Konzepts des Potentialtriggers aus [59] werden zusätzlich zu *harten Abwurfkriterien* Kontrollparameter eingeführt, die eine Erhöhung der Sinkgeschwindigkeit auf Ihren maximalen Wert zur Folge haben. Diese Funktion wird als *Override* bezeichnet, da für den Zeitraum geltender *Override-Bedingungen* die normale Berechnung der Sinkgeschwindigkeit überstimmt wird. Ein Kriterium hierfür ist der Kontrollparameter *Sitzverstellung*. Bei längerer Betätigung der elektrischen Sitzverstellung ist die Erreichbarkeit des Lenkrads nicht mehr gewährleistet. Die motorische Reaktionsfähigkeit ist damit unter Umständen nicht mehr gegeben. Der Beginn einer Sitzverstellung wird daher als Beginn der *Override-Situation* gesehen. Durch den schnellen Ablauf des Potentials und der zeitnah erfolgenden Triggeraufforderung ist es möglich, den Fahrer im Loop zu halten. Wird der Trigger nicht gesetzt oder fährt der Fahrer trotz gesetztem Trigger mit der Sitzverstellung fort, kann die Sitzverstellung weiterhin als hartes Abwurfkriterium betrachtet werden und eine *Fahrerübernahmeaufforderung (FÜA)* durch das System mit anschließender Deaktivierung des Modus VA erfolgen.

Weitere *Override-Bedingungen* können relevante Informationen aus anderen Systemen des Egofahrzeugs darstellen. Konkretes Anwendungsbeispiel sind die prädiktiven Streckendaten eines Navigationssystems oder angereicherte Eingangsinformationen eines Workloadmanagers aus [82]. Anhand dieser Daten können Situationen antizipiert werden, die aufgrund der Beschaffenheit der prädizierten Verkehrsinfrastruktur eine potentiell hohe Kritikalität aufweisen. Autobahnauffahrten in Stausituationen repräsentieren ein typisches Beispiel. Beim Passieren mit einem vollautomatischen STA ist die Wahrscheinlichkeit hoch, mit einem für das FAS schwer detektierbaren und interpretierbaren Naheinscherer konfrontiert zu werden. In der Folge besteht die erhöhte Wahrscheinlichkeit einer systeminitiierten FÜA. Wird diese Situation antizipiert, wird der *Override* für einen Zyklus aktiviert und der Fahrer durch eine zeitnah erfolgende, zusätzliche Triggeraufforderung in den Loop eingebunden.

Das dargelegte Konzept aus Elementen der direkten und indirekten Fahrerüberwachung in Kombination mit der Methode der erzwungenen Bedienhandlung auf Basis eines zweckgebundenen Anzeige- und Bedienkonzepts zur Interaktion mit Automatisierungspotential und Triggeraufforderung erfüllt die grundlegenden Anforderungen zur Bestimmung eines Fahrers *im Loop* aus Abschnitt 3.2.1.1.

### 3.2.4 Umsetzung des Potentialtriggers

Um das theoretische Konzept des Potentialtriggers in ein Fahrzeug integrieren zu können, ist eine geeignete Funktionsstruktur zu etablieren. Durch die intelligente Kombination verschiedener Methoden der Fahrerüberwachung zur Bestimmung verschiedener Kontrollparameter ergibt sich eine präzise abgestimmte Verzahnung der einzelnen Aspekte. Die sinnhafte Anordnung und Korrelation von Anzeigen, Bedienelementen und Sensoren zur Überwachung des Fahrzeugumfelds und des Fahrers sind die Grundlage für den Erfolg des Konzepts in der Praxis. Die *Funktionslogik* beschreibt das Zusammenspiel zwischen der Aktivität des FAS des Modus VA, der Anzeige des Automatisierungspotentials und der reaktiven Fahrerinteraktion (Abschnitt 3.2.4.1). Die Berechnung der Sinkgeschwindigkeit auf Basis der detektierten Daten erfolgt mittels einer *Fuzzy Logic* (Abschnitt 3.2.4.2). Die Systemausgaben sowie die Interaktionen durch den Fahrer werden durch die zweckmäßige Gestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion gesteuert (Abschnitt 3.2.4.3).

### 3.2.4.1 Funktionslogik

Das Flussdiagramm aus Abbildung 3.2 zeigt den Informationsfluss innerhalb des Potentialtriggerkonzepts. Nach Aktivierung des Modus VA wird auch das Potential initialisiert. Das zu Zyklusbeginn komplett gefüllte Potential sinkt mit einer voreingestellten Sinkgeschwindigkeit ab, während parallel die einzelnen Fahrerüberwachungssensoren ihren Betrieb aufnehmen und Daten für den Potentialtrigger-Berechnungsalgorithmus generieren. Tritt keine Override- oder Abwurf-Bedingung in Kraft, reduziert sich der Füllstand des Potentials mit der anhand von Fahrerüberwachungs- und Umfelddaten errechneten Sinkgeschwindigkeit. Wird dem System die Gültigkeit einer Override-Bedingung rückgemeldet, wird die Berechnung der Sinkgeschwindigkeit überstimmt und der Betrag der Sinkgeschwindigkeit auf einen Maximalwert gesetzt. Die Triggerraufforderung erfolgt zeitnah. Tritt hingegen ein Abwurf-Kriterium in Kraft, erfolgt eine sofortige FÜA, der Modus VA wird in der Folge deaktiviert und der Fahrer muss die Fahrzeugführung komplett übernehmen.

Die Berechnung der Sinkgeschwindigkeit erfolgt mittels einer *Fuzzy Logic*, die die unscharfen Eingangsgrößen der Sensoren in eine konkrete Sinkgeschwindigkeit umrechnet (vgl. Abschnitt 3.2.4.2). Erreicht der Füllstand des Potentials einen diskreten, minimalen Schwellenwert, gibt das System eine Triggerraufforderung an den Fahrer aus. Kommt der Fahrer dieser Triggerraufforderung innerhalb des Zeitraums vom Erreichen des minimalen Schwellenwerts und einem komplett leeren Potential nach und führt die spezifizierte Betätigung (vgl. Abschnitt 3.2.4.3) aus, wird das Potential initialisiert. Der Zyklus beginnt erneut mit der Überprüfung der Override- und Abschaltbedingungen. Kommt der Fahrer der Triggerraufforderung hingegen im zur Verfügung stehenden Zeitrahmen *nicht* nach, wird eine FÜA ausgegeben und der Modus VA deaktiviert.

### 3.2.4.2 Informationstechnische Grundlagen

Die informationstechnische Basis des Potentialtriggers ist die Verknüpfung aller relevanten Eingangsdaten über eine *Fuzzy Logic*. Diese Theorie ermöglicht es technischen Anwendungen unspezifische bzw. unscharfe Beschreibungsgrößen zu erfassen und in konkrete technische Werte umzuwandeln (vgl. [72]). Für den Anwendungsfall der Fahrerzustandsbestimmung durch den Potentialtrigger wird der Ansatz verwendet, um die einzelnen Werte aus direkter und indirekter Fahrerüberwachung und die externen, verkehrsspezifischen Faktoren zu einer Sinkgeschwindigkeit des Automatisierungspotentials zu integrieren. Grundsätzlich besteht eine Fuzzy Logic aus den Teilschritten der *Fuzzyifizierung*, der *Interferenz* und der *Defuzzyifizierung*. Im Teilschritt der *Fuzzyifizierung* werden für die von den verschiedenen Sensoren detektierten Zustandsgrößen *Blick in freie RoI*, *Infotainmentnutzung* und *Kritikalität der Verkehrssituation* Zuordnungsdiagramme hinterlegt. Diese sog. *Fuzzy-Sets* ermöglichen die Angabe eines Erfüllungsgrades in Abhängigkeit der Werte der Zustandsgrößen. Dieser Erfüllungsgrad beschreibt den Einfluss des Parameters auf die Sinkgeschwindigkeit des Potentials. Der Wert „0“ beschreibt einen minimalen, der Wert „1“ einen maximalen Einfluss. In der subsequenten *Interferenz* werden die Zustandsgrößen gewichtet und die einzelnen Sets miteinander verknüpft. Das Ergebnis der Interferenz ist der Wert  $v_{ges}$ . Diesem Wert wird in der anschließenden Defuzzyifizierung eine korrespondierende Sinkgeschwindigkeit  $v_{sink}$  zugeordnet. Das Potential wird anschließend mit  $v_{sink}$  verringert.

Weitere Details zur Fuzzyifizierung der Eingangsgrößen, zur ihrer Verknüpfung im Schritt der Interferenz und zur anschließenden Umrechnung in die Sinkgeschwindigkeit des Potentials finden sich in [57], [59] und [39]. Abbildung 3.3 zeigt erste Entwürfe für qualitative Verläufe der Fuzzy Sets zur Fuzzyifizierung

der Eingangsgrößen und das Ergebnis-Set zur Zuordnung der realen Ausgangsgröße  $v_{sink}$  zu  $v_{ges}$ . Die Verläufe spiegeln in ihrer Kombination den Charakter des Überwachungskonzepts wieder. Ihre Form wird auf Basis von Expertenschätzungen festgelegt.

Die Beschaffenheit des Fuzzy Sets zur Evaluierung der Infotainmentnutzung bewirkt eine Erhöhung der Sinkgeschwindigkeit bei sehr seltener und sehr häufiger Interaktion des Fahrers mit dem Infotainmentsystem. Außerdem ist ein Bereich der optimalen Interaktionsfrequenz vorgesehen. Es wird angenommen, dass bei *sehr seltener* oder *keiner* Interaktion des Fahrers mit dem Infotainmentsystem eine starke, vom Potentialtrigger nicht kontrollierbare Ablenkungsquelle vorliegt. Diese Quelle kann beispielsweise ein

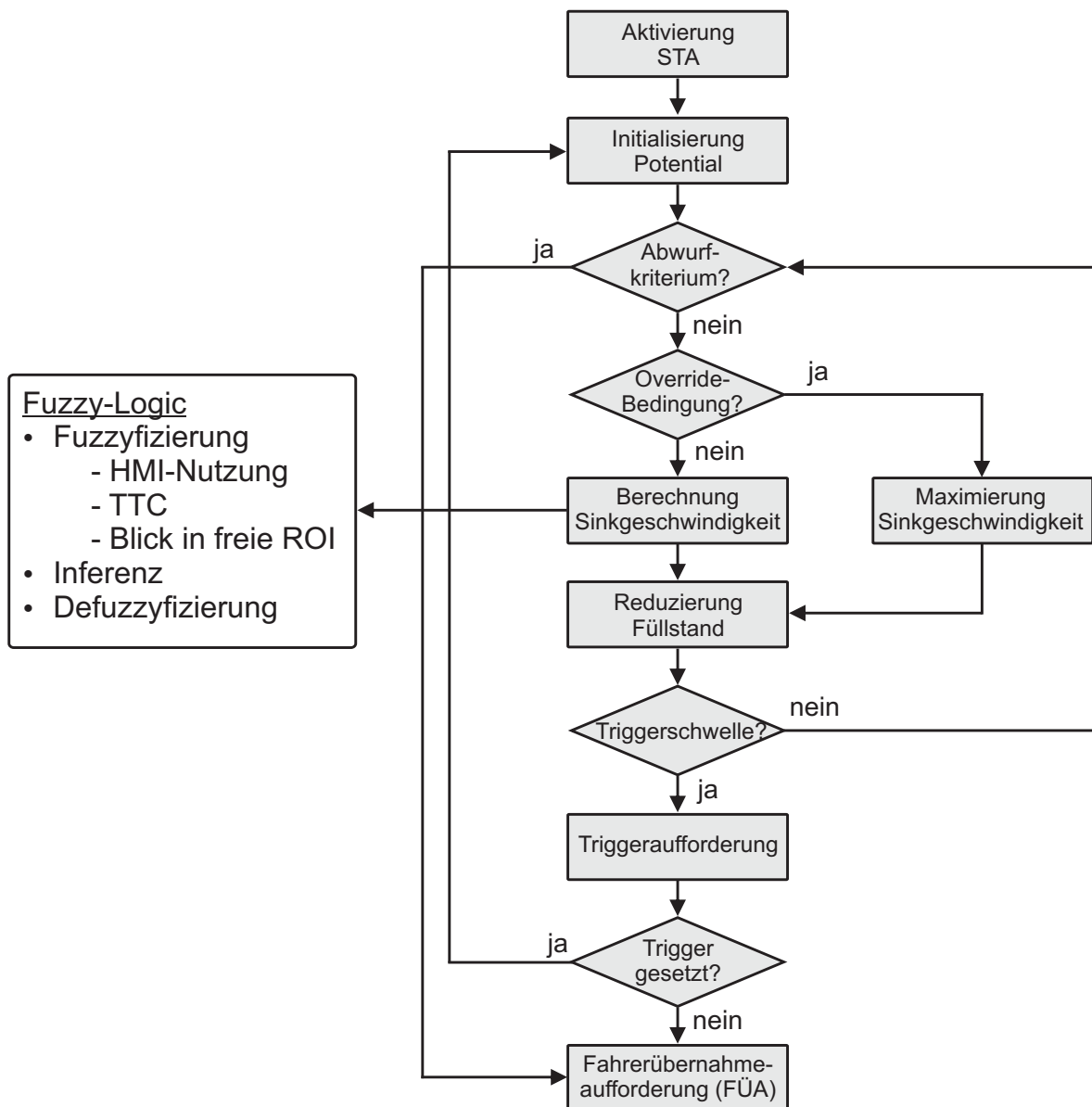


Abbildung 3.2: Funktionslogik des Potentialtriggerkonzepts, adaptiert nach [59]

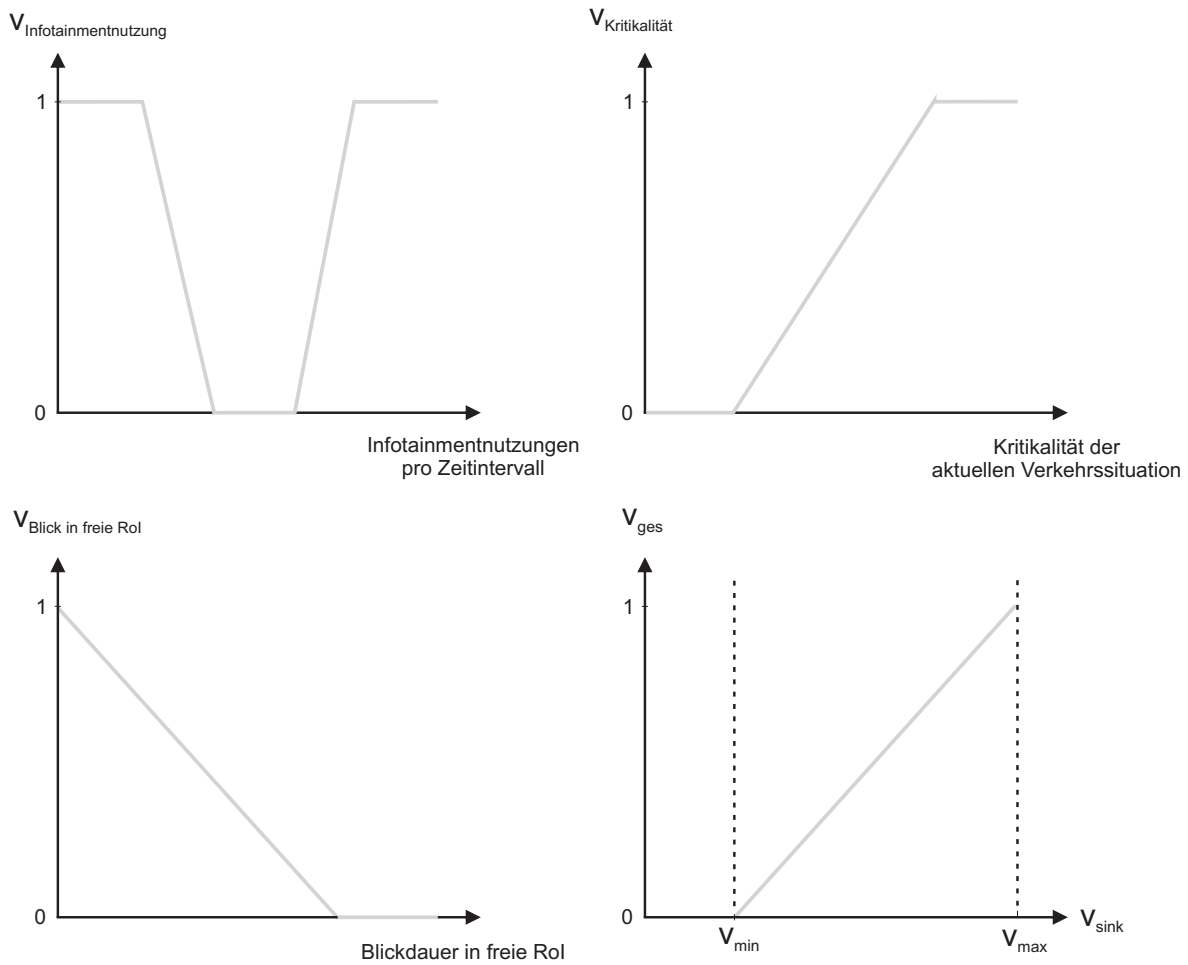


Abbildung 3.3: Fuzzy-Sets für die Eingangsgrößen und Ergebnis-Set für die Ausgangsgröße der Potentialtrigger *Fuzzy Logic*, adaptiert nach [59]

Smartphone oder ein Tablet sein, eine Nutzung des Fahrers derartiger Inhalte ist nach Möglichkeit einzuschränken. Zusätzlich bedingt *zu häufige* Fahrerinteraktion ebenfalls einen Anstieg der Sinkgeschwindigkeit. Es wird davon ausgegangen, dass eine zu starke Immersion in die Menüstrukturen und Inhalte des Infotainmentsystems eine starke Ablenkungswirkung ausüben. Das Fuzzy Set weist außerdem ein ausgeprägtes Minimum aus. Dies Minimum skizziert die Annahme einer aus Sicht des Systementwicklers *optimalen* Interaktionsfrequenz mit dem Infotainmentsystem des Fahrzeugs.

Die Eingangsdaten der videobasierten Fahrerüberwachung erfassen die visuelle Aufmerksamkeit des Fahrers. So kann auf Basis der Kopforientierung die grobe Blickrichtung detektiert werden. Durchbricht eine auf einer angenommenen Stirnfläche aufgesetzte Flächennormale eine innerhalb der Windschutzscheibe positionierte RoI, kann von einer Blickorientierung in die RoI ausgegangen werden. Blickt der Fahrer längere Zeit in die RoI, wird der Einfluss des Parameters *Blick in freie RoI* auf die Sinkgeschwindigkeit minimal. Richtet der Fahrer seinen Blick nie oder nur kurz in die RoI, wirkt der Parameter als ein die Sinkgeschwindigkeit vergrößernder Faktor.

Der Faktor *Kritikalität der Verkehrssituation* gibt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Situationen an, die eine Übernahme des Fahrers erfordern. Das Fuzzy Set für diesen Parameter bedingt entsprechend

eine hohe Sinkrate für hohe Kritikalitätswerte und einen geringen Einfluss auf die Sinkgeschwindigkeit bei niedrigen Werten der potentiellen Kritikalität.

Diese Parameter werden gewichtet und miteinander verknüpft (vgl. [59]). Durch die Verknüpfung über das Ergebnis-Set aus Abbildung 3.3 wird dem Ausgangswert der Inferenz eine reale Sinkgeschwindigkeit zugeordnet. Die Sinkgeschwindigkeit  $v_{sink}$  ist beim Potentialtriggerkonzept als *wesentliche Ausprägung* zur Evaluierung der Parameter *Müdigkeit*, *Schlaf* und *Starrer Blick* immer  $v_{sink} > 0$ . Selbst wenn sich der Fahrer aus Sicht der Fahrerüberwachung optimal verhält - sein Gesichtsfeld also in die freie RoI gerichtet ist, das Infotainmentsystem mit der optimalen Frequenz betätigt wird und die Verkehrssituation ausreichend beherrschbar ist - muss das Potential weiter absinken. Nur so ist eine valide Beurteilung des Fahrerzustandes auf Basis *aller* relevanten Kontrollparameter möglich.

### 3.2.4.3 Mensch-Maschine-Schnittstelle

Als integraler Bestandteil des kombinierten Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzepts trägt das HMI des Potentialtriggers maßgeblich zu einer funktionsfähigen Umsetzung des Entwurfs bei. Die Ausgestaltung der Mensch-Maschine-Interaktion bei der Triggerbetätigung (*Bedienung*) und die Gestaltung der Anzeige des Potentialtriggers (*Anzeige*) kennzeichnen die Mensch-Maschine-Schnittstelle des Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzepts für den Modus VA.

**Bedienung** Ein grundsätzlicher Aspekt zur Bedienlogik des Potentialtriggers ist das Vermeiden des unaufgeforderten Setzens von Triggern durch den Fahrer. Erfolgt eine Triggerbetätigung ohne vorgelagerter Aufforderung durch das System, kann nicht von einem aufmerksamen Fahrer ausgegangen werden. Entsprechend wird das Potential in diesem Fall *nicht* initialisiert. Vielmehr hat ein unaufgefordertes Betätigen des Triggers eine FÜA, und in der Konsequenz eine Deaktivierung des Modus VA zur Folge. Auf diese Weise wird ein Auffüllen des Potentials durch zufällige Betätigungen zum korrekten Zeitpunkt oder durch regelmäßige Betätigungen ohne gleichzeitiger Aufmerksamkeitszuwendung auf die Triggeraufforderung in der RoI verhindert. Zwar kann durch die Betätigung des Triggers von einem motorisch reaktionsfähigem Fahrer ausgegangen werden, allerdings entfällt die Interpretationsmöglichkeit der Reaktion des Fahrers auf die Triggeraufforderung. Zusätzlich ist kein Blick des Fahrers in die RoI zur scharfen und unscharfen Wahrnehmung von wichtigen Umgebungsinformationen nachweisbar.

Wie in Abschnitt 3.2.1.2 dargelegt, ist die Notwendigkeit des Nachweises der Eingriffsmöglichkeit in ein freies Lenkrad ein zentraler Unterschied des Modus VA zum Modus TA. Neben der Überwachung der Sitzverstellung ist es erforderlich, durch die Art der vom Fahrer geforderten Interaktion die Verfügbarkeit des Hand-Arm-Apparates für einen Eingriff am Lenkrad nachzuweisen. Dies resultiert in der Anforderung, die Triggerbetätigung als Interaktion mit der Hand und in unmittelbarer Nähe zum Lenkrad auszulegen. Die Betätigung erfolgt in einer Form, die die Verfügbarkeit einer Hand zur Ausführung von Lenkbewegungen am Lenkrad ermöglicht. Die Möglichkeit zum Halten von Medien wie Smartphones, Tablets, Büchern oder Zeitungen wird durch die Art der Triggerbetätigung weitgehend ausgeschlossen. Interaktionen, die für die Betätigung mit einem Umfassungsgriff oder Zufassungsgriff ausgelegt sind, erfüllen diese Anforderung. Die Interaktion bzw. das Halten zusätzlicher Elemente wird erschwert.

Zur Kraftübertragung erscheint ein Reibschluss geeignet. Die Möglichkeit zum Nachweis einsatzbereiter Hände kann dadurch zusätzlich verbessert werden, da die Hand neben dem Aufwand zur Betätigung eines Stellelements zusätzlich Kraft ausüben muss, um eine Kraftübertragung zwischen Stellteil und Hand zu ermöglichen. Jedoch bedarf es für reibschlüssige Kraftübertragung zusätzlichen Aufwands zur Herstel-



lung des Reibschlusses. Die Bedienung des Triggers soll einerseits die Verfügbarkeit der Hände gewährleisten, andererseits aber auch ohne unverhältnismäßigen Betätigungsaufwand erfolgen. Eine zu starke Bindung motorischer Kapazitäten für die Betätigung des Triggers ist mit Hinblick auf die Einsatzbereitschaft der Hände zur Übernahme des Lenkrads kontraproduktiv. Folglich ist für die Triggerbetätigung eine geeignete *formschlüssige* Art der Kraftübertragung in Kombination mit einer passenden Greifart anzustreben.

Formschlüssige Betätigungen mit Zu- oder Umfassungsgriff können die Betätigung aus motorischer Sicht erleichtern. Dies fördert eine intuitive und wenig beanspruchende Bedienung des Triggers und unterstützt gleichzeitig die Überprüfung des Kontrollparameters *Einsatzbereite Hände*. Des Weiteren soll die Betätigung frei von Diskomfort sein. Dies bedeutet die Betätigung so auszulegen, dass die Extremitätenregionen der Bewegungsmöglichkeiten des Hand-Arm-Apparats gemieden werden.

Eine weitere Anforderung an die Betätigung ist die Möglichkeit zur Bedienung ohne lange und große Blickabwendungen. In Kombination mit der Anforderung einer Positionierung der Triggerbetätigung im nahen Umfeld des Lenkrads impliziert dies eine nicht sichtbare Positionierung des Stellelements hinter dem Lenkrad und/oder eine intuitive Auslegung der Interaktion.

**Anzeige** Das Anzeigeconzept ist ein wesentlicher Bestandteil des Potentialtriggerconzepts. Wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, wird die Anzeige der Triggeraufforderung innerhalb oder am Rand der RoI positioniert. In Kombination mit der videobasierten Bestimmung der Kopforientierung ermöglicht dies die genaue Interpretation des Blickverhaltens des Fahrers für den Zeitpunkt der Triggeraufforderung. Hat der Fahrer diese wahrgenommen, kann eine periphere oder foveale Wahrnehmung der Informationen innerhalb der RoI nachgewiesen werden.

Zusätzlich ermöglichen die Winkelwerte zur Orientierung des Kopfes aus dem Algorithmus der Fahrerüberwachungskamera als Eingangsparameter der Sinkgeschwindigkeitsberechnung eine grobe Interpretation des Blickverhaltens für die Zeit *zwischen* den Triggeraufforderungen.

Der absinkende Füllstand des Potentials wird ebenfalls innerhalb der RoI visualisiert. Auf diese Weise ist die simultane Aufnahme von Umgebungsinformationen und Zustandsinformationen des Potentialtriggers möglich.

Für die Visualisierung der Füllstandsanzeige und der Trigger- und Übernahmeaufforderungen in der für den Fahrbetrieb relevanten RoI eignet sich ein *Head-Up-Display (HUD)*. Dieses Anzeigemedium ist in der Lage, die reale Welt mit virtuellen Bildern zu überlagern. Aktuelle, in Serienfahrzeugen verfügbare HUDs projizieren das transparente, virtuelle Bild in den Bereich *vor* dem Fahrzeug *über* der Motorhaube. Allgemeine Vorteile dieser Technologie sind die „geringen notwendigen Kopf- und Augenbewegungen“ und die „geringe notwendige Akkommodation“ ([107], S.1) zum Erfassen von Umfeldinformationen. Für den speziellen Anwendungsfall des Potentialtriggers ermöglichen HUDs die Visualisierung der Triggeraufforderungen und des Potentialfüllstands innerhalb der RoI. Wird die Anzeige des Potentialtriggers im HUD vom Fahrer foveal erfasst, ist durch das periphere Blickfeld der relevante Bereich vor dem Fahrzeug abgesichert. Die Visualisierung der Potentialtriggeranzeige im Kombidisplay stellt eine Alternative zur Projektion der Anzeige über das HUD dar. Diese Umsetzung ist durch die Visualisierung der Potentialtriggeranzeigen *neben* der RoI, die parallele Darstellung anderer Inhalte des Kombi-Displays und die größere notwendige Akkommodation zwischen Inhalten der realen Welt und der Visualisierung im Kombi-Display lediglich *ein Kompromiss*. Eine Realisierung des Potentialtriggerconzepts mit einer abschließlichen Anzeige im Kombi-Display wird in dieser Arbeit nicht untersucht. Die Umsetzung muss an anderer Stelle validiert werden.

Eine zentrale Eigenschaft des Anzeigeconzepts ist die Anforderung, die Triggeraufforderung ausschließlich *visuell* zu kommunizieren. Diese essentielle Prämisse liegt in der Grundidee des Konzepts begründet, mit der Triggeraufforderung den aufmerksamen Fahrer zu erreichen. Durch regelmäßige, zur Schaffung eines ausreichenden Situationsbewusstseins erfolgende Blicke des Fahrers in das relevante Fahrzeugumfeld wird die Aufforderung bemerkt. Durch die Anpassung des Helligkeitsverlaufs der Anzeige kann die Triggeraufforderung für den visuell aufmerksamen Fahrer hervorgehoben werden, sollte dieser seinen Blick gerade auf einen anderen Punkt innerhalb der RoI fokussieren (vgl. Abschnitt 2.1.1.2). Die Ergänzung dieser visuellen Aufforderung durch akustische oder haptische Elemente ermöglicht es einem visuell unaufmerksamen Fahrer, den Trigger ohne vorhergehender visueller Erfassung der Umgebung zu setzen. Neben dem visuellen Kanal sind andere Wahrnehmungskanäle zur Kommunikation der Triggeraufforderung folglich nicht anwendbar.

Im Gegensatz hierzu sind für die FÜA keine Einschränkungen hinsichtlich der Kommunikationskanäle zwischen Fahrer und Fahrzeug gegeben. Die FÜA richtet sich an den *unaufmerksamen*, abgelenkten Fahrer, das System kann daher den Fahrer multimodal ansprechen. Vorstellbar sind haptische Rückmeldungen über vibrierende Bedienelemente und Sitze oder durch einen Bremsruck des Fahrzeugs, akustische Rückmeldungen durch Signaltöne oder visuelle Rückmeldungen durch zusätzliche Anzeigen im Kombi-Display.

### 3.2.5 Zusammenfassung Potentialtrigger

Kapitel 3.2 entwickelt auf Basis grundlegender Betrachtungen zur Rolle des Fahrers beim Betrieb vollautomatischer FAS das kombinierte Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzept *Potentialtrigger*. Der Potentialtrigger stellt einen Lösungsansatz für den Zielkonflikt zwischen größtmöglicher Entlastung des Fahrers durch das vollautomatische Assistenzsystem bei gleichbleibend hoher Verfügbarkeit des Fahrers zur adäquaten Fahrzeugübernahme an den Systemgrenzen des Modus VA dar. Auf Basis konkreter Anforderungen an die Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen vollautomatischer FAS werden Kontrollparameter bestimmt, deren Überwachung Aussagen über einen Fahrer *im Loop* erlauben. Anhand der verschiedenen technischen Möglichkeiten zur Fahrerüberwachung wird die Notwendigkeit eines *kombinierten* Konzepts zur zuverlässigen Erfassung aller relevanten Kontrollparameter aufgezeigt. Das Konzept *Potentialtrigger* zeigt einen kombinierten Ansatzes zur Fahrerzustandsbestimmung. Dabei sinkt ein virtuelles Automatisierungspotential analog dem Füllstand einer Wassersäule mit variierender Sinkgeschwindigkeit ab. Erreicht der Füllstand des Potentials einen minimalen Grenzwert, wird der Fahrer aufgefordert, einen manuellen Trigger zu betätigen. Das Setzen des Triggers initialisiert das Potential. Wird der Trigger nicht gesetzt, deaktiviert sich in der Folge der Modus VA.

## 3.3 Konzeptentwicklung Bedienung Fahrerassistenzsysteme

Das folgende Kapitel beschreibt die Entwicklung von Bedienkonzepten zur Bedienung des in Kapitel 3.1 definierten Automationsspektrums. Der Schwerpunkt liegt dabei an der Schaffung durchgängiger und konsistenter Modalitäten für die Bedienung des Spektrums. Abschnitt 3.3.1 erläutert die grundlegenden Konzepte zur Bedienung des Automationsspektrums. Die heute geläufigen Bedienkonzepte von Seriensystemen der TA werden diskutiert. Zusätzlich muss der Systementwickler Möglichkeiten zur Einflussnahme durch den Fahrer in den Modi MF und AUTON berücksichtigen. Ein Schwerpunkt des

Kapitels liegt auf der Bedienung im Modus VA. Zum einen soll das Bedienkonzept der VA dem Fahrer die Bedienung der erweiterten funktionalen Möglichkeiten zukünftiger Systeme der VA verfügbar ermöglichen. Zum anderen soll das Bedienkonzept die Anforderungen des Potentialtriggerkonzepts zur Bestimmung eines Fahrers *im Loop* erfüllen. Abschnitt 3.3.2 beschreibt die Applikation dieser Bedienphilosophie für das Automationsspektrum im Rahmen eines reduzierten Bedienkonzepts. Die Grundidee besteht hier in einer größtmöglichen Reduktion der Anzahl von Stellteilen bei einer gleichzeitigen Funktionsintegration bestehender Bedienelemente. Abschnitt 3.3.3 entwickelt neue Bedienelemente, die Handhabung des gesamten Spektrums wird hier über jeweils ein integratives Stellteil ermöglicht. Abschnitt 3.3.4 versucht, die Manipulation der aus funktionaler Sicht stark unterschiedlichen Modi durch Modus-spezifische Bedienelemente darzustellen. Abschnitt 3.3.5 fasst die entwickelten Bedienkonzepte zur Bedienung des Automationsspektrums zusammen.

### 3.3.1 Bedienkonzept des definierten Automationsspektrums

Zur Bedienung des Automationsspektrums ist es notwendig, den Wechsel zwischen den Automationsstufen in der vorgesehenen Ausprägung zu ermöglichen. Innerhalb eines Modus müssen die Möglichkeiten zur Bedienung des vorliegenden Systems gegeben sein. Für die Modi MF und AUTON sind die Möglichkeiten zur Interaktion für den Fahrer aufgrund der gewählten Systemauslegung stark eingeschränkt. Da in der MF keine Einstellmöglichkeiten innerhalb des Modus vorgesehen sind, beschränken sich die Möglichkeiten der Interaktion auf die Transition in Modi höherer Automation (Abschnitt 3.3.1.1). Im Modus AUTON muss der Fahrer per Definition nicht mehr als Rückfallebene zur Verfügung stehen. Entsprechend sind auch hier keine Möglichkeiten zur Parametrierung oder zum Triggern von Manövern vorgehalten (Abschnitt 3.3.1.4). Der Modus TA ist hingegen im weiten Sinn an die heutigen Möglichkeiten zur Parametrierung und Systemeinstellung angelehnt. Repräsentiert wird der Modus durch ein FSRA-System, die in Abschnitt 2.3.1.1 beschriebenen Interaktionsmöglichkeiten des Systems sollen durch ein neuartiges Bedienkonzept weitgehend übernommen werden. Das neue Konzept wird nicht mit der Ambition entwickelt, einen Ersatz oder eine Verbesserung der aktuell verfügbaren Bedienkonzepte auf der Lenkradspeiche oder mittels eines Lenkstockhebels zu schaffen. Zentrales Anliegen ist vielmehr die durchgängige Güte des Bedienkonzepts über das gesamte Spektrum (Abschnitt 3.3.1.2). Der SPA des Modus VA übernimmt vom Fahrer die komplette Fahrzeugführung, ist jedoch weiterhin auf den Fahrer als Rückfallebene angewiesen. Der Fahrer soll jedoch nicht in eine reine Überwachungsrolle gedrängt werden. Als Prämisse des Systementwicklers ist seine aktive Einbindung zu ereignisdiskreten Zeitpunkten entsprechend der seriell-sequentiellen Systemauslegung des Regelkreises zu verfolgen. Das in Abschnitt 3.3.1.3 eingeführte Bedienkonzept für den Modus VA ermöglicht dem Fahrer die Beeinflussung des SPA über eine neuartige *Parameter- und Manöverschnittstelle (PMS)* auf Basis eines Master-Slave-Ansatzes. Diese Schnittstelle erlaubt dem Fahrer die Parametrierung quasi-stationärer Zustände (z.B. Frei- oder Fahrfahrt innerhalb eines Fahrstreifens) sowie das Antriggern von Fahrmanövern (Fahrstreifenwechsel, Überhölmanöver, etc). Durch die bidirektionale Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation ermöglicht die Schnittstelle außerdem die Rückmeldung von Informationen über den Zustand der Regelstrecke *Fahrzeug* und der Fahrzeugumgebung an den Fahrer. Diese Rückmeldung kann die für die Rückfallebene *Fahrer* vorliegende Informationsdichte zusätzlich erhöhen.

### 3.3.1.1 Konzept für den Modus MF

Für den Modus MF des Automationspektrums werden wenige Interaktionsmöglichkeiten mit dem System benötigt. Der Modus MF zeichnet sich dadurch aus, dass FAS zeitdiskret und situationsabhängig wirken. Für diese FAS sind keine Möglichkeiten zur Einstellung von Systemparametern vorgehalten. Zentral für den Modus MF ist die Möglichkeit zur Aktivierung von höher automatisierten Modi. In Abhängigkeit der konkreten Ausgestaltung der Bedienelemente kann eine hierarchische oder eine unabhängige Aktivierung der einzelnen Modi erfolgen. Führt ein Fahrer beispielsweise im Modus MF und sind aufgrund der aktuellen Verkehrssituation sowohl der Modus TA und der Modus VA verfügbar, kann der Fahrer bei einer hierarchischen Aktivierung der Modi nach einer Aktivierung der TA den Modus VA aktivieren. Eine gleichberechtigte Aktivierung ermöglicht eine von dieser Sequenz losgelöste Aufschaltung der VA.

### 3.3.1.2 Konzept für den Modus TA

Als Trägersystem des Modus TA besteht die Herausforderung für die Bedienkonzeptgestaltung in der Adaption der aktuellen Bedienung des ACC an das neue Bedienkonzept. Wie in Abschnitt 2.3.1.1 dargelegt, hat der Benutzer zum einen die Möglichkeit zur Parametrierung von Systemeinstellungen. Hier kann in einer *simultanen* Bedienung (vgl. Abschnitt 2.1.1.4) die Sollzeitlücke und die Setzgeschwindigkeit verstellt werden. Die Einstellung der Setzgeschwindigkeit stellt sich für den Nutzer durch die Ergänzung des Bedienelement durch eine komplementäre Anzeige als *Folgeaufgabe* dar. Dem Nutzer ist die Führungsgröße (Setzgeschwindigkeit) sowie die Nachführgröße (Istgeschwindigkeit) der Regelung jederzeit bekannt. Die Setzgeschwindigkeit wird bei den meisten Systemen über eine Anzeige im Kombi-Display eingeblendet. Manche Hersteller ergänzen diese temporäre oder dauerhafte Anzeige über eine Darstellung der Setzgeschwindigkeit durch Leuchtelemente im Tachokranz (vgl. Abbildung 2.8). Die aktuelle Geschwindigkeit wird dem Fahrer über den herkömmlichen Tachometer angezeigt.

Die Einstellung der Sollzeitlücke stellt sich für den Nutzer hingegen als *Kompensationsaufgabe* dar. Durch die Betätigung des Verstellelements wird die Differenz zwischen aktueller Zeitlücke und der vom Fahrer gewünschten Zeitlücke angepasst. Weder die Führungs- noch die Nachführgröße sind dem Fahrer als Absolutwerte bekannt.

Zusätzlich hat der Fahrer natürlich die Möglichkeit, durch das zugehörige Bedienkonzept die Systemzustände des ACC S&G zu steuern. Eine wesentliche Verstellmöglichkeit ist die SET-Funktionalität. Gespeicherte Setzgeschwindigkeiten können bei gleichzeitiger Aktivierung des Systems durch RESUME übernommen werden. CANCEL schaltet das ACC in den Zustand *Stand-by*. Hersteller-spezifische Eigenheiten von Bedienkonzepten werden an dieser Stelle vernachlässigt.

Funktionale und konzeptionelle Einschränkungen des Bedienkonzepts der TA im Vergleich zu aktuellen Serienlösungen zur ACC-Bedienung werden in gewissem Rahmen akzeptiert. Die Einordnung des Bedienkonzepts in den größeren Kontext der durchgängigen Bedienung eines Automationspektrums verschiebt die Priorisierung der Güte des Bedienkonzepts des Modus TA in Richtung eines hochwertigen Gesamtkonzepts.

### 3.3.1.3 Konzept für den Modus VA - Master-Slave Parameter- und Manöverschnittstelle

Der in Kapitel 3.1 diskutierte, vollautomatische SPA bietet dem Fahrer die Möglichkeit zur Folge- oder Freifahrt innerhalb des eigenen Fahrstreifens. Das FAS regelt die Geschwindigkeit des Fahrzeugs selbstständig innerhalb der Geschwindigkeitsgrenzen des SPA im Bereich von 0-130 km/h. Wird vom SPA ein regelrelevantes Vorderfahrzeug erfasst, regelt das System auf die im Funktionsalgorithmus hinterlegte Sollzeitlücke. Ist kein Vorderfahrzeug vorhanden, beschleunigt das Fahrzeug bis hin zur oberen Geschwindigkeitsgrenze des Systems. Dieser Zustand wird als *quasi-stationärer Zustand* umschrieben: die Dynamik der sich verändernden Umgebungsbedingungen wird komplett vom FAS verarbeitet, in der Folge stellt sich aus Sicht des Fahrers der Zustand der sich bewegenden Regelstrecke als stationär dar. Der Fahrer ist von allen kontinuierlichen Regeltätigkeiten zur Längs- und Querverführung entbunden. Als verbleibende Aufgabe muss er die vom Potentialtrigger (vgl. Kapitel 3.2) geforderte Betätigung ausführen.

Im quasi-stationären Zustand hat der Fahrer zudem die Möglichkeit, bei Bedarf auf dynamische Rahmenbedingungen zu reagieren und den quasi-stationären Zustand zu parametrieren. Möchte er beispielsweise während der spurmittigen parametrisierten Folgefahrt in einer Stausituation eine Rettungsgasse für sich nähernde Einsatzfahrzeuge bilden, kann dies über die *Parameterschnittstelle* erfolgen. Das Bedienkonzept ermöglicht die Herstellung eines lateralen Versatzes im Fahrstreifen.

Eine weitere Möglichkeit zur Bedienung des Systems ist durch die *Manöverschnittstelle* gegeben. Fährt der SPA zum Beispiel nach längerer Freifahrt auf einer zweispurigen Autobahn innerhalb des eigenen Fahrstreifens auf einen langsameren LKW auf, wird er bei entsprechend passender Verkehrssituation ein Überholen des LKWs einer langsamen Folgefahrt vorziehen. Der Fahrer kann also bei Bedarf einen Wechsel des Fahrstreifens durch das FAS initiieren. In der Modellvorstellung entspricht dieses Manöver einem Wechsel der quasi-stationären Folgefahrt hinter dem LKW in die quasi-stationäre Frei- oder Folgefahrt mit höherer Geschwindigkeit auf dem benachbarten Fahrstreifen. Das Antriggern eines Manövers entspricht damit der Beauftragung des Systems mit einem Wechsel des quasi-stationären Zustands. In diesem konkreten Fall ist der quasi-stationäre Zustand durch die Folgefahrt innerhalb des eigenen Fahrstreifens beschrieben. Das Wechselmanöver wird nach der Beauftragung durch den Fahrer bei gegebenen Umgebungsparametern selbstständig vom SPA ausgeführt.

Ein geeignetes Bedienkonzept für den Modus VA ermöglicht die Parametrierung quasi-stationärer Zustände der Regelstrecke und das Initiieren von Fahrmanövern zum Wechsel quasi-stationärer Zustände, eine *Parameter- und Manöverschnittstelle*. Zusätzlich bietet das Konzept Bedienmöglichkeiten zur Betätigung des Triggers des Interaktionskonzepts aus Kapitel 3.2 sowie zur (De-)Aktivierung des Systems.

**Master-Slave Parameter- und Manöverschnittstelle** Die Bedienmodalitäten der Schnittstelle zur Parametrierung und zum Triggern von Fahrmanövern des Modus VA wird im Rahmen dieser Arbeit durch eine generische *Parameter- und Manöverschnittstelle* umgesetzt. Das Konzept dieser neuartigen, integrativen Schnittstelle ist in [122] beschrieben. Die grundlegende Idee des Konzepts besteht in der Applikation eines Master-Slave-Bedienprinzips. Abweichend vom in Kapitel 2.3 beschriebenen Master-Slave-Ansatz zur kontinuierlichen Fahrzeugführung, wird das Prinzip für eine ereignisdiskrete Interaktion mit einem vollautomatisierten FAS adaptiert.

In der Master-Slave *Parameter- und Manöverschnittstelle* repräsentiert das Bedienelement den *Master* des Regelkreises. Die Regelstrecke *Fahrzeug* repräsentiert den *Slave* des Systems. In der technischen

Umsetzung des Master-Slave-Ansatzes wird der Master als abstrahierte Miniatur der Regelstrecke ausgeführt. Zusätzlich werden die realen Grenzen des Slaves in abstrahierter Form auf das Bedienkonzept projiziert. Die Position des Masters in Relation zu den abstrahierten Umgebungsbedingungen des Slaves kann durch den Nutzer manipuliert werden. Der Slave folgt durch das vollautomatisierte FAS diesen Vorgaben des Nutzers am Master. Auf diese Weise können Parametereinstellungen vorgenommen oder Manöver angetriggert werden. Das generische Prinzip zeichnet sich durch vielfältige Möglichkeiten einer technischen Umsetzung aus.

Zur Bedienung des SPA des Modus VA werden die Regelstrecke und die zentralen Umgebungsparameter in modellhafter Form auf das Bedienelement projiziert. Maßgeblich sind hierfür die Grenzen der Parametrierung und damit die Betätigungsschwellen der Manöver. Für die Schnittstelle eines SPA ist demnach die abstrahierte Darstellung der Spurmarkierungen des aktuell befahrenen Fahrstreifens sowie regelrelevanter Vorderfahrzeuge vorgesehen. Weiterführende Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise die Integration von Geschwindigkeitsvorschlägen und -begrenzungen oder veränderten Breiten von Fahrstreifen in Baustellen sind ebenso denkbar. Die Grundidee des Konzepts ist in Abbildung 3.4 illustriert.

Die *Parametrierung* des Slaves erfolgt durch das Bewegen des Masters innerhalb der durch das Bedienkonzept dargestellten, symbolhaften Grenzen. Die Fahrzeugposition innerhalb des Fahrstreifens folgt der beliebig wählbaren Position des Slaves innerhalb der projizierten Umgebungsrestriktionen. Beispielsweise wird die Herstellung eines lateralen Versatzes innerhalb des Fahrstreifens durch eine Annäherung des Bedienelements an die Fahrstreifenmarkierung herbeigeführt. Eine Annäherung an ein Vorderfahrzeug erfolgt entsprechend durch eine Annäherung des Stellelements an das virtuelle, als haptische Rückmeldung auf das Bedienkonzept projizierte Vorderfahrzeug.

Das Nachführen der Längs- und Querposition des Slaves innerhalb des *realen* Fahrstreifens in Relation zur aktuellen Position des Masters innerhalb des *virtuellen* Fahrstreifens erfolgt entsprechend der seriell-sequentiellen Wirkstruktur durch das vollautomatisierte FAS. Eine kontinuierliche Übernahme der Fahrzeugführung durch das Master-Slave-Bedienkonzept ist folglich *nicht* vorgesehen, die Interaktion erfolgt zu ereignisdiskreten Zeitpunkten.

Die Umsetzung der *Manöverschnittstelle* wird dem applizierten Bedienprinzip entsprechend umgesetzt: Wünscht der Fahrer einen Zustandswechsel des Slaves, muss er die virtuellen Grenzen dieses Zustands mit dem Master überstimmen. Einen Wechsel des Fahrstreifens initiiert der Fahrer folglich durch eine richtungsgebundene Betätigung des Stellelements über die auf das Bedienkonzept projizierten Umgebungsbedingungen hinaus.

Ein Überstimmen entsprechend gestalteter virtueller Barrieren kann weitere Manöver antriggern. So sind neben dem Wechsel von Fahrstreifen Manöver wie Überhol-, Abbiege- oder Parkvorgänge vorstellbar. Ist der Zustandswechsel innerhalb einer vorgegebenen Zeit aufgrund passender Umgebungsbedingungen ausführbar, wird das gewünschte Fahrmanöver durch das vollautomatisierte FAS durchgeführt. Nach dem Manöver muss sich die Manöverschnittstelle an den neuen Zustand der Regelstrecke anpassen, respektive eine dynamische Anpassung der Rückmeldung bzw. der Anzeige erfolgen. Abbildung 3.4 illustriert die Grundidee der PMS. Das zentral angeordnete Element repräsentiert eine Miniatur der Regelstrecke. Die maßgeblichen Umgebungsparameter, respektive die Markierungen des aktuellen Fahrstreifens und gegebenenfalls einzuhaltende Abstände zu regelrelevanten Vorderfahrzeugen werden durch virtuelle Grenzen angezeigt. Die PMS ermöglicht die bidirektionale Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation. Neben den Nutzereingaben zur Parametrierung und zum Triggern von Manövern kann die Regelstrecke aktuelle Zustandsinformationen an den Fahrer rückmelden. Durch die abstrahierte Darstellung der Umweltbedingungen in der Slave-Umgebung kann der Fahrer z.B. Rückschlüsse auf die aktuelle Position des Slaves innerhalb des Fahrstreifens oder zu Regelgrenzen des FAS ziehen.

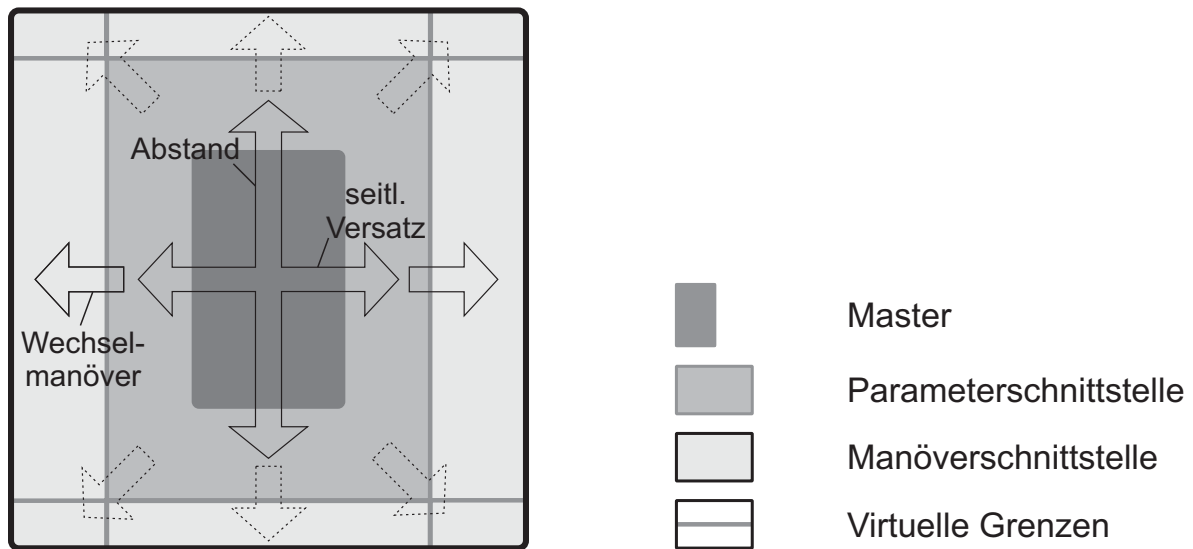


Abbildung 3.4: Allgemeine Darstellung der Parameter- und Manöverschnittstelle (PMS), adaptiert nach [36]

**Mögliche Umsetzungen einer PMS** Die konkrete Umsetzung des generischen Konzepts kann auf Basis verschiedener Bedien- und Rückmeldemodalitäten erfolgen. Für die Bedienung können alle Formen der in Abschnitt 2.3.3.2 diskutierten Interaktionskonzepte aus verschiedenen technischen Disziplinen appliziert werden:

Integrative grafische Umsetzungen der PMS mit einer *Kopplung* von Anzeige- und Bedienort können in Form eines *Touchdisplays* realisiert werden. Stickähnliche Hardware-Lösungen mit variablen und adaptierbaren Kraft-Weg-Verläufen und korrespondierenden Anzeigen im Kombi- oder Head-Up-Display sind eine Möglichkeit zur *örtlich getrennten* Bedienung und Anzeige der PMS.

Der Abstraktionsgrad der Schnittstelle kann dabei unterschiedlich hoch sein. Möglich sind sowohl realistische Darstellungen des Masters und seiner Umgebung in einem Videodisplay, als auch die starke Abstraktion des Fahrzeugs in Form eines mechanischen Stellelements.

Als Kommunikationskanal zur Zustandsrückmeldung des Systems und seiner Parameter stehen vorrangig der optische und der haptische Sinneskanal zur Verfügung. Sinnhafte Kombinationen zur multimodalen Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation verbessern die Schnittstelle zusätzlich. Beispielsweise kann die Bedienung eines Touchdisplays durch haptische Rückmeldung der Bedienung (Vibration des Displays) vereinfacht werden. Der auditive Sinneskanal ist in diesem Zusammenhang als primärer Kommunikationskanal zwischen Fahrer und FAS aufgrund seines vergleichsweise unscharfen Charakters zu vernachlässigen, akustische Signale können jedoch als zusätzliche Reize die Schnittstelle ergänzen.

Die PMS hat den Anspruch, die für ausreichendes Situationsbewusstsein erforderliche Informationsdichte zu erhöhen und die innere Modellbildung des Nutzers zu erleichtern. Die Schnittstelle versucht folglich, den Nutzer bei der Ausführung der Folgeaufgabe zur Bedienung des Modus VA durch die Unterstützung der inneren Modellbildung zu unterstützen.

Durch eine geeignete Gestaltung der Schnittstelle können dem Fahrer bei Bedarf auch im vollautomatischen Betrieb Informationen zum aktuellen Zustand der Regelstrecke und zu herrschenden Umgebungs-

bedingungen kommuniziert werden. Auf diese Weise soll der Fahrer zusätzlich dabei unterstützt werden, ein valides Modell der Funktionalität des FAS und seiner Systemgrenzen aufzubauen.

Im Vergleich zu der in Abschnitt 2.3.3.1 vorgestellten Manöverschnittstelle (Conduct-by-Wire) werden bei der PMS die Manöver und die Umgebungsparameter nicht vollständig abstrahiert. Anstatt einer rein grafischen Interpretation und Darstellung der Manöver als Icons bedient sich die PMS einer modellhaften Repräsentation des Egofahrzeugs und seiner Umgebung als Basis der Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation im Modus VA. Auf diese Weise besteht weiterhin eine Kopplung zwischen der Funktion des FAS und der Bedienung durch den Nutzer.

#### 3.3.1.4 Konzept für den Modus AUTON

Das Bedienkonzept für den Modus AUTON orientiert sich vom Grundsatz an der Ausprägung der Bedienmöglichkeiten des Modus MF. Da der Fahrer nicht mehr als Rückfallebene des autonomen FAS zur Verfügung stehen muss, wird er komplett aus dem Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis herausgelöst. Seitens des Bedienkonzepts stehen dem Fahrer keine Möglichkeiten zur Parametrierung des Systems zur Verfügung. Neben einer Statusanzeige zur Kommunikation des Systemzustands wird dem Fahrer noch eine Möglichkeit zur Deaktivierung des Modus AUTON angeboten.

Ein visionäres autonomes System ist mit ausreichender funktionaler Kompetenz ausgestattet, um sämtliche Situationen adäquat handhaben zu können. Die Anforderung an eine schnellstmögliche Übernahme der Fahrzeugführung durch den Fahrer ist in diesem Fall nicht mehr gegeben. Es können daher die etablierten Standardbedienelemente zur Fahrzeugführung aktiv aus dem direkten Zugriff des Fahrers entfernt werden. So kann das Lenkrad beispielsweise durch ein geeignetes Bedienelement zur Interaktion mit dem umfangreichen Infotainmentsystem eines autonomen STP ersetzt werden. Alternativ kann das Lenkrad ersatzlos aus dem Zugriff verfahren. Dieses *Wegfahren* oder *Wegklappen* des Lenkrades eröffnet nicht nur aus anthropometrischer Sicht neue Potentiale der innovativen, großzügigen Innenraumgestaltung. Es ermöglicht auch neue Wege der Integration von Infotainmentfunktionen im Fahrzeug. Auch die Pedale können in diesem Fall aus ihrer ursprünglichen Position verfahren oder durch andere Elemente ersetzt werden. Vorstellbar ist beispielsweise ein Ersatz der Pedale durch eine durchgängige, feststehende Fußablage zur Steigerung des Komforts.

Zusammenfassend ist es das zentrale Anliegen für den Modus AUTON, den Systemzustand eindeutig und unmissverständlich zu kommunizieren. Dem Fahrer muss klar sein, dass er sich in einer komplett unterschiedlichen Rolle *außerhalb* des Regelkreises befindet. Die Wegnahme von Möglichkeiten zur Einflussnahme auf das System und das Verfahren der Bedienelemente zur Erfüllung der primären Fahraufgabe müssen durch eine geeignete Anzeige unterstützt werden.

Ein detaillierter Entwurf des HMI des Modus AUTON ist nicht Teil dieser Ausarbeitung, die Arbeit versucht jedoch Ansatzpunkte für zukünftige Gestaltungsmöglichkeiten zu liefern. Ein Schwerpunkt der weiteren Ausarbeitung wird auf der Entwicklung neuer Anzeigemöglichkeiten im Fahrzeuginnenraum, auf der Integration neuer Bedienteile für sekundäre und tertiäre Aufgaben im Fahrzeuginnenraum und der Weiterentwicklung dieser Infotainmentinhalte liegen müssen. Damit entzieht sich die Gestaltung des Modus AUTON in weiten Teilen dem Ansinnen dieser Arbeit, der Entwicklung eines Konzepts für das automatisierte Fahren.





### 3.3.1.5 Interstrukturelle Transitionen des Automationspektrums

Das allgemeine Bedienkonzept folgt in der Systematik der Bedienung der Definition des Automationspektrums aus Kapitel 3.1. Die Aufschaltung von Modi mit höherem Automationsgrad erfolgt in Abhängigkeit der entwickelten Bedienkonzepte hierarchisch oder unabhängig. Wird ein Modus durch den Fahrer durch einen Eingriff in die Fahrzeugführung oder durch Betätigung des entsprechenden Bedienelements deaktiviert, ist die Rückfallebene des Automationspektrums immer der *Modus TA* im Zustand *Stand-by*. Diese Ausprägung erfolgt auf Basis der Anforderung, dem Nutzer die Möglichkeit zur Ausbildung eines einheitlichen und verständlichen inneren Modells zu ermöglichen. Als grundsätzliche Regel wird der Fahrer also lernen, dass bei der Deaktivierung des aktuell aktiven Modus jede aktive Regeltätigkeit des Systems eingestellt wird und der Modus TA im Zustand *Stand-by* als Rückfallebene aktiv wird. Für den Fahrer bietet sich ein einheitliches Bild, da nun jede Form der top-down-Modus-Deaktivierung durchgängig gehandhabt wird. Sowohl systeminitiierte Abschaltungen als auch Fahrerinteraktionen - egal welcher Natur - in den Modi VA und AUTON haben *immer* eine Deaktivierung des aktuellen Modus und einem Rückfall in den Modus TA im Zustand *Stand-by* zur Folge. Der Modus TA bildet hier auf Basis des bereits vorhandenen inneren Modells zur FSRA-Systemstruktur eine Ausnahme hinsichtlich der Betätigung des Gaspedals und des Lenkrads (vgl. Kapitel 2.3).

Jeder Modus bietet dem Nutzer mindestens die Bedienmöglichkeit, bei gegebener Verfügbarkeit einen *bottom-up*-Moduswechsel zu initiieren. Zusätzlich kann noch die Anwahl einzelner Modi über separate Bedienschritte gegeben sein. Neben dem Fahrereingriff in die Bedienelemente bietet das Bedienkonzept außerdem die Möglichkeit, den aktuell aktiven Modus durch Betätigung einer Taste zu deaktivieren und den Rückfall-Modus anzusteuern.

### 3.3.1.6 Zusammenfassung Bedienkonzept des Automationspektrums

Das in Abschnitt 3.3.1 dargelegte Bedienkonzept stellt ein für die einzelnen Modi des Automationspektrums optimiertes Bedienkonzept dar. In Kombination mit den beschriebenen Modus-Transitionen (vgl. Abschnitt 3.3.1.5) erlaubt die beschriebene Ausprägung des Bedienkonzepts die durchgängige und einheitliche Bedienung des Spektrums. Während im Modus MF analog dem Modus AUTON außer dem bottom-up- bzw. top-down-Moduswechsel keine Möglichkeit zur Interaktion vorgehalten werden muss, versucht das Konzept im Modus TA die Bedienung und Funktionalität des aktuellen, parallel-sequentiellen Serien-ACCs so weit wie möglich abzubilden und zu erhalten. Das Konzept will keine Alternative zu aktuellen Bedienkonzepten der Längsführungsautomation, sondern ein stimmiges Gesamtkonzept für das gesamte Spektrum entwickeln. Für die Bedienung des Modus VA wird eine neue Bedienphilosophie vorgestellt. Die Parameter- und Manöverschnittstelle ermöglicht die bidirektionale Fahrer-Fahrzeug-Kommunikation in einem seriell-sequentiellen Wirkgefüge zwischen Fahrer und FAS. Der Nutzer kann mit Hilfe dieser neuartigen Schnittstelle die Längs- und Querablage des eigenen Fahrzeugs innerhalb der begrenzenden Situationsparameter wählen (Parameterschnittstelle). Durch Übereinstimmen dieser begrenzenden Parameter werden der Betätigung entsprechende Manöver initiiert (Manöverschnittstelle).

### 3.3.2 Reduzierte Konzepte

Bei der Entwicklung von Benutzerschnittstellen für komfortorientierte FAS der Führungsebene wird häufig der Weg beschritten, für neue Funktionen zusätzliche Bedienelemente ins Fahrzeug oder in bestehende Bedienelemente zu integrieren. Lenkstockhebel zur Bedienung von GRA- oder ACC-Systemen repräsentieren typische Beispiele dieser Form der Neuentwicklung. Die Bedieninsel in der Lenkradspeiche zur Bedienung von GRA- und ACC-Systemen von Fahrzeugen der BMW AG (vgl. Abschnitt 2.3.1.1) ist ein Beispiel für die Integration neuer Betätigungselemente in bestehende Stellteile.

Die Kategorie der *Reduzierten Konzepte* schlägt einen entgegengesetzten Weg ein. Ziel der Konzepte ist es, die Nutzerinteraktion mit den Systemen des Automationsspektrums durch das in Abschnitt 3.3.1 dargelegte Bedienkonzept auf Basis einer *Minimierung der Anzahl* neuer Bedienelemente zu realisieren. Um die größere Komplexität des zu bedienenden Automationsspektrums handhaben zu können, ist für diesen Ansatz eine weitreichende Funktionsintegration der bestehenden Bedienelemente nötig. Eine Stellteilintegration bzw. eine Integration neuer Stellteile erfolgt lediglich im unvermeidbaren Rahmen. Die Handhabung der verbleibenden Funktionsvielfalt erfolgt über die funktionale Erweiterung der Elemente Lenkrad, Gas- und Bremspedal unter Einbeziehung des haptischen Informationsaufnahme kanals. Die Nutzung und Funktionalität der FAS werden angepasst bzw. rational vereinfacht. Eine konkrete Umsetzung der Kategorie der *Reduzierten Konzepte* ist durch das in Abschnitt 3.3.2.1 beschriebene Konzept *Standardbedienelemente* ausgeführt. Die Konzeptkategorie und die beschriebene Umsetzung aus Abschnitt 3.3.2.1 ist in [123] beschrieben.

#### 3.3.2.1 Konzept *Standardbedienelemente*

Das reduzierte Bedienkonzept *Standardbedienelemente* beschreibt eine Umsetzung der *Reduzierten Konzepte*. Weitere Ausführungsideen sind vorstellbar, werden im Rahmen dieser Ausarbeitung jedoch nicht beschrieben. Das in Abbildung 3.5 prinzipiell skizzierte Konzept besteht aus lediglich einem zusätzlichen Stellelement zur bottom-up-Aktivierung der Automationsmodi und zum top-down-Übergang aus einem Modus mit höherem Automationsgrad in den Rückfallmodus TA. Dieses Element wird als monostabiles Wippelement ausgeführt und in die linke Lenkradspeiche integriert. Eine Betätigung nach oben ermöglicht bei gegebener Verfügbarkeit die *hierarchische* Aufschaltung des nächsten Modus. Eine Betätigung nach unten hat stets einen Übergang in den Rückfallmodus zur Folge. Die übrigen Funktionen der jeweiligen Modi werden über aktiv ausgeführte Standardbedienelemente realisiert. Das Lenkrad, das Gas- und das Bremspedal werden durch geeignete Aktorik mit der Möglichkeit zur Rückmeldung variabler Kraft-Weg-Verläufe versehen. Die Bedienung der einzelnen Modi auf Basis des Bedienkonzepts aus Abschnitt 3.3.1 ist in den folgenden Abschnitten beschrieben.

**Bedienung des Modus MF** Im Modus MF kann der Fahrer durch einmalige Betätigung des monostabilen Wippelements den Moduswechsel initiieren. Diese Funktionalität entspricht der Aktion *AUTOMATIONSGRAD ERHÖHEN (A+)*. Es wirken die unterlagert, zeitdiskret eingreifenden FAS des Modus MF. Die Kennlinien der Elemente Lenkrad, Gas- und Bremspedal entsprechen der Serienauslegung.

**Bedienung des Modus TA** Bei der Aktivierung des Modus TA befindet sich die teilautomatisierte Längsführung im Zustand *Stand-by*. Dem Grundprinzip der Konzeptkategorie (*reduziert*) folgend entfällt

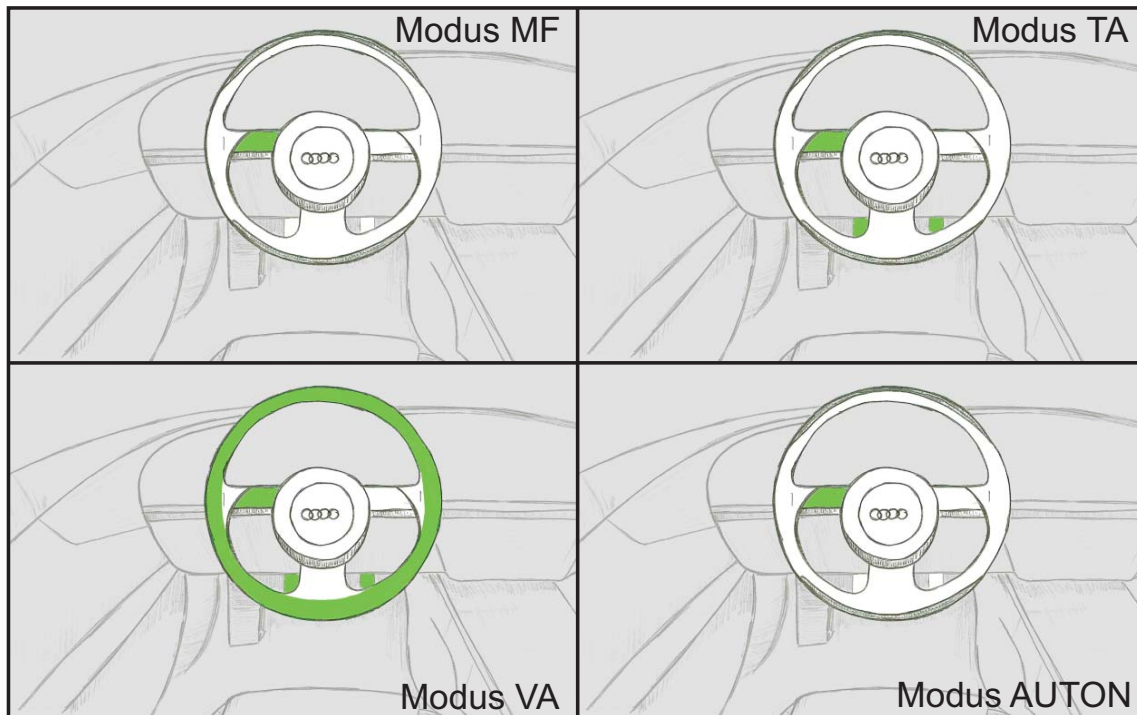


Abbildung 3.5: Prinzipdarstellung Reduziertes Konzept *Standardbedienelemente*, adaptiert nach [100] durch [43]

eine separate SET-Funktionalität. Um das ACC S&G zu aktivieren, betätigt der Fahrer erneut A+. Dies entspricht im Grundsatz der SET-Funktionalität. Die aktuell gefahrene Geschwindigkeit wird als Setzgeschwindigkeit übernommen und die Längsregelung wird aktiv. Der Nutzer folgt mit der Betätigung von A+ der logischen Kette der Erhöhung des Automationsgrades. Für eine Deaktivierung der Regelung betätigt der Fahrer das monostabile Wippelement am Lenkrad nach unten (CANCEL), der Modus TA wechselt in den Zustand *Stand-by*. Durch eine längere CANCEL-Betätigung (*longpush*) wechselt das System in den Modus MF. Der Wechsel muss zur besseren Verständlichkeit durch optische Anzeigeelemente unterstützt werden.

Zur *Parametrierung der TA* stehen dem Fahrer das Gas- und das Bremspedal zur Verfügung. Die Bedienung der TA im Rahmen eines Konzepts der *reduzierten* Kategorie ist im Vergleich zu heutigen Serienauslegungen leicht abgeändert und z.T. eingeschränkt.

Grundsätzlich werden beide Elemente durch geeignete Aktorik zur flexiblen, adaptiven Steuerung ihrer Kraft-Weg-Verläufe erweitert. Außerdem müssen die Algorithmen der Steuergeräte zur Verarbeitung der Nutzereingaben über die Pedale als Eingabemedien des ACC-Steuergeräts angepasst werden. Die technische Adaption der Stellelemente ist nicht Teil dieser Arbeit, für die Umsetzung eines aktiven Standardbedienelements sei exemplarisch auf [24] verwiesen.

Die Einstellung der Setzgeschwindigkeit wird über die beiden Pedale vorgenommen. Der Fahrer muss das Fahrzeug bei aktivem ACC durch Betätigung des Brems- oder Gaspedals auf die gewünschte Fahrgeschwindigkeit beschleunigen. Die gewählte Geschwindigkeit übernimmt das ACC als aktive Setzgeschwindigkeit.

Das *Bremspedal* weist dabei eine Betätigungscharakteristik analog der heutigen Serienauslegung eines AUDI Q7 mit aktiver Pedalnachführung auf. Das Pedal wird in Relation zu der vom ACC geforderten Bremswirkung aktiv nachgeführt. Fahrereingaben über das Bremspedal werden vom ACC abweichend der heutigen Auslegung interpretiert: Das ACC wird aufgrund fahrerinitiiertter Bremsungen nicht mehr deaktiviert, sondern geht vergleichbar der Betätigung des Gaspedals in einen *Override*-Zustand.

Das *Gaspedal* gibt bei diesem Konzept die aktuell angeforderte Leistung (d.h. die gewählte Setzgeschwindigkeit) durch eine aktiv nachgeführte Pedalstellung wieder. Beispielsweise wird bei einer Betätigung des Bremspedals zeitgleich die Position des Gaspedals an die verringerte Leistungsanforderung durch das ACC-Steuergerät angepasst.

Die Möglichkeit zur Deaktivierung der TA ist für den Fahrer auf Basis des adaptiven Kraft-Weg-Verlaufs der Pedale weiterhin gegeben. Beide Pedale werden in Anlehnung an die Betätigungscharakteristik eines *Kick-Downs* des Gaspedals bei Fahrzeugen mit Automatikschaltgetrieben mit einer überstimmbaren Barriere im dynamischen Kraft-Weg-Verlauf versehen. Ein Übertreten dieser Barriere am Brems- und am Gaspedal entspricht einem CANCEL. Eine Betätigung innerhalb dieser Barrieren erlaubt eine Einstellung der Setzgeschwindigkeit, die Regelung verbleibt dabei aktiv.

Die Verstellung der Sollzeitlücke erfolgt analog der Wahl der Setzgeschwindigkeit über die Betätigung der Pedale in der Folgefahrt. Die Kraft-Barrieren im Betätigungsverlauf der Pedale können in der Folgefahrt an die Fahrsituation angepasst werden, d.h. durch die Projektion einer minimalen bzw. maximalen Sollzeitlücke auf den Kraft-Weg-Verlauf der Pedale kann der Nutzer anhand der Betätigungscharakteristik zwischen einer Folge- und einer Freifahrt unterscheiden. Die Setzgeschwindigkeit verbleibt während der Folgefahrt auf dem voreingestellten Wert, kann aber durch eine Senke im Kraft-Weg-Verlauf hinterlegt werden. Betätigt der Fahrer während der Folgefahrt innerhalb der am Gaspedal anliegenden Grenzen das Gaspedal, fährt er innerhalb der Systemgrenzen des ACC näher an das Vorderfahrzeug auf. In der Freifahrt ist das FSRA in der Lage, bis hin zu Fahrgeschwindigkeiten von 250 km/h die Längsregelung auszuführen. Eine haptische Barriere zur Kommunikation der Systemgrenzen kann daher bzgl. der haptischen Charakteristik analog der heutigen Standardbetätigungscharakteristik des Gaspedals ausgelegt sein. Folglich entspricht eine *Kick-Down* Betätigung am Gaspedal einem Übertreten der Systemgrenze des ACC und triggert die CANCEL-Funktionalität.

Zusammenfassend werden über die in die Betätigungscharakteristika der Pedale eingespielten, haptischen Barrieren die jeweils vorliegenden Systemgrenzen der TA kommuniziert. In der Folgefahrt können die minimale und maximale Zeitlücke eingespielt werden. In der Freifahrt kann das Bremspedal die vom System maximal bereitstellbare Bremskraft wiedergeben. Die durch das Gaspedal anforderbaren Beschleunigungen liegen innerhalb der Systemgrenzen des ACC. Die über einen Kick-Down erreichbare, maximale positive Beschleunigung des Fahrzeugs überschreitet die ACC-Systemgrenzen.

Eine Verstellmöglichkeit der Setzgeschwindigkeit sowie eine RESUME Funktionalität während des *Stand-by*-Zustands der TA entfallen konzeptbedingt. Der Anfahrtrigger kann analog der heutigen Serienauslegung über ein Antippen des Gaspedals erfolgen. Das Beschleunigungsverhalten des Fahrzeugs wird bei der Anwahl neuer Setzgeschwindigkeiten oder Sollzeitlücken vom Fahrer bestimmt. Aufgrund des Entfalls der vorauseilenden Geschwindigkeitseinstellung bedeutet dies einerseits einen Komfortverlust im Vergleich zu aktuellen ACC-Systemen. Andererseits erhöht sich dadurch die Kompetenz des Fahrers im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis.

**Bedienung des Modus VA** Die Umsetzung der Master-Slave-PMS erscheint im Kontext der *Reduzierten Konzepte* nur eingeschränkt realisierbar. Die Installation einer abstrahierten Miniatur der Regel-

strecke als Bedienelement im Fahrzeuginnenraum widerspricht der Grundidee der Reduktion. Ein Übertrag der PMS auf das Konzept *Standardbedienelemente* erfolgt entsprechend nicht durch die Schaffung eines Hardware-Masters im Fahrzeuginnenraum. Vielmehr wird das Konzept durch eine abstrahierte Integration der virtuellen Barrieren der PMS in die Betätigungsverläufe der Bedienelemente des Konzepts umgesetzt. Die modellhafte, miniaturisierte Regelstrecke wird auf das Lenkrad, das Brems- und das Gaspedal aufgeteilt. Die Zustandsrückmeldung erfolgt einerseits haptisch über die Stellelemente, andererseits muss zur Steigerung der Systemtransparenz eine komplementäre Anzeige nach dem Master-Slave-Prinzip der PMS implementiert werden.

Als Erweiterung zum Modus TA wird für die PMS der VA zusätzlich zu aktivem Gas- und Bremspedal ein aktives Lenkrad als Stellelement verwendet. Die Schwellen der PMS werden durch steile und hohe Anstiege in den Kraft-Weg-Verläufen der Bedienelemente realisiert. Für das Lenkrad ergibt sich ein Korridor, innerhalb dessen der Fahrer in Einklang mit der seriell-sequentiellen Wirkstruktur des SPA einen Querversatz im Fahrstreifen herstellen kann. Nähert sich das Fahrzeug der Fahrstreifenmarkierung und damit der Schwelle der Parameterschnittstelle, steigt die Gegenkraft im Lenkrad an. Zum Triggern eines Wechsels des Fahrstreifens muss diese Barriere überwunden werden. Die Unterscheidung zwischen einer Fahrzeugübernahme durch den Fahrer und einem Manövertrigger erfolgt durch eine systemseitige Interpretation des Lenkverhaltens des Fahrers. Ruckartige oder sehr kräftige Lenkbewegungen des Fahrers führen zum Abwurf des Systems, kontinuierliche, ruhige Lenkbewegungen triggern ein Manöver. Eine weitere Möglichkeit zur Unterscheidung ist das Lenkverhalten *nach* der Schwellenbetätigung. Liegt nach dem Trigger weiterhin ein Handlenkmoment an, ist dies unter Umständen ein Indiz für die Absicht einer Fahrerübernahme. Wird im Anschluss an den Trigger kein Handlenkmoment detektiert, kann der Trigger als Manöveraufforderung interpretiert werden. Für diese Unterscheidung ist es wesentlich, im Entwicklungsprozess charakteristische Kennlinien der jeweiligen Lenkverhalten zu ermitteln um die Validität der getroffenen Annahmen zu überprüfen.

Die Pedalerie verhält sich unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften des Modus VA ähnlich dem teilautomatisierten Betrieb. Die haptischen Barrieren des Modus werden an die feststehenden Systemgrenzen des Modus VA angepasst. Diese im Vergleich zum Modus TA geringe Abweichung widerspricht der eindeutigen haptischen Unterscheidbarkeit der Modi. Alternativ können die Bedienelemente innerhalb der Systemgrenzen von ihrer Standardfunktionalität entkoppelt werden, d.h. Betätigungen der Pedale haben keine Auswirkungen auf die Fahrzeugdynamik.

Der Anfahr- bzw. Potentialtrigger kann in Weiterführung der Analogie zum Modus TA durch eine Betätigung des Gaspedals erfolgen. Dies hat eine eingeschränkte Überwachung des Kontrollparameters *Einsatzbereite Hände* des Potentialtriggerkonzepts zur Folge. Eine Alternative ist die Interpretation von Betätigungen am Lenkrad als Trigger, allerdings werden in diesem Fall vom Fahrer gegebenenfalls ungewollte Parametrierungen der Querverführung verlangt. Eine Betätigung des Triggers über A+ ist nicht möglich, da bei gegebener Verfügbarkeit durch A+ der Modus AUTON aktiviert werden kann.

**Bedienung des Modus AUTON** Wird von der Umfeldwahrnehmung und der Funktion der Modus AUTON freigegeben, wird dies dem Fahrer durch eine geeignete Anzeige kommuniziert. Durch eine Betätigung von A+ wechselt der Fahrer in den autonomen Modus. Er muss in der Folge nicht mehr als Rückfallebene zur Verfügung stehen, es ist daher möglich die Standardbedienelemente aus dem direkten Zugriff des Fahrers zu entfernen. Lediglich die Deaktivierung des Modus durch die CANCEL-Betätigung auf der Lenkradspeiche muss weiterhin verfügbar sein. Dies kann durch eine geeignete Kinematik zum Verfahren bzw. Wegklappen des Lenkrads ermöglicht werden. Das Konzept eines in der Instrumententafel versenkbaren Lenkrads wird zum Beispiel in [52] vorgestellt. Die Pedale können in der aktuellen

Position verriegelt und unterhalb einer Mindestaufstandskraft als Fußstütze dienen. Alternativ können die Pedale beispielsweise in Fahrtrichtung weggeklappt werden. Während des Betriebs der VA müssen dem Fahrer erweiterte Anzeigehalte und Bedienmodalitäten für das Infotainmentangebot zur Verfügung stehen.

### 3.3.2.2 Diskussion

Die Konzeptkategorie *Reduziert* wirkt dem allgemeinen Trend zur einhergehenden Erhöhung der Anzahl von Bedienelementen im Fahrzeug-Innenraum bei der Erweiterung von Anzahl und Funktionsvielfalt der FAS entgegen. Eine bewusste Vermeidung zusätzlicher Komplexität der ohnehin vielfältigen und aufwendigen Bedienkonzepte in vielen Fahrzeugen erscheint vorteilhaft. Weitere Potentiale des Konzepts sind die zusätzlichen Möglichkeiten der haptischen Kommunikation externer Verkehrseinflüsse wie Geschwindigkeitsvorschläge einer Car-to-X Infrastruktur für den Modus TA (z.B. Ampeln, Verkehrszeichen). Durch die stetige Interaktion des Fahrers mit den Standardbedienelementen wird der Fahrer für die Modi TA und VA nicht zu weit aus dem Loop genommen. Ein weiterer positiver Aspekt tritt durch die stärkere Nutzung des haptischen Kanals zur Kommunikation von Fahrer und FAS auf.

Die Tragweite dieses Effekts kann unter Umständen durch die mangelnde Unterscheidbarkeit der haptischen Rückmeldungen der Pedale in den Modi TA und VA eingeschränkt werden. Durch diesen Faktor muss die systemseitige Zustandskommunikation ergänzend auf dem ohnehin stark belasteten visuellen Kanal erfolgen. Die Möglichkeit zur Kommunikation der relevanten Umgebungsinformationen über aktiv ausgeführte Bedienelemente ist bisher nur in Ansätzen untersucht. Während für das Gaspedal (z.B. [73]) und das Lenkrad (z.B. [70]) belastbare Untersuchungen zu verwandten Themen existieren, sind keine zuverlässigen Aussagen zur haptischen Anzeige diskreter Grenzen im Bremspedal bekannt. Ein potentielles Grundsatzproblem ergibt sich durch die Einschränkungen des bisherigen Funktionsumfangs durch die neuartige Form der Bedienung. Zusätzlich sind Komforteinbußen für die Bedienung der TA durch eine Verlagerung der Bedienung weg von handbetätigten Bedienelementen (Lenkstockhebel, Tastenmodule in der Lenkradspeiche etc.) auf fußbetätigte Pedale zu erwarten. Die Entlastung des Fahrers durch den Wegfall der Notwendigkeit einer kontinuierlichen Pedalbetätigung ist für die TA folglich als geringer einzustufen. Auch im Modus VA ist die Entlastung des Fahrers durch eine komplette Entkopplung von den Bedienelementen der primären Fahraufgabe ein wesentlicher Aspekt. Das Konzept *Standardbedienelemente* entkoppelt den Fahrer von den Bedienelementen, zwingt ihn jedoch gleichzeitig zu einer Bedienung über das Lenkrad und die Pedale. Dieser Interessenskonflikt kann sich ebenfalls negativ auf die Akzeptanz der *reduzierten* Konzeptkategorie auswirken. Als weitere Einschränkung des Konzepts wird die unvorteilhafte Darstellung der PMS durch die Aufteilung der miniaturisierten Regelstrecke auf drei Bedienelemente gesehen. Die Unterstützung des Nutzers bei der Bildung eines inneren Modells des FAS erscheint eingeschränkt.

Als Konsequenz ist für eine praktische Weiterentwicklung dieses theoretischen Konzepts neben der technischen Realisierbarkeit der benötigten, hochfunktionalen by-Wire-Bedienelemente außerdem die Akzeptanz mit vergleichbaren Bedienkonzepten des Automationsspektrums zu untersuchen.

### 3.3.3 Integrative Konzepte

Die Kategorie der *Integrativen Konzepte* beschreibt Umsetzungen auf Basis des Prinzips einer weitgehenden Integration der Bedienung des Automationsspektrums und seiner einzelnen Modi an einem

Bedienort in ein neuartiges Bedienelement. Angetrieben wird diese Entwicklung durch eine absehbare Ausreizung aktueller Bedienelemente durch die Erweiterungen des Automationsspektrums. Aktuelles Beispiel ist der ACC-Bedienhebel von Fahrzeugen der AUDI AG (z.B. AUDI A6 ab Baujahr 2011). Aufbauend auf dem Bedienelement einer GRA wird im Zuge der funktionalen Erweiterung durch die Abstandsregelung mit der Einführung des ACC ein weiteres Betätigungselement (monostabiles Wippenelement auf der Oberseite des Hebels) in das Bedienelement integriert. Dieser Weg erscheint aufgrund der weitreichenden, funktionalen Erweiterung des verfügbaren Spektrums auf Dauer nicht zielführend. Die folgenden Konzeptideen integrieren die Bedienung des Automationsspektrums durch Variabilität hinsichtlich ihrer Gestalt in Form und Aussehen, ihrer Betätigungscharakteristik und ihrer Position. Ein *Hebel*konzept zur Bedienung des Spektrums in vier unterschiedlich zu bedienenden Positionen wird vorgestellt (Abschnitt 3.3.3.1). Ein als *Drehdrücksteller* ausgeführtes Konzept ermöglicht die Bedienung durch Variation seiner Gestalt und seiner Betätigungscharakteristik (Abschnitt 3.3.3.3). Einen ähnlichen Weg verfolgt das Konzept *Handballenablage* (Abschnitt 3.3.3.2). Die Bedienung des Spektrums erfolgt hier über die adaptive Variabilität der verfügbaren Stellelemente und eine angepasste Betätigungscharakteristik. Das Bedienelement dient zusätzlich als Handballenablage der Infotainment-Bedieneinheit des Fahrzeugs.

Die Prinzipskizzen der diskutierten Konzepte zeigen eine Positionierung der Bedieneinheiten in der Mittelkonsole. Der ausgesprochen komfortablen Erreichbarkeit der Elemente stehen potentielle unbeabsichtigte Betätigungen und die Gefahr der Überfrachtung der Mittelkonsole gegenüber. Vor allem der Beifahrer kann eine kritische Rolle einnehmen. Die Möglichkeit seiner Einflussnahme muss ausgeschlossen werden. Grundsätzlich sind auch andere Positionierungen integrativer Bedienelemente denkbar, beispielsweise ist eine Verlagerung der Elemente auf eine breite Armablage in der Türverkleidung möglich.

### 3.3.3.1 Konzept *Hebel*

Das in Abbildung 3.6 skizzierte, integrative Bedienkonzept *Hebel* verfolgt die Bedienung des Automationsspektrums über ein Bedienelement in Hebelform. Das Konzept ist in [127] detailliert. Das einseitig gelagerte Bedienelement kann vier diskrete Positionen einnehmen. Weitere Betätigungselemente sind in die dem Fahrer zugewandte Stirnseite des Hebels integriert. Die vier Positionen repräsentieren die einzelnen Modi. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen bzgl. ihrer Positionierung in x- und z-Richtung, durch die jeweils verfügbaren Betätigungen und durch die vorliegenden Betätigungscharakteristika. Auf der Oberseite des Hebels befindet sich für den Positionswechsel des Hebels eine mit der Funktionalität A+ (vgl. Abschnitt 3.3.2.1) belegte Taste. Sie wird bei einem Umfassen mit der ganzen Hand nicht ausgelöst. Durch eine Betätigung mit der Fingerspitze erfolgt bei gegebener Verfügbarkeit ein Wechsel in den nächst höheren Automationsmodus. Aufgrund der linearen Anordnung der einzelnen Positionen erfolgt die Aufschaltung hierarchisch. Zur Deaktivierung des aktuell aktiven Modus befindet sich in unmittelbarer Nähe des Hebels auf der Oberseite der Mittelkonsole eine weitere Taste.

**Bedienung des Modus MF** Im Modus MF ist das Bedienelement analog Abbildung 3.6 in der vordersten *Position 1* bündig in der Mittelkonsole versenkt. Aufgrund der als selten zu erwartenden Interaktion wird *Position 1* am Rande des Greifraums der Nutzerpopulation positioniert. Ein Umfassen des Elements ist nicht möglich. Über eine Betätigung von A+ kann der Fahrer in den Stand-by-Zustand des Modus TA wechseln. Initiiert der Fahrer einen Wechsel, verfährt das Bedienelement automatisch in die *Position 2*.

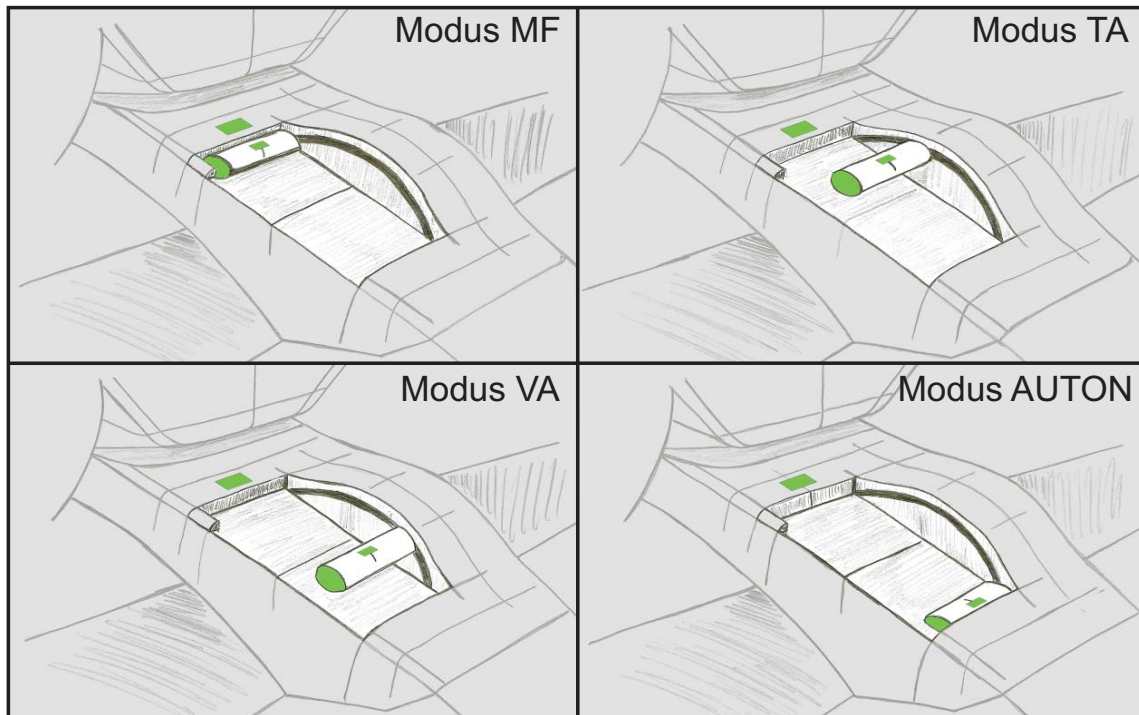


Abbildung 3.6: Prinzipdarstellung Integratives Konzept *Hebel* nach [100]

Bei der dauerhaften Betätigung der Deaktivierungstaste versenkt sich das Element wieder bündig in die Mittelkonsole. Die Auslagerung der Taste und eine Dauerbetätigung zum Verfahren des Hebels vermeiden eine Quetschung der Hand oder der Finger zwischen Bedienelement und Konsole.

**Bedienung des Modus TA** *Position 2* zur Bedienung der TA wird anhand der Prämisse der optimalen Erreichbarkeit während der teilautomatischen Fahrt ausgelegt. Die Positionierung erfolgt anhand des besten Kompromisses für das Umgreifen vom Lenkrad auf das Bedienelement für kleine Frauen und große Männer (vgl. Kapitel 2.2). Das Umgreifen soll nach Möglichkeit ohne Blickabwendung und mit geringem Bewegungsaufwand umgesetzt werden. Die Bedienung des Modus TA setzt sich aus Betätigungen am Hebel und über die Betätigungselemente auf seiner Stirnseite zusammen. Der Hebel ist primär für eine Bedienung durch einen Umfassungsgriff, die Bedienung der seitlich angeordneten Elemente ist für eine Daumenbetätigung ausgelegt. Im Modus TA ist der Hebel in x-Richtung monostabil verschiebbar. Eine longpush-Betätigung in Fahrtrichtung ((+x)-Richtung) setzt die Sollzeitlücke herab, eine äquivalente Betätigung entgegen der Fahrtrichtung vergrößert die Sollzeitlücke des ACC S&G. Eine kurze Betätigung entgegen der Fahrtrichtung (*shortpush*) wird in Analogie zur aktuellen Belegung eines ACC-Lenkstockhebels der AUDI AG als RESUME interpretiert. Zur Umsetzung der BOOST Funktionalität wird in Anlehnung an die Betätigung des Gasgriffs eines Motorrads der Hebels im Uhrzeigersinn um seine y-Achse rotiert. Die Einstellung der Setzgeschwindigkeit wird über eine Wipptaste oder ein monostabiles Wippelement an der Stirnseite des Hebels vorgenommen werden. Die Wippbewegung erfolgt für eine Erhöhung in (+x)-, für eine Verringerung der Setzgeschwindigkeit in (-x)-Richtung. Unmittelbar



neben dem Element zur Einstellung der Sollgeschwindigkeit wird eine weitere Taste integriert. Diese vereint die SET- und CANCEL-Funktionalitäten. Im *ACC Stand-by* wird somit die aktuell gefahrene Geschwindigkeit als aktive Regelgeschwindigkeit übernommen. Ist das ACC aktiv, deaktiviert eine Betätigung der Taste das ACC. CANCEL und SET sind somit als kombinierte ON/OFF-Taste realisiert. Diese Kombination hat einen Wegfall der SET-Funktionalität während des aktiven Betriebs zur Folge. Zur Vermeidung von unbeabsichtigten Betätigungen des Wippelements und der ON/OFF-Taste ist bei der technischen Umsetzung ein geeignetes Konzept zur Positionierung und Ausführung der Elemente zu entwickeln.

Betätigt der Fahrer bei gegebener Verfügbarkeit des Modus VA und aktivem ACC die A+-Taste, verfährt der Hebel automatisch. Der Modus VA wird aktiviert.

**Bedienung des Modus VA** Um für den Modus VA den maximalen Bedienkomfort zu gewährleisten, wird *Position 3* anhand der Prämisse einer bequemen Erreichbarkeit während der vollautomatisierten Fahrt ausgelegt. Der Fahrer darf im Modus VA die Hände vom Lenkrad nehmen, muss jedoch am Bedienelement weiterhin den Potentialtrigger aus Kapitel 3.2 setzen. Es muss ein Kompromiss zwischen der örtlichen Nähe und der resultierenden Erreichbarkeit des Bedienelements zum Lenkrad und einer entspannten, zurückgelehnten Sitzhaltung im Modus VA gefunden werden. Zur Betätigung des Potentialtriggers bieten sich die Betätigung einer Taste oder eine Betätigung direkt am Hebel an. In *Position 3* stellt der Hebel eine (stark) abstrahierte Repräsentation der Regelstrecke *Fahrzeug* dar. Das Bedienelement folgt damit der Grundidee der PMS. Das FAS wird durch die Manipulation einer Miniatur der Regelstrecke innerhalb seiner umgebungsspezifischen Restriktionen gesteuert. Die Betätigung erfolgt mittels eines Zufassungsgriffes.

Bei der Aktivierung des Modus VA werden die Betätigungselemente an der Stirnseite des Hebels deaktiviert. Die Rotation des Hebels ist im Modus VA nicht möglich. In Anlehnung an die Systemdefinition der VA übergibt der Fahrer die Fahrzeugführung an den SPA. Dessen Systemgrenzen (maximale Regelgeschwindigkeit, Verkehrssituation etc.) sind feststehend, eine Variation der Setzgeschwindigkeit durch den Nutzer ist nicht vorgesehen. Durch eine Adaption der Betätigungscharakteristik des Hebels in *Position 3* ist das Element innerhalb seiner baulichen Grenzen in der x/y-Ebene frei beweglich. Der Aufbau ist mit einer geeigneten Aktorik ausgestattet, um bei der Bewegung des Hebels in dieser Ebene die Kennlinien des Kraft-Weg-Verlaufs beliebig variieren zu können. Sie müssen als virtuelle, haptische Projektionen von Fahrstreifenmarkierungen, regelrelevanten Vorderfahrzeugen etc. steile Flanken darstellen können und in ihrem Verlauf variabel sein.

Die Position des Hebels innerhalb der haptischen Grenzen repräsentiert die Position des Fahrzeugs innerhalb seines Fahrstreifens in Relation zu Fahrstreifenmarkierungen und gegebenenfalls vorhandenen Vorderfahrzeugen. Durch ein Verschieben und Halten des Hebels innerhalb der haptischen Grenzen in y-Richtung wird der laterale Versatz des Fahrzeugs innerhalb der Fahrstreifenmarkierungen gesteuert. So kann der Nutzer beispielsweise in Stausituationen einen Linksversatz innerhalb des Fahrstreifens herstellen, um durch einen ungehinderten Blick nach vorne die Staulänge oder -ursache abschätzen zu können. Will der Fahrer ein Manöver antriggern, muss er das System mit dem Wechsel in einen anderen quasi-stationären Zustand beauftragen. Dies ist durch ein richtungsgebundenes Überstimmen der haptischen Barrieren im Kraft-Weg-Verlauf des Betätigungselements möglich. Fährt das Fahrzeug analog des in Abschnitt 3.3.2.1 beschriebenen Autobahnscenarios auf einen langsam fahrenden LKW innerhalb des eigenen Fahrstreifens auf, kann der Fahrer durch ein kurzes Antippen des Hebels in (+y)-Richtung über die virtuelle, haptische Fahrstreifenbegrenzung hinaus einen Wechsel des Fahrstreifens antriggern. Ist innerhalb einer gewissen Latenzzeit ein Wechsel des Fahrstreifens möglich, führt das Assistenzsystem

diesen vollautomatisiert aus. Auf dem linken Fahrstreifen regelt das FAS anschließend entweder auf ein vorhandenes Vorderfahrzeug oder auf die Setzgeschwindigkeit des SPA ( $v_{setz} = 130 \text{ km/h}$ ).

Durch die uneingeschränkte Beweglichkeit des Hebels innerhalb der x/y-Ebene ist die intuitive Beauftragung unterschiedlicher Manöver oder die Parametrierung der durchzuführenden Manöver durch verschiedene Bewegungsmuster des Stellelements als Triggerbetätigung möglich. Beispielsweise ist eine Anlehnung des Regelverhaltens an die Betätigungsgeschwindigkeit vorstellbar, eine Betätigung mit höherer Stelleildynamik hat entsprechend Manöver mit höherer Dynamik der Regelstrecke zur Folge. Ein anderes Beispiel ist die mögliche Differenzierung zwischen Manövern anhand der Art der Betätigung: Eine Betätigung des Hebels in (+x)/(+y)-Richtung kann ein Trigger für ein *Überholmanöver* inkl. Rückkehr auf den ursprünglichen Fahrstreifen sein. Eine ausschließliche Betätigung in (+y)-Richtung ohne Auslenkung in x-Richtung triggert einen Fahrstreifenwechsel mit anschließendem Verbleib im Ziel-Fahrstreifen. Bei gültigen Einschaltbedingungen wird dem Fahrer die Verfügbarkeit des Modus AUTON kommuniziert. Durch eine Betätigung von A+ aktiviert der Fahrer den autonomen Modus.

**Bedienung des Modus AUTON** Gemäß der Definition des Automationsspektrums aus Kapitel 3.1 verfährt das Bedienelement nach der Betätigung von A+ automatisch in die *Position 4*. Um ein Quetschen der Hand oder der Finger zu vermeiden, wird das Element nur während der dauerhaften Fingerbetätigung von A+ verfahren. Der Hebel versenkt sich bündig in die Mittelkonsole und bietet dem Nutzer außer der globalen OFF-Taste *keine* Möglichkeiten zur Bedienung. Dies impliziert die neue Rolle des Fahrers im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis als Passagier. Die Notwendigkeit zur Interaktion mit dem Fahrzeug oder einem FAS zur Fahrzeugführung ist nicht mehr nötig. Die Zustandskommunikation des STP erfolgt visuell über eine Anzeige im Kombi- oder Head-Up-Display. Neben dem Verfahren des Hebels können zeitgleich die Bedienelemente für die Fahrzeugführung aus dem Greifraum des Fahrers entfernt werden. Zur Bedienung der für den Modus AUTON erweiterten Infotainmentinhalte können dem Nutzer zusätzliche Interaktions- und Anzeigemodalitäten angeboten werden. Zur Deaktivierung des Modus AUTON wird die OFF-Taste betätigt.

Das integrative Konzept *Hebel* beschreibt einen Ansatz zur Bedienung des Automationsspektrums, welcher eine Differenzierung der einzelnen Modi durch seine vier in x- und z-Richtung diskreten Positionen sowie unterschiedlichen Betätigungscharakteristika für die einzelnen Modi aufweist. Der geringen Anzahl an erforderlichen Interaktionen der Modi MF und AUTON wird durch das bündige Versenken des Bedienelements in der Mittelkonsole Rechnung getragen. Zusätzliche Tastenelemente ermöglichen die Bedienung des Modus TA, die freie Beweglichkeit des Hebels entlang eines adaptiven Kraft-Weg-Verlaufs in der x-/y-Ebene machen den Hebel zum Steuerelement einer Master-Slave-PMS des Modus VA. Neben der Zeigerwirkung ermöglichen die vier entlang der x-Achse aufgereihten Positionen eine nach den spezifischen Eigenschaften des Modus ausgerichtete Anthropometrie. Für den Modus VA wird die Regelstrecke in abstrahierter Form auf den Hebel projiziert. Der Nutzer soll diese Projektion nicht bewusst wahrnehmen, die Form des Hebels wird daher nicht der Fahrzeugform nachempfunden. Ziel des Entwicklers ist vielmehr die Unterstützung des Fahrers bei der unbewussten Übernahme des zugrundeliegenden inneren Modells der PMS auf Basis der rückgemeldeten Kräfte. Eine korrespondierende Anzeige im Kombi- oder Head-Up-Display komplettiert das Anzeige- und Bedienkonzept.

### 3.3.3.2 Konzept *Handballenablage*

Das integrative Bedienkonzept *Handballenablage* (HBA) ermöglicht die Bedienung des Automationspektrums und dient als Handballenablage für eine Infotainmentbedienung in der Mittelkonsole. Für das in Abbildung 3.7 skizzierte, prinzipielle Beispiel erfolgt die Infotainmentbedienung über einen Drehdrücksteller und zusätzlichen Tasten. Die skizzierte Form des Ausführungsbeispiels der Handballenablage orientiert sich an einer Computermaus. Andere Grundformen (Barren, Turbine etc.) sind ebenso vorstellbar. Die Konzeptidee ist unter [125] beschrieben.

Die Bedienung des Automationsspektrums und seiner vier Modi wird durch die HBA und ergänzender Betätigungselemente realisiert. Während die TA und die VA aufgrund des technischen Konzepts *unabhängig* voneinander aktiviert werden können, kann der Modus AUTON weiterhin nur *hierarchisch* über den Modus VA aktiviert werden.

Der Grundkörper des Bedienelements weist eine Bedieninsel zur Bedienung der TA an der Stirnseite auf. Ergänzend sind in unmittelbarer Nähe zwei Tasten in die Mittelkonsole integriert. Diese sind vom Fahrer in der TA ohne Umgreifen bedienbar. Die Umschaltung des Modus TA in den Modus VA erfolgt durch ein nutzerinitiiertes Drehen des Bedienelements um seine z-Achse. Die in der Mittelkonsole positionierten Tastenelemente werden dadurch vom Grundkörper der *Handballenablage* überdeckt. Die Maus dient als Repräsentation der Regelstrecke für die Bedienung der PMS. Der Wechsel vom Modus VA in den Modus AUTON durch erneutes Betätigen von A+ erfolgt auf Basis einer Translation des Bedienelements entlang seiner z-Achse. Die Maus wird teilweise in der Mittelkonsole versenkt. Das Element ist ortsfest, eine Translation entlang der x-Achse beim Moduswechsel ist nicht vorgesehen. Die Zeigerwirkung der jeweils vorliegenden Zustände des Bedienelements und der zugehörigen Modi erfolgt durch den Winkel und den Offset der Maus in Relation zu seiner z-Achse.

**Bedienung der Modi MF und TA** Das Element *Maus* weist aufgrund der Anforderungen seitens der Bedienung der TA und seitens dem Nutzen als Handballenablage keine formliche Unterscheidung der Modi MF und TA auf. Die Zustandsunterscheidung muss über eine Anzeige im Kombi- oder Head-Up-Display erfolgen. Die in Fahrtrichtung weiter hinten liegende Taste ist analog dem Konzept *Hebel* (Abschnitt 3.3.3.1) mit einer ON/OFF-Funktionalität belegt. Einmaliges Betätigen der Taste initiiert einen Zustandswechsel des Systems vom Modus MF in den Modus TA, Zustand *Stand-by*. Top-down ermöglicht eine longpush-Betätigung der Taste ein Umschalten in die MF. Die vordere der beiden Tasten ist mit der Funktion RESUME belegt.

Die (De-)Aktivierung im Modus TA erfolgt durch Betätigung der ON/OFF-Taste. Die Verstellung der Setzgeschwindigkeit wird über ein an der Stirnseite in die Maus integriertes Stellelement vorgenommen. Denkbar sind hier Drehräder mit Rasterung, Wipptasten oder monostabile Wippelemente zur Einstellung der Geschwindigkeitsstufen. Zusätzlich ist in die Oberfläche der Maus eine Taste integriert, deren Verstellung für den Modus TA mechanisch blockiert ist. Die Einstellung der Sollzeitlücke erfolgt über eine monostabile, translatorische Betätigung der Maus in x-Richtung. Durch die Integration des RESUME in eine separate Taste kann die Sollzeitlücke sowohl über eine longpush- als auch über eine shortpush-Betätigung gewählt werden.

Der bottom-up-Moduswechsel erfolgt bei gegebener Verfügbarkeit der VA durch eine nutzerinitiierte Drehung des Grundkörpers der Maus um seine z-Achse. Eine Drehung um 90° im Uhrzeigersinn aktiviert den Modus VA.

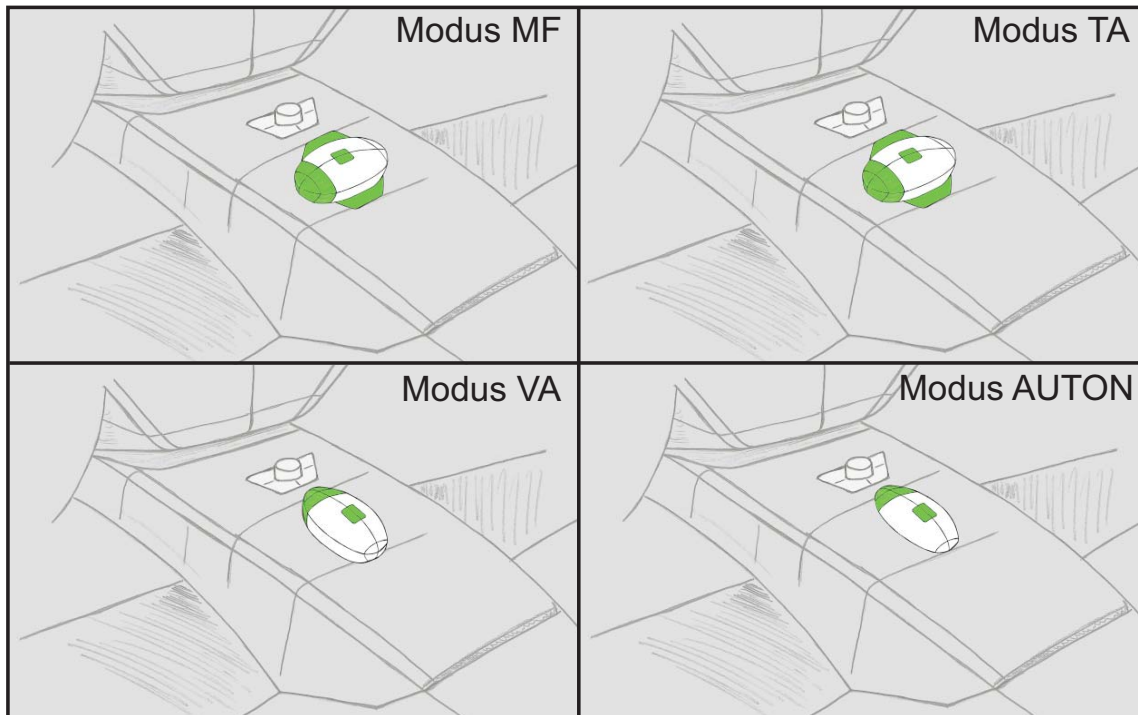


Abbildung 3.7: Prinzipdarstellung Integratives Konzept *Handballenablage*, adaptiert nach [100] durch [43]

**Bedienung des Modus VA** Die beiden in der Mittelkonsole liegenden Tasten werden durch den Grundkörper der Maus überlagert. Die in die Oberfläche der Maus integrierte Taste wird für den Modus VA entriegelt und mit der Betätigung des Potentialtriggers belegt. Die Maus ist in der  $x$ -/ $y$ -Ebene frei beweglich, die Betätigungscharakteristik muss in alle Richtungen frei konfigurierbare und dynamisch verstellbare Kraft-Weg-Kennlinien aufweisen. In der Master-Slave-PMS repräsentiert die Maus den Master. Die Positionsänderungen des Masters werden mittels eines Zufassungsgriiffs umgesetzt. Die Parametrierung des FAS erfolgt innerhalb haptischer Barrieren im Kraft-Weg-Verlauf der Betätigung, das Triggern eines Manövers erfolgt durch ein kurzes Überstimmen dieser Barrieren.

Eine Erweiterung dieses Konzepts ist die Möglichkeit zur Zustandsrückmeldung des FAS an den Fahrer während der vollautomatisierten Fahrt. Nutzt der Fahrer das Bedienelement als Handballenablage zur Bedienung des gegebenenfalls erweiterten Infotainmentsystems, kann das FAS durch Variation der Gegenkräfte am Bedienelement Rückmeldung über seine Regeltätigkeit geben. Denkbar sind die Rückmeldung von Positionsänderungen des Fahrzeugs in Relation zu den Fahrstreifenmarkierungen und anderen regelrelevanten Objekten. Alternativ können auch unspezifische Rückmeldungen des Bedienelements (Vibrationen etc.) den Fahrer situationsabhängig informieren. Ein geeignetes Szenario ist beispielsweise die multimodale Übernahmeaufforderung des Potentialtriggers. Voraussetzung für diese Art der Kommunikation ist immer eine Hands-On-Erkennung des Bedienelements.

Die Aufschaltung des Modus AUTON erfolgt über eine Taste auf der Oberseite des Bedienelements. Diese STP ON/OFF Taste (de-)aktiviert den STP. Das Bedienelement senkt sich daraufhin in (-z)-Richtung in die Mittelkonsole. Kommt es zu einer systeminitiierten Deaktivierung des Modus VA, dreht sich das Bedienelement *aktiv* um 90° gegen den Uhrzeigersinn zurück in die Ausgangslage (Modus TA).

**Bedienung des Modus AUTON** In *Position 4* ist das Element in der Mittelkonsole versenkt. Ist für den STP ein innovatives Interaktionskonzept für das Infotainmentsystem an einem von der Mittelkonsole abweichenden Bedienort verfügbar (z.B. eine kabellose Tastatur oder ein Touchscreen), kann die Handballenablage sogar bündig in der Mittelkonsole versenkt werden. Die STP ON/OFF-Taste bleibt weiterhin verfügbar.

Alternativ erfolgt die Translation in z-Richtung in einem Maß, in dem der Grundkörper des Bedienelements weiterhin als Handballenablage für das Standard-Infotainmentkonzept zu Verfügung steht. Der Fahrer kann nun auch im Modus AUTON mit dem Standardbedienelement des Infotainmentsystems interagieren und dabei die Handballenablage nutzen.

Das integrative Bedienkonzept *Handballenablage* ermöglicht die Bedienung des Automationsspektrums durch eine Anpassung der Form und Betätigungscharakteristik des Elements durch Rotation um die z-Achse und eine Translation in z-Richtung. Besonders erwähnenswert ist die Überdeckung der in die Mittelkonsole integrierten Tasten beim Übergang von der TA in die VA. Zusätzlich soll durch geeignete geometrische Gestaltung (baulicher Überhang) im Modus VA der direkte Zugriff auf das Element zur Geschwindigkeitseinstellung eingeschränkt werden. Auf diese Weise wird neben der Zeigerwirkung durch die Rotation des Elements - in der Theorie - eine Reduktion der Interaktionsmöglichkeiten mit dem Bedienkonzept erreicht. Das hinsichtlich der Anzahl der Interaktionsmöglichkeiten optisch wie funktional reduzierte Konzept ermöglicht die Bedienung der PMS. Eine weitere Neuerung stellt die funktionale Integration einer Handballenablage für die Infotainmentbedienung dar. Dies eröffnet neue Kanäle zur Zustandskommunikation des vollautomatischen FAS während der Infotainmentbedienung. Zusätzliche Anzeigen komplettieren das integrative HMI-Konzept zur FAS-Bedienung. Verschiedene Umsetzungen mit variierender Formgebung finden sich in [125].

### 3.3.3.3 Konzept *Drehdrücksteller*

Ein weiteres integratives Konzept zur Bedienung des Automationsspektrums repräsentiert das Konzept *Drehdrücksteller (DDS)*. Die Grundidee des Bedienelements ist in Abbildung 3.8 illustriert, das Konzept zur Bedienung des Modus TA findet sich in [62], das Gesamtkonzept ist zudem in [126] beschrieben. Der Drehdrücksteller besteht aus einem umfassenden, drehbaren Ring und einem zentralen, stickähnlichen Bedienelement mit drei integrierten Tasten. Die Variation der Zustände zur Darstellung der vier Automationsmodi wird durch die selektive Änderung der z-Position dieser Bestandteile realisiert.

Für die Modi MF und AUTON wird erneut der Ansatz verfolgt, das Element bündig in die Mittelkonsole zu versenken. Für die Bedienung der TA stehen dem Nutzer ein drehbarer Ring sowie drei Tasten zur Verfügung. Beim Übergang zum Modus VA senkt sich der Ring bündig in die Mittelkonsole, als Master der PMS verbleibt ein stickähnliches Element mit drei integrierten Tasten. Beim Übergang zum Modus AUTON wird dieser Stick ebenfalls bündig versenkt.

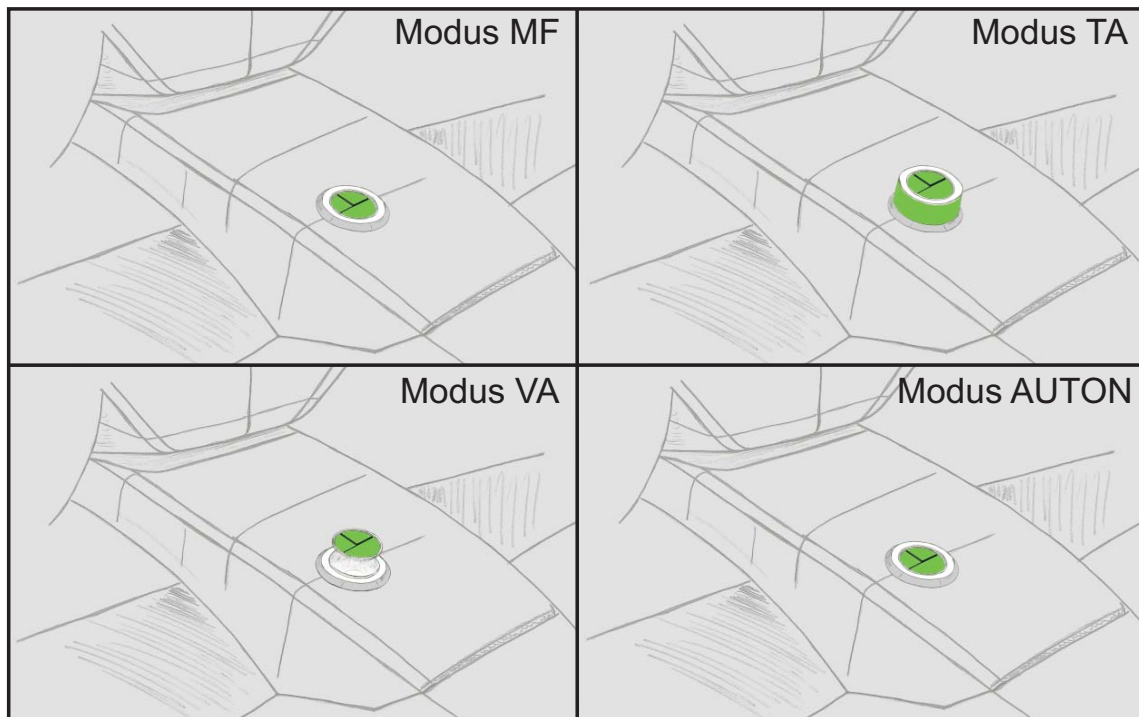


Abbildung 3.8: Prinzipdarstellung Integratives Konzept *Drehdrücksteller*, adaptiert nach [100] durch [43]

**Bedienung des Modus MF** In *Position 1* ist das Element vollständig in der Mittelkonsole versenkt. Die drei integrierten Tasten sind dem Fahrer zugänglich, ansonsten bieten sich keine Interaktionsmöglichkeiten. Die Tasten sind mit den Funktionalitäten RESUME, OFF und A+ belegt. Wünscht der Fahrer die Aktivierung des Modus TA, kann er durch einen hierarchischen Wechsel mittels A+ in den Modus höherer Automation wechseln, die beiden anderen Tasten sind ohne Funktion. Betätigt der Fahrer A+, wechselt das System in den Modus TA.

**Bedienung des Modus TA** Der gesamte Drehdrücksteller erhebt sich aus der Mittelkonsole, in *Position 2* bieten sich dem Nutzer alle Freiheitsgrade des Stellelements an. Die Tasten sind nun alle funktional belegt. Mittels A+ kann der Nutzer den Automationsgrad analog dem *Reduzierten Konzept* aus Abschnitt 3.3.2 innerhalb des Modus erhöhen. Er schaltet den Modus damit aus dem Zustand *Stand-by* in den Zustand *Aktiv*. Die Integration der SET- und der A+-Funktionalität hat die beschriebenen Einschränkungen zur Folge, u.a. ist keine unabhängige Aufschaltung der Modi möglich. Durch eine Betätigung der Taste OFF wird eine CANCEL-Funktionalität getriggert, eine longpush-Betätigung initiiert einen Moduswechsel in die MF. Ist eine Setzgeschwindigkeit gespeichert, kann über die Taste RESUME diese wieder als aktive Setzgeschwindigkeit aufgenommen werden.

Der drehbar gelagerte Ring ermöglicht in direkter Analogie zum Tachometer und dem zugehörigen LED Tachokranz zur Anzeige des Systemzustands und der aktuellen Setzgeschwindigkeit die Manipulation der ACC-Wunschgeschwindigkeit. Ein Drehen im Uhrzeigersinn erhöht diese, ein Drehen entgegen des

Uhrzeigersinns erniedrigt sie. Die Rasterung des endlos drehenden Rings ist an die Granularität des LED-Tachokranzes angepasst. Im Optimalfall ist der Drehwiderstand, respektive die Kraft-Weg-Kennlinie der Drehbetätigung der technischen Umsetzung dynamisch und variabel. Dies ermöglicht beispielsweise das Einspielen von zusätzlichen Informationen des FAS und der Umgebung. Geschwindigkeitsgrenzen und -empfehlungen, aktuelle Setzgeschwindigkeiten oder die Regelgrenzen des ACC können dem Nutzer somit durch Senken oder Blockaden und Barrieren im Betätigungsverlauf des Drehrades kommuniziert werden.

Die Einstellung der Sollzeitlücke erfolgt durch ein monostabiles Kippen um die y-Achse oder eine monostabile Translation entlang der x-Achse. Eine Verkleinerung der Sollzeitlücke wird also exemplarisch durch ein Tippen des gesamten Elements in (+x)-Richtung realisiert.

Um einen hierarchischen Wechsel in den Modus VA zu triggern, muss der Nutzer bei aktivem ACC und verfügbarem SPA die A+-Taste betätigen.

**Bedienung des Modus VA** Nach der Aktivierung der VA versenkt sich der Drehring bündig in der Mittelkonsole (*Position 3*). Eine Verstellung der Sollzeitlücke und der Setzgeschwindigkeit wird somit Hardware-seitig unterbunden, eine Entkopplung von Stellteil und Funktion ist im Modus VA nicht nötig. Das verbleibende, zentrale Bedienelement mit drei integrierten Tasten hat die Betätigungscharakteristik eines rotatorisch gelagerten Sticks, mit Freiheitsgraden um die kombinierte y- und x-Achse. Die haptische und visuelle Anmutung des sich in Richtung Drehpunkts verjüngenden Stabelements unterscheiden sich deutlich vom Modus TA. Die Kraft-Weg-Kennlinien dieser Rotation müssen die beschriebenen Anforderungen zur Darstellung einer PMS erfüllen: die Betätigungscharakteristik des Masters (Stick) ist in der Lage, Triggerschwellen für Manöver und Grenzen einer Parametrierung des Slaves darzustellen. Die Betätigung des Potentialtriggers erfolgt über die RESUME-Taste. Damit wird eine semantische Durchgängigkeit zur Bedienung eines Serien-ACCs gewahrt. Über eine Betätigung der OFF-Taste kann entweder der Rückfallmodus TA angesteuert werden (short-push), oder ein Wechsel in die MF durchgeführt werden (longpush). Bei gegebener Verfügbarkeit ermöglicht eine Betätigung von A+ die Aufschaltung des Modus AUTON.

**Bedienung des Modus AUTON** Die Darstellung des Drehdruckstellers in *Position 4* entspricht dem Modus MF. Das gesamte Element wird bündig in der Mittelkonsole versenkt, dem Fahrer stehen zur Interaktion drei Tasten zur Verfügung, wobei lediglich die OFF-Taste funktional belegt ist. Will der Fahrer den Modus AUTON deaktivieren, kann er dies durch eine Betätigung der OFF-Taste initiieren. Der Drehdrucksteller fährt daraufhin unabhängig einer langen oder kurzen Betätigung immer in die Position 2 der TA.

Als zusätzliches Potential des Konzepts ist es möglich, die beiden benachbarten Tasten A+ und OFF mittels kleiner Stellmotoren zustandsabhängig haptisch hervorzuheben. Dies ermöglicht die haptische Unterscheidbarkeit der Modi MF und AUTON, die Blindbedienbarkeit des Elements wird erhöht. Ist beispielsweise im Modus AUTON lediglich die OFF-Taste funktional belegt, kann sich diese durch leichtes Anheben in z-Richtung von den übrigen Tasten abheben. Für den Modus MF erfolgt analog eine Anhebung der Taste A+.

Der Drehdrucksteller verfolgt ein Konzept zur Bedienung des Automationsspektrums, welches durch die hohe Variabilität der optischen und haptischen Darstellung des Bedienelements eine distinguierte Bedienung der einzelnen Modi ermöglicht. Die jeweiligen Darstellungsformen unterstützen die Eigenheiten

der zu bedienenden Modi. Die Geschwindigkeitsverstellung durch ein am LED-Tachokranz orientiertes Drehrad und die Projektion des Slaves auf einen stickähnlichen Master sind wesentliche Gesichtspunkte des Konzepts.

### 3.3.3.4 Diskussion

Die *integrativen* Konzepte HBA, DDS und Hebel stellen Erweiterungen des bisherigen Bedienkonzepts im Fahrzeugcockpit dar. Die zusätzlichen, neuartigen Bedienelemente sind in den Ausführungsbeispielen jeweils in die Mittelkonsole integriert. Aufgrund der auf die Körperhaltung und -stellung angepassten Form der Interaktion erscheint als zusätzliche Variante lediglich eine alternative Integration der Elemente in die Fahrertür zur Bedienung mit der linken Hand als möglich. Aufgrund des begrenzten Bauraums in der Fahrertür, des für die Bedienung der Elemente notwendigen Bewegungsraumes und des vergleichsweise großen Platzbedarfs einer Aktorik zur Realisierung variabler Kraft-Weg-Verläufe erscheint eine Integration in die Mittelkonsole als die wahrscheinlichere Variante. Auch hier ist der verfügbare Bauraum aufgrund der Existenz von Ablagen, Bedienelementen zur Gangwahl und Infotainmentbedienung, konstruktiven Bestandteilen der Karosserie und des Lüftungssystems etc. stark begrenzt. Jedoch versprechen aktuelle technische Trends neue, platzsparende Möglichkeiten zur Interaktion mit Infotainmentsystemen (z.B. Touchpads und -screens) oder zur Anwahl von Getriebestufen (z.B. Tasten). Gegebenenfalls freierwerdender Bauraum kann für die Integration der integrativen Elemente in die Mittelkonsole genutzt werden. Die alternative Umsetzung in der Fahrertür kann in weiterführenden Untersuchungen hinsichtlich der Möglichkeiten einer technischen Realisierung und des Bedienkomforts evaluiert werden.

Die integrativen Konzepte *Hebel*, *Handballenablage* und *Drehdrucksteller* repräsentieren Ausführungsbeispiele der *integrativen* Konzeptkategorie. Diese ermöglicht eine Bedienung von FAS *einer* Kategorie - der Führungsebene mit kontinuierlichem Eingriff - durch *eine* Bedieninsel, bzw. *ein* Bedienelement. Die Darstellung der Bedienung der vier Modi des Automationsspektrums durch ein integratives Bedienelement birgt für den Nutzer den Vorteil der Clusterung semantisch verwandter Systeme. Die Veränderungen in Form, Position und Betätigungscharakteristik in Abhängigkeit des jeweils aktiven Modus unterstützen die Ausbildung eines inneren Modells des Automationsspektrums und seiner Modi.

Die beschriebenen Konzepte stellen konkrete Ausführungsbeispiele dar, alternativ sind natürlich abweichende Ausführungen denkbar.

Die Positionierung in der Mittelkonsole ermöglicht eine für kleine und große Personen gute Bedienbarkeit. Für den Modus VA ist eine gute Anpassung der Position der Elemente an die Modus-spezifischen Anforderungen gegeben. Der entspannt zurückgelehnte Fahrer, der nur selten mit den Standardbedienelementen zur Fahrzeugführung interagieren muss, kann die FAS-Bedienelemente komfortabel bedienen. Dies gilt bei den skizzierten Konzepten leider auch in gewisser Weise für den Beifahrer. Eine Positionierung in der Mittelkonsole bedingt unzulässige Eingriffsmöglichkeiten des Beifahrers in die Fahrzeugführung. Diese sicherheitsrelevante Einschränkung kann durch bauliche Maßnahmen verhindert werden, die grundsätzliche Möglichkeit zur Einflussnahme des Beifahrers ist jedoch bei einer Positionierung in der Mittelkonsole nur mit Hilfe zusätzlicher Sensorik vollständig vermeidbar. Als weitere Einschränkung ist für die Bedienung des ACC S&G des Modus TA ein Loslassen des Lenkrads mit der rechten Hand nötig.



### 3.3.4 Aufgeteilte Konzepte

Die Konzeptkategorie der *Aufgeteilten Konzepte* verfolgt das Prinzip der Bedienung der vier Modi des Automationspektrums über vier unterschiedliche Bedienkonzepte. Diese sind voneinander unabhängig, durch das Fehlen gegenseitiger Abhängigkeiten können die jeweiligen Konzepte die Anforderungen der einzelnen Modi optimal berücksichtigen.

Das aufgeteilte Konzept *Gabel* (Abschnitt 3.3.4.1) ermöglicht die Bedienung der TA über einen Lenkstockhebel, die PMS des Modus VA wird durch ein neuartiges, gabelförmiges Bedienelement mit Gestenbedienung umgesetzt. Diese Gabel fungiert als Halterung einer Tastatur oder eines vergleichbaren Bedienelements zur Infotainmentbedienung im Modus AUTON.

Das Ausführungsbeispiel *Touch* repräsentiert ebenfalls ein Konzept der *aufgeteilten* Kategorie. Die Bedienung der TA erfolgt über ein seitlich am Pralltopf positioniertes Bedienfeld. Die PMS wird über ein im Lenkrad positioniertes Touchdisplay realisiert, beim Übergang in den Modus AUTON wird durch eine komplett neue Positionierung und inhaltliche Gestaltung des Touchdisplays das Eingabemedium für die Infotainmentfunktionen des Modus AUTON umgesetzt. Die Konzeptkategorie und die konzeptionelle Realisierung als Konzept *Touch* ist in [121] beschrieben.

#### 3.3.4.1 Konzept *Gabel*

Das neuartige Konzept *Gabel* kombiniert ein herkömmliches Konzept zur Bedienung des Modus TA mit der neuartigen Realisierung der PMS über ein gabelförmiges Element zur Gestenbedienung. Das Prinzip ist in Abbildung 3.9 skizziert. Der Master der PMS wird von der Hand des Nutzers symbolisiert. Das gabelförmige Element wird in der Folge als Aufnahme eines Eingabemediums zur Infotainmentsnutzung im Modus AUTON verwendet. Ein konservativer Ansatz kann beispielsweise eine Tastatur mit integriertem Trackball mit der Gabel koppeln. Eine technisch aufwendigere, visionäre Lösung kann die Transformation der Gabel in ein Tastatur- oder Touchpad-ähnliches Bedienteil sein.

**Bedienung des Modus MF** Die aufgeteilten Konzepte vereinen den Vorteil, das Interaktionsschema genau auf die Bedienung der einzelnen Modi abstimmen zu können. Da der Modus MF im Grunde keine Interaktion des Fahrers mit den unterlagert wirkenden FAS erfordert, wird dafür keine Erweiterung des HMI vorgesehen. Der Nutzer bedient die manuelle Fahrzeugführung weiterhin über die Standardbedienelemente Lenkrad, Gas- und Bremspedal.

Die (De-)Aktivierung der übrigen Modi kann unabhängig erfolgen. Im Konzept *Gabel* sind aus dem Modus MF die Modi TA und VA direkt anwählbar, der Modus AUTON wird aufgrund des beschriebenen Hardwarekonzepts hierarchisch auf den Modus VA aufgeschaltet.

**Bedienung des Modus TA** Die Bedienung des Modus TA erfolgt in dieser Umsetzung analog der Bedienung eines ACC-Seriensystems über einen ACC-Lenkstockhebel. Das Bedienkonzept ist in Abschnitt 2.3.1.1 detailliert beschrieben.

**Bedienung des Modus VA** Zur Aktivierung des Modus VA zieht der Fahrer eine beidseitig am Pralltopf anliegende Gabel in die *Position 2*. Die Gabel ist am Lenkrad drehbar gelagert, zur Aktivierung

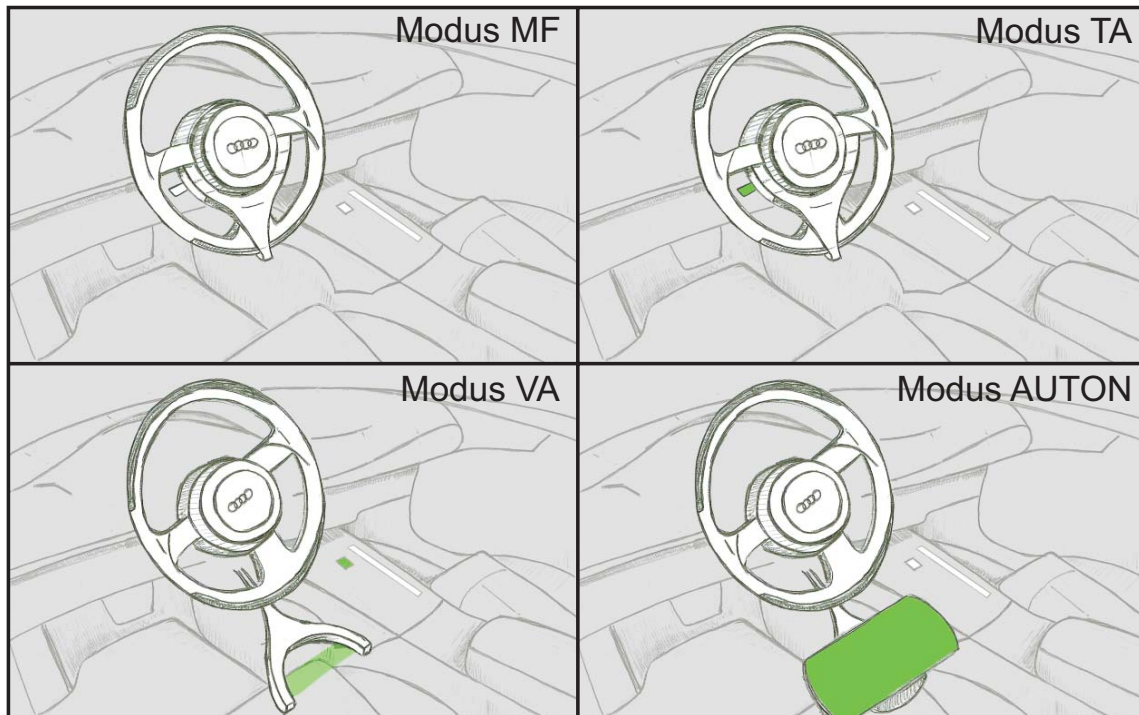


Abbildung 3.9: Prinzipdarstellung Aufgeteiltes Konzept *Gabel*, adaptiert nach [100] durch [43]

klappt der Nutzer das im unteren Bereich des Lenkrads gelagerte Element in eine Rastposition im Freiraum zwischen sich und dem Lenkrad. Das Drehgelenk der Gabel befindet sich im Bereich der Lenksäulenverkleidung, bei einer Drehung des Lenkrads aufgrund von Lenkbewegungen des vollautomatischen FAS verbleibt die Gabel in einer unveränderlichen Position. Die Dimensionen und die Anordnung von Lenkrad und Gabel sind so zu wählen, dass ein ungehinderter Zugriff auf das Lenkrad jederzeit möglich ist. Für die systeminitiierte Deaktivierung muss eine automatische Rückstellmöglichkeit gegeben sein, durch geeignete Belegungserkennungsmechanismen an Lenkrad und Gabel ist ein Einklemmen der Gliedmaßen des Fahrers bei der Rückstellung auszuschließen.

Die Gabel verfügt an den beiden dem Fahrer zugewandten Enden über geeignete Sensorik zur Interpretation der vom Fahrer ausgeführten Handbewegungen bzw. Gesten. Von Interesse sind die Gesten zwischen und neben den beiden Enden der Gabel. Die Sensorik ermöglicht die Realisierung der PMS durch die Hand des Fahrers. Nach dem Master-Slave-Prinzip der PMS stellt die Hand des Fahrers den Master dar, die Gabel repräsentiert die - in diesem Fall nicht an die tatsächlichen Umgebungsbedingungen adaptierbaren - Fahrstreifenmarkierungen. Will der Fahrer die Position des Fahrzeugs innerhalb der regelrelevanten Fahrbahnmarkierungen parametrieren, muss er dazu seine Hand unter Beachtung bestimmter Bewegungsparameter in die gewünschte, relative Position innerhalb der Gabel bewegen. Bewegt er seine Hand wieder aus diesem begrenzten Bereich, zentriert sich anschließend das Fahrzeug selbstständig innerhalb des Fahrstreifens.

Zum Triggern eines Manövers muss der Fahrer im Sinne der Konzeptbeschreibung der PMS die Grenzen seines aktuellen, quasi-stationären Zustandes übertreten bzw. überstimmen. Einen Spurwechsel nach

links initiiert der Fahrer, indem er seine Hand aus einer zentralen Position stetig nach links und über die Fahrstreifenmarkierung, respektive dem linken Ende der Gabel, bewegt. Detektiert das System diese Geste, wird bei passenden Umgebungsbedingungen das Manöver ausgeführt.

Zur Realisierung der PMS kommt die Gabel ohne zusätzliche Betätigungselemente aus. Die benutzerinitiierte Deaktivierung erfolgt durch ein manuelles Hochklappen der Gabel. Der Übergang zum Modus AUTON erfolgt durch ein an geeigneter Stelle positioniertes, zusätzliches Tastenelement mit der Funktion STP ON/OFF. Passend ist eine Integration in einen separaten Bereich, wie z.B. in die Mittelkonsole. Hier ist bei einer Betätigung eine Quetschgefahr der oberen Extremitäten beim automatischen Hochklappen der Gabel ausgeschlossen.

**Bedienung des Modus AUTON** Aktiviert der Nutzer den STP, verfahren die primären Bedienelemente zur Fahrzeugführung aus dem Eingriffsbereich des Fahrers. Es bietet sich ein Bedienelement für die Interaktion mit den STP Infotainmentfunktionen an. Transformationen der Gabel in neue Betätigungselemente werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Eine exemplarische technische Umsetzung kann in einer sich nach der STP Aktivierung anbietenden Tastatur mit Trackball oder Mauspad bestehen. Die Tastatur ist neben der STP Aktivierungstaste in der Mittelkonsole versenkt und durch einen geeigneten Mechanismus (automatisch öffnende und schließende Klappen) nur im Modus AUTON verfügbar. Das Element ist mit einer geeigneten Aufnahme für eine formschlüssige Kopplung mit der Gabel ausgeführt. Kommt es zu einer FÜA durch den STP, muss der Fahrer die Tastatur entfernen, um ein Hochklappen der Gabel zu ermöglichen. Verbleibt die Tastatur trotz der Übernahmeaufforderung auf der Gabel, muss die autonome Rückfallebene des STP eingreifen.

Das aufgeteilte Konzept *Gabel* repräsentiert einen progressiven Ansatz zur Bedienung des Spektrums durch (weitgehend) unabhängige Bedienelemente. Die Innovation besteht in der Umsetzung eines Gestik-Bedienkonzepts für die PMS. Im Vergleich zu den integrativen und reduzierten Lösungen sind für die Umsetzung dieses Konzepts tiefgreifende und sichtbare Eingriffe in die Innenraumgestaltung nötig. Sicherheitsrelevante Aspekte, wie beispielsweise die Integration eines im Crashfall potentiell gefährlichen Objekts in den Fahrgastraum oder die mittelfristige technische Umsetzbarkeit der Lösung, können im Rahmen dieser Konzeptentwicklung *nicht vollständig* berücksichtigt werden. Die Einschränkungen der Lösung bzgl. des Gesamtkonzepts des Fahrzeugcockpits sind bekannt und fließen entsprechend in die Bewertung des Konzepts ein.

### 3.3.4.2 Konzept *Touch*

Einen weiteren Lösungsvorschlag zur aufgeteilten Bedienung des Automationsspektrums repräsentiert das Konzept *Touch*. Eine Umsetzung des Konzepts erfordert eine tiefgreifende bauliche Änderung eines X-by-Wire-Lenkrads. Grundidee ist der Ausbau der Rolle des Lenkrads als zentrales Bedienelement im Fahrzeug.

Ein wichtiges Element des Konzepts ist ein mittig im Lenkrad positioniertes Touchdisplay. In Kombination mit zusätzlichen, seitlich positionierten Betätigungselementen und einer hohen geometrischen Variabilität dient es als Anzeige- und Interaktionsmedium für die FAS. Das Element *integriert* zwar einerseits verschiedene Formen der Bedienung, andererseits bietet es für jeden Modus hinsichtlich der Darstellungsart, der Position und der Betätigungsart ein *signifikant eigenständiges* Interaktionskonzept. Dies rechtfertigt die Zuordnung in die *aufgeteilte* Konzeptkategorie.

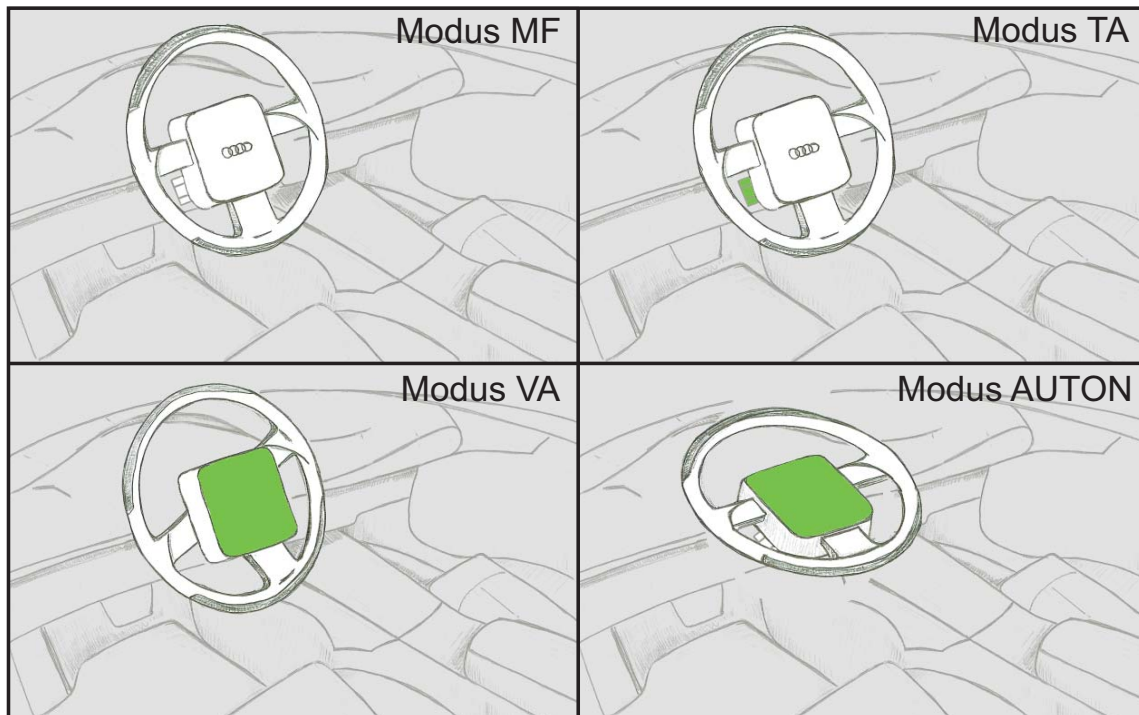


Abbildung 3.10: Prinzipdarstellung Aufgeteiltes Konzept *Touch*, adaptiert nach [100] durch [43]

**Bedienung des Modus MF** Die Abstimmung des Bedienkonzepts auf die Anforderungen der einzelnen Modi des Spektrums wird durch die Art der Hardware-seitigen Integration und der Variation von Anzeigehalten des Touchdisplays in ein Lenkrad ermöglicht. Für den Modus MF ist das Display fest mit dem Lenkradaufbau verbunden, das Lenkrad und das Touchdisplay sind gekoppelt und repräsentieren *ein* Bedienelement. Bei Lenkbewegungen dreht sich entsprechend der gesamte Aufbau, inklusive des gekoppelten Touchdisplays. Der Anzeigehalt des Displays kann dem aktuellen Lenkraddesign des Herstellers nachempfunden werden. Beispielsweise kann mittig im Display das Logo des Fahrzeugherstellers eingespielt werden. Dieses virtuelle Logo wird analog dem heutigen Hardware-Logo in der Airbagabdeckung bei Lenkbewegungen des Fahrers mitgedreht.

Auf der vom Fahrer aus linken Lenkradseite sind seitlich am Touchdisplay und/oder auf der Lenkradspeiche Bedienelemente für die Bedienung der TA integriert. Eines dieser Elemente ist als Taste ausgeführt und mit der A+-Funktionalität belegt. Diese ermöglicht die Aktivierung des Modus TA.

**Bedienung des Modus TA** Aktiviert der Fahrer durch Betätigung der A+-Taste den Modus TA, hat er die Möglichkeit zur Bedienung der Teilautomation über die einzelnen Betätigungselemente der seitlich positionierten Bedieneinheit. Eine Möglichkeit zur Gestaltung dieser Bedieneinheit besteht in einer Anlehnung an die Umsetzung der BMW AG (vgl. Abschnitt 2.3.1.1). Hier wird das ACC S&G durch eine zentral in der Lenkradspeiche positionierte, zweistufige, monostabile Wippe und zusätzlichen Tasten bedient. Eine Bedienung kann auch durch eine seitlich, unterhalb der Lenkradspeiche positionierte Bedieneinheit analog einem Satelliten am Pralltopf erfolgen. Dieses Bedienkonzept für die TA findet sich in [120].

Die Einstellung der Setzgeschwindigkeit erfolgt bei diesem Konzept ebenfalls über ein zentrales, monostabiles Wippelement. Die SET-Funktionalität wird in die A+-Funktionalität integriert, ein RESUME erfolgt über ein Drücken oder ein Ziehen der seitlich am Satellit gelagerten RESUME-Wippe. Die Wahl der Sollzeitlücke kann durch eine Betätigung der dafür vorgesehenen Tasten oder über ein monostabiles Verschieben des gesamten Satelliten in z-Richtung erfolgen. Eine weitere Möglichkeit zur Bedienung der Abstandseinstellung ist die Integration in ein grafisch abgegrenztes Bedienfeld im Touchdisplay. Die Bedienung der TA über einen Satelliten bietet gegenüber einer Bedienung auf der Lenkradspeiche den Vorteil der Verfügbarkeit der Speiche als Bedienort für Kombi- und Infotainmentfunktionen.

Das Touchdisplay ist im Modus TA weiterhin starr mit dem Lenkrad verbunden, das Erscheinungsbild des Lenkrads orientiert sich an einer seriennahen Ausführung. Es wird weiterhin zentral das mitdrehende Logo des Fahrzeugherstellers eingeblendet. Der Lenkradaufbau und das Display sind gekoppelt. Allerdings wird die gegebene Verfügbarkeit des Modus VA durch eine grafische Anzeige auf dem Touchdisplay kommuniziert. Diese Anzeige ist zusätzlich mit A+ belegt, der Fahrer kann den Modus VA durch die Betätigung der Touch-Fläche aktivieren.

Als Alternative zu einer Ausführung der Bedienung des Modus TA auf der Speiche oder als Satellit kann dem Gedanken der Aufteilung der Bedienkonzepte der einzelnen Modi folgend auch ein Lenkstockhebelkonzept zur Bedienung des Modus TA genutzt werden.

**Bedienung des Modus VA** Nachdem der Nutzer den Modus VA durch eine Betätigung der Bedienfläche im Touchdisplay aktiviert hat, werden das Display und der Lenkradaufbau entkoppelt. Das Display verbleibt im Anschluss einer automatisierten horizontalen Ausrichtung als starres Element direkt vor dem Fahrer. Auf der Bedienoberfläche des Touchdisplays wird eine grafische Darstellung der PMS eingeblendet. Im Vergleich zu den stark abstrahierten Ausführungen des Masters der *integrativen* Konzepte kann hier eine realitätsnahe Visualisierung der PMS erfolgen. Die PMS wird durch eine Projektion der aktuellen Verkehrssituation auf eine interaktive, grafische Oberfläche umgesetzt. Der Fahrer kann nun innerhalb der grafischen Grenzen der PMS die Position seines Fahrzeugs durch die Manipulation des grafischen Masters parametrieren und Manöver antriggern. Dies erfolgt durch die Bedienung des Touchdisplays. Einen charmanten Lösungsansatz bietet das Touchdisplay für die Bedienung des Potentialtriggers. Die Art der Interaktion kann auf spielerische Weise mit der Art der Anzeige korrespondieren. Beispielsweise kann bei der Darstellung des Automatisierungspotentials als Wassersäule durch eine geeignete Touch-Geste des Fahrers ein Wasserzulauf geöffnet werden. Bei der Darstellung des Potentials als Sanduhr kann die Triggerbetätigung im Umdrehen einer Sanduhr durch den Fahrer realisiert werden. Gemäß der Definition des Modus VA muss der Lenkradkranz weiterhin im direkten Zugriff des Fahrers verbleiben. Innerhalb dieser Restriktion wird der Kranz jedoch automatisiert in (+x)-Richtung vom Fahrer in Richtung Instrumententafel verfahren. Die Lenkbewegungen des FAS werden vom Lenkrad weiterhin nachempfunden. Auf diese Weise ist im Falle einer FÜA sichergestellt, dass der Fahrer seinen Lenkeingriff an die aktuellen Radlenkwinkel anpassen kann.

Bei einer Deaktivierung des Modus muss zur Möglichkeit der Kopplung des Lenkradaufbaus und des Displays durch eine automatische Anpassung der Position des Displays Deckungsgleichheit zwischen den Koppelementen hergestellt werden. Die Aktivierung des Modus AUTON erfolgt im Konzept *Touch* über eine separate Taste im Fahrzeugcockpit.

**Bedienung des Modus AUTON** Nach der Aktivierung des Modus AUTON über die separate, in der Mittelkonsole positionierte Taste wird die Bedienoberfläche der PMS ausgeblendet. Um den Modusüber-

gang zu unterstreichen, werden durch verschiedene Stellmotoren simultan das Lenkrad um seine y-Achse und das Display um  $90^\circ$  um seine x-Achse rotiert. Zusätzlich wird das Display analog dem Lenkradkranz um die y-Achse rotiert. Das Touchdisplay dient nun als reines Eingabemedium für die im Kombi-Display und HUD angezeigten, erweiterten Infotainmentinhalte des Modus AUTON. Die Unterkante des Lenkradkranzes erfüllt die Funktion einer Handballenablage zur komfortablen Bedienung. Diese komplexe, automatisierte Kinematik des Lenkrads und des Displays erfordern maximale Flexibilität der Bestandteile und sind wohl nur auf Basis eines by-Wire-Lenkrads realisierbar. Der Entfall der mechanischen Kopplung des Lenkrads mit der Lenksäule ermöglicht zusätzliche Freiheitsgrade in der Gestaltung des Bedienelements.

Für den Fall einer Deaktivierung des Systems werden die Bestandteile des Konzepts wieder in die Ausgangslage verfahren.

Das aufgeteilte Konzept *Touch* realisiert die Bedienung des Automationsspektrums mittels vier verschiedener Bedienkonzepte. Diese werden alle auf Basis der Weiterentwicklung des Lenkrads umgesetzt. Neben der innovativen Bedienung der TA durch einen seitlich am Lenkrad positionierten Satelliten wird die Bedienung der VA über die realitätsnahe Darstellung der PMS auf einem zentral vor dem Fahrer positionierten Touchdisplay ermöglicht. Auf diese Weise wird der Nutzer maßgeblich bei der Ausbildung eines passenden inneren Modells der PMS unterstützt. Durch die variierenden Kopplungen von Lenkrad und Touchdisplay wird dem Nutzer klar der aktuell aktive Modus kommuniziert, zusätzlich wird durch die hohe Variabilität der einzelnen Elemente den Anforderungen der einzelnen Modi optimal Rechnung getragen. So bietet das Konzept z.B. auch einen Lösungsvorschlag für die Interaktion mit den Infotainmentsystemen eines STP an.

Eine technische Umsetzung des beschriebenen Konzepts erfordert massive konstruktive Anpassungen der Lenkradstruktur, sicherheitsrelevante Themen stehen bei der Konzeptentwicklung nicht im Vordergrund. Die Umsetzung eines Airbags im Lenkrad wird durch das beschriebene Konzept in Frage gestellt. Dünne Touchdisplays mit Sollbruchstellen für Airbags scheinen aus technischer Sicht mittelfristig umsetzbar. Eine Interaktion mit dem Touchdisplay mit einem zentral im Lenkrad hinterlagerten Airbag kann jedoch für den Bediener ein gewisses Verletzungsrisiko bedeuten, falls während der Bedienung der Airbag ausgelöst wird.

### 3.3.4.3 Diskussion

Ein klarer Vorteil der aufgeteilten Konzepte ist die Möglichkeit der Modus-spezifischen Gestaltung der Interaktion. Der Modus TA kann entsprechend über ein am oder im Lenkrad positioniertes Betätigungselement oder -feld bedient werden. Auf diese Weise wird der Fahrer nicht zum einseitigen Loslassen des Lenkrads bei der ACC-Bedienung gezwungen. Der Modus VA kann ebenfalls über ein optimiertes Konzept bedient werden. Die PMS kann dem Fahrer in einer an die spezifische Sitzposition angepassten Form und einem für den Fahrer leicht verständlichen Abstraktionsgrad dargestellt werden. Durch die Aufteilung auf einzelne Bedienelemente kann zudem die Transparenz des Automationsspektrums für den Nutzer gesteigert werden, er muss sich kein inneres Modell des gesamten Spektrums erschaffen, sondern lediglich eines des jeweiligen Modus und seiner Bedienung.

Dies kann sich andererseits auch als Nachteil erweisen. Das aufgrund der technischen Voraussetzungen an sich komplexe Automationsspektrum umfasst die zusammengehörigen FAS der Führungsebene mit kontinuierlichem Eingriff. Eine kognitive Erfassung und Verarbeitung des Spektrums und seiner Bedie-

nung benötigt geringere Kapazität, falls verwandte Systeme und Strukturen in psychologische Einheiten (vgl. Abschnitt 2.1.1.2) zusammengefasst werden können. Eine klare Aufteilung der Bedienkonzepte der Modi einer im Grunde eng verwobenen Struktur von FAS kann diesem Ansinnen aus theoretischer Sicht entgegenwirken. Die Vor- und Nachteile einer Aufteilung müssen empirisch untersucht werden.

Weitere Nachteile der *aufgeteilten* Realisierungen sind sicherheitsrelevante technische Aspekte. Das Konzept *Gabel* stellt im Modus VA im Kollisionsfall eine potentielle Gefahr für den Rumpfbereich des Fahrers dar. Beim Konzept *Touch* ist für den Kollisionsfall im Modus VA bei einer Positionierung des Airbags im Zentrum des Lenkrads eine Gefährdung der oberen Extremitäten des Fahrers gegeben, sollte der Fahrer die PMS im Moment des Crashes bedienen.

Die aufgeteilten Konzepte *Gabel* und *Hebel* repräsentieren Ausführungsbeispiele des Prinzips der Aufteilung der Bedienung der Modi auf unabhängige Bedienkonzepte. Abweichend zu den dargestellten Konzeptideen sind weitere Umsetzungen denkbar. Beispielsweise kann sich im Rahmen einer prototypischen Umsetzung und Untersuchung der Konzeptkategorien eine weitreichende Präferenz des aufgeteilten Konzepts bei gleichzeitiger Bevorzugung der Nutzer einer Stick-ähnlichen PMS (vgl. Abschnitt 3.3.3.3) herausstellen. Diese Kombination ist als aufgeteiltes Konzept ebenso denkbar.

### 3.3.5 Zusammenfassung Bedienkonzepte

Die in Kapitel 3.3 vorgestellten *Reduzierten*, *Integrativen* und *Aufgeteilten* Bedienkonzepte versuchen mittels unterschiedlicher Ansätze, die Bedienung des Automationsspektrums aus Kapitel 3.1 zu ermöglichen. Die *Reduzierten Konzepte* aus Abschnitt 3.3.2 verfolgen den Ansatz der Reduktion der Anzahl zusätzlicher Bedienelemente. Vorteilhaft dabei ist die Vermeidung zusätzlicher Komplexität durch zusätzlich zu beherrschende Bedienkonzepte. Das Beispiel *Standardbedienelemente* zielt auf eine intuitive Handhabbarkeit der Systemkomplexität durch funktionale Erweiterungen der vorhandenen Bedienelemente Lenkrad, Gas- und Bremspedal ab. Die Einschränkungen der komfortablen Bedienung der TA sowie des Master-Slave-Konzepts der PMS können sich nachteilig auf die Akzeptanz auswirken.

Die *Integrativen Konzepte* aus Abschnitt 3.3.3 in den Ausführungsbeispielen *Hebel*, *Handballenablage* und *Drehdrücksteller* setzen die Bedienung des Spektrums durch die Entwicklung *eines* zentralen Bedienelements um. Die Bedienung der einzelnen Modi erfolgt auf Basis variabler Formgebung und Positionierung der Elemente sowie der Implementierung unterschiedlicher Betätigungscharakteristika für jeden Modus. Vorteilhaft ist die Konzentration des Interaktionskonzepts auf einen Bedienort sowie die gute Zeigerwirkung der variabel gestalteten Bedienelemente. Als Nachteil ist die kompromissbehaftete Lösungsfindung durch die Integration verschiedener Modi mit abweichenden Anforderungen an ein Bedienkonzept zu sehen.

Die *Aufgeteilten Konzepte* aus Abschnitt 3.3.4 verfolgen ebenso den Ansatz der Schaffung signifikanter Betätigungscharakteristika für die einzelnen Modi des Spektrums. Die unterschiedlichen Charakteristika werden hier jedoch durch unterschiedliche Betätigungselemente und -orte umgesetzt. Für den Modus TA setzen die Konzepte auf konservative Lösungen im Bereich des Lenkrads und der Lenksäule. Der Modus VA wird in den Konzeptbeispielen *Gabel* und *Touch* durch - im Kontext der Bedienung von FAS - neue Modalitäten bedient. Im Konzept *Gabel* wird die PMS per berührungsloser Gestenbedienung umgesetzt, im Konzept *Touch* durch die Bedienung eines Touchdisplays. Einschränkungen einer technischen Umsetzung sind die hier nur am Rande erwähnten sicherheitskritischen Aspekte der Konzepte.

## 3.4 Konzeptauswahl

Die Potentiale der in Kapitel 3 vorgestellten Mensch-Maschine-Systeme werden im folgenden Kapitel analysiert und bewertet. Die Güte der diskutierten Bedienkonzepte hängt einerseits von der systemergonomischen und anthropometrischen Qualität der Umsetzungen ab. Andererseits ergeben sich aus dem Gesamtfahrzeugkontext Rückschlüsse auf das Potential der einzelnen Konzepte. In Abschnitt 3.4.1 erfolgt eine allgemeine Analyse im Gesamtfahrzeugkontext. In Abschnitt 3.4.2 erfolgt eine detaillierte Bewertung durch einen quantitativen, methodischen Vergleich anhand einer Bewertungsmatrix. Als Ergebnis der Bewertung werden vielversprechende Bedienkonzepte weiterentwickelt, konkretisiert und als Prototypen aufgebaut. Diese Prototypen werden anschließend durch Fahrstudien evaluiert. Die prototypische Umsetzung und Bewertung der Systeme in einem Versuchsträger ist im anschließenden Kapitel 5 beschrieben.

### 3.4.1 Bewertung der Konzepte

Die Vor- und Nachteile der in Kapitel 3.3 diskutierten Bedienkonzepte für die Bedienung des Automationsspektrums aus Kapitel 3.1 ist von den Rahmenbedingungen einer Realisierung der einzelnen Ideen im Gesamtfahrzeugkontext abhängig.

Zum einen stehen sicherheitsrelevante Aspekte im Blickpunkt. Hier treten Anforderungen wie Crashsicherheit oder die Bediensicherheit im Missbrauchsfall in den Vordergrund. Zum anderen ergeben sich für den Kontext einer mittelfristigen Realisierbarkeit in einem Serienfahrzeug technische Bewertungsaspekte. Neben ästhetischen Gesichtspunkten liegt ein Fokus auf der Erfüllung anthropometrischer und systemergonomischer Anforderungen.

Im Folgenden folgt auf Basis von Abschnitt 3.3.2.2, Abschnitt 3.3.3.4 und Abschnitt 3.3.4.3 eine Bewertung der zentralen Aspekte der einzelnen Ausführungsbeispiele im Gesamtfahrzeugkontext.

#### 3.4.1.1 Bewertung Konzept *Standardbedienelemente*

**Gesamtheitliche Bewertung** Aus Gesamtfahrzeugsicht ist die mäßige Erweiterung der Bedienumfänge im Fahrzeuginnenraum durch das Konzept *Standardbedienelemente* positiv zu bewerten. Die Anzahl und damit die Auswirkung einer Integration der zusätzlichen Stellelemente ins Fahrzeug ist entsprechend gering. Die funktionale Erweiterung der Standardbedienelemente erscheint mit Hinblick auf aktuelle Entwicklungen im Bereich der aktiven Lenksysteme (EPS) und aktiver Pedale (z.B. aktives Gaspedal) technisch realisierbar. Die Darstellung des visionären Modus AUTON erfordert größere konstruktive Anpassungen des Fahrzeuginnenraums. Mit vergleichbar visionärem Charakter existieren jedoch bereits Innenraumkonzepte, die beispielsweise ein bündiges Versenken des Lenkrads in der Schalttafel ermöglichen.

**Ergonomische Bewertung** Aus ergonomischer Sicht vorteilhaft ist die geringe zusätzliche Komplexität durch die Erweiterung des Automationsspektrums. Ziel der Erweiterung der Standardbedienelemente muss die Möglichkeit der intuitiven Erlernbarkeit der Bedienung und die klare Abgrenzung der Modi zueinander sein. Diese Entwicklung vorausgesetzt, muss der Fahrer kein zusätzliches inneres Modell eines neuartigen Bedienelements bilden.



Andererseits läuft die durchgängige Verwendung der Standardbedienelemente dem Anliegen der TA und VA zuwider, den Fahrer von der Bedienung eben dieser Elemente zu entlasten. Vor allem für den Bereich der TA wird dies eine Komforteinschränkung im Vergleich zur heutigen Ausprägung einer ACC-Bedienung zur Folge haben.

Die konzeptbedingte Auftrennung der Master-Slave-PMS ist bzgl. des in dieser Arbeit umgesetzten Bedienkonzepts nachteilig. Für die Bedienung eines Automationsspektrums mit diskreten Stufen weist das Konzept Standardbedienelemente einen Mangel an Selbsterklärungsfähigkeit auf. Die Systemzustände der Modi werden durch das Erscheinungsbild des Bedienkonzepts nicht klar kommuniziert, lediglich der Modus AUTON ist durch das Verfahren der Standardbedienelemente deutlich abgegrenzt. Die Modi MF, TA und VA unterscheiden sich hauptsächlich durch die Betätigungscharakteristik und die Rückmeldung der Stellteile. Diese nicht offensichtliche Differenzierung muss vom Entwickler durch eine klare visuelle Darstellung des Spektrums durch geeignete grafische Anzeigen ausgeglichen werden, eine weitere Belastung des beim Fahren bereits stark beanspruchten visuellen Informationsaufnahmekanals ist die Folge (vgl. Abschnitt 2.1.1.2).

Ein offener Punkt ist die Nutzerakzeptanz der Umsetzung variabler Kraft-Weg-Verläufe im Bremspedal. Die Fähigkeit des Nutzers zur Wahrnehmung und korrekten Interpretation der systemseitig eingespielten Kraftverläufe muss nachgewiesen werden.

### 3.4.1.2 Bewertung Konzept *Hebel*

**Gesamtheitliche Bewertung** Das skizzierte Umsetzungsbeispiel des Hebels (Abbildung 3.6) lässt die Notwendigkeit eines tiefgreifenden Eingriffs in die aktuelle Gestalt der Mittelkonsole erahnen. Ein Vorteil dieser konstruktiven Anpassung ist die Möglichkeit, die Zugriffsmöglichkeiten des Beifahrers auf das Bedienelement konstruktiv einzuschränken. Die Positionswechsel in x-Richtung sowie die Notwendigkeit eines ausreichend großen Greifraums in der direkten Umgebung des Hebels für die Modi TA und VA erfordern verhältnismäßig viel Bauraum zur Integration des Konzepts in eine Mittelkonsole. Die Positionen der verbleibenden Elemente (z.B. MMI-Bedienelement, SbW-Tasten, elektronische Parkbremse etc.) müssen folglich der Position des Hebels untergeordnet werden.

Im skizzierten Konzept sind die Bedienelemente zur Wahl der Getriebestufe als Tasten ausgeführt. Ein Großteil der Nutzerpopulation ist an die Gangwahl mit Hilfe unterschiedlich geformter Hebel gewöhnt. Die Projektion der Funktion des bekannten Gangwahlhebels auf Tasten ist für den Nutzer an sich durch die Beschriftung der Tasten leicht nachvollziehbar. Die simultane Einführung eines neuen, hebelartigen Bedienelements zur Bedienung einer grundlegend abweichenden Funktionalität kann jedoch unter Umständen die Nutzer vor Adaptionsprobleme stellen.

**Ergonomische Bewertung** Aus ergonomischer Sicht ergeben sich durch die Variabilität des Hebels in x-Richtung große Vorteile. Die Positionen der einzelnen Modi kann optimal an die Bedürfnisse des Fahrers angepasst werden. Die Position der TA kann in einer Form bestimmt werden, in der sowohl große als auch kleine Personen den Hebel beim Umgreifen vom Lenkrad während der Fahrt problemlos ertasten und bedienen können. Durch eine Translation in (-x)-Richtung zur Darstellung des Modus VA kann die Position des Hebels an die erwartete, entspannt zurückgelehnte Sitzhaltung des Fahrers angepasst werden. Ein weiterer Vorteil des Hebels ist die Art der Betätigung in x-Richtung. Durch einen form-schlüssigen Zu- oder Umfassungsgriff erfolgt die Betätigung mit minimalem Aufwand. Die Kraftüber-

tragung bei der Betätigung in y-Richtung erfolgt auf Basis eines Reibschlusses, folglich ist ein höherer Kraftaufwand für die Hand zu erwarten.

Als Einschränkung wird das potentielle Einklemmen von Extremitäten oder Gegenständen erachtet. Einerseits ist zu erwarten, dass Fahrer die freie, plane Fläche in unmittelbarer Nähe zum Fahrerarbeitsplatz als Ablageflächen für Handys, Brillen oder Ähnlichem missbrauchen werden. Andererseits kann durch die Auslegung von A+ und der OFF-Betätigung ein Einklemmen der Finger weitgehend vermieden werden, ein Restrisiko bleibt jedoch bestehen.

### 3.4.1.3 Bewertung Konzept *Handballenablage*

**Gesamtheitliche Bewertung** Die Integration der HBA in das Innenraum-Konzept eines Fahrzeugs erscheint als mittelfristig realisierbar. Die Möglichkeit zur vielseitigen Nutzung des Elements als Handballenablage und FAS-Bedienelement wird als Vorteil erachtet.

Die technische Realisierbarkeit, vor allem hinsichtlich des für die Aktorik des Bedienelements zur Verfügung stehenden Bauraums, muss anhand weiterführender Entwicklungen überprüft werden, da beispielsweise Einschränkungen der Belüftung des Fahrzeug-Fonds oder bestehender Lösungen zur Infotainmentbedienung nicht akzeptabel sind.

Ein negativer Aspekt der Positionierung eines integrativen FAS-Bedienelements in der Mittelkonsole ist mit Hinblick auf das Gesamtfahrzeugkonzept die Möglichkeit der Einflussnahme des Beifahrers. Bei geeigneter Gestaltung der HBA ist eine harmonische Integration in den Fahrzeuginnenraum möglich, jedoch stellt das Bedienteil an sich ein zusätzliches Element in einem Cockpit dar, welches bereits eine hohe Zahl an Betätigungsmöglichkeiten aufweist.

**Ergonomische Bewertung** Bei einer ergonomischen Bewertung des integrativen Stellelements treten zunächst die positiven Aspekte des Bedienelements in den Vordergrund. Einerseits wird durch die prominente Zeigerwirkung durch die Rotation des Grundkörpers die Zustandskommunikation unterstützt. Zusätzlich wird durch die intelligente Reduktion der verfügbaren Bedienelemente beim Moduswechsel den reduzierten Interaktionsmöglichkeiten der PMS für den Modus VA Rechnung getragen. Die Möglichkeit des schnellen Wechsels zwischen Infotainmentbedienung und Bedienung des FAS erscheint ebenfalls vorteilhaft.

Die Positionierung des Elements in x-Richtung ist durch die funktionale Kette von Handballenablage und MMI-Bedienelement vorgegeben, in x ergibt sich konzeptbedingt keine Positionsveränderung des Bedienelements. Die Position des Elements ist also bestenfalls ein Kompromiss zwischen einer aufwandsarmen, mit minimaler Blickabwendung verbundenen Betätigung im Modus TA und einer komfortablen Erreichbarkeit der Handballenablage und des MMI-Bedienteils im Modus VA.

Ein genereller Nachteil der integrativen Konzepte besteht in der Notwendigkeit zum einseitigen Loslassen des Lenkrads zur Bedienung des Modus TA. Diese Einschränkung wird durch die kompromissbehaftete Positionierung in x-Richtung zusätzlich verstärkt.

Die Integration des Elements und die zusätzlichen Interaktionsmöglichkeiten mit dem Fahrzeug in der Mittelkonsole stellen den Fahrer aus ergonomischer Sicht insgesamt vor eine komplexe Aufgabe. Bei der Umsetzung ist dabei auf eine sinnvolle Begrenzung der für den Fahrer zu verarbeitenden psychologischen Einheiten zu achten. Dies schränkt die Freiheitsgrade zukünftiger Konzepte der Infotainmentbedienung ein.

#### 3.4.1.4 Bewertung Konzept *Drehdrücksteller*

**Gesamtheitliche Bewertung** Für den DDS ergeben sich die Einschränkungen in Bezug auf die Bediensicherheit durch die Eingriffsmöglichkeit des Beifahrers.

Die konstruktiven Veränderungen im Gesamtfahrzeugkontext sind als vergleichsweise gering einzustufen, eine serientaugliche Umsetzung und Integration der Elemente mit den beschriebenen Funktionen (Translation in z-Richtung, variabler Kraftverlauf der Drehbewegung des Ringes und des Sticks etc.) steht aus.

Die Ähnlichkeit des zugrundeliegenden Bedienkonzepts des DDS zu anderen Bedienelementen der Mittelkonsole stellt im aktuellen Kontext einen Nachteil hinsichtlich der Differenzierbarkeit der Bedienelemente in der Mittelkonsole dar. Absehbare Erweiterungen der MMI-Bedieneinheiten durch Touchpads oder -screens haben das Potential, das Konzept des MMI-Drehdrückstellers in naher Zukunft adäquat zu ersetzen. Die Verwechslungsgefahr zwischen den beiden Drehdrückstellern ist damit nicht mehr gegeben.

**Ergonomische Bewertung** Die erwähnten Einschränkungen der Modus-spezifischen Positionierungsmöglichkeiten des Bedienkonzepts erfordern eine kompromissbehaftete Positionierung des Elements in x-Richtung. Analog dem Konzept HBA besteht ein gangbarer Kompromiss in einer Positionierung des DDS, die einen geringen Bewegungsaufwand zur Bedienung der TA bei gleichzeitig stark ausgeprägter Blindbedienbarkeit, sowie eine komfortable Bedienung in der Modus-spezifischen Sitzposition der VA ermöglichen.

Aus systemergonomischer Sicht schränkt das Konzept die Bedienbarkeit des Modus TA geringfügig ein, da aufgrund der hierarchischen Aktivierung der Modi durch die A+-Taste bei aktiver TA die Übernahme der aktuellen Geschwindigkeit als Setzgeschwindigkeit nicht möglich ist.

Ein großer Vorteil des DDS besteht in der guten Differenzierbarkeit der einzelnen Modi. Sowohl die Betätigungscharakteristik als auch das Erscheinungsbild der Modi TA und VA unterscheiden sich grundlegend. Für den Modus TA besteht eine ausgeprägte Analogie zwischen der Anzeige der Setzgeschwindigkeit im Tachokranz sowie der Verstellung der Setzgeschwindigkeit durch die Rotation des Drehringes. Die Bedienung der VA durch einen geeigneten Stick entspricht ebenfalls bei einem Großteil der Nutzerpopulation durch Computerspiele (z.B. Sony Playstation, vgl. Abschnitt 2.3.3.2) bekannten inneren Modellen. Vor allem die Freiheitsgrade des Sticks sind daher dem Nutzer auf Anhieb ersichtlich.

Weiterentwicklungen aktueller ACC-Funktionalitäten, wie beispielsweise die Übernahme von Geschwindigkeitsvorschlägen oder Tempolimits als Setzgeschwindigkeiten, können durch die Variation des Gegenkraftverlaufs der Betätigung des Drehringes umgesetzt werden. Dadurch verkörpert das System außerdem ein hohes Potential für zukünftige Entwicklungen.

Durch die in die einzelnen Stellelemente integrierte Funktionsvielfalt ist es möglich, das Automationspektrum durch eine im Vergleich geringe Anzahl von Tasten abzubilden. In der Folge ergibt sich für den Nutzer eine überschaubare Komplexität der Bedienung.

#### 3.4.1.5 Bewertung Konzept *Gabel*

**Gesamtheitliche Bewertung** Im Gesamtfahrzeugkontext hat eine Umsetzung der *Gabel* weitreichende Anpassungen des Fahrerarbeitsplatzes zur Folge. Die Integration des gabelförmigen Elements

in das Lenkrad bedarf massiver Entwicklungsarbeiten und konstruktiver Anpassungen des Fahrerarbeitsplatzes. Zusätzlich muss die Funktionalität der Gestenbedienung unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen des Automotive-Bereichs (geringer verfügbarer Bauraum, wechselnde Lichtverhältnisse, Vibrationen etc.) durch geeignete Sensorik im Fahrzeuginnenraum umgesetzt werden. Aus Sicht der In-sassensicherheit ergibt sich durch eine Umsetzung des Konzepts die Anforderung, dass die Gabel im Falle eines Crashes keine Gefahr für den Fahrer darstellen darf. Dies muss durch eine geeignete konstruktive Ausführung des Bedienelements sowie ein angepasstes Airbag-Konzept erreicht werden.

Die beschriebenen Nachteile ergeben sich aus der Integration einer neuen Bedienmodalität in die Domäne *Fahrzeug*, haben jedoch keinen Einfluss auf die Güte des Bedienkonzepts.

Vorteilhaft ist der hohe Innovationsgrad des Konzepts, durch die Gestenbedienung wird ein aktueller technischer Trend frühzeitig ins Fahrzeug integriert.

Aus Sicht des Gesamtfahrzeugkonzepts birgt das Konzept überwiegend große Herausforderungen für die Interieur-Entwicklung. Diese Einschränkungen müssen den erwarteten ergonomischen Vorteilen gegenübergestellt werden.

**Ergonomische Bewertung** Vorteilhaft ist die Bedienung des Modus TA auf Basis eines etablierten und akzeptierten Bedienkonzepts. Die Bedienung über einen Lenkstockhebel ermöglicht eine intuitive Manipulation der TA. Ein Loslassen des Lenkrads sowie Blickabwendungen sind zur Bedienung kaum nötig.

Zur Interaktion mit der PMS ist durch die Gestenbedienung keine Betätigung von Tasten oder anderen Elementen nötig. Der Slave der PMS wird durch die Hand des Nutzers repräsentiert. Als Vorteil wird eine starke Abstraktion und damit geringe Komplexität der Bedienung angenommen. Nachteilig kann sich bei der kontaktlosen Bedienung durch Gesten die Unidirektionalität des Informationsflusses zwischen Fahrer und Bedienelement auswirken. Die Rückmeldung des Systems erfolgt über den visuellen sowie auf Basis der Fahrzeugbewegungen über den haptischen Kanal. Eine Kommunikation der einschränkenden Umgebungsparameter, wie beispielsweise die laterale Position des Egofahrzeugs im Fahrstreifen, ist daher nur eingeschränkt möglich.

Durch die Aufteilung der Bedienung der einzelnen Modi auf unterschiedliche Bedienelemente ergibt sich eine klare Unterscheidbarkeit der Modi.

Die Möglichkeit zur Nutzung der Gabel als Aufnahme eines Eingabelements des Modus AUTON erscheint als zusätzlicher Vorteil des Konzepts. Die Form und Art dieses Elements muss im weiteren Entwicklungsprozess erarbeitet werden.

#### 3.4.1.6 Bewertung Konzept *Touch*

**Gesamtheitliche Bewertung** Eine Realisierung des Konzepts *Touch* erscheint nur auf Basis eines *Steer-by-Wire*-Konzepts machbar. Der Wegfall der mechanischen Verbindung bedeutet einen tiefgreifenden Eingriff in das Grundkonzept heutiger Serienfahrzeuge, scheint aber aufgrund der Entwicklungen anderer Betätigungselemente (Gangwahlhebel, Gaspedal etc.) aus technischer wie zulassungsrelevanter Sicht langfristig realisierbar.

Da sich die Anpassungen auf das Lenkrad beschränken, bewegen sich die für den Fahrer wahrnehmbaren Eingriffe in die Interieurstruktur in akzeptablem Rahmen. Durch die Möglichkeit zur variablen Gestaltung der Displayinhalte kann dem Nutzer für die auch heute verfügbaren Modi ein weitgehend

gleichbleibendes Erscheinungsbild des Lenkrads mit einem zentral positionierten Herstellerlogo präsentiert werden. Lediglich die Form des Pralltopfs bzw. der Airbagabdeckung erscheint rechteckig.

Aus Sicht des Sicherheitskonzepts sind größere Anpassungen nötig. Ein zentral im Lenkrad positionierter Airbag ist aufgrund des Verletzungsrisikos bei der Bedienung der VA nachteilig, selbst wenn Displays mit eingearbeiteten Airbagklappen in Zukunft verfügbar sein können.

**Ergonomische Bewertung** Durch die aufgeteilte Ausführung des Bedienkonzepts und die stark differenzierte Darstellung der einzelnen Modi wird der jeweils aktive Modus klar und transparent kommuniziert. Analog dem Konzept *Gabel* ist eine Bedienung der TA durch eine für den Modus optimierte Bedieninsel seitlich am Pralltopf realisiert. Die VA kann in einem für den Nutzer nachvollziehbaren Abstraktionsgrad visualisiert werden, die innere Modellbildung wird dadurch vereinfacht. Möglich ist es auch, die an sich aufgeteilten Bedienkonzepte der einzelnen Modi stückweise zu integrieren. Beispielsweise kann die Bedienung der TA zum Teil auf das Touchdisplay ausgelagert werden. Eine Distanzeinstellung erfolgt entsprechend durch eine an die Bedieninsel anschließende Fläche im Touchscreen. Das Gesamtkonzept ist dadurch flexibel erweiterbar und an zukünftige funktionale Weiterentwicklungen der einzelnen Modi adaptierbar.

Durch die Interaktion mit dem zentral vor dem Fahrer positionierten Touchdisplay ist für Wechsel zwischen der visuellen Wahrnehmung der Fahrzeugumgebung und dem Fokus auf das Display eine starke Akkommodation des Auges nötig. Diese Akkommodation erhöht die körperliche Beanspruchung des Fahrers und nimmt Zeit in Anspruch.

Durch die hohe Variabilität der im Touchdisplay dargestellten Inhalte ergeben sich auch für den Modus AUTON zahlreiche Möglichkeiten zur Gestaltung der Interaktion mit den Infotainmentsystemen. Die Umfunktionierung des umgeklappten Lenkradkranzes als Handballenablage für die Bedienung des Touchfeldes erscheint zwar technisch aufwendig, ist jedoch aufgrund des stark erhöhten Bedienkomforts bei der dauerhaften Betätigung von großem Nutzen.

### 3.4.2 Methodischer Konzeptentscheid

Tabelle 3.1 führt einen methodischen Konzeptvergleich der in Kapitel 3 diskutierten Konzepte durch. Die positiven und negativen Aspekte repräsentieren die Grundlage der Bewertung. Die eingetragenen Werte werden auf Basis von Diskussionen mit Experten aus der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen, der Konzeptentwicklung im Bereich der Ergonomie und Wissenschaftlern aus dem Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion eruiert. Der Erfüllungsgrad der einzelnen Kriterien wird anhand einer 9-3-1-Skala bewertet (vgl. z.B. [91]), wobei die Bewertung eines Aspekts mit einer „9“ eine starke Erfüllung der Anforderung ausdrückt. Die Werte der Skala dienen zur besonderen Betonung der „starken Erfüllung“ eines Kriteriums im Vergleich zu den anderen Bewertungsstufen. Die Kriterien werden nicht gewichtet. Den teilnehmenden Experten wird im Vorfeld der Bewertung die Beschaffenheit der 9-3-1-Bewertungsskala erläutert. Die Basis der entwickelten Konzepte sowie der methodischen Bewertung ist die Anforderungsliste aus Tabelle 2.1. Der quantitative Vergleich dient als Wegweiser der weiterführenden Entwicklungstätigkeiten. Die Bewertungen der 3. Unterebene werden zusammengefasst, das Gesamtergebnis ergibt sich aus der Addition der Bewertung der 2. Gliederungsebene der Aspekte (1.1 + 1.2 + 1.3 usw.). Bei fehlender Eindeutigkeit wird die Bewertung auf die niedrigere Stufe abgerundet.

Tabelle 3.1: Bewertung der Bedienkonzepte des automatisierten Fahrens auf Basis der Anforderungsliste aus Tabelle 2.1

		Konzeptkategorie					
		<i>reduziert</i>	<i>integrativ</i>			<i>aufgeteilt</i>	
		Standard- BE	HBA	Hebel	DDS	Gabel	Touch
Nr.	Kriterium						
<b>1.</b>	<b>Systemergonomische Kriterien</b>						
1.1	Aufgabenangemessenheit	9	9	3	9	3	3
1.1.1	Grad der Komplexität	9	3	3	9	9	9
1.1.2	Grad der Integration	9	9	3	9	3	9
1.1.3	Sensorische Ressourcen	9	9	9	9	3	1
1.1.4	Situationsbewusstsein und motorische Reaktionsfähigkeit in der VA	3	9	9	9	3	3
1.2	Unterscheidbarkeit	1	9	9	9	3	9
1.3	Selbsterklärungsfähigkeit	3	3	1	9	3	9
1.3.1	Kommunikation aktueller Systemzustände	3	3	1	9	3	9
1.4	Steuerbarkeit	3	3	3	3	3	3
1.5	Primäre äußere Kompatibilität	3	9	9	9	9	9
1.5.1	Sinnfälligkeit	3	9	9	9	9	9
1.6	Primäre innere Kompatibilität	9	3	3	9	1	9
1.6.1	Betätigungsrichtung	9	3	3	9	1	9
1.7	Sekundäre Kompatibilität	9	9	9	9	9	9
1.8	Konsistenz	3	9	9	9	9	9
1.9	Fehlerrobustheit	3	3	3	3	3	3
1.10	Anpassbarkeit und Erlernbarkeit	1	3	3	9	3	9
1.11	Bedienbarkeit des gesamten Spektrums	3	3	3	9	3	9
1.11.1	MF	9	9	9	9	9	9
1.11.2	TA	3	3	3	3	9	9
1.11.3	VA	1	9	9	9	3	9
1.11.4	AUTON	3	3	3	9	3	9
<b>2.</b>	<b>Anthropometrische Kriterien</b>						
2.1	Handlungsorgan	3	9	3	9	3	9
...							

Tabelle 3.1: Bewertung der Bedienkonzepte des automatisierten Fahrens auf Basis der Anforderungsliste aus Tabelle 2.1

		Konzeptkategorie					
		<i>reduziert</i>	<i>integrativ</i>			<i>aufgeteilt</i>	
		Standard- BE	HBA	Hebel	DDS	Gabel	Touch
Nr.	Kriterium						
2.2	Häufigkeit und Dauer der Betätigung	9	9	9	9	9	9
2.3	Greifart	9	9	9	9	9	9
2.4	Kopplungsart	9	9	9	9	3	9
2.5	Formgestaltung	3	9	3	9	3	9
2.6	Erreichbarkeit	9	3	9	3	9	9
2.7	Sichtbarkeit	9	9	9	9	3	3
2.8	Blindbedienung	3	3	3	3	9	9
2.8.1	Haptische Unterscheidbarkeit zu anderen Bedienelementen	9	3	3	3	9	9
2.8.2	Haptische Unterscheidbarkeit der Automationsstufen	3	3	3	9	9	9
2.9	Bedienkomfort	9	9	9	9	3	3
2.9.1	Körperhaltung und -stellung	9	9	9	9	3	3
2.10	Bediensicherheit	9	3	3	3	1	1
2.10.1	Fehlbedienung	9	3	9	3	3	3
2.10.2	Verletzungsgefahr	9	9	3	3	1	1
2.10.3	Quetschgefahr	9	3	1	1	1	1
<b>3</b>	<b>Technisch-physikalische Kriterien</b>						
3.2	Technische Realisierbarkeit	3	9	9	9	1	3
3.3	Adaptivität und Adaptierbarkeit des Systems	3	3	3	9	1	1
3.4	Mechanischer Aufbau	3	9	9	9	3	3
<b>4.</b>	<b>Ästhetische Kriterien</b>						
4.1	Bedienerlebnis	1	3	3	3	3	9
4.2.	Design	9	9	1	9	3	9
$\Sigma$		138	168	146	198	112	176

Anhand der Bewertung wird eine positive Beurteilung der integrativen Konzepte *DDS*, *HBA* und *Hebel* deutlich. Der *DDS* hebt sich dabei im Vergleich leicht ab, das Konzept *Hebel* wird im Vergleich eher mäßig bewertet. Das Konzept *Touch* erscheint als vielversprechender Vertreter der *aufgeteilten* Konzeptkategorie, während das Konzept *Gabel* sowie das *reduzierte* Konzepte *Standard-BE* im Rahmen dieser Bewertung vergleichsweise geringes Potential offenbaren.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Bewertung auf Basis der Erfüllung von im Vorfeld definierten Anforderungen an ein spezifisches Bedienkonzept des automatisierten Fahrens durchgeführt wird. Die entstehende Rangreihenfolge spiegelt entsprechend das Potential der Konzepte hinsichtlich einer Realisierung innerhalb der für diese Arbeit geltenden Rahmenbedingungen wider. Beispielsweise sind einige Einschränkungen der *reduzierten* Konzeptkategorie auf die mangelnde Kompatibilität zwischen den Bedienkonzepten und den vorgestellten Umsetzungen für TA und VA zurückzuführen. Im Umkehrschluss verspricht beispielsweise die Entwicklung eines Bedienkonzepts für die Bedienung weiterführender Automationsstufen auf Basis des Konzepts *Standard-BE* aufgrund vorteilhafter Konzeptideen (Reduzierung der Anzahl zusätzlicher Bedienelemente, Nutzung bekannter Stellteile etc.) großes Potential.

Die beschriebenen Bedienkonzepte sollen für potentielle Kunden erlebbar und beurteilbar in ein reales Versuchsfahrzeug integriert werden. Die Zahl der abhängigen Variablen einer nachfolgenden Evaluierungsstudie muss beherrschbar bleiben. Daher wird entschieden, aufgrund der durchgängig positiven Bewertung die Entwicklung der drei *integrativen* Elemente zur Bedienung des Automationsspektrums voranzutreiben. Die Konzepte werden im Detail spezifiziert, ein geeignetes technisches Konzept wird erarbeitet und die Elemente und zu bedienenden Funktionen werden prototypisch in einen Versuchsträger integriert. Das Konzept *Touch* wird trotz der positiven Beurteilung im Rahmen dieser Arbeit nicht tiefergehend untersucht, eine Umsetzung und Evaluierung erfolgt in nachgelagerten Entwicklungstätigkeiten.





## 4 Technische Umsetzung

Das folgende Kapitel beschreibt die Details der technischen Umsetzung der Konzepte und deren Integration in einen Versuchsträger. In den technischen Grundlagen (Kapitel 4.1) werden die Spezifikationen des Versuchsträgers beschrieben. Zur werksseitig vorhandenen technischen Ausstattung werden die Anpassungen und Einbauten des Fahrzeuges detailliert. Zusätzlich legt das Kapitel die Umsetzung der FAS-Trägerfunktionen zur Simulation des Automationspektrums (Kapitel 4.2) sowie die gewählten Lösungen zum Aufbau der Bedienelemente (Kapitel 4.3) dar.

### 4.1 Versuchsträger

Als Versuchsfahrzeug dient ein AUDI A7 (Baujahr 2010). Das Fahrzeug und die verbauten Zusatzelemente sind in Abbildung 4.1 dargestellt.



Abbildung 4.1: Versuchsträger A7 mit Erweiterungen nach [2]

**Grundausrüstung** Der A7 verfügt über die FAS ACC S&G und AALA. Diese ermöglichen die Automation der Längs- und Querverführung für den Bereich der TA. Die Umfeld-Sensorik des Fahrzeugs entspricht dem Serienstand, unter anderem sind - wie in Abschnitt 2.3.1 beschrieben - zwei LRR-Sensoren und eine Videokamera verbaut.

Das werksseitig umgesetzte HMI ermöglicht die semi-transparente Projektion fahrrelevanter Informationen auf die Windschutzscheibe im Bereich über der Motorhaube (HUD). Ein großes Farbdisplay zwischen den Tuben des Kombiinstrumentes ermöglicht die Darstellung vielfältiger Inhalte. Die Bedienung des ACC erfolgt über einen Lenkstockhebel, die (De-)Aktivierung des AALA kann der Fahrer über die Taste auf der Stirnseite des Blinkerhebels vornehmen. Eine Auswahl zwischen frühem und spätem Lenkeingriff wird in einem Untermenü des MMI getroffen.

**Modifikationen** Das aktuelle Bedienlayout der Mittelkonsole weist eine Vielzahl verschiedener Stillelemente zur Bedienung des Fahrzeuges auf. Eine zentrale Stellung nimmt hier der serienmäßig verbaute Gangwahlhebel ein. Um bei der Entwicklung neuartiger FAS-Bedienelemente und deren Integration in die Mittelkonsole des Fahrzeugs gestalterische Freiheiten zu schaffen, wird der Gangwahlhebel durch Tasten ersetzt. Diese Lösung soll einer Überfrachtung der Mittelkonsole mit großen, zentralen Bedienelementen und einer Verwechslung vorbeugen. Hierfür muss das Doppelkupplungsgetriebe mit mechanischer Kopplung zwischen Gangwahlhebel und Getriebe durch ein Automatikgetriebe mit *Shift-by-Wire* (SbW)-Betätigung ersetzt werden. Ein Gangwechsel wird hier nicht durch mechanische Kraftübertragung von Gangwahlhebel auf das Getriebe, sondern durch elektronische Signale initiiert.

Die Displays des Kombiinstrumentes und des HUDs werden modifiziert. Durch die Anpassung ist es möglich, die Inhalte beider Displays vollständig zu überblenden. Die simulierten Anzeigen werden auf einem Fahrzeug-PC generiert. Ein Videosplitter teilt die Grafikausgabe des Rechners zwischen einer Standardausgabe auf einem im Fahrzeug verbauten Monitor, dem HUD und dem Kombi-Display auf. Animierte Inhalte werden in der Plattform *Flash* der Fa. *Adobe* programmiert. Auf den Fahrzeugbussen vorliegende Informationen werden abgegriffen und in die Simulation integriert. Im Kombiinstrument wird durch die Anzeige von Inhalten wie der Restreichweite, der Gesamt- und Tageskilometer sowie der Uhrzeit durch geeignete grafische Gestaltung eine seriennahe Anmutung der grafischen Überblendung erreicht.

Das HUD dient in diesem Kontext zur Visualisierung des Automatisierungspotentials und der Triggeraufforderungen im Modus VA. Für die MF und die TA ist das HUD ausgeschaltet.

Im Fahrzeug wird eine Vielzahl zusätzlicher Steuergeräte und Meßtechnik verbaut. Auf die gewählten Lösungen wird an dieser Stelle nicht im Detail eingegangen. Die zusätzliche Hardware ermöglicht unter anderem:

- permanente Anfahrbereitschaft des ACC S&G durch eine Manipulation der Daten direkt auf dem ACC-Steuergerät
- Ansteuerung der AALA-Schnittstelle durch Auftrennen und Manipulation des Datenflusses auf dem Flexray
- Filterung und Substitution der originären Botschaften des ACC-Lenkstockhebels durch proprietär generierte Botschaften
- Etablierung der Kommunikation der Systembestandteile auf dem fahrzeugeigenen Dashboard-CAN (D-CAN)

Zur Umsetzung des Potentialtriggerkonzepts wird im Bereich des Kombiinstruments eine Fahrerüberwachungskamera verbaut. Die Kamera wird in Verbindung mit einem Programm der Fa. *CanControls* zur Detektion des Gesichtsfeldes und seiner Orientierung auf einem der beiden Fahrzeugrechner betrieben. Die USB-Platinenkamera vom Typ *uEye 1226 LE* der *IDS Imaging Development Systems GmbH* wird im Bereich des Drehzahlmessers in den Tubus integriert. Die Position schränkt in der aktuellen Ausführung den Bewegungsbereich des Drehzahlmessers ein. Um eine Kollision mit dem Kameraobjektiv zu vermeiden, wird die obere Extremstellung des Zeigers auf 5000 U/min limitiert. Die Positionierung der Kamera erfolgt mithilfe des RAMSIS Menschmodells in einem 3D-Flächenmodell des A7 Interieur. In der gewählten Position befindet sich das Gesichtsfeld der 5-Perzentil-Frau und des 95-Perzentil-Mannes mit den entsprechenden, variierenden Sitz- und Lenkradpositionen im Detektionsbereich der Kamera. Die Kamera ist mit einem Tageslichtsperrfilter versehen, im Bereich des Innenspiegels und des Spiegeldreieck verbaute IR-LEDs sorgen für weitgehend gleichmäßige Lichtverhältnisse im Fahrzeuginnenraum. Die Frequenz der LEDs ist zur Vermeidung des unverhältnismäßig großen Aufwands nicht mit der Abtastfrequenz der Kamera gekoppelt, bei sehr wechselhaften Lichtbedingungen mit starken und/oder hochfrequenten Hell-Dunkel-Kontrasten kann das Kamerasystem nur eingeschränkt benutzt werden. Zu technischen Details des realisierten Beleuchtungs-Kamera-Systems sei der interessierte Leser auf [39] verwiesen.

## 4.2 Automationsspektrum

Das Fahrzeug ist in der Lage, mit den verbauten Seriensystemen die Modi MF und TA des Automationsspektrums abzubilden. Die Zustände *ACC Off*, *Stand-by* und *Aktiv* des ACC S&G-Seriensystems sind hierfür ausreichend. Der Prototyp ist nicht in der Lage, den Modus AUTON umzusetzen.

Der AALA wirkt entsprechend der Definition des dargestellten Automationsspektrums als Bestandteil des Modus VA. Das System wird für die Versuchszwecke in einer Konfiguration appliziert, die unter Versuchsbedingungen auf einem abgesperrten Testgelände einen Hands-Off-Betrieb erlaubt. Für die Modi MF und TA wird das System deaktiviert. Obwohl die Definition des Spektrums eine unterlagerte, situativ eingreifende Systemausprägung des AALA für den Modus TA vorsieht, kann dies aus technischen Gründen im Versuchsträger nicht umgesetzt werden.

### 4.2.1 Modi MF und TA

Der Modus MF entspricht in der gewählten Terminologie dem Zustand *Off* des ACC-Systems. In der Serienumsetzung werden gegebenenfalls gespeicherte Setzgeschwindigkeiten in der Raststellung des ACC-Lenkstockhebels gelöscht. Da die elektronischen Signale dieser Raststellung von den neuen, prototypischen Bedienelementen im Versuchsträger nicht nachgebildet werden können, wird der Modus MF lediglich simuliert. Setzgeschwindigkeiten bleiben im Speicher und werden durch ein Leuchten der korrespondierenden Diode im Tachokranz angezeigt.

Der Modus TA wird im Fahrzeug gemäß der Festlegung des Automationsspektrums durch das ACC S&G-Seriensystem dargestellt. Das System entspricht aus funktionaler Sicht der in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Systemauslegung: Neben einer Steuerung der Systemzustände kann der Nutzer Sollzeitlücke und Wunschgeschwindigkeit einstellen.



## 4.2.2 Modus VA

Der Modus VA wird im Versuchsträger durch eine Kombination und aufgabenspezifische Adaption der Seriensysteme zur Teilautomation der Längs- und Querführung realisiert.

### 4.2.2.1 Längsführung

Die Längsführungskomponente des Modus VA wird durch das im Fahrzeug verbaute ACC S&G-Seriensystem umgesetzt. Dieses nutzt neben den Radarsensoren die im Spiegelfuß verbaute Kamera zur Anreicherung der vorliegenden Objektinformationen. Das System entspricht vollständig der Serienumsetzung, lediglich der Zeitraum der Anfahrbereitschaft ist durch den im Versuchsträger möglichen, direkten Zugriff auf das Steuergerät vom Entwickler frei wählbar.

### 4.2.2.2 Querführung

Die Querführungskomponente wird von der Sensorik und dem Funktionsalgorithmus des AALA übernommen. Abweichend vom Seriensystem wird die vom Aktor einzuregelnde Solltrajektorie jedoch nicht durch einen Trajektorienabgleich auf Basis detektierter Fahrstreifenmarkierungen vorgegeben (vgl. Abschnitt 2.3.1.2). Sie erfolgt durch die von AALA-Kamera und den LRR-Sensoren detektierten Objektinformationen eines Vorderfahrzeugs. Die laterale Position innerhalb des Fahrstreifens und die Geschwindigkeit des Objekts sind die Grundlage einer Substitution der Eingangsdaten eines ansonsten unveränderten Funktionsalgorithmus. Auf Basis der neuen Regelvorgabe folgt das Egofahrzeug der Lateralposition der errechneten Mitte eines detektierten Vorderfahrzeugs. Das Prinzip ist unter dem Begriff *Lock-on-Target (LOT)* bekannt.

Zur Detektion der Spurposition wird vorzugsweise auf die Daten der Kamera zurückgegriffen. Liefert diese Daten von unzureichender Qualität, wird alternativ auf die Radarsensoren zurückgegriffen. Aufgrund der höheren Zuverlässigkeit des Sensors zeichnen sich Radardaten durch höhere Verfügbarkeit aus. Allerdings birgt das Sensorprinzip den Nachteil, dass die verbauten LRR primär für die Detektion von Längsabständen konzipiert sind. Für die Detektion eines lateralen Versatzes sind sie nur eingeschränkt geeignet. In diesem Fall verhält sich die Querregelung im Versuchsträger trotz eines applizierten Filters zur Abschwächung des Effekts sehr sprunghaft.

Die Hands-On-Erkennung wird ebenso wie die untere Geschwindigkeitsgrenze von 65 km/h des AALA-Seriensystems deaktiviert.

### 4.2.2.3 Integrierte Längs- und Querführung

Der für den Nutzer erlebbare Unterschied zu den Serienausführungen der FAS besteht in der Verkopplung der beiden Systeme zu einem einheitlichen, integrierten Gesamtsystem. Diese erfolgt mittels eines *CAN Access Programming Language (CAPL)* - Knotens im Programm *CANalyzer* der Fa. *Vector*. Durch diesen Funktionsblock werden zum einen die Eingangsdaten der Querregelung generiert und substituiert, zum anderen legt das Programm die Systemgrenzen und die Wirkstruktur des vollautomatischen Systems fest. Beim Überschreiten dieser Grenzen wird der Modus VA systeminitiiert deaktiviert. Die Rahmenbedingungen der integrierten Längs- und Querführung sind:

- Vorderfahrzeug vorhanden
- max. Abstand: 50 m
- Geschwindigkeitsbereich: 0-50 km/h bzw. gewählte Setzgeschwindigkeit
- Lenkwinkelbereich: 0-60°
- max. Lenkwinkelgradient: 10°/s

Die Existenz eines regelrelevanten Vorderfahrzeuges ist die Grundvoraussetzung für die Möglichkeit zum Aktivieren der VA, da das Regelverhalten des im Versuchsträger adaptierten Querführungssystems auf seinen Objektinformationen beruht. Die Maximalgeschwindigkeit wird im CAPL-Knoten auf 50 km/h begrenzt, das System überschreitet jedoch nie die eingestellte ACC-Setzgeschwindigkeit.

Die Trägerfunktion des Modus VA wird, der Festlegung des Automationsspektrums aus Kapitel 3.1 entsprechend, gemäß einer seriell-sequentiellen Wirkstruktur ausgelegt. Das System reagiert folglich einheitlich auf Eingaben des Nutzers. Betätigungen des Lenkrads, des Brems- oder des Gaspedals führen zu einer Deaktivierung der VA und einem Rückfall in den Stand-by-Zustand des Modus TA. Eine Deaktivierung am jeweiligen Betätigungselement wird analog verarbeitet.

In Einklang mit der seriell-sequentiellen Kooperationsform zwischen Fahrer und FAS wird im Modus VA die gesamte Längs- und Querführungsaufgabe vom Fahrzeug übernommen. Die Kommunikation erfolgt durch ereignisdiskrete Eingaben des Fahrers an das FAS, diese Interaktion beruht auf der in Abschnitt 3.3.1.3 beschriebenen PMS und der Interaktion mit dem Potentialtrigger.

**Parametrierung** Bei Bedarf ist es dem Nutzer möglich, die laterale Position seines Fahrzeugs in Relation zu einem Vorderfahrzeug zu parametrieren. Aus technischen Gründen ist dies in einer ersten Ausbaustufe des Versuchsträgers lediglich in Querrichtung möglich. Bei der Ausführung wird durch einen Eingriff in die Querdynamik ein diskreter Versatz hergestellt, die Trajektorien von Vorder- und Egofahrzeug verlaufen parallel. Im System ist eine maximale Auslenkung des Versatzes hinterlegt, diese wird für den Zeitraum der Parametrierung durch den Nutzer gehalten. Die Extremposition wird entsprechend des umgebenden Fahrzenarios ausgelegt: eine zentrierte Position des Vorderfahrzeuges vorausgesetzt, entsprechen die Extrema einer unmittelbaren Annäherung der jeweiligen Räder einer Fahrzeugspur an die korrespondierende Fahrstreifenmarkierung.

**Wechselmanöver** Der Nutzer kann außerdem einen Wechsel zwischen zwei Vorderfahrzeugen veranlassen. Voraussetzung ist die Existenz eines zweiten Vorderfahrzeuges innerhalb eines durch die Geometrie des Erfassungsbereichs der Fahrzeugsensorik festgelegten Feldes. Bei der Ausführung verlässt das Egofahrzeug die zentrale Position hinter dem Vorderfahrzeug und verfährt durch Eingriffe in die Querdynamik in eine zentrale Position hinter dem zweiten Vorderfahrzeug.

Befahren die Vorderfahrzeuge in geeigneter Relativposition zueinander und zum Egofahrzeug zwei getrennte Fahrstreifen, stellt sich dem Nutzer dieser Wechsel der regelrelevanten Vorderfahrzeuge als *Wechsel des Fahrstreifens* dar.

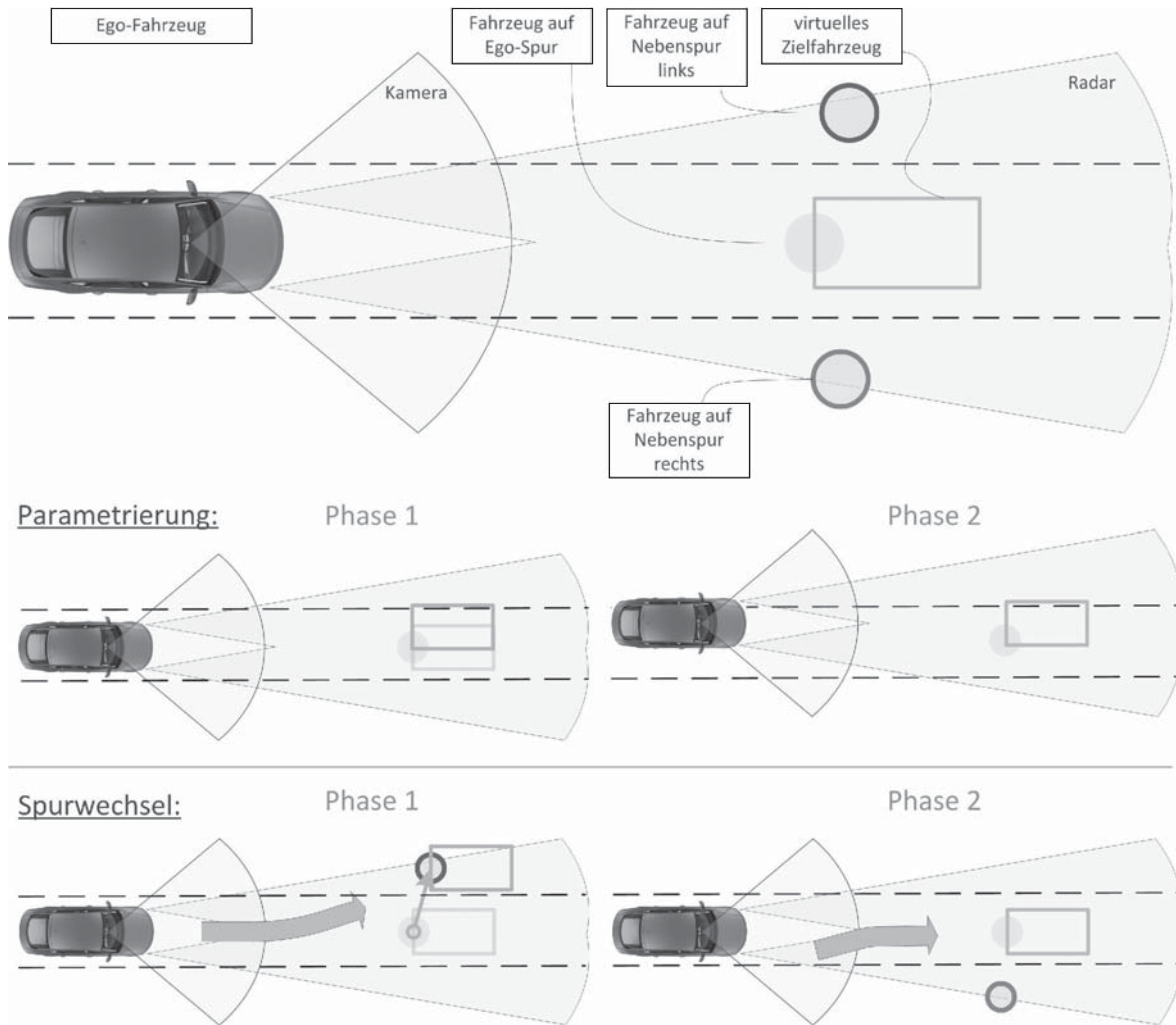


Abbildung 4.2: Parametrierung und Wechselmanöver auf Basis des virtuelles Zielobjekts nach [2]

**Virtuelles Zielobjekt** Technische Grundlage der Parametrierung und des Wechselmanövers ist die Generierung eines virtuellen Zielobjekts als Eingangsgröße der Querführung. Möchte der Nutzer eine Parametrierung vornehmen, wird die Position des virtuellen Zielobjekts lateral verschoben. Die Querführung des Egofahrzeugs empfindet diese Verschiebung nach, bis die Trajektorie des Egofahrzeugs mit der des virtuellen Objekts übereinstimmt. Triggert der Fahrer ein Wechselmanöver, so bewegt sich das virtuelle Zielobjekt vom aktuellen (realen) Vorderfahrzeug zum angestrebten, neuen Zielobjekt. Das Egofahrzeug wird dem virtuellen Objekt nachgeführt. Dieses wird anschließend mit dem realen Zielobjekt fusioniert. Auf diese Weise ist durchgängig ein Vorderfahrzeug vorhanden, der Modus VA bleibt entsprechend aktiv. Das Prinzip ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Als Grundlage des Wechselmanövers muss der laterale Abstand zwischen den Vorderfahrzeugen ausreichend groß sein, damit die Sensorik zwei separate Objekte wahrnehmen kann. Der für die Vorderfahrzeuge zur Verfügung stehende Bereich zur Ermöglichung des Wechselmanövers wird in Versuchsfahrten ermittelt. Die Längsführungskomponente des Modus VA arbeitet unabhängig von virtuellen Zielobjekten und folgt weiterhin den realen Vorderfahrzeugen.

### 4.2.3 Modus AUTON

Die Umsetzung des Modus AUTON bedarf per Definition der Integration einer autonomen Rückfallebene. Diese dient zur adäquaten Handhabung aller Situationen, in denen der Fahrer die Fahrzeugführung nicht rechtzeitig übernehmen kann. In der aktuellen informationstechnischen und sensorischen Struktur des A7 ist die Möglichkeit zur autonomen Ansteuerung eines sicheren Zustands nicht umgesetzt. Der Versuchsträger ist hinsichtlich seiner funktionalen sowie sensorischen Kapazitäten jedoch modular erweiterbar aufgebaut, die Integration der vierten Stufe des Automationsspektrums in Form eines autonomen Staupiloten ist Gegenstand aktueller Entwicklungstätigkeiten.

Inhalte zur funktionalen und sensorischen Kompetenz von FAS des Modus AUTON werden unter anderem in [57] oder [13] behandelt.

Der Modus AUTON stellt aus Sicht der HMI-Entwicklung überschaubare Anforderungen an das FAS-Bedienkonzept. Der Fokus muss an dieser Stelle eher auf der Entwicklung eines an die Anforderungen der autonomen Fahrzeugführung angepassten Fahrzeuginnenraums liegen. Interessante Aspekte sind zum einen die im Modus AUTON zur Verfügung stehenden, erweiterten Infotainmentfunktionen und das zugehörige HMI. Von Interesse sind natürlich auch die anthropometrischen Anpassungen des Fahrzeuginnenraums an einen Fahrer, dessen Interaktionsraum nicht mehr durch die primäre Fahraufgabe, sondern durch seine Rolle als Passagier bestimmt ist. Diese Entwicklungen sind jedoch nicht Teil dieses Projektes, sondern werden als weiterführende Aufgaben verstanden.

## 4.3 Bedienelemente

Die technische Umsetzung der Bedienelemente beinhaltet die funktionale Belegung der Freiheitsgrade der Elemente. Neben systemergonomischen Gestaltungsgrundsätzen dienen hier die Erkenntnisse einer Studie zur Auslegung integrativer Stellelemente als Auslegungsprämissen (Abschnitt 4.3.1). Der Prozess zur technischen Umsetzung der Konzeptideen (Abschnitt 4.3.2) umfasst iterative Schritte zur Konsolidierung gestalterischer Anforderungen und technischer Rahmenbedingungen. Parallel wird die geometrische Integration der Stellteile in das Fahrzeugcockpit unter Berücksichtigung der anatomischen Gegebenheiten der Nutzerpopulation vorgenommen.

### 4.3.1 Studie zur Auslegung integrativer Stellelemente

Die funktionale Belegung von Freiheitsgraden integrativer Stellelemente erfolgt auf Basis bekannter Bewegungs-Effekt-Stereotypen. Im Rahmen dieses Projekts wird anhand von Vorüberlegungen eine Untersuchung zum intuitiven Nutzerverständnis integrativer Stellelemente zur Erweiterung bzw. Bestätigung der Wissensbasis durchgeführt.

**Versuchsziele** Ziel der Studie im Allgemeinen ist die Überprüfung des theoretischen, intuitiven Verständnisses integrativer Stellelemente zur Bedienung hochautomatisierter FAS. Im Speziellen wird das prinzipielle Verständnis des geplanten Master-Slave-Ansatzes der Parameter- und Manöverschnittstelle zur Bedienung des Modus VA untersucht. Die Probanden werden mit Prinzipaufbauten möglicher integrativer Stellelemente konfrontiert. Diese sind in die Mittelkonsole eines Fräsmodells integriert. Aufga-



be der Versuchsteilnehmer ist es, heutige und zukünftige FAS-Funktionen der Führungsebene nach ihren Vorstellungen auf die Freiheitsgrade dieser Stellelemente zu projizieren.

**Stichprobe** Das Probandenkollektiv setzt sich aus 31 Teilnehmern (28 männlich, 3 weiblich) mit einem Durchschnittsalter von 32.3 Jahren zusammen. Alle Teilnehmer sind Rechtshänder und besitzen durchgängig Erfahrung mit FAS der Führungsebene, insbesondere dem ACC-System zur Teilautomatation der Längsführung. 35.5% haben das System ausprobiert, 38.7% nutzen das System unregelmäßig, 16.1% nutzen es häufig, 9.7% nutzen das System sehr oft. Alle Versuchspersonen sind Mitarbeiter der Technischen Entwicklung der AUDI AG, daher zeichnet sich das Kollektiv durch technisches Verständnis und Fähigkeit zur Abstraktion komplexer Zusammenhänge aus. Gepaart mit der ACC-Vorerfahrung der Teilnehmer wird mit der gewählten Stichprobe die Abbildung einer - auf Basis eines potentiellen, mittelfristigen Serieneinsatzes - repräsentativen Nutzergruppe für hochautomatisierte FAS angestrebt.

**Versuchsdurchführung** Zur Durchführung des Versuchs wird jeweils eines der beiden in Abbildung 4.3 dargestellten Prinzipbedienelemente in die Mittelkonsole des Fräsmodells eines zukünftigen Fahrzeugs der Mittelklasse der AUDI AG integriert.

Die Bedienelemente *Hebel* und *Handschlitten* repräsentieren frühe Entwürfe möglicher, integrativer Bedienelemente mit einer Vielzahl denkbarer Freiheitsgrade. Diese sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Neben der Integration verschiedener Dreh- und Tastenelemente und der Umsetzung einer Push-Betätigung in (-z)-Richtung wird für beide Bedienelemente eine per Tastendruck entriegelbare Betätigung innerhalb der x/y-Ebene realisiert. Der Hebel integriert diese Verstellmöglichkeit in eine im Hebelfuß verdeckte Mechanik. Der Handschlitten realisiert die x-Translation durch eine in x-Richtung verschiebbare Schiene. Die Verschiebung in y-Richtung erfolgt über ein in den Griff des Schlittens integriertes Schienensystem. Im verriegelten Zustand ist eine Translation der Elemente im Bereich von ca.  $\pm 2 \text{ mm}$  möglich. Die Entriegelung erfolgt bei beiden Elementen durch einen elektromechanischen Aktuator. Dieser entspermt bei Bedarf analog Abbildung 4.3 den gesamten Verstellweg (ca.  $\pm 12 \text{ mm}$ ) der Bedienteile. Das zur Integration verwendete Fräsmodell dient der Beurteilung ergonomischer Aspekte von Fahrzeugkonzepten in der frühen Phase des Produktentwicklungsprozesses. Die Bedienelemente sind für die Zwecke des Versuchs modular austauschbar gestaltet. Durch die realitätsnahe Gestaltung des Modells mit komplettem Interieur, A-Säule, einer Windschutzscheibe, Türen und den aus dem Innenraum sichtbaren Exterieur-Anbauten findet die Untersuchung an einem realistisch nachgebildeten Fahrerarbeitsplatz statt. Die Versuchspersonen setzen sich in das Modell, der Versuchsleiter beschreibt zusammenfassend die Funktionalität und Bedienung der relevanten FAS ACC S&G, AALA und STA. Anschließend können im Rahmen einer freien Exploration und - bei Bedarf - unter Anleitung des Versuchsleiters alle Freiheitsgrade des verbauten Bedienelements erprobt werden. Die Teilnehmer werden nun mit verschiedenen realitätsnahen Fahrsituationen konfrontiert. Diese beschreiben im alltäglichen Fahrbetrieb auftretende Situationen bei der Bedienung von FAS der Führungsebene. Die Einzelsituationen werden den Probanden als sequentielle Szenen einer konstruierten, imaginären Fahrt auf Landstraße und Autobahn dargelegt. Sie werden den Teilnehmern mündlich erläutert, gleichzeitig werden symbolhafte Illustrationen gereicht. Anschließend erfolgt die Aufforderung durch den Versuchsleiter, eine intuitiv gewählte, zu der beschriebenen Situation passende Bedienhandlung am Bedienelement auszuführen. Die Bedienhandlung wird vom Versuchsleiter protokolliert. Die Teilnehmer werden vor dem Versuch darauf hingewiesen, dass funktionale Doppelbelegungen von einzelnen Freiheitsgraden möglich sind. Für die Zwecke des Versuchs sind vor allem intuitive Antworten wichtig.

Im Anschluss an die erste Sequenz wird der Proband gebeten, das erlebte Prinzipbedienteil mittels eines Fragebogens zu bewerten. Zwischenzeitlich tauscht der Versuchsleiter die Elemente aus. Zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekten wird die Abfolge systematisch variiert.

Die gestellten BediENAufgaben umfassen ein breites Spektrum an möglichen Interaktionen zur Bedienung teil- und vollautomatisierter Systeme. So soll z.B. ein ACC oder AALA aktiviert werden. Während der imaginären Fahrt werden die Probanden aufgefordert, die Parameter Setzgeschwindigkeit und Sollzeitlücke zu verändern. In einer Stausituation wird die Parametrierung eines lateralen Versatzes des Egofahrzeugs innerhalb des eigenen Fahrstreifens in einer Stausituation untersucht. In Anhang F findet sich die mündliche Situationsbeschreibung und die zugehörige Illustration der Aufgabe „Lateralen Versatz herstellen“.

**Ergebnisse** Entriegelte und nicht-entriegelte Betätigungen innerhalb der x/y-Ebene werden für die Zwecke der Versuchsauswertung zusammenfassend der Kategorie *richtungsgebundener, translatorischer*

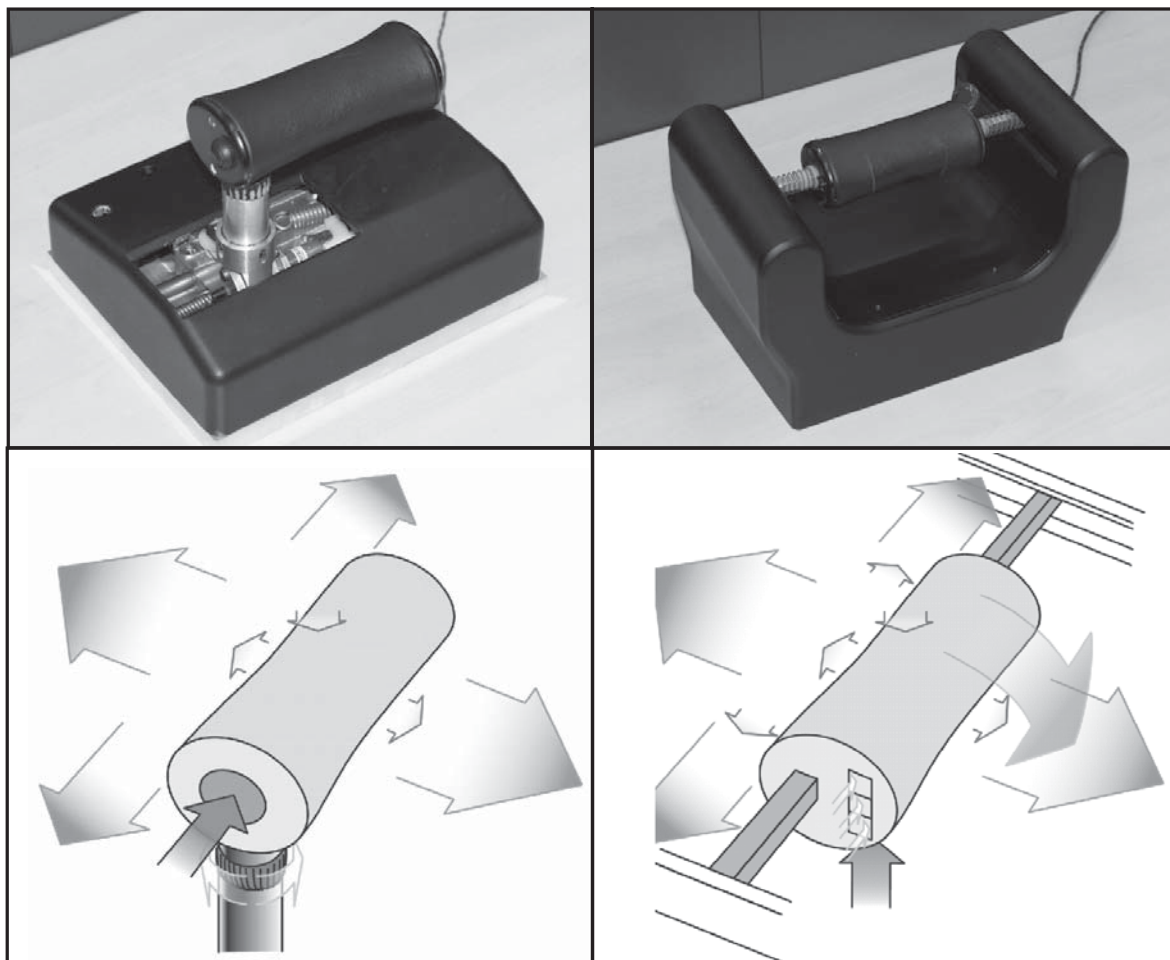


Abbildung 4.3: Prinzipbedienteile *Hebel* (links) und *Handschlitten* mit ihren Freiheitsgraden nach [7]

*Betätigungen* zugeordnet. Es wird angenommen, dass beide Betätigungsformen (entriegelt und nicht-entriegelt) auf einem vergleichbaren inneren Modell beruhen. Dieses Modell wird für diese Untersuchung mit „*Projektion des Egofahrzeugs auf das Bedienelement*“ umschrieben.

Das Prinzipbedienteil *Handschlitten* wird für die Herstellung des lateralen Versatzes von den Versuchsteilnehmern in 83.8% mit einer longpush-Betätigung in Versatzrichtung belegt. 12.8% stellen den Versatz durch einen Trigger in Versatzrichtung her, ein Teilnehmer wünscht die Herstellung des Versatzes durch eine kurze Betätigung entgegen der Richtung des Versatzes.

Zur Herstellung des lateralen Versatzes durch den STA wählen für das Bedienelement *Hebel* 80.6% der Probanden eine longpush-Betätigung des Hebels in die y-Richtung des gewünschten Spurversatzes. 16.1% triggern die Herstellung des Versatzes durch eine kurze Betätigung des Hebels in die gewünschte y-Richtung. Ein Proband wünscht den Versatz durch ein Herabdrücken des Hebels und gleichzeitiger kurzer Betätigung entgegengesetzt der gewünschten Versatzrichtung anzutriggern.

Um die Setzgeschwindigkeit des aktivierten ACC-Systems mit dem Element *Handschlitten* zu erhöhen, wählen 54.8% eine translatorische Verstellung des Bedienelements in Fahrtrichtung, 29% realisieren die Verstellung durch Betätigung der Wipptaste. 13% der Probanden wählen eine Rotation des Schlittens, 3.2% durch eine Translation entgegen der Fahrtrichtung.

Für das Bedienelement *Hebel* wünschen 51.6% eine Erhöhung der Setzgeschwindigkeit durch translatorische Verstellung in Fahrtrichtung, 32.3% wünschen eine Einstellung durch Drehen des Drehrades im Uhrzeigersinn. 6.4% erhöhen die Setzgeschwindigkeit durch eine Betätigung entgegen der Fahrtrichtung, 9.6% wählen irrelevante, unrealistische Kombinationen von Einzelbetätigungen.

Um die Sollzeitlücke des ACC-Systems zu vergrößern, bewegen beim Bedienelement *Handschlitten* 48.4% der Probanden das Bedienelement translatorisch entgegen der Fahrtrichtung, 35.5% betätigen hierfür die seitliche Wipptaste, 6.4% betätigen in Fahrtrichtung. 9.7% der Betätigungen sind keiner einheitlichen Kategorie zuzuordnen.

Für das Bedienelement *Hebel* wählen 61.3% eine Betätigung des Drehrades, 32.3% betätigen den Hebel entgegen der Fahrtrichtung, 6.4% vergrößern den Abstand durch eine Betätigung in Fahrtrichtung.

Aus Beobachtungen während der freien Exploration wird mangelndes intuitives Verständnis bzgl. der Entriegelungstaste beider Elemente beobachtet. Beim Element *Handschlitten* wird dieser Effekt durch die verdeckt positionierte Taste verstärkt. Ein weiterer relevanter Aspekt ergibt sich durch die Beobachtung der Nutzung der Bedienelemente als Handablage. Das Verhalten wird bei mehr als der Hälfte der Probanden beobachtet.

**Diskussion** Ein zentrales Ziel der Untersuchung ist eine Einschätzung des Potentials einer Master-Slave-PMS für den Modus VA. Die PMS zielt darauf ab, den Nutzer bei der Bildung eines inneren Modells zur Bedienung des Modus VA zu unterstützen. Die Untersuchung soll Auskunft über bereits bestehende Modellvorstellungen zwischen Stellteil und Regelstrecke geben.

Die intuitive Belegung der integrativen Stellelemente zur Parametrierung des lateralen Spurversatzes in einer Stausituation gibt Auskunft zu dieser Fragestellung. Zusätzlich geben die Ergebnisse der Fragen nach der Einstellung der Setzgeschwindigkeit und der Vergrößerung des gewünschten Abstands bei der teilautomatisierten Fahrt Hinweise auf bereits vorhandene, innere Modelle. Dieser Zusammenhang ist jedoch durch die ACC-Vorerfahrung der Nutzer beeinflusst. Die Einstellung der Sollzeitlücke in Form einer Kompensations-, und die Einstellung der Setzgeschwindigkeit in Form einer Folgeaufgabe (vgl.

Abschnitt 2.1.1.4) bei der Bedienung mit dem ACC-Lenkstockhebel ist den Probanden aufgrund ihrer ACC-Erfahrung bekannt.

Die Teilnehmer des Versuches stellen mit großer Mehrheit mit beiden Bedienelementen den Querver-satz durch eine Betätigung in Fahrzeugquerrichtung her. Dieses Ergebnis belegt den modellhaften, inne-ren Zusammenhang zwischen Fahrzeug und Bedienelement. Das Master-Slave-Grundprinzip der PMS ist damit nicht nur theoretisch anhand von Kompatibilitätsüberlegungen, sondern auch im Experiment nachgewiesen. Der theoretisch wie praktische Zusammenhang - in der Theorie auch als primäre äußere Kompatibilität beschrieben (vgl. Abschnitt 2.1.1.4) - besagt demnach, dass die resultierende Fahrzeugbe-wegung mit der Bewegungsrichtung des Stellteils übereinstimmt. Diese Erkenntnis nährt die Erwartung eines intuitiven Nutzerverständnisses der Master-Slave-PMS zur Steuerung der Systeme des Modus VA. Die funktionale Belegung der Stellelemente für die Parametrierung des ACC-Systems lässt vergleichbare Rückschlüsse zu. Die Aussagen können aufgrund der Vorprägung der Probanden mit der Bedienung von ACC nur als Hinweise genutzt werden. Die Hälfte der Probanden betätigt für eine Erhöhung der Setzge-schwindigkeit beide Bedienelemente in Fahrtrichtung. Für die Anpassung der Sollzeitlücke belegen die Hälfte der Probanden den Handschlitten mit einer translatorischen Betätigung des Elements entgegen der Fahrtrichtung. Für die Einstellung der Zeitlücke mit dem Hebel ergibt sich ein abweichendes Bild, die Mehrheit der Probanden verstellt die Zeitlücke mittels des Drehrades. Diese Erkenntnis deckt sich mit der systemergonomischen Annahme einer abweichenden Wahrnehmung der Nutzer von Distanz- und Geschwindigkeitsverstellung. Eine vergleichbare Verteilung für die Distanzverstellung des Hand-schlittens ist nicht gegeben. Eine Ursache hierfür kann die äußere Inkompatibilität zwischen der vertikal angeordneten Wipptaste und resultierender Fahrzeugbewegung sein. Jedoch stützt auch hier die Nutzung der Wipptaste zur Einstellung der Sollzeitlücke durch einen beachtenswerten Prozentsatz der Teilnehmer die Annahme einer differenzierten Wahrnehmung von Geschwindkeits- und Abstandseinstellung.

Insgesamt ergeben sich auf Basis der Erprobung der beiden Prinzipbedienelemente zusätzliche Ansprü-che an die technische Umsetzung der integrativen Stellelemente:

- Reduktion der Freiheitsgrade im Vergleich mit Prinzipbedienteilen
- Klare Kommunikation der Freiheitsgrade (Formsprache)
- Keine „versteckten“ Freiheitsgrade durch Entriegelung
- Keine Push-Betätigung in z-Richtung

### 4.3.2 Technische Umsetzung der Bedienelemente

Die in Abschnitt 3.3.3 beschriebenen Konzeptideen der integrativen Stellelemente Hebel, Drehdrück-steller (DDS) und Handballenablage (HBA) werden im Detail ausgearbeitet und technisch umgesetzt. Zusätzlich zur Unterstützung des Projekts durch die an diesem Projekt beteiligten Fachbereiche (Ent-wicklung *Ergonomiekonzepte* und Entwicklung *Fahrerassistenzsysteme*) der AUDI AG werden an dieser Stelle die *Germaneers GmbH* zur technischen Umsetzung, sowie die *IconIncar GmbH* für Aspekte des technischen Designs in den Prozess integriert.

Ziel der Entwicklung ist der modulare Aufbau der Bedienelemente zur Integration in die Mittelkonsole des Versuchsträgers A7. Für die Durchführung von vergleichenden Untersuchungen mit Probanden muss

die technische Umsetzung eine schnelle Austauschbarkeit der Module gewährleisten. Neben der funktionalen Möglichkeit zur Integration der Elemente in das Fahrzeugsystem wird - als Grundlage einer späteren Bewertung der Module in Probandenuntersuchungen - eine durchgängig hochwertige Anmutung angestrebt. Aus diesem Grund erfolgt die Entwicklung unter der Prämisse einer Anlehnung an die aktuelle Interieur-Designsprache des A7-Versuchsträgers. Zudem wird versucht, die Bedienbarkeit und Funktionalität der standardmäßig in der Mittelkonsole verbauten Elemente nicht einzuschränken. Die *elektronische Parkbremse (EPB)*, die *Motor Start/Stop-Taste* zur Zündungsbetätigung, die Tasten des SbW-Elements zum Wechseln der Fahrstufen und natürlich das Bedienfeld zur MMI-Bedienung, bestehend aus Hard- und Softkeys und einem Drehdrücksteller.

Im Zuge der Auslegung des Packages der Module werden die Elemente unter Einhaltung ergonomischer Vorgaben positioniert. Zentral ist hierbei die komfortable Erreichbarkeit aller Elemente für die betrachtete Nutzerpopulation. Die Positionierung erfolgt unter Berücksichtigung der Häufigkeit und Wichtigkeit der Bedienung. Eine detaillierte ergonomische Auslegung der Mittelkonsole für das integrierte FAS-Bedienelement und die weiteren Bestandteile der Mittelkonsole erfolgt exemplarisch für die beiden anderen Module am Element *Hebel* in Abschnitt 4.3.2.1.

#### 4.3.2.1 Hebel

Wie in Abschnitt 3.3.3.1 beschrieben, bildet das integrative Konzept *Hebel* das Automationsspektrum durch vier diskrete Positionen und einer positionsabhängig veränderlichen Betätigungscharakteristik ab.

**Anthropometrische Auslegung** Auf Basis des skizzierten Konzeptentwurfs wird anhand der ergonomischen und technischen Rahmenbedingungen eine Positionierung des Hebels und der übrigen Bedienelemente der Mittelkonsole erarbeitet. Der Bereich für die Positionierung des Hebels befindet sich zwischen den in Abbildung 4.4 dargestellten Schnittpunkten. Im dargestellten  $y$ -Schnitt bilden rote Linien analog den Erläuterungen in Tabelle 4.1 die geschnittenen Erreichbarkeitsflächen im Bereich der Mittelkonsole für die 5-Perzentil-Frau ab. Die blauen Linien zeigen den 95-Perzentil-Mann. Der  $y$ -Schnitt erfolgt durch die Mittelebene eines Hebels mit einer Länge von 115 mm bei  $y = -17.5$  im Konstruktionskoordinatensystem des Fahrzeugs.

Der Bereich zwischen den Schnittpunkten B und C repräsentiert den für beide Perzentil-Extrema komfortabel bedienbaren Bereich: hier kann der M95 das Element zwischen den Fingergliedern und dem Handballen, die F05 mit dem Handballen bedienen. Die F05 muss das Schlüsselbein hierfür auslenken, der M95 erreicht das Element mit dem Handballen ohne Auslenkung des Schlüsselbeins. Entsprechend wird dieser Bereich für die Bedienung des Modus TA (Hebel in *Position 2*) und des Modus VA (Hebel in *Position 3*) gewählt. Für die Bedienung der TA wird hierfür ein Fokus auf die lenkradnahe Positionierung des Hebels gelegt. Dies soll eine komfortable, aufwandsarme und ohne Blickabwendung durchführbare Bedienung des Modus ermöglichen. Ausgehend von angelehnt und angeschnallt im Fahrzeug sitzenden Passagieren, repräsentiert *Position 3* einen Kompromiss zwischen komfortabler Erreichbarkeit des Bedienelements im Modus VA, der visuellen Unterscheidbarkeit der Bedienelementposition im Vergleich zum Modus TA und der örtlichen Nähe zum Lenkrad. Diese muss weiterhin gegeben sein, um die Übernahme des Fahrzeugs zu ermöglichen.

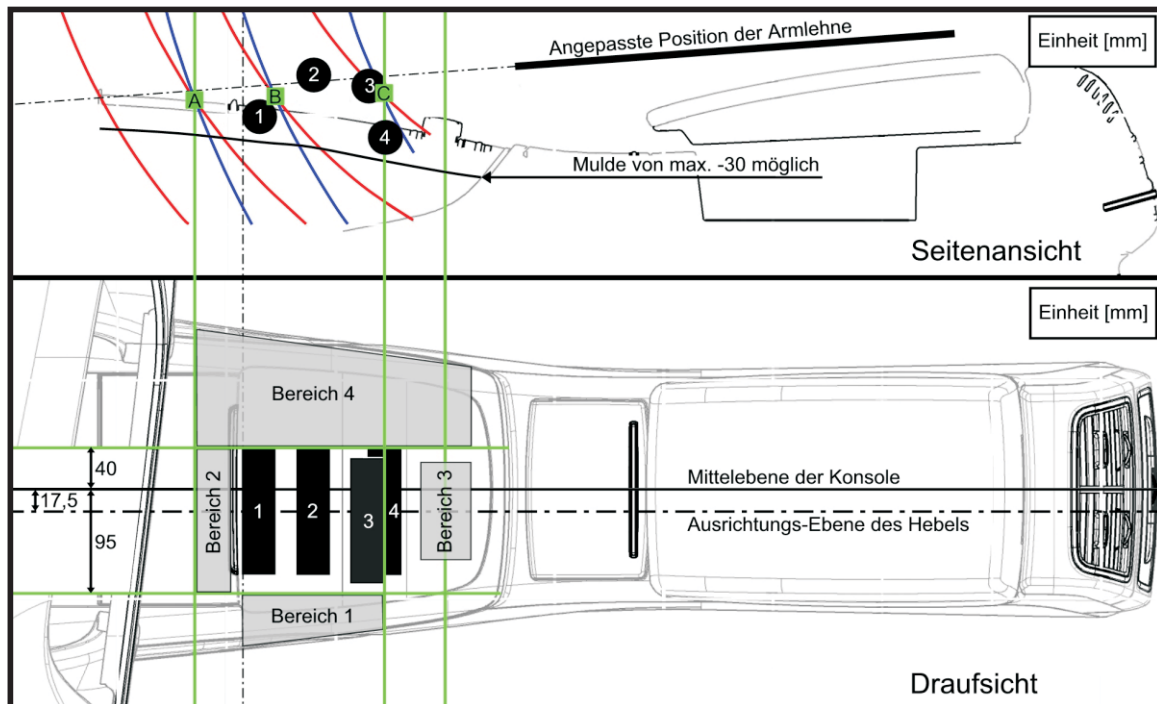


Abbildung 4.4: Ergonomische Auslegung der Mittelkonsole auf Basis der Erreichbarkeiten der Nutzerpopulation nach [100]

*Position 1* ist für den M95 nur durch eine Auslenkung des Schlüsselbeins erreichbar, aufgrund der erwarteten seltenen Betätigung des Hebels im Modus MF wird der Kompromiss hinsichtlich der Erreichbarkeit an dieser Stelle akzeptiert. Die eingeschränkte Erreichbarkeit des Elements durch die F05 für den Modus AUTON (Hebel in *Position 4*) wird aus diesem Grund ebenfalls akzeptiert.

Die Variation des z-Niveaus des Hebels in den vier Positionen ergibt sich einerseits durch die geometrische Optimierung der geforderten Erreichbarkeiten, andererseits durch Sicherstellung der benötigten Greifräume um den Bedienhebel. Zudem benötigt der Hebel aufgrund der einseitigen Lagerung eine stabile mechanische Anbindung an die Mittelkonsole. Diese Kombination unterschiedlicher Anforderungen findet sich im Design des Konzepts durch die markante Erhebung im Bereich neben dem Bedienhebel wieder.

Um Bauraum für die aufwendige Aktorik des Bedienelements zu schaffen, entfallen die Hardkeys der MMI-Bedieneinheit. Die Bedienung der jeweiligen Menüstrukturen erfolgt daher zentral über das Einstiegsmenü des MMI-Systems. Die x-Positionierung der MMI-Bedieninsel entspricht der Serienauslegung des A7. Lautstärkeregler, Motor Start/Stop und EPB werden wie dargestellt innerhalb der Erreichbarkeitskurven der Nutzerpopulation auf der Oberfläche der Mittelkonsole positioniert.

Tabelle 4.1: Schnitte der Erreichbarkeitsflächen für F05 und M95, adaptiert nach [100]

		Schnittpunkte		
		A	B	C
Erreichbarkeit	F05	Zeigefinger bei <i>festem</i> Schlüsselbein	Handballen bei <i>freiem</i> Schlüsselbein	Handballen bei <i>festem</i> Schlüsselbein
	F95	Zeigefinger bei <i>freiem</i> Schlüsselbein	Handballen bei <i>festem</i> Schlüsselbein	Handballen bei <i>freiem</i> Schlüsselbein

**Systemergonomische Auslegung** Im Modus MF kann der Nutzer über eine Sensortaste (Abbildung 4.5, *Element 1*) auf der Oberseite des in der Mittelkonsole versenkten Bedienelements die A+-Funktionalität betätigen. Der Hebel verfährt in der Folge automatisiert in den Modus TA. Hier stehen dem Nutzer ein monostabiles Wippelement (Abbildung 4.5, *Element 2*) zur Verstellung der Setzgeschwindigkeit, sowie eine zusätzliche Taste (Abbildung 4.5, *Element 3*) mit einer zustandsabhängig kombinierten SET- und CANCEL-Funktionalität zur Verfügung. Die seitlich ausgelagerte OFF-Taste (Abbildung 4.5, *Element 4*) ist für eine shortpush-Betätigung mit einer Modus-übergreifenden CANCEL-Funktionalität belegt. Eine longpush-Betätigung der Taste veranlasst - ebenfalls Modus-übergreifend - einen Übergang in den Modus MF. Die translatorischen Freiheitsgrade des Hebels in x-Richtung ermöglichen die Verstellung der Sollzeitlücke und die Betätigung der RESUME-Funktionalität. Eine kurze, monostabile Auslenkung entgegen der Fahrtrichtung - analog der Betätigung am ACC-Lenkstockhebel - triggert RESUME. Der ACC S&G Anfahrtrigger ist ebenfalls über die RESUME-Betätigung implementiert. Eine longpush-Betätigung *entgegen* der Fahrtrichtung vergrößert die Sollzeitlücke, betätigt der Fahrer *in* Fahrtrichtung wird der Wunschabstand verringert. Die Verstellung der Sollzeitlücke erfolgt analog der Serienauslegung des ACC S&G Systems in vier sequentiellen Stufen. Diese Auslegung wird auf Basis der Erkenntnisse der in Abschnitt 4.3.1 diskutierten Auslegungsuntersuchung vorgenommen. Hier wird das Prinzip der Master-Slave-PMS angedeutet. Die translatorischen Freiheitsgrade des Bedienelements in Fahrzeuglängsrichtung entsprechen den in Abbildung 4.5 dargestellten *Betätigungen A* und *B*. Der Kraftvektor der vom Nutzer aufzubringenden Betätigungskraft verbleibt über die gesamte Bewegung konstant. Ist der Modus VA aktivierbar, kann der Fahrer durch Betätigung von *Element 1* den Automationsgrad erhöhen. Das Bedienelement verfährt automatisiert in den Modus VA. Dem Fahrer ist es theoretisch möglich, weiterhin auf *Element 2* und *3* zuzugreifen. Die Betätigungselemente sind jedoch im Modus VA ohne Funktion. Zusätzlich steht im Modus VA die Möglichkeit zur translatorischen Betätigung des Hebels in Fahrzeugquerrichtung (*C* und *D*) zur Verfügung. Durch die Verkopplung der Betätigungen in Längs- und Querrichtung des Fahrzeugs (Abbildung 4.5, *Betätigungen C, D, E* und *F*) ist das Element damit innerhalb der x-/y-Ebene mit einem Betätigungsweg von  $\pm 10\text{mm}$  in x- und y-Richtung frei bewegbar. Ein zentraler Aspekt beim Übergang in den vollautomatisierten Modus ist die Anpassung der Betätigungscharakteristik der translatorischen Verstellung. Die Verläufe der Betätigungskraft sind innerhalb der elektromechanischen Grenzen der Prototypen frei konfigurierbar. Technische Details zur Auslegung des Betätigungskraftverlaufs finden sich in Kapitel 4.4. Der Kraftverlauf der Bedienelemente zur Darstellung der PMS steigt in Form eines von der Mittelstellung linear ansteigenden Trichters an. Der Trichter mündet an den Rändern der Betätigungsebene in einen begrenzenden, steilen Kraftanstieg.

Der beschriebene Kraftverlauf ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Ziel dieser Auslegung ist die Darstellung markanter haptischer Barrieren an den Rändern der Betätigungsfläche als virtuelle Grenzen des semi-stationären Zustands der Regelstrecke. Ohne Krafteinwirkung des Nutzers zentriert sich das Bedienelement selbstständig. Der Hebel repräsentiert das Fahrzeug, der steile Anstieg der Betätigungskraft projiziert den Verlauf der begrenzenden Umgebungsfaktoren auf das Bedienelement. Diese Faktoren

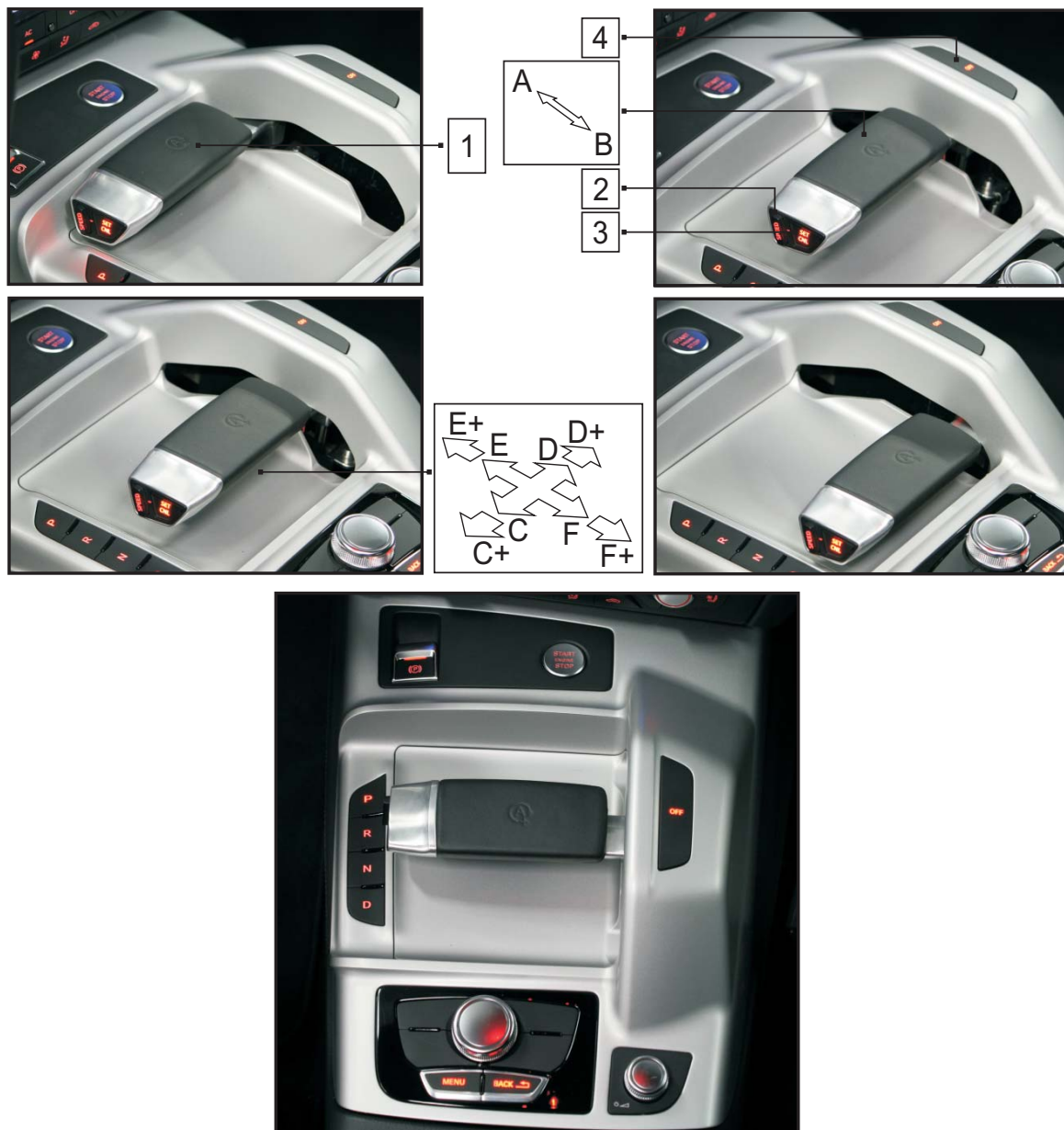


Abbildung 4.5: Prototypische Umsetzung und Betätigungsmöglichkeiten des integrativen Stellelements *Hebel* für die Modi MF (oben links), TA (oben rechts), VA (mitte links) und AUTON (mitte rechts)



können Fahrstreifenmarkierungen oder andere infrastrukturelle Elemente zur Begrenzung des Fahrstreifens, andere Fahrzeuge oder implizit wie explizit vorliegende Verkehrsvorschriften sein. Eine Betätigung des Hebels innerhalb seiner virtuellen, haptischen Grenzen entspricht einer *Parametrierung* der Position des Egofahrzeugs innerhalb seiner umgebenden Grenzen. Sensiert der Positionssensor des Bedienelements eine Auslenkung des Hebels über einen diskreten Punkt hinaus, lenkt der SPA das Fahrzeug für die Zeit der Auslenkung in Richtung der Extremposition der Parametrierung (vgl. Abbildung 4.7). Auf Basis einer geeigneten Parameter-Applikation bzgl. einer geeigneten Relativposition des Vorderfahrzeugs und der Breite des Fahrstreifens entspricht die Extremposition dem Rand des Fahrstreifens. Beendet der Nutzer die Parametrierung, zentriert sich das Bedienelement in der Mitte des Betätigungsfeldes. Dem Prinzip der PMS folgend, zentriert sich in der Konsequenz das Fahrzeug hinter seinem Vorderfahrzeug. Eine Auslenkung des Bedienelements über die haptischen Grenzen hinaus triggert ein *Wechselmanöver* (vgl. Abschnitt 4.2.2.3). Die Betätigung ist entsprechend der Darstellung in Abbildung 4.7 ausgelegt: Zum Start eines Manövers muss der Nutzer den Hebel maximal auslenken und innerhalb einer kurzen Latenzzeit ( $t < 2\text{ s}$ ) loslassen. Das Manöver wird erst *nach* der Detektion der Rückführung des Hebels in die Mittellage getriggert. Diese Auslegung schließt irrtümliches Triggern von Manövern durch kraftvolle Betätigung der Positions-Parametrierung weitgehend aus. Die Manöverbetätigungen sind in Abbildung 4.5 mit einem zusätzlichen „+“ gekennzeichnet ( $C+$ ,  $D+$ ,  $E+$  und  $F+$ ). Die Betätigung des Potentialtriggers erfolgt in Konsistenz zur Bedienung des ACC-Anfahrtriggers durch die RESUME-Betätigung.

Die technischen Rahmenbedingungen des Versuchsträgers ermöglichen in einem ersten Schritt eine Umsetzung der PMS für Funktionen in Querrichtung (siehe Kapitel 5.2). Die Bedienung ist bei allen integrativen Bedienelementen auf die  $y$ -Richtung beschränkt. Die Bedienelemente bieten die Möglichkeit einer Bedienung innerhalb aller Richtungen der Betätigungsebene. Geplante Erweiterungen sind die Möglichkeit zur Parametrierung der Fahrzeugposition in allen Richtungen der Betätigungsebene. Zusätzlich soll die Beauftragung des FAS mit verschiedenen Manövern möglich sein. Beispielsweise ist eine Unter-

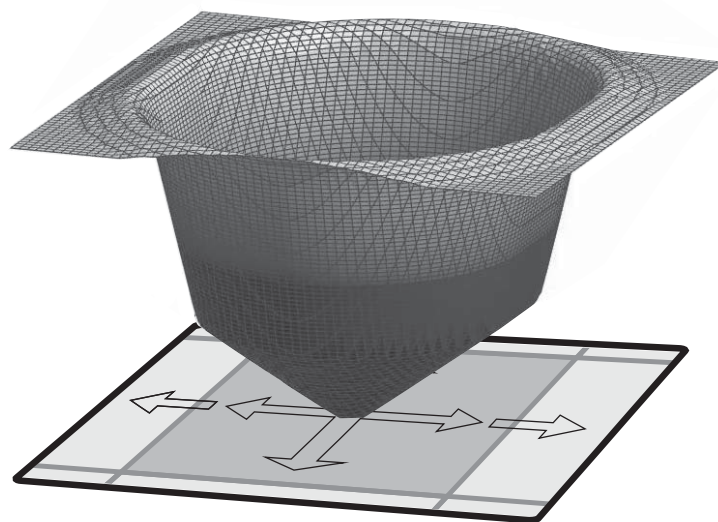


Abbildung 4.6: Qualitativer Betätigungskraftverlauf des integrativen Stellelements *Hebel*, adaptiert nach [2]

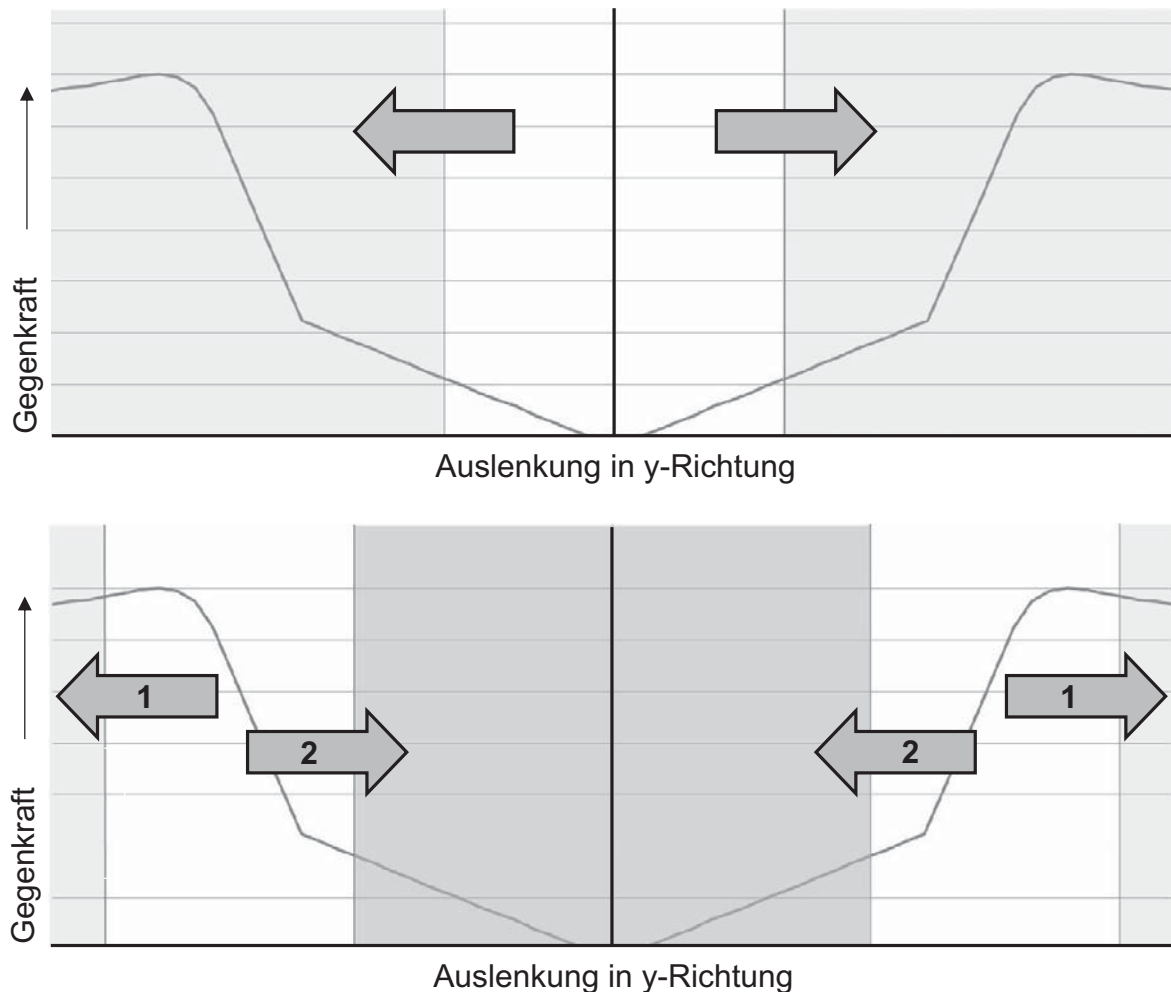


Abbildung 4.7: 2D-Kraftverlauf und Betätigungsverlauf zur *Parametrierung* (oben) und *Manöverbeauftragung* (unten)

scheidung zwischen Wechselmanövern des Fahrstreifens mit konstantem Geschwindigkeitsverlauf und Überholmanövern mit variierenden Geschwindigkeitsverläufen geplant. Diese funktionale Erweiterung der SPA-Funktion ist für diesem Projekt nachfolgende Arbeitsschritte vorgesehen.

Sind die Einschaltbedingungen des Modus AUTON erfüllt, kann der Nutzer die Erhöhung des Automationsgrades durch Betätigung der A+-Taste beauftragen. Theoretisch verfährt der Hebel in der Folge automatisiert in *Position 4*. Hier ist das Element in der Mittelkonsole versenkt, ein Umgreifen des Hebels ist nicht mehr möglich. Dem Nutzer steht nun lediglich die OFF-Taste zur Deaktivierung des Staupiloten und dem subsequenten Aktivierung der Modi TA bzw. MF zur Verfügung. Der Modus AUTON ist aktuell nicht umgesetzt, das Bedienelement kann im realen Einsatz *Position 4* nicht ansteuern.

Weitere Spezifika des Hebels sind die Integration der A+-Funktionalität in eine ausschließlich bei Fingerbetätigung auslösende Sensortaste auf der Oberseite, sowie die Auslagerung und der OFF-Taste. Beide schließen durch die Art der Betätigung bei der bottom-up-Aktivierung des Modus AUTON bzw. beim

top-down-Übergang in den Modus OFF ein Einklemmen der Finger zwischen Bedienelement und Konsole aus.

#### 4.3.2.2 Drehdrücksteller

Die Umsetzung des DDS erfolgt analog der Konzeptbeschreibung aus Abschnitt 3.3.3.3. Die vier Modi werden durch ein formvariables Betätigungselement mit unveränderlicher Positionierung in x-Richtung dargestellt. Die Formvarianz wird durch die konzertierte Veränderung der z-Position der einzelnen Bestandteile des DDS erreicht. Ein umfassender Drehring sowie ein zentrales Stickelement mit integrierten Tasten ermöglichen in unterschiedlichen Kombinationen die Bedienung der vier Modi.

**Anthropometrische Auslegung** Für die Positionierung des Elements auf der Mittelkonsole wird analog Abschnitt 4.3.2.1 eine ergonomische Package-Analyse vorgenommen. Der Arbeitsschritt wird im Rahmen dieser Arbeit nicht abgebildet. Führungsgröße der Positionierung der einzelnen Elemente ist der DDS, die übrigen Bedienelemente der Mittelkonsole werden entsprechend dem besten Kompromiss zwischen Erreichbarkeit und Packageplan positioniert.

Der DDS weist aufgrund seines konzeptionellen Prinzips eine in x-Richtung unveränderliche Position auf. Eine Anpassung des x-Position an die spezifischen Anforderungen der Modi ist folglich nicht umsetzbar. Die gewählte x-Position des DDS spiegelt den Kompromiss zwischen aufwendungsarmer Erreichbarkeit beim Umgreifen zwischen Lenkrad und Bedienelement und einer komfortablen Erreichbarkeit für die betrachteten Extrempersentile der Nutzerpopulation für den Hands-Off-Betrieb wider. Diese Entscheidung ist einerseits die Basis einer Bedienung des ACC S&G im Modus TA ohne Blickabwendungen und mit geringem motorischen Aufwand. Zusätzlich können sowohl die 5-Perzentil-Frau, als auch der 95-Perzentil-Mann in einer entspannten Sitzposition ohne Überstreckung des Armes und ohne Auslenkung des Schlüsselbeins die PMS des Modus VA bedienen.

Das Drehrad wird aus Aluminium gefertigt und mit einem Durchmesser von 75 mm ausgeführt. Die Grifffläche wird mit in z-Richtung laufenden Längsrillen versehen. Auf diese Weise differenziert sich der DDS hinsichtlich seines optischen und haptischen Erscheinungsbildens signifikant vom benachbarten Drehdrücksteller der MMI-Bedieneinheit, Verwechslungen der beiden Elemente wird somit vorgebeugt. Für die in den Stick integrierten Tastenelemente (Abbildung 4.8, *Element 1, 2* und *3*) gilt der haptischen Unterscheidbarkeit ein besonderes Augenmerk. *Element 3* wird daher mit einer Fühlhilfe versehen. Die Erhebung ermöglicht in Kombination mit der eindeutig zuordbaren Tastengröße eine einfache haptische Identifikation der RESUME-Taste. *Element 1* und *2* werden zur Abgrenzung von den übrigen Elementen mit Fühlstegen versehen. Das MMI wird in einer der Serienauslegung entsprechenden x-Position in (-y)-Richtung verschoben, um die Zugänglichkeit des DDS in einer fahrerorientierten Position zu gewährleisten.

**Systemergonomische Auslegung** Im Modus MF ist das Bedienelement in der Mittelkonsole versenkt, lediglich das Tastenfeld ist für den Fahrer erreichbar. Der Fahrer kann durch Betätigung der A+-Taste (Abbildung 4.8, *Element 1*) den Modus TA aktivieren. Ist das System verfügbar, erhebt sich der gesamte DDS automatisiert aus der Mittelkonsole. A+ ist bei diesem Konzept mit einer (konsistenten) Doppelbelegung ausgeführt. Einerseits vollführt *Element 1* analog dem *Hebel* die bottom-up-Aktivierung der Automationsmodi. Des Weiteren wird beim DDS die SET-Funktionalität in A+ integriert. Damit ist

es dem Fahrer möglich, einen intrastrukturellen Wechsel vom Zustand *ACC Stand-by* in den Zustand *ACC Aktiv* zu triggern. Diese Funktionsintegration hat eine hierarchische Aktivierungssequenz des Modus VA zur Folge, eine Aktivierung des SPA ist konzeptbedingt nur noch bei vorhergehend aktivem ACC möglich.

Dem Nutzer stehen außerdem eine OFF- sowie die RESUME-Funktion zur Verfügung (Abbildung 4.8, *Element 2* und *3*). Die OFF-Funktionalität dient Modus-übergreifend zur Deaktivierung des aktuell wirkenden Automationsmodus, eine shortpush-Betätigung triggert einen Übergang in den Stand-by-Zustand des Modus TA. Eine longpush-Betätigung veranlasst die Aktivierung des Modus MF. Zusätzlich kann der Fahrer zur Bedienung des Modus TA mit dem frei drehbaren Ring die Setzgeschwindigkeit manipulieren. Durch eine Rotation des Drehrings wird die Setzgeschwindigkeit verändert. Eine Drehung im Uhrzeigersinn erhöht die Setzgeschwindigkeit, einer Drehung gegen den Uhrzeigersinn verringert sie (Abbildung 4.8, *Element 4/5*). Die 5- bzw. 10-km/h Verstellstufen des Seriensystems werden für den Nutzer durch eine äquidistante Rasterung des Drehrings symbolisiert. Zusätzlich zur rotatorischen Betätigung des Ringes um die Hochachse ist es möglich, durch eine monostabile shortpush-Betätigung des DDS in Fahrzeuginnenrichtung die Sollzeitlücke zu verstellen (Abbildung 4.8, *Betätigung A/B*). Die Betätigung wird über einen Verstellweg von 2mm dargestellt. Sie bildet die Grundzüge der Master-Slave-PMS ab: durch eine Betätigung in Fahrtrichtung wird die Sollzeitlücke verringert, entgegen der Fahrtrichtung wird sie vergrößert. Wählbar sind die vier Abstandsstufen des ACC-Seriensystems.

Das Tastenfeld im Zentrum des DDS verbleibt - unabhängig der Rotation des Drehrings - in einer festen Position. Bei gegebener Systemverfügbarkeit aktiviert der Fahrer den Modus VA durch Betätigung der A+ Funktionalität. In der Folge senkt sich der Drehring in die Mittelkonsole ab. Das verbleibende, zentrale Stickelement integriert auf der Oberseite eines sich konisch verjüngenden Joysticks die Tasteneinheit. Durch die glatte, metallische Oberfläche und die veränderte Betätigungscharakteristik differenziert sich im Modus VA sowohl die haptische, als auch die optische Anmutung des Bedienelements vom Erscheinungsbild des DDS im Modus TA.

Der Stick dient dem Fahrer als Interaktionsmedium zur Bedienung der PMS. Die Betätigung erfolgt rotatorisch um einen in die Mittelkonsole verlagerten Drehpunkt. Analog der Umsetzung des Konzepts *Hebel* wird durch den Modus-spezifischen Betätigungskraftverlauf des Sticks das Fahrzeug und seine realen Umgebungsrestriktionen repräsentiert. Innerhalb diskreter Grenzen steigt der Gegenkraftverlauf des Elements linear an, an den Rändern des Betätigungsfeldes symbolisieren haptische Barrieren die realen Grenzen der Parametrierung der Fahrstreifenposition und den Übergang zum Start von Manövern. Analog zu Abbildung 4.7 wird durch eine Betätigung innerhalb dieser Barrieren eine Positionsveränderung des Egofahrzeugs veranlasst. Überstimmt der Nutzer kurzzeitig diesen steilen Anstieg im Betätigungskraftverlauf, triggert er damit einen Wechsel der quasi-stationären Fahrt (vgl. Kapitel 3.3).

Der DDS, respektive das Stickelement des Modus VA, ist ebenso wie das Element *Hebel* selbstzentriert ausgeführt. Die Position des Egofahrzeugs verhält sich entsprechend: zentriert sich das Bedienelement innerhalb des Betätigungsfeldes, zentriert sich das Fahrzeug in Abhängigkeit der lateralen Position des Vorderfahrzeugs innerhalb des Fahrstreifens.

Aus Gründen der Durchgängigkeit zum Bedienkonzept des ACC wird der Potentialtrigger ebenso wie beim *Hebel* durch eine Betätigung der RESUME-Funktion (Abbildung 4.8, *Element 3*) realisiert.

Zur Aktivierung des Modus AUTON betätigt der Nutzer die Taste A+. Ist der STP aktiv, senkt sich auch das zentrale Stickelement in die Mittelkonsole ab. Der DDS ist nun erneut komplett versenkt, das Tastenfeld steht dem Nutzer weiterhin zu Deaktivierung der Automation über die Taste OFF zur Verfügung.

Die ursprüngliche Idee einer situationsabhängigen Anhebung der beiden kleinen Tasten in den Modi MF und AUTON (vgl. Abschnitt 3.3.3.3) ist aus technischen Gründen im Rahmen dieses Projekts nicht realisierbar: Für die gleichzeitige Integration eines elektromotorischen Antriebs, einer geeigneten Lagerung und einer Hinterleuchtung der *Elemente 1* und *2* steht zu wenig Bauraum zur Verfügung.

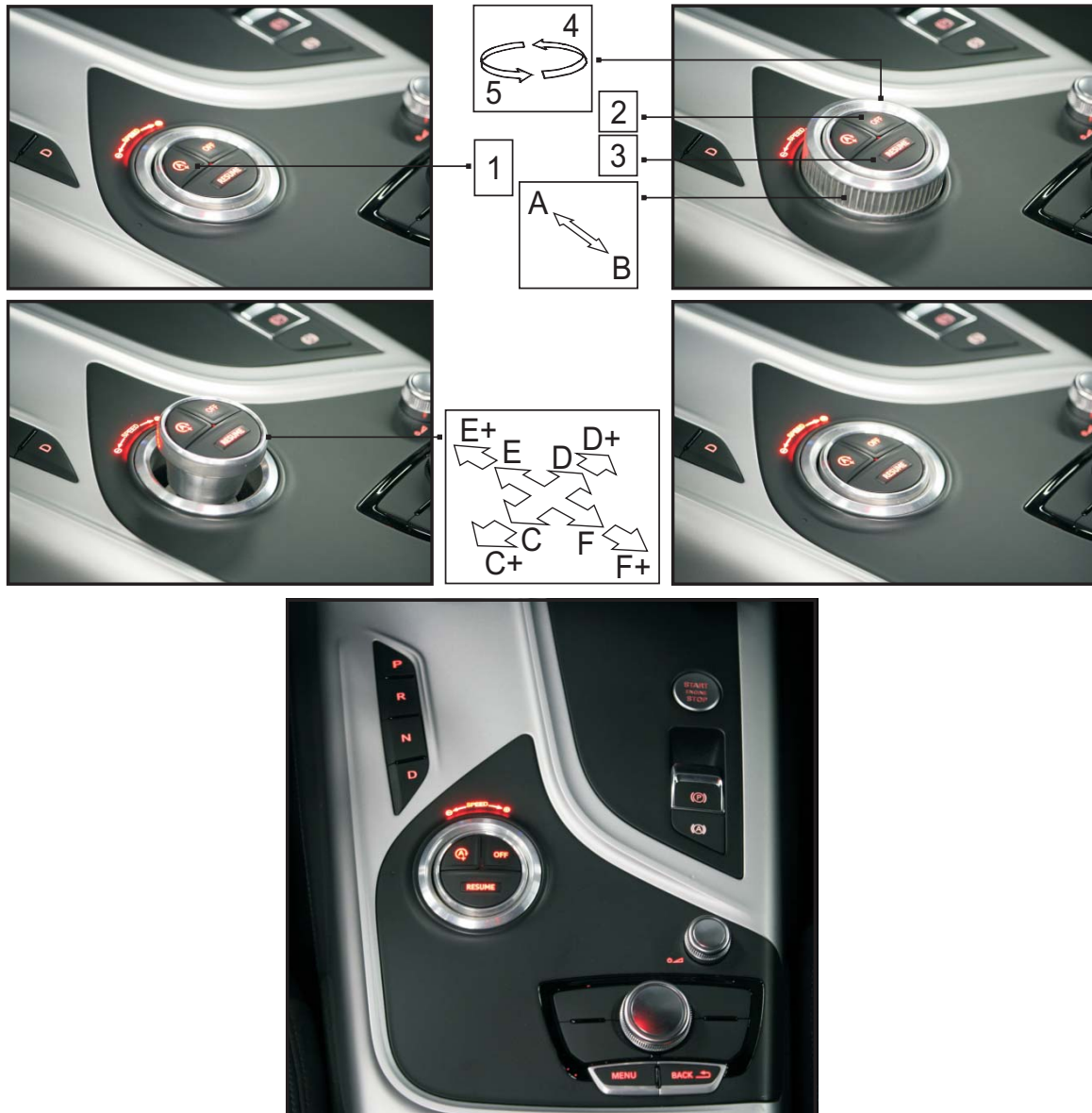


Abbildung 4.8: Prototypische Umsetzung und Betätigungsmöglichkeiten des integrativen Stellelements DDS für die Modi MF (oben links), TA (oben rechts), VA (mitte links) und AUTON (mitte rechts)

### 4.3.2.3 Handballenablage

Die technische Umsetzung des Konzepts HBA unterscheidet sich hinsichtlich des Erscheinungsbildes im Vergleich zu den Umsetzungen des Hebels und des DDS weitreichender von der in Abschnitt 3.3.3.2 beschriebenen Konzeptidee. Die HBA wird nicht der ursprünglichen Idee entsprechend in Form eines Barren ausgeführt (vgl. Abbildung 3.7). Die endgültige Ausführung orientiert sich vielmehr an der Form des *Drehrades einer Turbine*. Die zugrundeliegenden Entwicklungsschritte sind im Detail in [36] dargestellt.

**Anthropometrische Auslegung** Die gewählte Formsprache ist in Abbildung 4.9 illustriert. Ein grundlegender Vorteil der *Turbine* besteht in der Möglichkeit zur komfortablen Bedienung der beiden in die Mittelkonsole integrierten Tasten im Modus TA. Vorversuche mit funktionslosen Bauraumdummies zeigen eine verbesserte Erreichbarkeit der Tasten der gewählten Turbinen-Form. Insbesondere die Bedienung von *Element 2* ist durch eine Betätigung mit dem Daumen einer entspannt auf der HBA ruhenden Hand weitaus komfortabler als die vergleichbare Taste einer barrenförmigen HBA.

Ein weiterer maßgeblicher Vorteil der *Turbine* besteht in der Gestalt des rotations-symmetrischen Grundkörpers. Das Element bietet eine gleichbleibend komfortable Handballenablage zur Bedienung der MMI-Bedieneinheit über das gesamte Spektrum. Durch die ungerade Anzahl an „Rotorblättern“, respektive den Auslegern des Grundkörpers, bleibt die signifikante Zeigerwirkung beim Moduswechsel zwischen TA und VA erhalten.

Das seitlich positionierte Drehrad ist durch die Integration in den Grundkörper unterhalb des Chromringes im Modus TA gut erreichbar. Die Rotation des Grundkörpers beim Übergang in den Modus VA limitiert den Zugriff auf das Drehrad. Das Element ist nur noch durch unkomfortable, unnatürliche Bewegungen des Hand-Arm-Apparats erreichbar. Auf diese Weise werden beim Moduswechsel alle zur Bedienung der PMS nicht mehr benötigten Stellteile aus dem direkten Zugriff des Fahrers entfernt.

Die Positionierung der HBA auf der Mittelkonsole folgt ähnlich dem DDS den konkurrierenden Anforderungen einer blickabwendungsarmen und aufwendungsarmen Bedienung des Modus TA und der komfortablen Bedienung in der entspannten Sitzhaltung des Modus VA im Hands-Off-Betrieb. Zusätzlich werden die Freiheitsgrade der Positionierung der HBA durch die kombinierte Nutzung des Elements als Bedieneinheit zur FAS-Interaktion *und* komfortorientierte Handballenablage der MMI-Bedieneinheit beschränkt. Die x-Maßkette wird im vorderen Bereich durch eine Verortung der MMI-Bedieninsel innerhalb der Erreichbarkeitskurven des 95-Perzentil-Mannes und der 5-Perzentil-Frau vorgegeben. Die Relativposition beider Elemente wird durch die benötigten Freigänge für die Bedienung und die optimalen x- und z-Abstände für eine komfortable Bedienbarkeit des MMI bestimmt. In Fahrtrichtung hinten ist der limitierende Faktor der x-Maßkette die Einschränkung des Bewegungsfreiraums der oberen Extremitäten der 5-Perzentil-Frau durch die seitliche Wange des Fahrersitzes.

**Systemergonomische Auslegung** Eine Besonderheit der Umsetzung der HBA besteht in der selbstständigen Ansteuerung des Modus TA im Zustand *Stand-by* beim Start des Fahrzeugs. Für den Prototypen entfällt dadurch die separate Darstellung des Modus MF. Dem Nutzer stehen alle Betätigungselemente zur Aktivierung und Parametrierung des Modus TA zur Verfügung. *Element 1* dient dem Fahrer zur Betätigung der RESUME-Funktion, *Element 2* integriert eine kombinierte SET- und CANCEL-Funktionalität. Hiermit ist es dem Fahrer zustandsabhängig möglich, das System zu aktivieren bzw. den

Übergang des aktiven Systems in den Zustand *Stand-by* zu initiieren. Beide Tasten sind in unveränderlichen Positionen bündig in die Mittelkonsole integriert. Das Tasten-*Element 3* ist mit einem OLED-Display hinterlegt und kann in Abhängigkeit der hinterlegten Funktion unterschiedliche Symbole anzeigen. Sie ist in einen der Ausleger des Grundkörpers integriert (vgl. Abbildung 4.9). Im Modus TA ist *Element 2* mit der A+-Funktionalität belegt.

Seitlich im Bereich von acht bis elf Uhr ist ein Drehrad in den Grundkörper integriert. Die Drehachse des Elements ist parallel zur z-Achse ausgerichtet und verläuft im Bereich zwischen neun und zwölf Uhr des Grundkörpers. Das gerasterte Rad ermöglicht die Einstellung der Setzgeschwindigkeit des Modus TA (Abbildung 4.9, *Element 4/5*). Die Verstellung erfolgt gemäß der Schrittweite des ACC-Seriensystems. Des Weiteren kann der Benutzer durch eine translatorische Betätigung der HBA (*Betätigung A* und *B*) die Sollzeitlücke des ACC-Systems variieren. Analog der Auslegung des Elements Hebel erfolgt die Einstellung der vier Abstandsstufen durch eine longpush-Betätigung des Elements in Fahrzeuginnenrichtung. Eine Betätigung nach vorne verringert, eine Betätigung entgegen der Fahrtrichtung vergrößert die Sollzeitlücke.

Den Übergang in den Modus VA initiiert der Fahrer durch die Betätigung der A+-Taste. Ist die VA verfügbar, erfolgt eine automatisierte Drehung des Stellteils um 60° im Uhrzeigersinn. Die Ausleger der HBA verdecken nun die in die Mittelkonsole integrierten *Elemente 1* und *2*. *Element 3* steht dem Fahrer an veränderter Position weiterhin zur Verfügung. Jedoch ist die Taste nun nicht mehr mit A+, sondern mit der RESUME-Funktion belegt. Das Display der Taste ändert seine Anzeige entsprechend. Der Bedienort des RESUME verbleibt somit bzgl. seiner x- und y-Position im Fahrzeug identisch, lediglich das z-Niveau der Betätigung wird durch den Ausleger der HBA um wenige mm erhöht. Der Moduswechsel ist in Abbildung 4.9 dargestellt.

Die *ursprüngliche* Idee der Erhöhung des Automationsgrades durch eine manuelle Drehung des Grundkörpers im Uhrzeigersinn und einer Verringerung durch eine Drehung entgegen des Uhrzeigersinns (vgl. Abschnitt 3.3.3.2) wird aufgrund technischer Restriktionen des Prototypen im ersten Schritt nicht umgesetzt. Die selbsthemmende Wirkung des Schneckenantriebs als Akteur des automatisierten Wechsels zwischen den Modi TA und VA bei externen Krafteinflüssen macht ein manuelles Umschalten für das gewählte Hardwarekonzept unmöglich. Diese technische Einschränkung hat aus konzeptioneller Sicht eine Veränderung des ursprünglich geplanten top-down-Übergangs zwischen den Modi VA und TA zur Folge: Da die Deaktivierung des Modus VA durch ein Drehen des Elements entgegen des Uhrzeigersinns nicht umsetzbar ist, wird für das vierstufige Gesamtkonzept der Übergang zwischen den Modi VA und TA durch eine Betätigung der Standardbedienelemente Lenkrad, Gas- und Bremspedal realisiert. Die erste technische Umsetzung der HBA enthält folglich kein separates Element zur Deaktivierung des Modus VA.

Zur Bedienung des Modus VA kann der Fahrer nun die gesamte HBA als Master der PMS entlang eines spezifischen Gegenkraftverlaufs in alle Richtungen der Betätigungsebene (Abbildung 4.9, *Betätigung A/B/C/D*) bewegen. Die Parametrierung der Position des Egofahrzeugs erfolgt durch eine Positionierung des Stellelements innerhalb begrenzender Barrieren im Betätigungskraftverlauf. Das Triggern von Manövern wird durch eine Betätigung über diese haptischen Grenzen hinaus vorgenommen. Zur Vermeidung von Fehlbedienungen wird der Manövertrigger analog den Elementen DDS und Hebel erst bei einer Rückführung des selbstzentrierenden Elements in eine Mittelposition gesetzt. Die technisch-funktionalen Rahmenbedingungen erlauben in einem ersten Schritt eine Bedienung der PMS in Querrichtung (siehe Kapitel 5.2).

Auf der Oberseite des rotationssymmetrischen Grundkörpers der HBA befindet sich *Element 7* (vgl. Abbildung 4.9) zur (De-)aktivierung des Modus AUTON. Bei gegebener Verfügbarkeit wird nach der

Aktivierung des STP durch diese STP ON/OFF-Funktionalität das Element automatisiert in z-Richtung nach unten verfahren. Da auch für den Modus AUTON eine Handballenablage zur Bedienung der MMI-Bedieneinheit notwendig ist, wird ein kleiner Verfahrweg realisiert: Um die Zeigerwirkung des Moduswechsels am Bedienelement klar zu kommunizieren, wird die gesamte HBA bis zur Oberkante der Ausleger in die Mittelkonsole versenkt. Ziel der Transformation ist die Inszenierung des Elements als



Abbildung 4.9: Prototypische Umsetzung und Betätigungsmöglichkeiten des integrativen Stellelements *HBA* für die Modi MF (oben links), TA (oben rechts), VA (mitte links) und AUTON (mitte rechts)



unbewegliches, integrales Element der Mittelkonsole. Über STP ON/OFF kann der Modus wieder deaktiviert und der Übergang in den Stand-by-Zustand des Modus TA getriggert werden.

Tabelle 4.2: Funktionale Belegung der integrativen Bedienelemente

		Hebel	DDS	HBA
Modus	Funktion	Betätigung mit		
<b>MF</b>				
	<b>A+</b>	Element 1	Element 1	Element 1
<b>TA</b>				
	<b>SET</b>	Element 3	Element 1	Element 2
	<b>CANCEL</b>	Element 3/4	Element 2 (shortpush)	Element 2
	<b>OFF</b>	Element 4 (longpush)	Element 2 (longpush)	-
	<b>RESUME</b>	Betätigung B (shortpush)	Element 3	Element 3
	<b>Einstellung <math>v_{setz}</math></b>	Element 2	Element 4/5	Element 4/5
	<b>Änderung <math>d_{wun.sch}</math></b>	Betätigung A/B (longpush)	Betätigung A/B (shortpush)	Betätigung A/B (longpush)
	<b>BOOST</b>	-	Element 3 (longpush)	Element 3 (longpush)
	<b>Anfahrtrigger</b>	Betätigung B (shortpush)	Element 3 (shortpush)	Element 3 (shortpush)
	<b>A+</b>	Element 1	Element 1	Element 1
<b>VA</b>				
	<b>Potentialtrigger</b>	Betätigung B (shortpush)	Element 3 (shortpush)	Element 6
	<b>Parametrierung</b>	Betätigung C/D/E/F	Betätigung C/D/E/F	Betätigung C/D/E/F
	<b>Trigger Spur- wechsel</b>	Betätigung C+/D+	Betätigung C+/D+	Betätigung C+/D+
	<b>A+</b>	Element 1	Element 1	Element 7
	<b>CANCEL</b>	Element 4	Element 2	-
<b>AUTON</b>				
	<b>OFF</b>	Element 4	Element 2	Element 7

### 4.3.2.4 Anzeigen

Zur Unterstützung der Intuitivität der Bedienkonzepte wird im Rahmen des Projekts ein komplementäres Anzeigekonzept entwickelt und in das Versuchsträgersystem integriert. Ziel des Anzeigekonzepts ist eine visuelle Illustration der Freiheitsgrade der Elemente sowie deren funktionale Belegung. Zusätzlich soll das Verständnis der Struktur des Automationspektrums gestärkt und das Konzept der Master-Slave-PMS implizit kommuniziert werden.

Das Anzeigekonzept wird exemplarisch am Beispiel des DDS diskutiert. Die Anzeige der vier Modi des Automationspektrums im Mittendisplays des Kombiinstrumentes bei Verbau des DDS ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Die korrespondierenden Anzeigen für die Elemente HBA und Hebel finden sich in Anhang D.

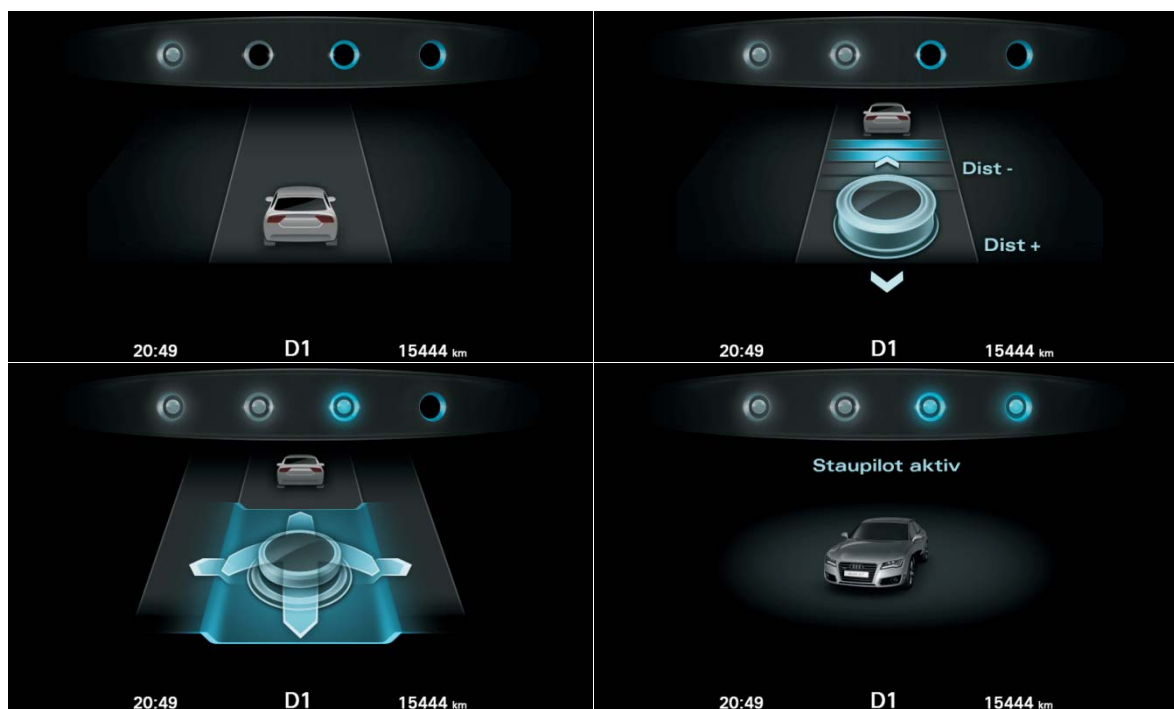


Abbildung 4.10: Anzeigekonzept für das Automationspektrum am Beispiel DDS für die Modi MF (oben links), TA (oben rechts), VA (unten links) und AUTON

Zur Kommunikation des aktuell aktiven Modus des Spektrums wird im oberen Bereich der Anzeige eine vierstufige *Perlenkette* eingeführt. Die vier Stufen des hierarchisch strukturierten Spektrums spiegeln sich in der Belegung der vier Felder mit *Perlen* wieder. Sind beispielsweise alle vier Felder gefüllt, ist mit dem Modus AUTON die vierte Stufe des Spektrums aktiv. Sind lediglich zwei Felder mit Perlen befüllt, ist die zweite Stufe des Spektrums (Modus TA) aktiv.

Beim Moduswechsel vom Modus MF in den Modus TA wird das Prinzip der Master-Slave-PMS unterstrichen. Im Modus MF wird das Egofahrzeug in Anlehnung an aktuelle Umsetzungen der Anzeigen der Systeme ACC S&G und AALA der AUDI AG als abstrahiertes Fahrzeug im Zentrum seiner begrenzten-

den Fahrstreifenmarkierungen dargestellt. Beim Übergang in den Modus TA wird das Egofahrzeug durch die Darstellung des jeweils verbauten Bedienelements überblendet. Diese Animation impliziert den Kern der Master-Slave-PMS, der Slave wird durch den Master des Regelkreises repräsentiert.

Nach dem Moduswechsel werden - in Ergänzung zu den Beschriftungen direkt am Bedienelement - die übrigen Freiheitsgrade des Elements für den Modus TA dargestellt. Für das Beispiel DDS wird entsprechend die shortpush-Betätigung zur Einstellung der Sollzeitlücke in Längsrichtung eingeblendet. Nach dem Übergang in den Modus VA ändert sich das Erscheinungsbild und die Betätigungscharakteristik des Stellelements nachhaltig. Diese Zeigerwirkung dient zur Untermalung des aus Nutzersicht neuartigen, ungewohnten Systemzustands. Die Anzeige versucht diese Zeigerwirkung zusätzlich zu verstärken, indem die Formänderung des Bedienelements auch in der Anzeige nachempfunden wird. Zusätzlich werden durch Pfeile die Freiheitsgrade zur Bedienung der PMS eingeblendet. Die bläuliche Einfärbung wichtiger Bestandteile der Anzeige sollen den Modus zusätzlich differenzieren.

Im Modus AUTON soll durch die gewählte Form der Anzeige dem Fahrer seine Rolle als Beifahrer kommuniziert werden. Lediglich der Systemzustand des Staupiloten wird dem Fahrer mitgeteilt. Die rotierende Außenansicht des Versuchsträgers steht stellvertretend für weitere Infotainmentinhalte, die dem Fahrer im Modus AUTON zur Verfügung stehen können. Infotainmentfunktionen werden aufgrund des abweichenden Fokus dieses Projekts nicht umgesetzt.

Des Weiteren werden akute FÜAn entwickelt und in die Anzeigelogik integriert. Für den Modus VA wird das HUD für die Anzeige des Füllstands des sinkenden Automatisierungspotentials sowie die Triggeraufforderungen des Potentialtriggerkonzepts verwendet (vgl. Kapitel 3.2). Das komplette Anzeigekonzept des Potentialtriggers wird in Kapitel 5.1 dargestellt. Die Erprobung erfolgt in einem ersten Schritt unabhängig von den neuen Bedienelementen, daher wird ein losgelöstes Potentialtrigger-Anzeigekonzept aufgebaut. Parallel zur Integration der Bedienelemente in den Versuchsträger erfolgt die Synthese der Potentialanzeige mit dem Anzeigekonzept des Automationsspektrums.

## 4.4 Integration des Gesamtsystems

Das im Versuchsträger umgesetzte Gesamtsystem stellt sich als Kombination einer Vielzahl verschiedener Subsysteme dar. Die Komponenten werden in teils unterschiedlichen Softwareumgebungen entwickelt. Abschnitt 4.4.1 beschreibt die funktionale Integration der Vielzahl an Bausteinen gewählte Softwareframework. Abschnitt 4.4.2 beschreibt die einzelnen Subsysteme und detailliert ihre Funktion im Gesamtsystem.

### 4.4.1 Framework ADTF

Das *Automotive Data- and Time-Triggered Framework (ADTF)* der Fa. *Elektrobit* (vgl. z.B. [37]) ermöglicht die erprobungsnahe Entwicklung, Integration und Applikation von Fahrerassistenz- und Fahrzeugsicherheitssystemen in der frühen Phase des Entwicklungsprozesses. Es ermöglicht dem Nutzer die zeitsynchrone Erfassung, Verarbeitung und Manipulation der Daten der Sensoren und Steuergeräte moderner KFZ. Die Informationsverarbeitung erfolgt in Funktionsblöcken (*Filter*). Diese Filter stehen für geläufige Anwendungen als standardisierte Bausteine zur Verfügung. Benutzerspezifische Anwendungen können in der Programmiersprache C++ umgesetzt und als Filter in eine ADTF-Konfiguration integriert werden. Die Verbindung über Ein- und Ausgangspins der einzelnen Filter legt den Datenfluss innerhalb

einer Konfiguration fest und erlaubt den Austausch von Daten zwischen den Bausteinen des Systems. Der Informationsfluss des Gesamtsystems erfolgt innerhalb der ADTF-Konfiguration über die Ein- und Ausgangspins der einzelnen Filter. Die Kommunikation mit den Systembestandteilen, die nicht Teil der ADTF-Konfiguration sind, erfolgt über den D-CAN des Versuchsträgers. ADTF bietet die Möglichkeit zur zeitsynchronen Kommunikation zwischen den Filtern und zwischen der Konfiguration mit den Bussystemen des Fahrzeugs.

#### 4.4.2 Subsysteme

Die folgenden Abschnitte beschreiben die elementaren Bestandteile des Versuchsträgers und das gewählte informationstechnische Konzept für ihre Umsetzung. Die Subsysteme und der implementierte Informationsfluss des Fahrzeugsystems sind qualitativ in Abbildung 4.11 dargestellt. Eine detaillierte Übersicht über die Vernetzung des Gesamtsystems findet sich im Anhang E.

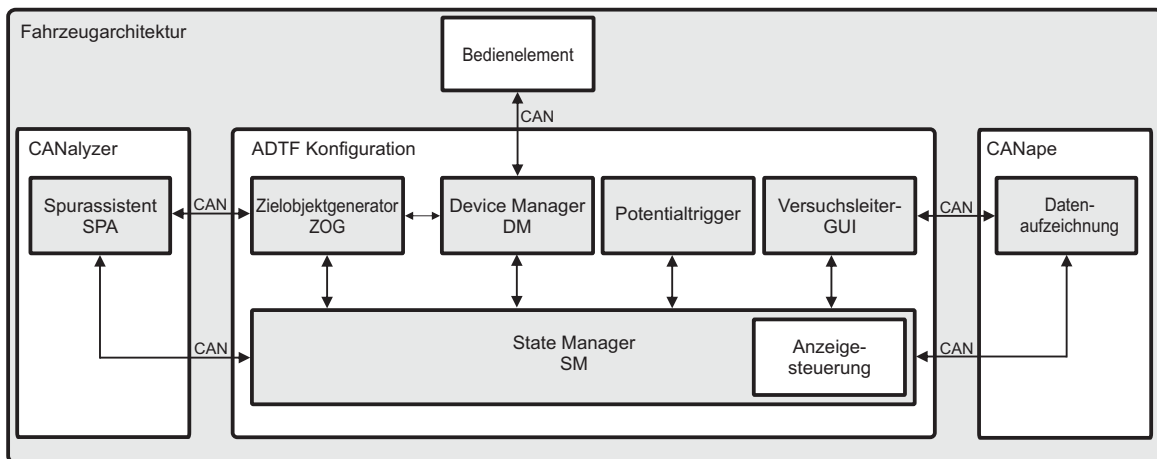


Abbildung 4.11: Vernetzung der Subsysteme im Versuchsträger nach [2]

**Potentialtrigger** Die Implementierung des Potentialtriggers erfolgt in *ADTF*. Die Grundlage des Potentialtriggers bildet der proprietär entwickelte Potentialtrigger-Filter. Eingangsgrößen des Filters sind zum einen die Daten einer Fahrerbeobachtungskamera der direkten Fahrerüberwachung. Zusätzlich gehen Daten der indirekten Fahrerüberwachung aus der Interpretation des Nutzungsverhaltens des HMI des Versuchsträgers, sowie situationsbeschreibende Daten zur Analyse der Kritikalität der aktuellen unmittelbaren und mittelbaren Verkehrssituation in den Filter ein. Die Eingangsgrößen dienen der Berechnung der Sinkgeschwindigkeit des Potentials auf Basis einer Fuzzy Logic. Die Details der Berechnung finden sich in Abschnitt 3.2.4.2 sowie in [59]. Zusätzlich verarbeitet der Potentialtrigger die vom Fahrer gesetzten Trigger.

Als Ausgabegröße generiert der Filter die Sinkgeschwindigkeit und den Füllstand des Automatisierungspotentials zur Darstellung im Fahrzeug. Zusätzlich wird in Abhängigkeit dieser Parameter und der Interaktion des Fahrers mit dem Potentialtrigger auf Basis des in Kapitel 3.2 beschriebenen Konzepts ein Systemzustand generiert und ausgegeben. Voraussetzung für die Aktivität des Modus VA ist ein Potential-

Füllstand größer Null, die Steuerung der Ausgabe des Systemzustands erfolgt durch die Interpretation des resultierenden Potential-Füllstands.

**State Manager (SM)** Der *State Manager* repräsentiert ein zentrales Modul des Fahrzeugsystems. Eine detaillierte Beschreibung der Funktionalität des *SM* findet sich in [117]. Der Filter kontrolliert und steuert als zentrale Instanz die Zustände des Gesamtsystems. Er fungiert als zentraler Mittler zwischen den einzelnen Subsystemen und steuert in Abhängigkeit einer a priori determinierten Systemhierarchie die Systemzustände. Beispielsweise kann die vollautomatisierte FAS-Funktion beim Erreichen von Systemgrenzen eine Abschaltung initiieren, der Potentialtrigger wird in der Konsequenz ebenfalls deaktiviert. Im Umkehrschluss kann das Modul *Potentialtrigger* seiner Funktionslogik entsprechend den Modus VA ebenfalls deaktivieren.

Die in den State Manager integrierte Steuerung der optischen und akustischen Anzeigen im Fahrzeug erfolgt auf Basis der Modul-internen Vorgaben des State Managers.

**Control Device Manager (CDM)** In den Versuchsträger werden die drei austauschbaren, modularen Bedienelemente *Hebel*, *DDS* und *HBA* integriert. Der *CDM* koordiniert die Anbindung der verschiedenen Bedienelemente an das Gesamtsystem. Um die einheitliche, bidirektionale Kommunikation zwischen den divergierenden technischen Umsetzungen mit dem Gesamtsystem zu ermöglichen, erfolgt im *CDM* eine Normierung der Bedienelement-spezifischen Signale. Zusätzlich wird das Verhalten des im *Zielobjektgenerator* erzeugten, virtuellen Zielobjekts gesteuert. Details zu den informationstechnischen Grundlagen des Filters und zur Integration des *CDM* in die ADTF-Gesamtkonfiguration finden sich in [2].

**Integrierte Längs- und Querführung** Die Funktion zur integrierten Längs- und Querführung des Versuchsträgers erfolgt durch die Kopplung der Seriensysteme zur teilautomatisierten Längs- und Querführung. Die Verknüpfung der beiden Einzelsysteme zu einem einheitlichen Gesamtsystem wird durch einen CAPL-Knoten (vgl. Abschnitt 4.2.2.3) umgesetzt. Im CAPL-Knoten wird die Regelvorgabe des Seriensystems substituiert (vgl. Kapitel 4.1). Im Modus VA regelt die Aktorik des AALA nicht wie das Seriensystem auf Basis eines Trajektorien-Abgleichs (vgl. Abschnitt 2.3.1.2). Die Regelvorgabe wird anhand der lateralen Position des Vorderfahrzeuges berechnet. Diese basiert auf den Daten des BVS sowie des LRR. Der CAPL-Knoten in der CANalyzer Umgebung repräsentiert softwareseitig eine unabhängige Insellösung. Die Kommunikation mit der ADTF-Konfiguration erfolgt über den D-CAN des Versuchsträgers.

**Zielobjektgenerator (ZOG)** Der *Zielobjektgenerator* ermöglicht die Umsetzung der PMS des SPA. Das Subsystem wird als benutzerspezifischer Filter in die ADTF-Konfiguration integriert. Für die Generierung und Steuerung des virtuellen Zielobjekts benötigt der Filter zusätzliche Sensordaten der umgebenden Fahrzeuge. Hierfür wird für den ZOG im Gesamtsystem eine zeitsynchrone Kopplung mit dem Flexray des Versuchsträgers etabliert.

**Aktorik** Als Aktoren zur Realisierung der variierenden Betätigungskraftverläufe der Bedienelemente dienen für die umgesetzten Prototypen jeweils vier Linearmagneten. Diese wirken über verschiedene

Umlenkpunkte auf das Stellteil. Die für den Nutzer bei der Betätigung spürbare Kraftresultierende in der x-/y-Ebene ergibt sich aus der Addition der vier am Betätigungselement wirkenden Kraftvektoren. Die Betätigungsfläche wird in beide Richtungen in jeweils 64 Einheiten unterteilt, der Modus-abhängige Gegenkraftverlauf bei der Betätigung wird auf einer Steuerplatine hinterlegt. Zu Applikationszwecken ist es möglich, in einem separaten Arbeitsschritt in einem geläufigen CAD-Programm (*CATIA V5* der Fa. *Dassault Systems*) verschiedene dreidimensionale Kraftverläufe zu erstellen. Diese qualitativen Verläufe werden mit Hilfe eines Macros in quantitative Kraftverläufe umgerechnet, welche auf den Steuerplatinen der einzelnen Bedienelemente gespeichert werden. Die Steuerung des Betätigungskraftverlaufs erfolgt als informationstechnischer Prozess unabhängig von der ADTF-Gesamtkonfiguration *innerhalb* des jeweiligen Bedienelement-Moduls.

Die Botschaften und Signale zur Bedienung des ACC S&G-Seriensystems zur Bedienung des Modus TA werden ebenfalls innerhalb des Moduls emuliert. Die Filterung der originären ACC-Bedienbotschaften wird durch ein zusätzliches Steuergerät umgesetzt. Die Ausgabe und Filterung der Signale erfolgt auf dem D-CAN des Versuchsträgers.

Zur Bedienung der PMS des Modus VA, respektive die Parametrierung und der Wechsel quasi-stationärer Zustände, werden die Ausgaben der Positionssensoren der Bedienelemente im CDM detektiert und verarbeitet. Die Kommunikation mit der ADTF-Konfiguration erfolgt über einen separat verlegten CAN-Bus (*Private-CAN*).

**Weitere Module** Zusätzlich zu den beschriebenen Subsystemen wird in die ADTF-Konfiguration ein Steuermodul integriert. Dieses erlaubt in nachfolgenden Probandenversuchen dem Versuchsleiter die Beeinflussung des Gesamtsystemverhaltens. So ist es beispielsweise möglich, die Systemzustände des Automationspektrums zu wechseln und FÜAn zu provozieren. Eine weitere Möglichkeit ist das Setzen von Triggern, um die subsequente Auswertung von Reaktionszeiten, Betätigungsverläufen etc. zu vereinfachen.

Ein weiteres Modul stellt die *CANape* Messkonfiguration dar. Sie dient als Grundlage der Funktionsapplikation in der frühen Phase des Projekts und bildet - in Kombination mit dem Aufnahme-Filter des ADTF - die Grundlage für die Aufzeichnung von Daten bei Fahrversuchen. Das Modul wird im *CANape* Tool der Fa. Vector implementiert. Analog der alleinstehenden Lösung des SPA in *CANalyzer*, erfolgt die Kommunikation mit der losgelösten Messkonfiguration über die Bussysteme des Fahrzeugs.

Tabelle 4.3: Subsysteme der technischen Umsetzung

Subsystem	Beschreibung	Softwarebasis
StateManager	Koordination und Steuerung der Subsystem-Zustände	ADTF
DeviceManager	Identifikation/Anbindung der Bedienelement-Module	ADTF
Zielobjektgenerator	Virtuelles Zielobjekt für Querführung im Modus VA	ADTF
Potentialtrigger	Sensordaten Fahrerüberwachung und Berechnung $v_{sink}$	ADTF
Versuchsleiter-GUI	Modul zur Steuerung des Systems durch Versuchsleiter	ADTF
Anzeigen	Systemzustände, FÜAn, Automatisierungspotential	Flash
Modus VA	Integration der FAS-Seriensysteme	CAPL-Knoten
Datenaufzeichnung	Datenaufzeichnung für Applikations- und Studienzwecke	CANape



## 5 Evaluierung der Konzepte

Die in Kapitel 4 diskutierten Prototypen repräsentieren Lösungsansätze zum nutzerzentrierten Aufbau eines Automationspektrums, zur Evaluierung des Fahrerzustands für den Betrieb des Modus VA, sowie für Bedienteile zur durchgängigen und konsistenten Bedienung der Automationsstufen. Das folgende Kapitel beschreibt die Schaffung einer empirischen Basis für Aussagen zu Güte, Tragfähigkeit und der zu erwartenden Nutzerakzeptanz der vorgestellten Konzepte.

Hierfür werden die Umsetzungen in einem ersten Schritt in realitätsnahen, experimentellen Probandenversuchen untersucht. Kapitel 5.1 beschreibt einen Fahrversuch zur Evaluierung des Potentialtriggerkonzepts. Ein weiterer Fahrversuch wird zur Bewertung der entwickelten Stellelemente zur Bedienung des Automationspektrums durchgeführt (Kapitel 5.2).

### 5.1 Evaluierungsstudie Potentialtrigger

Der in Kapitel 3.2 beschriebene Prototyp des Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzepts *Potentialtrigger* wird im Rahmen der Potentialtrigger-Evaluierungsstudie erprobt. Als Trägersystem des Modus VA wird ein prototypischer, vollautomatisierter STA gewählt. Ziel des Versuchs sind Aussagen zum Konzept hinsichtlich der Nutzerakzeptanz und der funktionalen Tragfähigkeit. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Versuchsziele (Abschnitt 5.1.1) und den Aufbau des Versuchs (Abschnitt 5.1.2). Die Ergebnisse der Untersuchung werden in Abschnitt 5.1.3 dargelegt, die Diskussion sowie die Ableitung eines Ausblicks findet sich in Abschnitt 5.1.4. Die Potentialtrigger-Fahrstudie und die eruierten Ergebnisse sind in kumulierter Form in [124] veröffentlicht.

#### 5.1.1 Versuchsziele

Ein grundlegendes Ziel des experimentellen Fahrversuchs ist die Untersuchung des Potentialtriggers hinsichtlich der subjektiven Nutzerakzeptanz des Interaktionskonzepts. Hier steht die Fragestellung im Vordergrund, ob das Prinzip der erzwungenen Bedienhandlung im Kontext der vollautomatisierten Fahrzeugführung seitens der Nutzer angenommen wird.

Zusätzlich liegt ein Fokus des Versuchs auf der Erprobung der funktionalen Tragfähigkeit des Konzepts beim Betrieb des Modus VA. Es wird untersucht, ob der Potentialtrigger die Verfügbarkeit des Fahrers als Systemüberwacher und Rückfallebene beim Betrieb eines FAS des Modus VA gewährleisten kann.

Das Konzept wird in dieser Studie singular betrachtet, die Untersuchung der entwickelten Bedienkonzepte folgt in einem separaten Versuch.

Im Vorfeld des Potentialtrigger-Versuchs werden verschiedene Ausprägungen des Systems appliziert: Die Parametrierungen *selten*, *mittel* und *häufig* variieren die seitens des Potentialtriggers vom Nutzer geforderte Interaktionsfrequenz. Die drei Ausprägungen werden im Fahrversuch verglichen.



Die Ausprägung *mittel* stellt dabei einen aus Expertensicht guten Kompromiss dar, der eine vom Nutzer akzeptierte Triggerhäufigkeit mit der Verfügbarkeit des Fahrers als Rückfallebene kombiniert. Zusätzlich wird erwartet, dass aus einer STA-Fahrt mit der Ausprägung *selten* ein - in Relation zu den Ausprägungen *mittel* und *häufig* - geringeres Aufmerksamkeitsniveau bei erhöhter Nutzerakzeptanz resultiert. Bei einer Fahrt mit der Potentialtrigger-Parametrierung *häufig* wird ein gegenläufiges Verhalten erwartet, ein im Vergleich größeres Aufmerksamkeitsniveau bei gleichzeitiger Zunahme der subjektiv empfundenen Belästigung.

Ein weiteres Untersuchungsziel ist die Ermittlung des Einflusses der geforderten Triggerfrequenz auf die relative Fehlerhäufigkeit bei der Bedienung des Mensch-Maschine-Systems.

### 5.1.2 Versuchsaufbau

Die folgenden Abschnitte beschreiben die technischen Anpassungen des Versuchsträgers, das gewählte Probandenkollektiv sowie den entwickelten Versuchsablauf zum Erreichen der Versuchsziele.

#### 5.1.2.1 Versuchsträger

Um den Potentialtrigger im Rahmen eines realitätsnahen, experimentellen Fahrversuchs untersuchen zu können, wird der in Kapitel 4 vorgestellte Versuchsträger AUDI A7 für die speziellen Zwecke des Versuchs optimiert.

**Modus VA** Der Versuchsträger bietet die in Abschnitt 4.2.2.3 beschriebenen Möglichkeiten zur integrierten Längs- und Querführung. Für die Zwecke dieser Studie ist jedoch eine Reduktion der Funktionsvielfalt des Modus VA nötig. Im Versuch wird kein SPA mit der Möglichkeit zur Positionsparametrierung und Wechselmanövern, sondern eine vollautomatisierte FAS-Funktion zur LOT-Stauassistentz (STA) implementiert. Die in Kapitel 4 erörterten Randbedingungen bleiben jedoch erhalten. Übergeordnete Einschaltbedingung der Funktion ist die Existenz eines regelrelevanten Vorderfahrzeugs mit einem maximalen Abstand von 50 m. Das System steht für einen Geschwindigkeitsbereich von 0-50 km/h und innerhalb eines Lenkwinkelbereichs von 0-60° zur Verfügung. Das prototypische System ist für den Hands-Off-Betrieb ausgelegt, die Hands-On Erkennung des AALA wird auskodiert. Ebenso wird das ACC S&G in permanente Anfahrbereitschaft versetzt, um Wechselwirkungen zwischen Potentialtrigger und dem Anfahrtrigger des Seriensystems nach längeren Standzeiten im Stop&Go-Verkehr auszuschließen.

Der STA präsentiert sich dem Fahrer analog der Festlegung aus Kapitel 3.1 als einheitliches Gesamtsystem mit intrastrukturell konsistenter Kooperationsform. Das Wirkgefüge des STA ist *seriell-sequentiell* ausgelegt, im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis sind die Elemente *Fahrer* und *FAS* in Serie geschaltet. Die Interaktion des Fahrers mit dem FAS durch den Potentialtrigger erfolgt systeminitiiert zu ereignisdiskreten Zeitpunkten, die komplette Fahrzeugführungsaufgabe wird vom Automaten übernommen.

**Mensch-Maschine-Schnittstelle** Die Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrzeug orientiert sich an den konzeptionellen Anforderungen des Potentialtriggerkonzepts. Da der Fahrer für den Fall der unzulässigen Annäherung oder des Überschreitens der Systemgrenzen des STA die Fahrzeugführung übernehmen muss, stehen Lenkrad, Gas- und Bremspedal weiterhin zur Verfügung. Die Interaktionen des

Nutzers mit diesen Standardbedienelementen führen immer eine Deaktivierung des Modus VA herbei. Für die singuläre Bewertung des Potentialtriggers in dieser Studie werden *keine* neuartigen Bedienelemente in den Versuchsträger integriert. Die Bedienung des STA erfolgt vorläufig mit Hilfe des ACC-Lenkstockhebels. Der Modus TA, respektive das singuläre ACC S&G des Fahrzeugs, sind für den Versuch deaktiviert. Die Funktion des AALA-Tasters auf dem Blinkerhebel wird ebenfalls auskodiert.

Durch eine Betätigung der SET-Funktionalität wird der STA aktiviert. Ist aufgrund eines vorhergehenden Aktiv-Zyklus des Systems eine Setzgeschwindigkeit gespeichert, kann der STA durch eine RESUME-Betätigung reaktiviert werden. Analog dem ACC erfolgt eine Abschaltung des STA durch die monostabile Betätigung des Hebels in Fahrzeuginnenrichtung (CANCEL). Die letzte Setzgeschwindigkeit wird gespeichert, das System wechselt in den Stand-by-Zustand. Die Deaktivierung des Systems durch die Betätigung der Standardbedienelemente entspricht ebenfalls einem CANCEL. Der gerastete OFF-Zustand des Systems wird über die Rastposition des Hebels aktiviert, gespeicherte Setzgeschwindigkeiten werden hierbei gelöscht. Der Zustand entspricht dem Modus MF des Automationspektrums. Das Verstellen der Setzgeschwindigkeit ist möglich, wird dem Fahrer jedoch nicht angezeigt.

Durch die Verwendung des ACC-Lenkstockhebels zur Bedienung des STA ist die Kontinuität zur aktuellen Bedienphilosophie gegeben. Für die Probanden (Pbn) des Fahrversuchs bietet dies den Vorteil, bei gegebener Erfahrung mit dem ACC S&G der AUDI AG das FAS des Modus VA über ein gewohntes Element mit geläufigen Handlungsabläufen bedienen zu können. Zusätzlich wird durch die Applikation des Lenkstockhebels der Anforderung des Potentialtriggerkonzepts Rechnung getragen, nach der eine Betätigung des Triggers die Verfügbarkeit einsatzbereiter Hände sicherstellen muss. Der LED-Tachokranz ist deaktiviert, die Serienanzeige in Kombi- und Head-Up-Display wird vom Potentialtrigger mit den Konzept-spezifischen Inhalten überblendet. Im Mittendisplay des Kombiinstrumentes wird die Systemzustandsanzeige des STA eingeblendet und mit Details der Serienanzeige (Restkilometer, Uhrzeit etc.) ergänzt. Die prototypische Zustandsanzeige wird grafisch in enger Anlehnung an die Serienanzeige ausgeführt. In Abbildung 5.1 sind die beschriebenen Zustandsanzeigen abgebildet: Sind die Einschaltbedingungen des STA erfüllt, wird dem Fahrer die Verfügbarkeit des Systems kommuniziert. Zusätzlich erfolgt die Einblendung eines Stausymbols. Aktiviert der Fahrer den STA, heben die grünen Pfeile in Längs- und Querrichtung die Aktivität der vollautomatisierten FAS-Funktion innerhalb des analog eingefärbten Fahrschlauches hervor. Wird vom STA oder vom Versuchsleiter eine unzulässige *Annäherung* an die Systemgrenzen antizipiert, gibt das System eine vorhersehbare FÜA aus. Für die Zwecke dieses Versuchs wird der Trigger der vorhersehbaren FÜA über das Interface der ADTF-Konfiguration ausschließlich vom Versuchsleiter gesetzt. Wird ein *Überschreiten* der Systemgrenzen erkannt, gibt der STA eine akute FÜA aus. Ziel der akuten FÜA ist die sofortige Übernahme des Fahrzeugs durch einen potentiell unaufmerksamen Fahrer. Aus diesem Grund wird sie akustisch durch das ACC-Übernahmesignal komplementiert. Die akute FÜA kann situationsabhängig mit oder ohne vorhersehbarer FÜA erfolgen, die Auslösung erfolgt anhand von Daten der Umfeldsensorik situationsspezifisch oder durch einen Trigger des Versuchsleiters.

Gemäß den konzeptionellen Anforderungen erfolgen die Potentialanzeige und die Triggeraufforderung im HUD des Versuchsträgers. Die Serienanzeige wird komplett überblendet, zusätzliche Anzeigedetails (Geschwindigkeit, Verkehrszeichenerkennung etc.) werden für das HUD *nicht* simuliert. Die Anzeige des Potentials und seine Füllstandsänderung werden in Anlehnung an eine ablaufende Wassersäule dargestellt. Zur Kommunikation der Triggeraufforderung an den Fahrer wird das Potential gelb eingefärbt und der Fahrer zur Betätigung der RESUME-Funktionalität aufgefordert. Eine Helligkeitsänderung der Potentialanzeige zur Unterstützung der Eigenheiten des peripheren Sehens wird aus technischen Gründen nicht umgesetzt. Die Triggeraufforderung erfolgt *rein visuell*. Die Anzeige des HUD wird im Fall einer Übernahmeaufforderung komplett ausgeblendet.

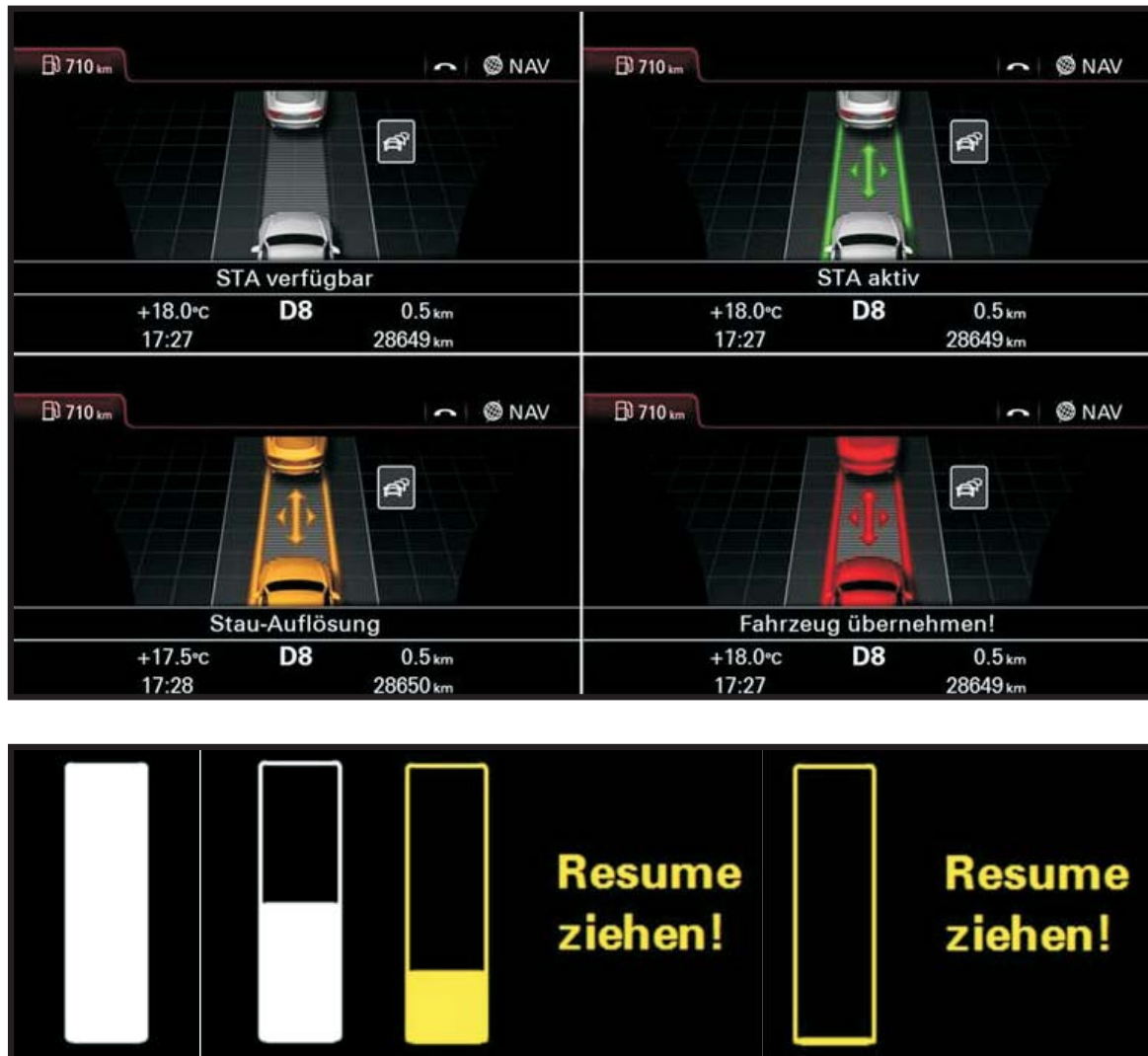


Abbildung 5.1: Anzeigen im Mitten- und Head-Up-Display für Potentialtrigger-Fahrversuch

Zur Erweiterung des Infotainmentangebots des Versuchsträgers wird im Bereich neben dem Klimabedienteil, seitlich vor dem deaktivierten Beifahrerairbag ein iPad der Fa. Apple verbaut (vgl. Abschnitt 2.3.3.2). Durch die bereits auf dem Gerät installierten Standardanwendungen sowie durch die Installation verschiedener zusätzlicher Apps dient das iPad im Versuch als Medium eines *mobilen Büros*. Dem Nutzer stehen während der Fahrt mit dem STA folgende Anwendungen zur Verfügung:

- eMail (bereits installiert)
- Kalender (bereits installiert)
- Spiel *Fruit Ninja* der Fa. *Halfbrick Studio*
- Videotelefonie mit der App *Skype* der Fa. *Skype Communications S.a.r.l*

Das iPad wird fest im Fahrzeug verbaut, die gewählte Position ist für alle Perzentile gut erreichbar. Als weiteres Medium des *mobilen Büros* wird im Versuch die Bedienung des fahrzeugeigenen Navigationssystems über den MMI-Controller verwendet.

**Erweiterungen** Im Fahrversuch werden die Umgebungsbedingungen möglichst konstant gehalten. Mit Ausnahme der provozierten Übernahmesituationen (siehe Abschnitt 5.1.2.3) weisen die simulierten Verkehrssituationen eine geringe Dynamik auf. Die Fahrzeuge werden während des gesamten Fahrversuchs auf einem niedrigen Geschwindigkeitsniveau bewegt. Das ACC-Seriensystem regelt als Längsführungskomponente des STA in dem gewählten Geschwindigkeitsband eine konstante Zeitlücke ein. Es stehen daher weder die TTC noch die Sollzeitlücke als situationsspezifische Eingangsgröße der Berechnung der Sinkgeschwindigkeit des Potentials zur Verfügung. Ebenso entfällt für den Fahrversuch aufgrund der substituierten Infotainmentbedienung über das im Fahrzeug verbaute iPad die HMI-Nutzung als variable, nutzerabhängige Eingangsgröße des Potentialtriggeralgorithmus. Der Filter wird daher im Vorfeld der Studie an die speziellen Einsatzbedingungen der Fahrstudie angepasst. Der Potentialtrigger führt die Berechnung der Sinkgeschwindigkeit hauptsächlich auf die Ausgaben der Fahrerüberwachungskamera, respektive auf die Kopforientierung des Fahrers in Relation einer RoI im Bereich der Windschutzscheibe durch. Im Rahmen dieser Studie ergibt sich durch die Positionierung des iPads außerhalb der festgelegten RoI die vorteilhafte Situation, die Interaktion mit dem Tablet durch die Interpretation der Kopforientierung zu antizipieren. Für die übrigen Beschreibungsgrößen wird von einer konstant starken Ablenkung durch das iPad sowie einer Stausituation mit konstant geringer Dynamik ausgegangen. Beide Parameter gehen im Rahmen dieser Studie als unveränderliche Größen mit geringer Gewichtung in die Berechnung von  $v_{sink}$  ein. Die Mittelwerte der Zeiten zwischen zwei Triggeraufforderungen sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Tabelle 5.1: Triggerzeiten i.A. der Systemausprägung des Potentialtriggers

Ausprägung	Triggerzeit [s]
<i>selten</i>	81.0
<i>mittel</i>	44.3
<i>häufig</i>	31.6

### 5.1.2.2 Stichprobe

Für die Zusammenstellung des Probandenkollektivs sind verschiedene Eigenschaften ausschlaggebend. Einerseits ist es das Ziel, den Potentialtrigger mit potentiellen zukünftigen Kunden vollautomatisierter FAS zu erproben. Es werden daher junge Akademiker ausgewählt, die meist am Anfang ihrer beruflichen Karriere oder kurz vor Abschluss ihrer universitären Ausbildung stehen. Diese repräsentieren eine Käuferschicht, die zum Zeitpunkt der prädierten Markteinführung vollautomatisierter FAS über die finanziellen Mittel zur Anschaffung dieser technisch hochwertig ausgestatteten PKWs verfügen können. Die 40 männlichen Probanden werden aus dem universitären Umfeld der *Universität der Bundeswehr München (UniBW)* akquiriert und sind im Durchschnitt 25.8 Jahre alt. Ihre durchschnittliche Jahreskilometerleistung beträgt 29.300 km/a. Die vergleichsweise hohe jährliche Fahrleistung erklärt die eben-

so starke monatliche Staubbelastung der Teilnehmer. Diese stehen im Durchschnitt viermal pro Monat im Stau. Die Pbn zeichnen sich folglich durch ausgewogene Fahrerfahrung und ein inherentes Verständnis des Komfortgewinns durch vollautomatisierte Stauassistenten aus.

Des Weiteren wird aufgrund des niedrigen Altersdurchschnitts der Stichprobe eine hohe Affinität zu Eingabemedien wie Touchdisplays und Tablets erwartet. Dies verringert die Einstiegshürde für die Durchführung von Nebentätigkeiten über das im Fahrzeug verbaute iPad.

Zur Gewöhnung der Stichprobe hinsichtlich des Fahrens und der Bedienung der automatisierten Fahrzeuglängsführung absolvieren alle Pbn eine Homogenisierungsfahrt mit einem aktuellen ACC S&G in einem AUDI A6. Die Teilnehmer werden eine Woche vor dem eigentlichen Fahrversuch zu diesem ersten offiziellen Versuchsteil eingeladen. Als Coverstory der Fahrt wird den Pbn ein Fahrversuch zur Erprobung verschiedener Parametrierungen des ACC-Systems kommuniziert. Eigentliches Ziel der einstündigen Fahrt ist jedoch die Gewöhnung des Teilnehmerkreises an das Gefühl der Teilautomatisierung der Fahrzeugführung. Da die Erfahrung mit ACC-Systemen keine explizite Anforderung der Probandenakquise darstellt, wird auf diese Weise ein einheitliches Niveau an Fahrerfahrung mit einem state-of-the-art ACC-System geschaffen. Durch die bei der Versuchsfahrt geforderten, zahlreichen Bedienschritte zur Interaktion mit dem FAS wird zudem eine einheitliche Erfahrungsbasis bzgl. der FAS-Bedienung mittels eines ACC-Lenkstockhebels geschaffen. Vor Fahrtbeginn geben die einzelnen Teilnehmer ihre demografischen Daten über ein iPad ein. Die Homogenisierungsfahrt wird von einem Versuchsleiter begleitet, zudem erfolgt die Aufzeichnung von Fahrzeug- und Umfelddaten durch sichtbare Sensoren und Datenspeicher (Dokumentationskamera in der Windschutzscheibe, Laptop im Fondbereich). An drei Haltepunkten wird die Erprobung unterbrochen, die Pbn werden aufgefordert den erlebten ACC-Fahrmodus (*auto*, *comfort* und *dynamic*) über eine eigens programmierte Online-Eingabemaske zu bewerten. Die Eingabe erfolgt ebenfalls über den Internetbrowser eines vom Versuchsleiter gereichten iPads. Das Gerät ist über UMTS mit dem Internet verbunden. Auf diese Weise erfolgt neben der Homogenisierung bzgl. der Fahrerfahrung mit FAS zusätzlich eine Eingewöhnung der Versuchsteilnehmer an die Bedienung eines iPad. Dies ist für die Ablenkung der Pbn während der Fahrten des Hauptversuchs von großer Bedeutung.

### 5.1.2.3 Versuchsdurchführung

Der Hauptteil des Potentialtrigger-Fahrversuchs findet auf dem Testgelände der UniBW statt (Abbildung 5.2). Auf dem ca. 1,2km langen Autobahnscenario wird mit Hilfe zweier Fahrzeuge mit instruierten Fahrern eine Stausituation simuliert. Zusätzlich werden an verschiedenen Punkten der Teststrecke durch die Begleitfahrzeuge sowie durch infrastrukturelle Maßnahmen (Baustelle, Autobahnausfahrt mit *Luftauto*<sup>1</sup>) Übernahmesituationen erzeugt. Zur nachgelagerten Auswertung werden die Fahrerreaktionen auf die FÜAn aufgezeichnet. Weiterführende Details zur Durchführung des Potentialtrigger-Versuchs finden sich in [108].

<sup>1</sup>Das verwendete *Luftauto* ist ein ballonartiges Kollisionsobjekt in Form eines Mittelklasse-PKWs auf einem flachen Schlitten aus Stahl. Im Fall einer Kollision des Versuchsträgers mit dem Objekt erfolgt der Kontakt lediglich mit der weichen, luftbefüllten Plane des Aufbaus. Zudem wird das Luftauto aufgrund des geringen Reibwerts zwischen Asphalt und Stahl vom Versuchsträger weggeschoben. Im unwahrscheinlichen Fall einer Kollision entstehen daher bei niedrigen Geschwindigkeiten keine nennenswerten Schäden. Den Versuchsteilnehmern sind diese Eigenschaften des Objekts nicht bekannt.



Abbildung 5.2: Teststrecke der UniBW München mit Wendepunkten (A, B, C), Baustelle (D) und Ausfahrt mit Luftauto (E, F), adaptiert nach [54]

Zu Beginn erläutert der Versuchsleiter den Teilnehmern die Hintergründe und Ziele der Studie. Zur Erfassung unvoreingenommener Daten wird der wahre Versuchszweck verschleiert. Als Coverstory wird die Beurteilung der Beanspruchung beim Betrieb eines vollautomatisierten FAS bei gleichzeitiger Interaktion mit Inhalten eines *mobilen Büros* gewählt (siehe Anhang B). Nach der theoretischen Einweisung in die Versuchshintergründe nehmen die Fahrer im Fahrzeug Platz und erhalten Gelegenheit, den Fahrerarbeitsplatz auf ihre subjektiven Präferenzen einzustellen. Bei stehendem Fahrzeug nimmt der Versuchsleiter eine Einweisung der Pbn in die funktionalen Möglichkeiten und Grenzen des LOT-STA vor. Im Anschluss bietet sich während der Einföhrungsfahrt (Abbildung 5.2, F-A) die Gelegenheit, unter Anleitung des Versuchsleiters sämtliche Bedienmöglichkeiten des STA - einschließlich der Systemdeaktivierung durch Betätigung von Lenkrad, Gas- und Bremspedal und der Triggerbetätigung - praktisch zu erproben. Die Einföhrung ermöglicht außerdem eine implizite Gewöhnung an die *Erfahrung* einer vollautomatisierten Fahrt, was für alle Teilnehmer eine neuartige und ggf. gewöhnungsbedürftige Situation darstellt. Für die nachfolgende Versuchsfahrt werden die Fahrer gebeten, sich im Zweifel stets hinter dem Begleitfahrzeug zu halten. Außerdem wird die Aufteilung der Verantwortlichkeiten zwischen Fahrer und Fahrzeug gemäß der in Kapitel 3.1 definierten Wirkstruktur des Modus VA erläutert. Die Fahrer werden explizit auf ihre Aufgabe hingewiesen, beim Auftreten von unerwartetem oder unplausiblem Verhalten des STA-Prototypen bzw. in subjektiv kritisch empfundenen Situationen die Fahrzeugführung zu übernehmen. Zu Beginn der Versuchsfahrt aktivieren die Testpersonen den STA. Das System folgt dem Zielfahrzeug, dieses simuliert langsam fließenden Stop&Go-Verkehr mit einer Geschwindigkeit von  $v \leq 10 \text{ km/h}$ . An vorbestimmten Punkten der Versuchstrecke werden Übernahme-situationen provoziert (vgl. Abbildung 5.2). Die Übernahme-situationen sind realen Verkehrssituationen in Stauszenarien nachempfunden und umfassen sowohl vorhersehbare, als auch unvermittelt auftretende Ereignisse. Während der gesamten Fahrt werden die Probanden mit realitätsnahen Nebenaufgaben aus dem Kontext eines *mobilen Büros* beschäftigt. In Konsistenz mit der gewählten Coverstory fordert der Versuchsleiter die Fahrer

auf, während der Fahrt mit dem *aktiven* STA beanspruchende Aufgaben auf dem iPad bzw. dem fahrzeu-geigenen Navigationssystem auszuführen und zu beurteilen. Die einzelnen Übernahme-situationen und die jeweils gewählten Ablenkungsarten sind in Tabelle 5.2 detailliert. Jeder Teilnehmer erprobt das Po-tentialtriggerkonzept in jeweils zwei verschiedenen Systemausprägungen. Während der Fahrt mit *einer* Variante werden die Fahrer jeweils *zweimal* zur Fahrzeugübernahme aufgefordert. Die beiden FÜAn er-geben sich aus einer vorhersehbaren und einer akuten Übernahme-situation. Die akuten Situationen sind in Abbildung 5.3 dargestellt.

Der Versuchsplan berücksichtigt eine ausgewogene Verteilung der in Tabelle 5.1 aufgezeigten Parame-trierungen, alle Abfolgen der Ausprägungen und Situationen werden über die Probanden systematisch variiert. Auf diese Weise werden Versuchs- und Reihenfolgeeffekte vermieden.

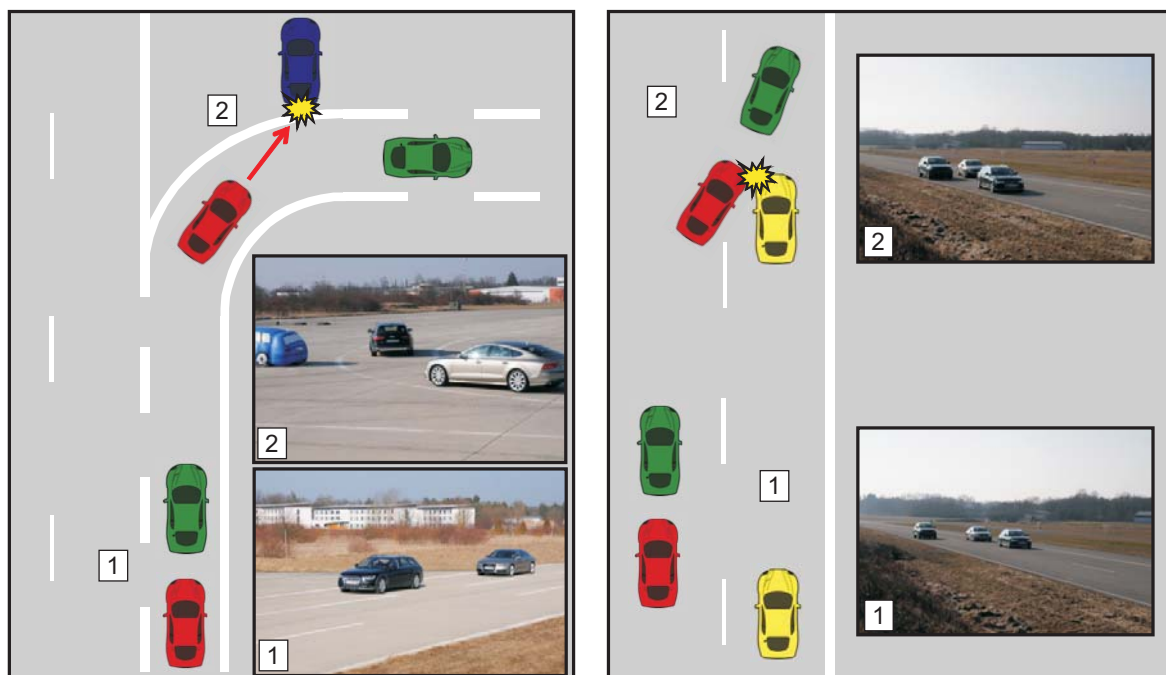


Abbildung 5.3: Akute Übernahme-situationen *Einscherer* (links) und *Luftauto* nach [54]

#### 5.1.2.4 Datenerhebung

Um die in Abschnitt 5.1.1 festgelegten Versuchsziele zu erreichen, werden zur Evaluierung der Fahrten objektive und subjektive Daten erhoben.

Aus objektiver Sicht sind hierfür das Bedienverhalten der Versuchsteilnehmer sowie die situationsbeschreibenden Umfeld- und Eigenzustandsdaten von Relevanz. Diese dienen zur Bestimmung der Bedienfehler bei der Interaktion mit dem Potentialtrigger. Des Weiteren werden die Reaktionszeiten der Fahrer bei den beschriebenen akuten und vorhersehbaren Übernahme-situationen bestimmt.

Die subjektive Beurteilung des Potentialtriggerkonzepts erfolgt anhand von Fragebögen. Zur Beurteilung der erprobten Konfigurationen füllen die Pbn nach den Fahrten mit *einer* Systemausprägung einen

Tabelle 5.2: Übernahme-situationen und ausgeführte Nebentätigkeiten

Art	Situation	Beschreibung	Nebenaufgabe
vorhersehbar	<b>Baustelle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verengung der Fahrbahn durch Baustelle auf einen Fahrstreifen</li> <li>• vorhersehbare FÜA beim Passieren eines Baustellen-Warnschildes</li> <li>• akute FÜA bei der Einfahrt in den verengten Baustellenbereich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spiel <i>Fruit Ninja</i></li> <li>• Zerteilen fliegender Früchte</li> </ul>
	<b>Stauauflösung</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• starke Beschleunigung des instruierten Vorderfahrzeugs</li> <li>• zeitgleiche Auslösung einer vorhersehbaren FÜA durch VL</li> <li>• akute FÜA beim Überschreiten des maximal zulässigen Abstands (<math>d_{max} = 50 m</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interaktion mit eMail und Navigationssystem</li> <li>• Extraktion einer Adresse aus eMail</li> <li>• Eingabe in fahrzeugeigenes Navigationssystem</li> </ul>
akut	<b>Luftauto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorderfahrzeug verlässt Autobahnzenario auf Autobahnausfahrt</li> <li>• LOT-STA folgt Vorderfahrzeug bis zum Überschreiten des zulässigen Lenkwinkels (<math>\delta_{max} = 60^\circ</math>)</li> <li>• akute FÜA und Systemabwurf, Fahrzeug stellt sich gerade</li> <li>• Eingriff des Fahrers zur Kollisionsvermeidung mit Luftauto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Videotelefonat über Skype</li> <li>• Befragung der Pbn zu bisherigen Eindrücken des STA</li> <li>• instruierter Gesprächspartner</li> </ul>
	<b>Einscherer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LOT-STA folgt Vorderfahrzeug auch beim Fahrstreifenwechsel</li> <li>• benachbarter Fahrstreifen durch zweites Begleitfahrzeug blockiert</li> <li>• Begleitfahrzeug im toten Winkel</li> <li>• VL triggert akute FÜA, Fahrzeug verbleibt auf Kollisionskurs mit verdecktem Nebenfahrzeug</li> <li>• Begleitfahrzeug und VL greifen ein, falls Kollision imminent</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interaktion mit eMail und Kalenderfunktion</li> <li>• Übertrag von Daten aus eMail in Kalender</li> <li>• Inhalte: Ereignis und Datum</li> </ul>



Fragebogen aus. In einem abschließenden Fragebogen bewerten die Teilnehmer die Funktionsweise und Wirkstruktur des STA und des Potentialtriggers. Die Bewertung erfolgt nach der Fahrt mit beiden Ausprägungen. Alle Fragebögen orientieren sich inhaltlich an der Coverstory, die tatsächlich relevanten Bewertungsaspekte werden in den umfangreichen Fragenkatalog eingewoben. Die einzelnen Fragebögen der Potentialtriggerstudie finden sich in Anhang A.

### 5.1.3 Ergebnisse

Die folgenden Abschnitte dokumentieren die Ergebnisse der Datenerhebung. Nach dem *zentralen Grenzwerttheorem* (siehe z.B. [12]) ist bei genügend großer Stichprobe „die Verteilung von Mittelwerten aus Stichproben des Umfanges  $N$ , die einer beliebig verteilten Grundgesamtheit entnommen werden, [...] normal“ ([12], S.411). In der Praxis wird entsprechend nach [12] bei einer Stichprobe von  $N \geq 30$  von einer hinreichend normalen Mittelwertverteilung ausgegangen. Auf dieser Basis kann die statistische Auswertung der Potentialtrigger-Evaluierungsstudie anhand *parametrischer Verfahren* wie etwa t-Tests oder Varianzanalysen erfolgen (vgl. [101]).

Die Ergebnisse der subjektiven Bewertung des Potentialtriggers werden in Abschnitt 5.1.3.1 detailliert. Sie umfassen die Aussagen der Probanden zur Funktionalität, Auslegung und Parametrierung des STA und des Potentialtriggers. Als weiteres Bewertungskriterium wird das eruierte Akzeptanzniveau seitens der Nutzer vorgestellt. Die Angaben erfolgen in Abhängigkeit zur erprobten Potentialtriggerparametrierung.

Die Auswertung der objektiven Daten erfolgt in Abschnitt 5.1.3.2. Die Ergebnisse dokumentieren die Reaktionszeiten der Fahrer in den Übernahmesituationen. Zusätzlich werden die ermittelten relativen Fehlerhäufigkeiten bei der Bedienung des Potentialtriggers abgebildet. Die objektiven Daten werden ebenso in Abhängigkeit der verschiedenen Ausprägungen des Potentialtriggers ausgewertet.

Tabelle 5.3: Beurteilung des STA und des Potentialtriggers im Abschlussfragebogen

Nr.	Frage	5er-Skala	Mittelwert	Stabw
1	Die Bedienung des Systems ist...	einfach (1) - schwierig (5)	1.30	0.56
4	Die Füllstandsanzeige im HUD war für mich bei der Bedienung des Stauassistenten...	leicht verständlich (1) - schwer verständlich (5)	1.15	0.66
5		hilfreich (1) - nicht hilfreich (5)	1.55	0.81
6	Damit der Stauassistent nicht mehr aktiv ist (Stand-by-Modus) mussten Sie bremsen, Gas geben oder lenken. Ich finde das ist...	sinnvoll (1) - sinnlos (5)	1.20	0.56

### 5.1.3.1 Subjektive Ergebnisse

Jeder Versuchsteilnehmer erprobt zwei verschiedene Parametrierungen des Potentialtriggerkonzepts (vgl. Abschnitt 5.1.2.3). Zur Bewertung der erlebten Ausprägung füllen die Pbn direkt nach den Fahrten einen Fragebogen aus. Am Ende des Versuchs beantworten sie im Rahmen eines Abschlussfragebogens grundlegende Fragestellungen zur Systemgestaltung des Modus VA sowie zum Verständnis des Potentialtriggerkonzepts. Die Fragebögen finden sich in Anhang A.

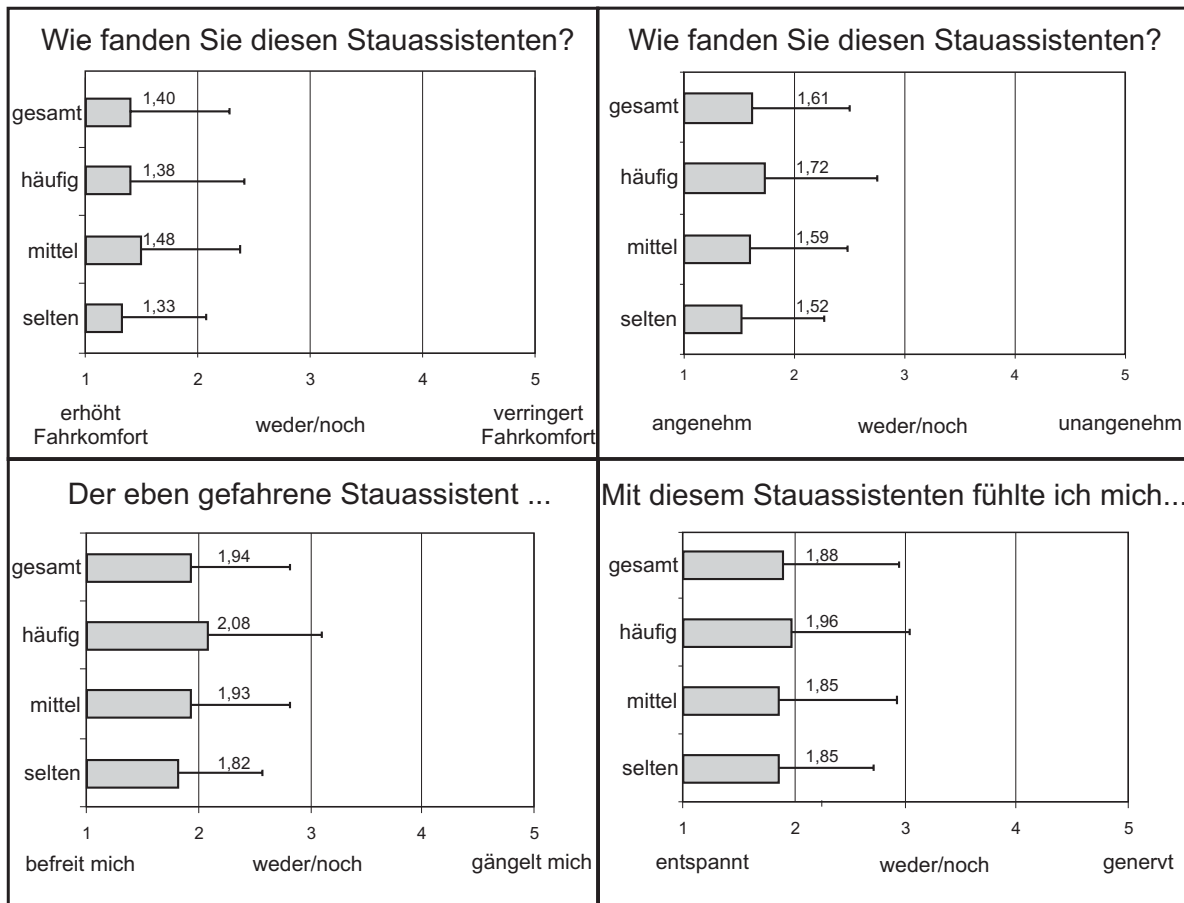


Abbildung 5.4: Subjektive Bewertung des Stauassistenten in Verbindung mit dem Potentialtriggerkonzept

Tabelle 5.3 detailliert die für die Versuchsziele relevanten Bewertungen des Gesamtkonzepts im Abschlussfragebogen.

Wie aus den Antworten zu *Frage 1* ersichtlich, fällt den Versuchsteilnehmern die Bedienung des Systems leicht. Die Visualisierung des Potential-Füllstandes im HUD des Versuchsträgers wird als leicht *verständlich* und *hilfreich* bewertet (*Frage 2*). Die visuelle Triggeraufforderung im HUD und die zugrundeliegende Funktionalität des manuellen Triggers - aus Nutzersicht wird der STA dadurch aktiv gehalten - wird als transparent und einfach zu verstehen eingeordnet: 37 Probanden bewerten den Wirkzusammenhang als *sofort verständlich*, zwei Probanden als *einfach zu lernen*. Lediglich ein Proband beurteilt

die Triggeraufforderung als *kompliziert* (Frage 3). Der STA wird als intrastrukturell konsistentes, seriell-sequentielles Gesamtsystem ausgelegt. Diese Gestaltung wird von den Teilnehmern als *sinnvoll* eingestuft (Frage 4). Im Anschluss an die einzelnen Fahrten erhalten die Pbn unmittelbar die Möglichkeit zur Bewertung der erprobten Parametrierung des Potentialtriggers. Die subjektive Beurteilung des STA und des Potentialtrigger-Interaktionskonzepts zeigt keine signifikanten Unterschiede der erprobten Ausprägungen *selten*, *mittel* und *häufig*. Abbildung 5.4 illustriert die Bewertung durch die Versuchspersonen: Der STA des Modus VA in Verbindung mit dem Potentialtrigger-Interaktionskonzept wird als tendenziell *angenehm* empfunden. Die Nutzung des Systems steigert den subjektiv empfundenen Fahrkomfort. Außerdem *entspannt* der STA die Pbn und sie fühlen sich durch das System tendenziell *befreit*.

Die subjektive Bewertung der zwischen den Ausprägungen variierenden Interaktionshäufigkeiten bildet die Grundlage einer Evaluation der Nutzerakzeptanz des Interaktionskonzepts. Die Befragung der Versuchsteilnehmer stellt eine Abhängigkeit des Bewertungsniveaus von der erprobten Ausprägung fest. Eine Varianzanalyse zeigt einen signifikanten Einfluss der Potentialtrigger-Konfiguration auf das subjektive Empfinden der Interaktionshäufigkeit (ANOVA,  $F(2,75)=4.08$ ,  $p=.02$ ). Ein Einzelvergleich mit Post-Hoc t-Test ergibt eine signifikant größere Nutzerakzeptanz der Interaktionsfrequenz der Ausprägung *selten* im Vergleich mit der Ausprägung *häufig*: Die Pbn schätzen die bei der Ausprägung *häufig* vom System geforderte Interaktionshäufigkeit als *zu hoch* ein. Dieser signifikante Unterschied deckt sich mit dem Trend, die geforderte Interaktion der Ausprägung *häufig* im Vergleich als *störender* einzustufen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.5 dargestellt.

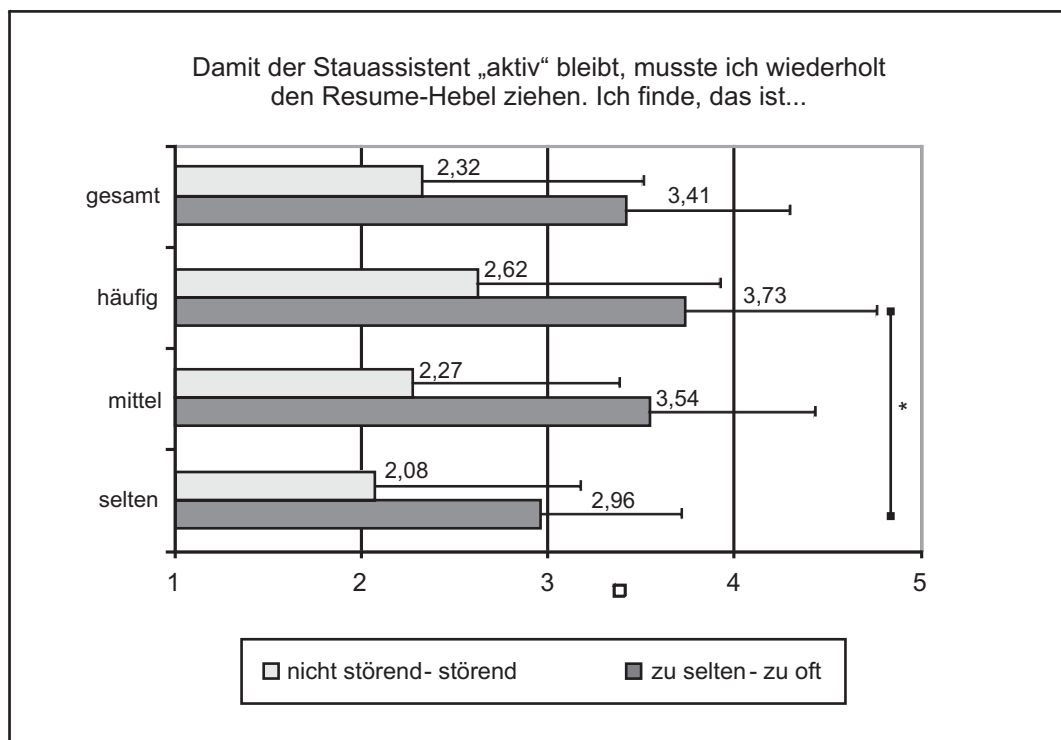


Abbildung 5.5: Subjektive Bewertung der in Abhängigkeit der Potentialtrigger-Konfiguration geforderten Interaktionshäufigkeit

### 5.1.3.2 Objektive Ergebnisse

Als Kennzahlen der objektiven Bewertung des Konzepts werden die Fehlerhäufigkeiten bei der Interaktion mit dem Konzept und die Reaktionszeiten der Probanden in den Übernahmesituationen betrachtet. Die Fehler werden als relative Häufigkeiten bei der Bedienung des Systems angegeben. Die Kennzahl wird entsprechend Gleichung 5.1 berechnet. Sie ergibt sich aus der Relation der beobachteten *Bedienfehler* zu der Gesamtzahl möglicher Fehlbetätigungen. Ein *Bedienfehler* liegt vor, wenn der Versuchsteilnehmer den Potentialtrigger nach einer Triggeraufforderung *nicht* betätigt. Eine *Fehlbetätigung* des Hebels ohne vorhergehender Aufforderung wird ebenfalls als Bedienfehler gewertet. Die Gesamtzahl möglicher Fehlbetätigungen ergibt sich aus der *Summe der Triggeraufforderungen* und der *unaufgeforderten Fehlbetätigungen*. In beiden Fällen führt die Interaktion des Nutzers mit dem Potentialtrigger zu einer Deaktivierung des STA und einem Wechsel in den Modus MF.

$$\text{Fehlerhäufigkeit} = \frac{\text{Anzahl der Bedienfehler}}{\text{Anzahl der Triggeraufforderungen} + \text{unaufgeforderte Fehlbetätigungen}} \quad (5.1)$$

Die Auswertung der Fehlerhäufigkeiten zeigt auf Basis einer Varianzanalyse einen signifikanten Unterschied zwischen den Ausprägungen (ANOVA,  $F(2,76)=3.72$ ,  $p=.03$ ). Der Post-Hoc t-Test ergibt eine signifikant höhere Fehlerhäufigkeit für die Fahrten mit der Ausprägung *selten* im Vergleich mit der Ausprägung *häufig*. Zudem ist durchgängig eine nicht zu vernachlässigende Fehlerhäufigkeit zu beobachten. Die Fehlerhäufigkeiten in Abhängigkeit der Systemausprägung sind in Abbildung 5.6 dargestellt.

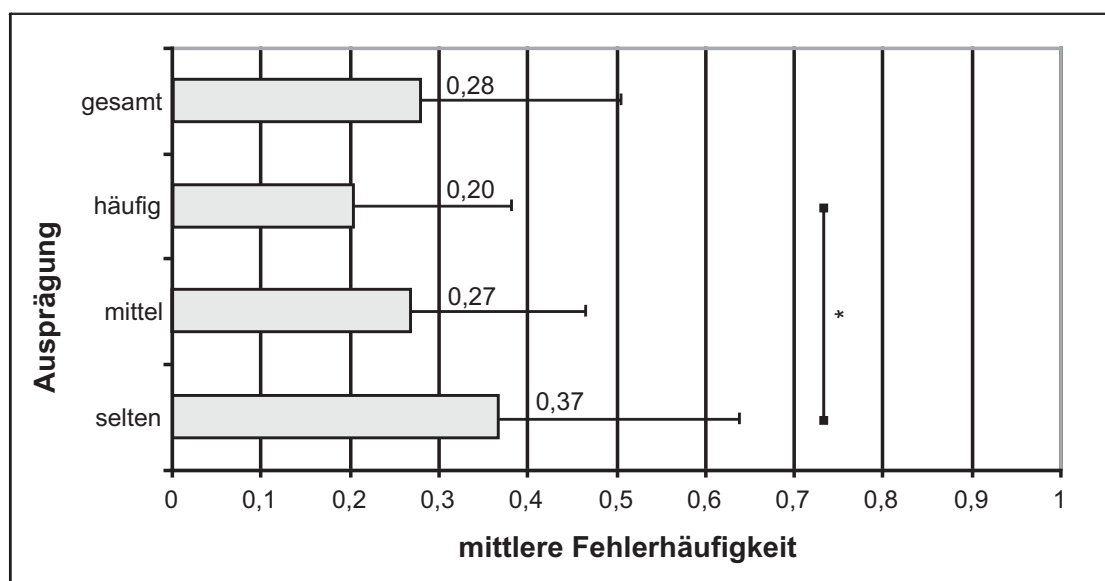


Abbildung 5.6: Fehlerhäufigkeit bei der Bedienung des Potentialtriggers in Abhängigkeit der Systemausprägung

Für die vorhersehbare Übernahmesituation *Stauauflösung* werden ebenso wie für beide akuten Übernahmeszenarien *Einscherer* und *Luftauto* mit Hinblick auf die Reaktionszeiten der Fahrer *keine* signifikanten Unterschiede zwischen den erprobten Parametrierungen des Potentialtriggers beobachtet. Bei

der Auswertung der vorhersehbaren Übernahmesituation *Baustelle* zeigt sich anhand einer Varianzanalyse ein signifikanter Einfluss der Ausprägung des Potentialtriggers auf die Reaktionszeiten (ANOVA,  $F(2,35)=5.35, p=.01$ ) (vgl. Abbildung 5.7). Der Post-Hoc t-Test ermittelt eine signifikant schnellere Übernahme der Fahrzeugführung für die Ausprägung *häufig* im Vergleich mit der Ausprägung *selten*.

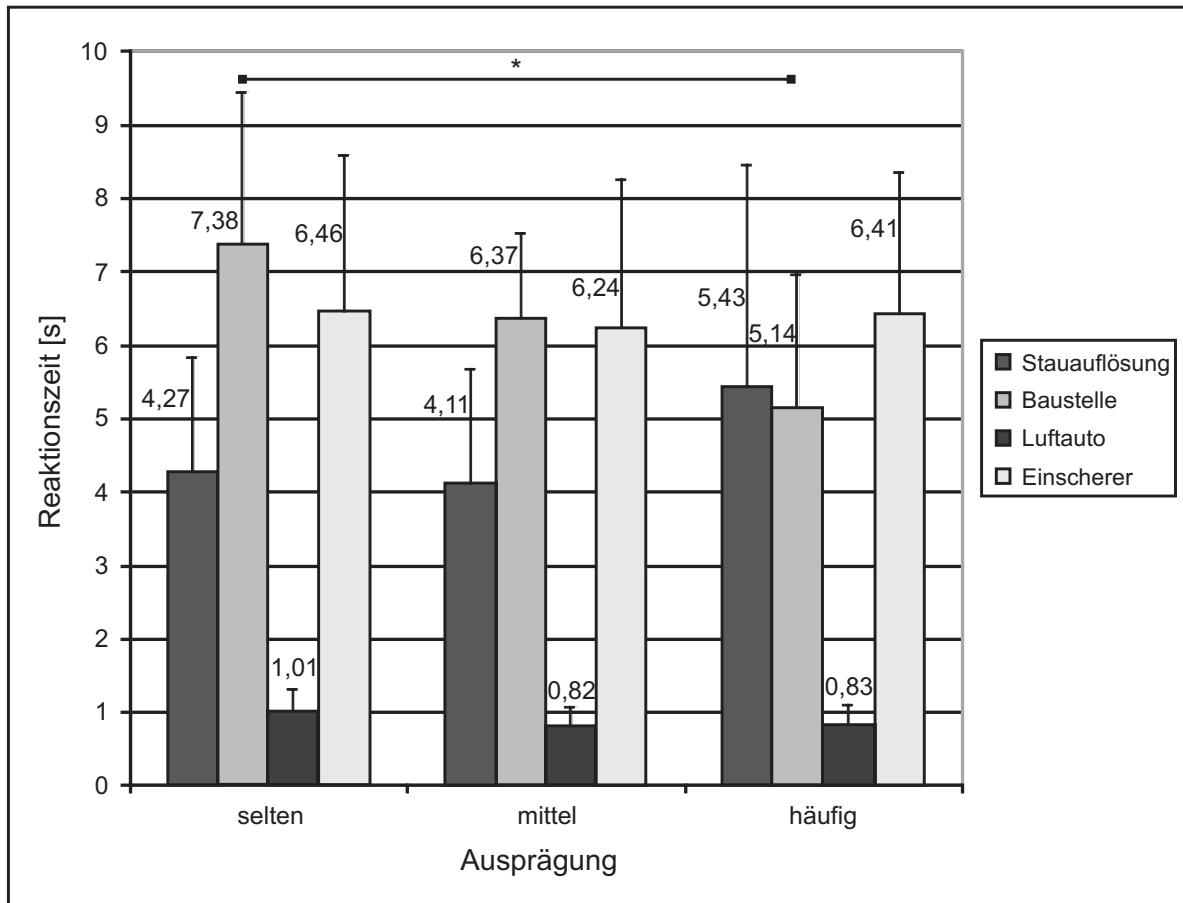


Abbildung 5.7: Reaktionszeiten der Pbn bei den FÜAn in Abhängigkeit der Systemausprägung

Im Vergleich der beiden Fahrten der Probanden ist zwischen der ersten und der zweiten Fahrt eine tendenzielle, leichte Abnahme der Fehlerhäufigkeit zu beobachten. Mit Hinblick auf die Reaktionszeiten kann keine Veränderung des Fahrerverhaltens beobachtet werden.

Im Verlauf des Fahrversuches werden zwei Übernahmesituationen beobachtet, in denen eine Reaktion der Fahrer ausbleibt. Diese nicht erfolgten Fahrerübernahmen treten im Versuch bei der akuten Situation *Einscherer* auf. Trotz der vom Versuchsleiter getriggerten FÜA müssen der Versuchsleiter und der Fahrer des verdeckten Begleitfahrzeugs eingreifen, um eine Kollision zu verhindern.

### 5.1.4 Diskussion

Wie in Abschnitt 5.1.3 aufgezeigt, wird das Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzept *Potentialtrigger* beim Betrieb eines vollautomatisierten STA durch die Probanden positiv bewertet. Neben einer hohen subjektiven Akzeptanz lassen die Aussagen der Versuchsteilnehmer zudem ein solides Verständnis des Wirkzusammenhangs zwischen dem Interaktionskonzept und dem Modus VA erkennen.

Zwischen der vom Potentialtrigger geforderten Interaktionsfrequenz und der von den Pbn kommunizierten Akzeptanzwerte besteht ein Zusammenhang, die höher-frequenten Triggeraufforderungen der Ausprägung *häufig* bewirken eine Absenkung des Akzeptanzniveaus.

Die Ergebnisse der objektiven Daten zeigen keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Reaktionszeiten der Fahrer bei den *akuten* Übernahme-situationen *Einscherer* und *Luftauto*. Die Zeitdifferenz von der akuten FÜA bis zur Reaktion der Fahrer ist unabhängig von den drei erprobten Potentialtriggerparametrierungen. In Bezug auf die *vorhersehbaren* Übernahme-situationen zeigt die Situation *Stauauflösung* keinen Zusammenhang zwischen der Reaktionszeit und der Ausprägung. Bei der Situation *Baustelle* reagieren die Pbn mit der Ausprägung *häufig* signifikant schneller auf die FÜA als mit der Ausprägung *selten*. Zur *mittleren* Systemausprägung zeigen sich weder in den akuten noch in den vorhersehbaren Situationen signifikante Unterschiede.

Die Fehlerhäufigkeit bei der Bedienung des Potentialtriggers zeigt eine Korrelation zwischen der erprobten Ausprägung und den Bedienfehlern der Pbn. Bei geringer Interaktionsfrequenz in der Ausprägung *selten* sind signifikant mehr Bedienfehler als in der Ausprägung *häufig* zu beobachten. Einerseits wird dies auf Basis der höheren Interaktionsfrequenz einer besseren Gewöhnung der Versuchsteilnehmer an den Potentialtrigger zugeschrieben. Andererseits scheinen die Teilnehmer die visuelle Kontrolle des Potentialfüllstands bei der geringeren Interaktionsfrequenz der Ausprägung *selten* zu vergessen. Die visuelle Kontrolle des Füllstands ermöglicht als Eckpfeiler des Potentialtriggerkonzepts eine periphere Wahrnehmung der relevanten Umgebungsinformationen zur Schaffung eines ausreichenden Situationsbewusstseins. Als Konsequenz der im Vergleich hohen Fehlerhäufigkeit der Ausprägung *selten* muss die visuelle Aufmerksamkeit der Fahrer für die geringe Interaktionsfrequenz dieser Parametrierung als zu gering eingestuft werden. Zur *mittleren* Parametrierung werden keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Fehlerhäufigkeit festgestellt.

Als Konsequenz für die Funktionsentwicklung sollte die zukünftige Entwicklung des Potentialtriggers auf Basis der *mittleren* Ausprägung durchgeführt werden: Der Vergleich der Ausprägungen zeigt zusammenfassend ein hohes subjektives Akzeptanzniveau für die Ausprägung *selten*, im Vergleich zur Ausprägung *mittel* werden jedoch keine signifikanten Unterschiede gemessen. Aus den objektiv erhobenen Daten ergeben sich zudem hinsichtlich der Fehlerhäufigkeiten und der Reaktionszeiten für die *mittlere* Ausprägung ein zur Ausprägung *häufig* vergleichbares Niveau.

Zusätzliche Prämissen einer weiterführenden Funktionsentwicklung ergeben sich aus den beiden nicht erfolgten Fahrerübernahmen bei der Übernahme-situation *Einscherer*. Das Ausbleiben der Fahrerreaktion kann ein Indikator dafür sein, dass mit Hilfe des Potentialtriggers bei der Fahrt mit einem STA die Verfügbarkeit des Fahrers nicht für alle denkbaren Verkehrssituationen sichergestellt werden kann. Stellt sich diese These als zutreffend heraus, ergibt sich die Forderung nach einer Erweiterung eines möglichen Seriensystems zur vollautomatisierten Stauassistentz im Vergleich zum erprobten Prototypen. Demnach soll ein Serien-STA in der Lage sein, neben Positionsinformationen des regelrelevanten Vorderfahrzeugs durch Erweiterung der Fahrzeugsensorik und des Funktionsalgorithmus weitere Parameter zur Bestim-

mung der Solltrajektorie heranzuziehen. Die Ergänzungen können etwa in der Berücksichtigung des Fahrstreifenverlaufs auf Basis der Detektion von Spurmarkierungen in Kombination mit einer Detektion und Verarbeitung der Belegung benachbarter Fahrstreifen mit relevanten Objekten sein. Auf diese Weise kann der strikte LOT-Ansatz des Versuchsträgers sinnfällig erweitert werden, Wechselmanöver des Vorderfahrzeuges werden im Optimalfall folglich nur noch bei passenden Umgebungsbedingungen nachempfunden. Dieser zusätzliche Kompetenzaufbau des STA kann unter der Prämisse erfolgen, den Fahrer als *permanente* Überwachungs- und Übernahmestanz des Mensch-Maschine-Systems in allen denkbaren kritischen Situationen zuverlässig verfügbar zu halten.

Als Alternative kann sich die Forderung ergeben, eine weitgreifende funktionale Erweiterung des STA durchzuführen. Dieser stark erweiterte STA benötigt den Fahrer also nicht permanent, sondern innerhalb einer festen Latenzzeit als Rückfallebene. Innerhalb dieses Zeitintervalls muss das System selbstständig alle auftretenden Situationen adäquat handhaben können. Diese Systemgestaltung setzt die Existenz einer systemeigenen Rückfallebene voraus, die zumindest für den zugesicherten Zeitraum eine sichere Fahrzeugführung durchführen kann. An dieser Stelle verwischen jedoch die klar definierten Grenzen des Automationspektrums. Der Potentialtrigger dient in dieser Konstellation entsprechend nicht mehr der Sicherstellen einer *permanenten* Verfügbarkeit des Fahrers, sondern einer Verfügbarkeit des Fahrers *innerhalb einer festen Latenzzeit*.

Einen weiteren Diskussionspunkt stellt die Fragestellung nach dem Anspruch an ein FAS des Modus VA dar: Wird von einem vollautomatisierten FAS die Handhabung von Situationen erwartet, die sich beispielsweise im Modus MF durch vergleichbar hohe Kritikalitätswerte auszeichnen? Die Situation *Einscherer* ist einer häufig auftretenden, realen Verkehrssituation nachempfunden. Die Kritikalität ergibt sich aus einer Kombination der strikten LOT-Auslegung des prototypischen STA und der Existenz eines unvorhersehbar agierenden Fahrzeugs im toten Winkel. Fahrzeuge im toten Winkel stellen jedoch auch im Modus MF eine potentielle Gefahrenquelle beim Wechsel des Fahrstreifens dar. Während den meisten Fahrern diese Gefahr während der manuellen Fahrt bewusst ist, stellt sich die Frage nach der Erwartungshaltung der Nutzer eines Systems des Modus VA. Wissen die Nutzer um die situativen Einschränkungen des FAS, ist eine funktionale Erweiterung der Funktion nicht zwangsläufig notwendig. Erwarten die Nutzer aufgrund der allgemein hohen Erwartung an ein vollautomatisiertes FAS die Handhabung der Situation, setzt die potentielle Markteinführung eine Lösung der Thematik voraus. Verhindern die technischen Rahmenbedingungen eine funktionale Erweiterung des FAS, kann eine Lösung auch darin bestehen, dem Nutzer anhand von Beschreibungen in Handbüchern oder Tutorials das System und seine funktionalen Grenzen anschaulich zu erläutern. Auf diese Weise wird der Fahrer bei der Ausbildung eines validen inneren Modells des FAS und seiner Grenzen unterstützt.

Die nicht erfolgten Übernahmen sind im Rahmen einer Versuchsfahrt in einer simulierten Staufahrt auf einem Testgelände aufgetreten. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Fahrerreaktion aufgrund einer Adaption der Pbn an diese außergewöhnliche Situation ausbleibt. Einerseits ist ein Unterschätzen der Kritikalität der Übernahmesituation aufgrund der sterilen Versuchsumgebung vorstellbar. Andererseits ist es möglich, dass die beiden Teilnehmer die Kritikalität der Situation zwar erkannt haben, die Fahrzeugübernahme aber bewusst ausbleibt. Die Teilnehmer möchten in diesem Fall schlicht die Grenzen des STA und die Reaktion des FAS auf die unerwartete Situation erleben.

Im Verlauf der Vorbereitung und Durchführung des Versuchs werden weitere Verbesserungsmöglichkeiten des Potentialtriggerkonzepts deutlich: Die auftretenden Dynamiken während der Versuchsfahrt sind außerhalb der Übernahmesituationen vergleichsweise gering. Ein Versuchsteilnehmer nutzt in einem Vorversuch die einhergehende niedrige Kritikalität der Versuchsfahrt aus und bedient das iPad ohne jegliche visuelle Interaktion mit dem Potentialtrigger. Die visuelle Triggeraufforderung wird entsprechend nicht

verarbeitet, die multimodale FÜA nutzt der Proband als Taktgeber der fünfsekündigen Latenzzeit. In dieser Zeit kann das System nicht reaktiviert werden. Im Anschluss aktiviert der Teilnehmer den STA erneut. Im Verlauf dieses gesamten Zyklus blickt der Fahrer ausgesprochen selten aus dem Fahrzeug, der Teilnehmer hat nicht die Möglichkeit zum Aufbau eines ausreichenden Levels an Situationsbewusstsein. Dieser konzeptionellen Schwäche des erprobten Potentialtriggers kann begegnet werden, indem einer Reaktivierung des Systems eine von der Fahrerbeobachtungskamera detektierte Orientierung des Gesichtsfelds des Fahrers in die RoI vorgeschaltet sein muss. Auf diese Weise kann nach systeminitiierten Abschaltungen von einem ausreichend aufmerksamen Fahrer ausgegangen werden. Diese Anpassung des Konzepts deckt nicht nur die Abschaltungen aufgrund des abgelaufenen Potentials, sondern alle systeminitiierten Abschaltungen ab.

Von einigen Pbn wird zudem angemerkt, die harte Grenze der Triggeraufforderung durch einen Übergangsbereich zu ersetzen. Auf diese Weise führen Triggerbetätigungen kurz vor der Triggerschwelle nicht mehr zu Systemabschaltungen, sondern ebenfalls zu einer Initialisierung des Potentials. Von der Anpassung wird eine komfortablere Bedienung des Potentialtriggers und in der Folge eine leichte Erhöhung des subjektiven Akzeptanzniveaus erwartet.

Im Versuch erfolgt die Bedienung des STA und des Potentialtriggers mit Hilfe des ACC-Lenkstockhebels. Diese Umsetzung erfüllt einerseits die Anforderungen des Potentialtriggers an eine manuelle Betätigung des Triggers in unmittelbarer Nähe zu den primären Stellelementen der Fahrzeugführung. Jedoch wird auf diese Weise das Bedienelement des Modus TA für die Zwecke des Modus VA genutzt, aus Sicht der Nutzer erfolgt somit eine Vermischung der Modi. Die gewählte Umsetzung erfüllt nicht die Anforderungen aus Kapitel 2.4 an eine distinguierte Bedienung der Teil- und Vollautomation. Andererseits wird die Durchgängigkeit zwischen den funktional eng verwandten Funktionalitäten *Anfahrtrigger* des ACC S&G und dem *Potentialtrigger* des STA bewahrt. Die Umsetzung der Bedienkonzepte aus Kapitel 3.3 nimmt diese Problematik auf und präsentiert dem Nutzer eine Kombination aus Durchgängigkeit zwischen den Triggerbetätigungen der Modi TA und VA *und* einer distinguierten Bedienung der Funktionalitäten der beiden Modi.

Der Potentialtrigger-Fahrversuch bestätigt die Möglichkeiten des Konzepts als Wegbereiter eines mittelfristigen Einsatzes vollautomatisierter FAS. Es werden konkrete Prämissen für weitere Entwicklungsschritte des Interaktionskonzepts abgeleitet. Zusätzlich können durch den Fahrversuch konzeptionelle Verbesserungen zur Erweiterung der Tragfähigkeit des Konzepts und zur Erhöhung der Nutzerakzeptanz bestimmt werden. Die Interpretation der Ergebnisse des Versuchs dienen als Eingangsparameter der Weiterentwicklung des Potentialtriggers als Bestandteil eines HMI Konzepts für den Einsatz vollautomatisierter Seriensysteme.

## 5.2 Evaluierungsstudie Bedienkonzepte

Kapitel 4 beschreibt die technische Umsetzung der integrativen Bedienelemente (vgl. Abschnitt 3.3.3) für die Bedienkonzepte des Automationsspektrums aus Abschnitt 3.3.1. Die gezeigten Aufbauten sind in Kombination mit einer reduzierten, prototypischen Darstellung des Automationsspektrums in einen Versuchsträger integriert. Das folgende Kapitel beschreibt einen experimentellen Fahrversuch zur Evaluierung der umgesetzten Konzepte. Abschnitt 5.2.1 definiert die Ziele der Untersuchung, Abschnitt 5.2.2 detailliert den gewählten Versuchsaufbau. Abschnitt 5.2.3 legt die Ergebnisse des Fahrversuchs dar. Diese dienen als Basis der abschließenden Diskussion (Abschnitt 5.2.4).



### 5.2.1 Versuchsziele

Der primäre Fokus der entwickelten Bedienkonzepte besteht in einer durchgängigen, konsistenten Bedienbarkeit des Automationsspektrums. Die integrativen Stellelemente *Hebel*, *Handballenablage (HBA)* und *Drehdrücksteller (DDS)* ermöglichen eine inter- und intrastrukturelle Interaktion mit den Modi MF, TA und VA. Das grundlegende Bestreben des Fahrversuchs ist eine Evaluierung der Bedienung des entwickelten Automationsspektrums mit den drei umgesetzten Konzepten durch eine potentielle Nutzerpopulation.

Ein Ziel des Versuchs besteht entsprechend in der Evaluierung des Nutzerverständnisses dieses Automationsspektrums und der Transitionen zwischen den einzelnen Modi (*interstrukturelle* Interaktion). Die Anpassung der Interaktionsmöglichkeiten für den Nutzer beim Übergang von einem Modus mit niedriger funktionaler Kompetenz (Modus TA) in einen Modus höherer funktionaler Kompetenz (Modus VA), stellen ebenso wie das umgesetzte Anzeige-Konzept zur Komplementierung des Bedienkonzepts zusätzliche konzeptionelle Untersuchungsaspekte der interstrukturellen Interaktion dar.

Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchung liegt auf der Evaluierung der Interaktionskonzepte zur Bedienung der einzelnen Modi des Spektrums (*intrastrukturelle* Interaktion). Ein besonderes Augenmerk liegt hier auf dem Potential der neuartigen Master-Slave-PMS zur Bedienung des Modus VA. Die Parameter- und Manöverschnittstelle (PMS) verfolgt das Ziel, den Nutzer bei der Ausbildung eines validen inneren Modells der Fahrerassistenzfunktion zu unterstützen. Ein weiterer Untersuchungsaspekt des Fahrversuchs besteht entsprechend darin, das Potential der Bedienkonzepte zur Unterstützung der inneren Modellbildung abzuschätzen.

Ein zentrales Anliegen des Fahrversuchs besteht zudem in einem Vergleich der drei integrativen Stellelemente. Einerseits wird auf diese Weise die Ausrichtung weiterführender Entwicklungsschritte integrativer FAS-Bedienelemente geschaffen. Außerdem soll die Bewertung der einzelnen technischen Umsetzungen Auskunft über verschiedene spezifische technische Lösungsansätze der Prototypen geben.

Schließlich soll als Nebenprodukt der Evaluierung der Bedienelemente eine Bewertung des Potentialtriggerkonzepts erfolgen. Die Studie strebt nach zusätzlichem Wissen zum Potentialtriggerkonzept. Aussagen zur Tragfähigkeit des Systems, respektive zur Gewährleistung der Verfügbarkeit des Fahrers als Rückfallebene, werden in Ermangelung einer Fahrerablenkung und provozierten Übernahmesituationen *nicht* angestrebt.

Der Anspruch der integrativen Bedienelemente liegt nicht in einer Verbesserung der Bedienkonzepte von ACC-Seriensystemen, sondern in einer optimalen Integration der Bedienung des Modus TA in ein durchgängiges Konzept zur Bedienung eines gesamten Automationsspektrums. Im Rahmen dieser Studie wird daher *kein* Vergleich mit existierenden Bedienkonzepten zur Bedienung des Modus TA vorgenommen.

### 5.2.2 Versuchsaufbau

In den folgenden Abschnitten werden die versuchsspezifischen Anpassungen des Versuchsträgers und das Probandenkollektiv des Bedienelement-Versuchs beschrieben. Abschließend wird der Versuchsablauf dargelegt, auf Basis dessen die Versuchsziele erreicht werden sollen.

#### 5.2.2.1 Versuchsträger

Der Versuchsträger wird für die Untersuchung der Bedienkonzepte gemäß der Beschreibung der technischen Umsetzung aus Kapitel 4 vorbereitet. Beim Aufbau der Bedienelemente wird ein Fokus auf die

Modularität und den einfachen Austausch der Module gelegt. Für die Zwecke des Versuchs ermöglicht die Modulbauweise einen Austausch der einzelnen Bedienelemente innerhalb weniger Minuten. Die Anpassung der Bedienelement-spezifischen Anzeige im Kombidisplay auf das aktuell verbaute Modul wird - wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben - durch eine auf dem D-CAN gesendete Bedienelement-ID gesteuert.

Das Automationsspektrum des Versuchsträgers beschränkt sich auf die Darstellung der Modi MF, TA und VA. Der Modus AUTON kann aufgrund technischer Einschränkungen hinsichtlich Sensorik und funktionaler Kompetenz *nicht* untersucht werden. Als Konsequenz muss das Element HBA angepasst werden. Die ursprünglich umgesetzte STP ON/OFF-Taste wird durch eine OFF-Taste ersetzt. Die Funktionalität ist nur im Modus VA verfügbar und ermöglicht eine Deaktivierung des SPA. Die Verfügbarkeit der Taste wird durch eine Modus-abhängige Hinterleuchtung kommuniziert.

Funktional wird der Modus MF nicht erprobt, für die Elemente DDS und Hebel dient der Modus lediglich als Einstieg in die hierarchische Aktivierung der nachfolgenden Automationsstufen. Trägerfunktion des Modus TA ist das ACC S&G des Versuchsträgers, der Modus VA wird entsprechend Kapitel 4 durch einen SPA repräsentiert. Im Vergleich zum Potentialtriggerversuch ermöglicht dieser prototypische SPA theoretisch die größere Maximalgeschwindigkeit von 50 km/h und bietet dem Nutzer die Funktionalität der PMS. Diese erlaubt dem Fahrer in der ersten Ausbaustufe die Parametrierung der Position des Egofahrzeugs innerhalb des aktuellen Fahrstreifens sowie das Triggern von Wechselmanövern zwischen Fahrstreifen.

Der Potentialtrigger muss für die speziellen Zwecke dieser Studie gesondert appliziert werden. Aufgrund der Restriktionen durch die auf der Versuchstrecke herrschenden Umgebungsbedingungen (starke Sonneneinstrahlung und häufig und unregelmäßig wechselnde Beleuchtungsverhältnisse) muss die videobasierte Fahrerüberwachung deaktiviert werden. Während bei der vorgelagerten Potentialtriggerstudie aufgrund des vergleichsweise statischen Versuchsdesigns bzgl. des Kamerasystems nahezu stationäre Einsatzbedingungen herrschen, liefert die videobasierte Fahrerüberwachung aufgrund der höheren Dynamik der Umgebungsbedingungen keine durchgängig zuverlässigen Daten. Um die Triggerzeiten dennoch zu variieren, wird in Folge von Manövertriggern und Parametereinstellungen am Bedienelement die Sinkgeschwindigkeit des Potentials herabgesetzt. Der Trigger erfolgt, in Kontinuität zum Potentialtriggerversuch, über die Betätigung der RESUME-Funktionalität am Bedienelement. Die durchschnittliche Triggerzeit liegt bei 61.95 s.

### 5.2.2.2 Stichprobe

Der Versuch ist in eine Expertenevaluierung und einen Probandenversuch aufgeteilt. Die zehn Mitglieder der Expertengruppe werden zu gleichen Teilen anhand von Mitarbeitern des Instituts für Arbeitswissenschaft der Universität der Bundeswehr München sowie Mitarbeitern der Technischen Entwicklung der AUDI AG rekrutiert. Alle Experten verfügen über langjährige Erfahrung auf dem Gebiet der Entwicklung und Erprobung von HMI-Konzepten für FAS.

Die Aufgabe der Versuchsteilnehmer des Probandenversuchs besteht in der Bedienung und der Evaluierung eines weitgehend neuartigen Bedienkonzepts. Sowohl die zur Erprobung stehenden Bedienelemente, als auch die Ausprägung und die Integration der komfortorientierten FAS der Führungsebene in ein Automationsspektrum werden in diesem Versuch erstmalig einer Bewertung durch unabhängige Probanden zugänglich gemacht. Neben der Repräsentation einer potentiellen, zukünftigen Käuferschicht soll die Stichprobe außerdem eine einheitliche Erfahrung mit komfortorientierten FAS der Führungsebene aufweisen.

Aus diesem Grund wird für den Hauptversuch die Stichprobe des Potentialtriggerversuchs (vgl. Abschnitt 5.1.2.2) gewählt. Diese bietet zusätzlich zu einer homogenen Erfahrung mit dem ACC S&G-Trägersystem des Modus TA den Vorteil eines durchgängigen Erfahrungsschatzes bzgl. des Modus VA: im Zuge des Fahrversuchs zum Potentialtrigger haben alle Probanden die Funktion eines vollautomatisierten FAS in einem seriell-sequentiell ausgelegten STA erlebt und mit dem System interagiert. Vollautomatisierte Systeme existieren aktuell lediglich in prototypischer Form, die Vorerfahrung der Probanden hinsichtlich dieser Systeme ist entsprechend einzigartig. Von den 40 Teilnehmern des Potentialtriggerversuchs stehen für die Bedienelement-Studie 36 Pbn erneut zur Verfügung.

### 5.2.2.3 Versuchsdurchführung

Die Bedienelement-Studie wird - ebenso wie der Potentialtrigger-Versuch aus Kapitel 5.1 - auf dem nicht-öffentlichen Testgelände der UniBW München durchgeführt. Das auf der Teststrecke verfügbare, 1,2 km lange Autobahnscenario (vgl. Abbildung 5.2) ist aufgrund der durchgängigen Fahrbahnmarkierungen, der konstanten Breite der Fahrstreifen und seiner geraden Beschaffenheit für die Erprobung geeignet. Für den Versuch werden keine infrastrukturellen Veränderungen vorgenommen. Zwei Begleitfahrzeuge mit instruierten Fahrern stellen in Abhängigkeit des Versuchsplans das Gelten der Einschaltbedingungen und das Einhalten geeigneter Umgebungsbedingungen (vgl. Abschnitt 4.2.2) für den prototypischen SPA sicher.

Der Fahrversuch setzt sich aus zwei Versuchsteilen zusammen: In einem ersten Schritt werden alle drei Bedienelemente durch den Expertenpool aus Forschung und Entwicklung bewertet. Jeder Experte erhält die Gelegenheit zur intensiven Erprobung der Bedienprinzipien und der drei Bedienelemente. Im Verlauf der jeweils ca. 25-minütigen Versuchsfahrten können die Teilnehmer in einer geführten Exploration intensiv mit den einzelnen Bedienkonzepten *alle verfügbaren* intra- und interstrukturellen Bedienhandlungen erleben und durchführen. Zur Vermeidung von Reihenfolgeeffekten wird die Abfolge der Bedienelemente zwischen den Experten variiert. Im Anschluss an jede Fahrt werden die Teilnehmer im Rahmen eines freien Interviews gebeten, die drei Elemente durch Bildung einer Rangreihenfolge auf Basis ihres ergonomischen Gesamteindrucks miteinander zu vergleichen. Die Gesamtdauer der Expertenevaluation beträgt etwa 90 Minuten. Anhand der gewonnenen Rangreihenfolge wird für den nachgelagerten Probandenversuch das Bedienelement mit dem geringsten ergonomischen Potential ausgeschlossen.

Der Probandenversuch stellt den Hauptteil der Fahrstudie dar. Die Teilnehmer erproben in variierender Abfolge die beiden aus Expertensicht vielversprechendsten Bedienelemente. Implizit erfolgt durch die Erprobung der beiden Elemente ein Kennenlernen des applizierten Bedienkonzepts zur Transition zwischen den drei für den Versuch umgesetzten Modi des Spektrums (MF, TA und VA). Zudem erlernen die Teilnehmer die Bedienung der Modi TA und VA. Die Erprobungsdauer für ein Bedienelement beträgt etwa 30 Minuten. Ein minutiöser Ablaufplan des Versuchs findet sich in [78].

Zur Erläuterung der Versuchsinhalte wird den Pbn vor Beginn des Versuchs die Coverstory ausgehändigt. Die Unterlage findet sich im Anhang B dieser Arbeit. Das primäre Versuchsziel der Fahrstudie wird im Rahmen dieser Untersuchung weitgehend offen kommuniziert. Die Probanden werden darüber aufgeklärt, an einer Evaluierung verschiedener Bedienelemente zur Interaktion mit den Systemen ACC und SPA teilzunehmen. Die Funktionalität des SPA wird auf Basis der Systemgrenzen des den Pbn bekannten STA der vorgelagerten Potentialtrigger-Studie beschrieben.

Im Anschluss an die theoretische Einführung in die Inhalte des Versuchs, nehmen die Pbn im Fahrzeug Platz. Die Teilnehmer werden aufgefordert, die ergonomische Einstellung des Fahrer Arbeitsplatzes

(Einstellung von Lenkrad, Fahrersitz, Innen- und Außenspiegel) auf ihre subjektiven Präferenzen vorzunehmen. Der Versuchsleiter erläutert im Anschluss die Art der Gangwahl durch das SbW-Tastenfeld. Außerdem erhält der Versuchsteilnehmer die Gelegenheit, das verbaute Bedienelement innerhalb eines Präsentationsmodus kennenzulernen. Die Übergänge und die Interaktionsmöglichkeiten der einzelnen Stufen werden vom Versuchsleiter erläutert, zudem erhalten die Teilnehmer die Möglichkeit zur Standerprobung der Elemente und ihrer Freiheitsgrade. Der Versuchsleiter rekapituliert die Abläufe des ACC und erläutert die Funktionsweise des SPA. Zur Sensibilisierung erfolgt ein expliziter Hinweis auf das potentielle Auftreten von Systemfehlern und auf die Verantwortlichkeit des Fahrers bei unplausiblen Verhalten der FAS.

Um die Probanden intensiv mit den Bedienelementen, ihren Freiheitsgraden und den bedienten FAS vertraut zu machen, werden während der Versuchsfahrt alle geforderten Bedienhandlungen mehrfach ausgeführt. Der detaillierte Ablauf der Versuchsfahrten findet sich in [78]. Zusammenfassend gliedert sich die Fahrt in einen ACC- und einen SPA-Teil.

Die Interaktion mit dem ACC-System erfolgt auf unterschiedlichen Geschwindigkeitsniveaus im Bereich von 20-80 km/h. Während der Fahrt mit dem ACC werden die Teilnehmer durch verschiedene Bedienhandlungen zur Interaktion mit dem ACC-System und dem Fahrzeug aufgefordert. Die Aufforderungen folgen einem im Vorfeld festgelegten Muster, das einen Durchlauf aller möglichen Nutzerinteraktionen mit dem ACC sicherstellt. Der Nutzer wird im *Free* und im *Follow Mode* mehrfach zur Aktivierung des Systems durch die SET- und die RESUME-Funktionalität aufgefordert. Die Deaktivierung erfolgt wahlweise über die CANCEL-Funktionalität des Bedienelements oder durch eine Betätigung der Fahrzeugbremse. Zudem werden die Teilnehmer zur Manipulation von Sollzeitlücke und Setzgeschwindigkeit aufgefordert. Am Ende des ACC-Teils folgt das ACC einem langsamen Vorderfahrzeug ( $v=20$  km/h).

Ein zweites, auf dem benachbarten Fahrstreifen fahrendes Vorderfahrzeug stellt die Einschaltbedingungen des SPA sicher. Die Verfügbarkeit des Systems wird den Pbn in der Folge über eine Anzeige im Kombi-Display kommuniziert. Durch Betätigung von A+ triggern die Fahrer den Übergang in den Modus VA. Während des SPA-Teils der Untersuchung interagieren die Teilnehmer auf drei Geschwindigkeitsniveaus (20, 30 und 40 km/h) mit dem SPA. Dabei werden sie jeweils sechsmal aufgefordert, über die PMS den Versatz innerhalb des Fahrstreifens wechselseitig zu variieren. Anschließend werden die Pbn gebeten, sechs Wechselmanöver zwischen den Fahrstreifen zu triggern. Außerdem werden die möglichen Formen der Deaktivierung (CANCEL, Lenkbewegungen oder Betätigung von Brems- oder Gaspedal) durchlaufen. Einem Ausschalten des SPA folgt jeweils der hierarchische Reaktivierungszyklus über ein RESUME des ACC und einer Erhöhung des Automationsgrades durch die A+-Funktionalität. Zusätzlich wird analog zur Potentialtriggerstudie die Interaktion mit dem Potentialtrigger gefordert.

#### 5.2.2.4 Datenerhebung

Um die in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Versuchsziele zu erreichen, werden zur Evaluierung aller Fahrten *subjektive* Daten erhoben. Im Rahmen des zweiten Teils der Studie werden für die Fahrten mit den Pbn zusätzlich *objektive* Daten erhoben.

Für die Bewertung durch die Expertengruppe ist die subjektive Evaluierung der Konzepte ausschlaggebend. Die Daten werden nach den Fahrten mit den einzelnen Bedienelementen durch freie Interviews erhoben. Auf Basis der mündlichen Beurteilung der Konzepte wird abschließend eine Rangreihenfolge gebildet.

Die Probandenuntersuchung wird sowohl anhand subjektiver als auch objektiver Daten ausgewertet. Als objektive Kennwerte werden die Interaktionen des Fahrers mit den Bedienelementen aufgezeichnet. Im Nachgang zur Studie erfolgt ein Abgleich der von den Probanden durchgeführten mit den erwarteten Bedienhandlungen. Zusätzlich wird die Fehlerhäufigkeit bei der Bedienung des Potentialtriggers gemessen. Nach der Erprobung eines Bedienelements werden die Teilnehmer gebeten, das erlebte Element mittels eines subjektiven Fragebogens zu bewerten. Nach der Erprobung und der singulären Bewertung beider Elemente erfolgt ein direkter Abgleich in einem vergleichenden Fragebogen.

### 5.2.3 Ergebnisse

Die nachfolgenden Abschnitte detaillieren die Ergebnisse des Bedienelemente-Fahrversuchs. Analog zur Potentialtrigger-Studie kann aufgrund der Größe der Stichprobe des Fahrversuchs ( $N=36$ ) auf Basis des zentralen Grenzwerttheorems von einer Normalverteilung der Ergebnisse ausgegangen werden (vgl. [12]). Dies ermöglicht die Anwendung parametrischer Verfahren zur statistischen Auswertung der erfassten Daten (siehe Abschnitt 5.1.3).

Abschnitt 5.2.3.1 legt die Ergebnisse der subjektiven Bewertung dar. Dies umfasst das Ergebnis der Expertenevaluierung und die Bewertungen der Probandenuntersuchung. Hier werden die Aussagen der Teilnehmer zum Verständnis und zum Gefallen hinsichtlich der Struktur und der Ausgestaltung des Automationsspektrums und der untersuchten Modi betrachtet. Die Bewertungen der beiden untersuchten integrativen Bedienelemente für das Spektrum werden dargelegt.

Abschnitt 5.2.3.2 dokumentiert die Ergebnisse der objektiven Datenerhebung. Die Ergebnisse zeigen die Häufigkeit von Bedienfehlern bei der Interaktion der Pbn mit den Bedienelementen zur Bedienung der FAS und des Potentialtriggers auf.

#### 5.2.3.1 Subjektive Ergebnisse

Als Ergebnis der Expertenevaluierung werden für den Probandenversuch die Bedienelemente HBA und DDS betrachtet. In der abschließenden Beurteilung durch die Experten ergibt sich das in Tabelle 5.4 dargestellte Ergebnis. Die von den Experten vergebenen Platzierungen (1./2./3. Platz) werden mit einem 3-2-1-Punktesystem bewertet, das Ergebnis der Evaluierung ist in Tabelle 5.4 dargestellt. Eine Detaillierung der Ergebnisse findet sich zudem in [78].

Tabelle 5.4: Ergebnis der Expertenevaluierung

Element	DDS	Hebel	HBA
Punktzahl	24	16	20
<b>Rangreihe</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>2</b>

Als Ergebnis der Bewertung werden die Elemente DDS und HBA einer Bewertung im Rahmen der Probandenuntersuchung zugeführt. Die wesentlichen Gründe für das vergleichsweise schlechtere Abschneiden des Hebels ergeben sich im freien Interview mit den Experten. Zentrale Nachteile sind die Ausführung von A+ als Sensortaste und das resultierende, langsame Ansprechverhalten beim Moduswechsel. Zudem stören sich die Experten an den im Vergleich massiven, teils als unharmonisch empfundenen Eingriffen in die Gestaltung der Mittelkonsole. Die hohe Intuitivität und Praktikabilität des DDS

sowie die von allen Experten hervorgehobene, ästhetisch-anmutige Erscheinung der HBA sind positive Faktoren der Konkurrenten. Das als Vorteil des Hebels genannte positive Gefühl bei der Interaktion mit dem Hebel und die hinsichtlich der anthropometrischen Güte angenehme Bedienung der PMS reichen nicht aus, um das zugunsten des DDS und der HBA ausfallende Vergleichsergebnis zu beeinflussen. Die für die Untersuchungszwecke wesentlichen Antworten der Versuchsteilnehmer sind zusammenfassend in Anhang C aufgeführt. Fragen mit statistisch signifikanten Unterschieden werden in der Tabelle mit einem „\*“ gekennzeichnet, die relevanten Messgrößen werden *kursiv* dargestellt. Die Spezifikation der angewandten statistischen Methode erfolgt im Text.

**Struktur des Automationspektrums** Allgemein zeigen die Antworten der Teilnehmer ein *klares Verständnis* von Struktur und Systemgrenzen der einzelnen Modi des Spektrums auf (vgl. F2, F3 und F4). Zudem zeigt die subjektive Bewertung der hierarchischen bottom-up-Aufschaltung des SPA eine sehr *schnelle Gewöhnung* sowie eine *hohe Akzeptanz* an diese Struktur (F1). Im abschließenden Vergleichsfragebogen äußern 37.1% der Teilnehmer die Präferenz einer gleichberechtigten (bzw. unabhängigen) Aufschaltung des Modus VA, 62.9% präferieren die hierarchische Modusaufschaltung.

Die A+-Tasten zur Erhöhung des Automationsgrades werden für beide Elemente als *leicht auffindbar* eingestuft. Beim Element DDS wird die Taste im Vergleich mit dem Element HBA als signifikant leichter auffindbar bewertet (F7a,  $T(35)=-2.355$ ;  $p=0.024$ ). Insgesamt zeichnet sich ein hohes Verständnis der A+-Funktionalität ab (vgl. Anhang C, F7b).

Den interstrukturellen top-down-Übergang des Spektrums in den Stand-by-Zustand des Modus TA in Folge einer Deaktivierung des Modus VA empfinden die Teilnehmer als leicht *verständlich* und *sicher*. Tendenziell wird dieser Ablauf jedoch aus Sicht der Nutzer als *nicht zwingend notwendig* erachtet (F9). Insgesamt wird das Verhalten des Fahrzeugs nach einem Fahrereingriff als *klar* und *verständlich* eingestuft (F21). Die Bedienelemente unterstützen dieses Nutzerverständnis durch die Zeigerwirkung, diese wird als *leicht verständlich*, *hilfreich* und *einfach* bewertet (F6, vgl. Abbildung 5.9). Zwischen den Bedienelementen werden keine signifikanten Unterschiede gemessen. Die Ergebnisse der subjektiven Bewertung der interstrukturellen Moduswechsel ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Das Konzept HBA stellt ein Bedienelement ohne separater Darstellung des Modus MF dar. 16.7% der Teilnehmer wünschen sich eine explizite Darstellung des Modus MF analog dem Element DDS. Die Mehrheit der Pbn (83.3%) findet eine in *Form und Position veränderte Grundeinstellung* für den Modus MF als überflüssig und akzeptiert eine identische Darstellungsform der Modi MF und TA.

**Bewertung der Bedienung des Modus TA** Die Stellelemente für die Geschwindigkeitsänderung bei der Bedienung des ACC erscheinen den Nutzern für beide Elemente als *angemessen* und *praktisch*. Die Wahrnehmung der Pbn ist für DDS und HBA *positiv*. Sie bewerten das Drehrad des DDS im Vergleich mit dem Drehrädchen der HBA als signifikant angemessener (F12a,  $T(35)=-2.355$ ;  $p=0.024$ ). Zudem wird das umfassende Drehrad des DDS für die Geschwindigkeitsänderung beim ACC signifikant *positiver* bewertet als das integrierte Drehrädchen der HBA (F12c,  $T(35)=-2.205$ ;  $p=0.034$ , vgl. Abbildung 5.10). Diese Unterschiede werden durch den Trend gestützt, das große Drehrad als tendenziell *praktischer* einzustufen als das integrierte Drehrädchen (F12b). Hinsichtlich der Betätigungsart zur Einstellung des Wunschabstands werden keine signifikanten Unterschiede zwischen der longpush-Betätigung der HBA und der shortpush-Betätigung des DDS gemessen. Insgesamt ist die Wahrnehmung der umgesetzten Freiheitsgrade weiterhin positiv, die Verstellung erscheint als *angemessen* und *praktisch*. Die Reaktivierung des ACC über die Taste für die RESUME-Funktionalität wird von den Pbn insgesamt

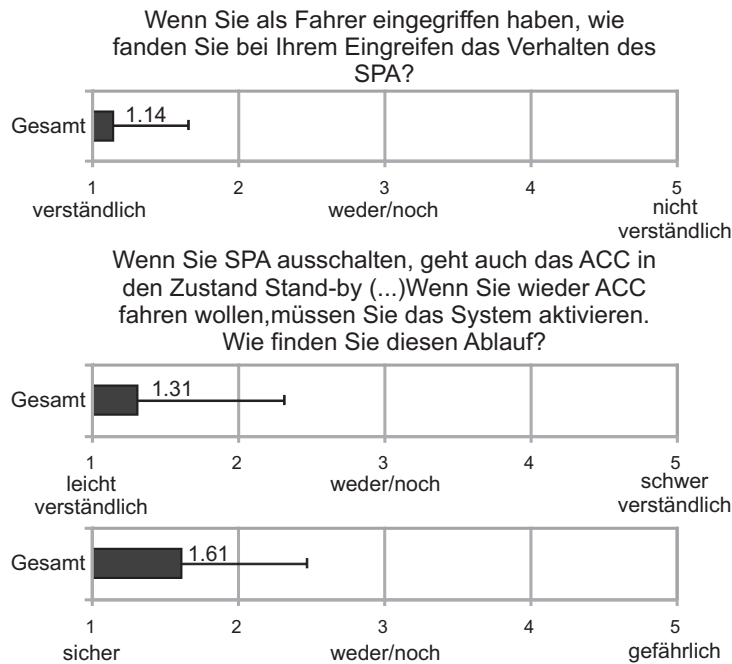


Abbildung 5.8: Subjektive Wahrnehmung der interstrukturellen Moduswechsel

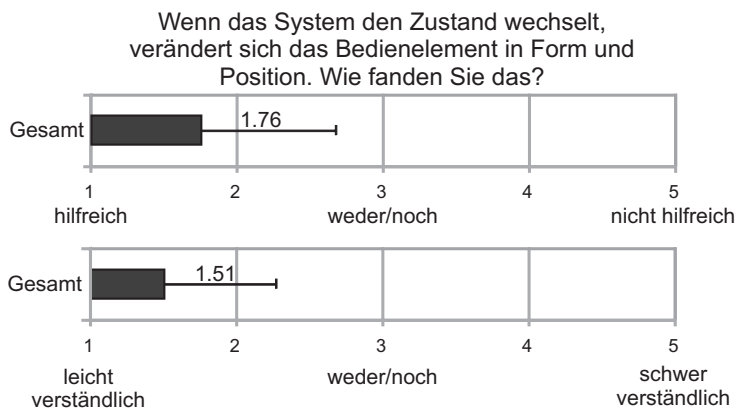


Abbildung 5.9: Subjektive Bewertung der Zeigerwirkung der Bedienelemente HBA und DDS

als *praktisch* empfunden. Die oben aufliegende Taste des Elements DDS wird als signifikant *praktischer* eingestuft als die in der Mittelkonsole positionierte Taste des Elements HBA ( $F(14b, T(35)) = -2.749$ ;  $p = 0.09$ ).

Für den DDS geben 83.3% der Pbn an, RESUME blind bedienen zu können. Für das Element HBA gehen 77.8% der Teilnehmer davon aus, die Taste ohne Blickabwendung betätigen zu können.

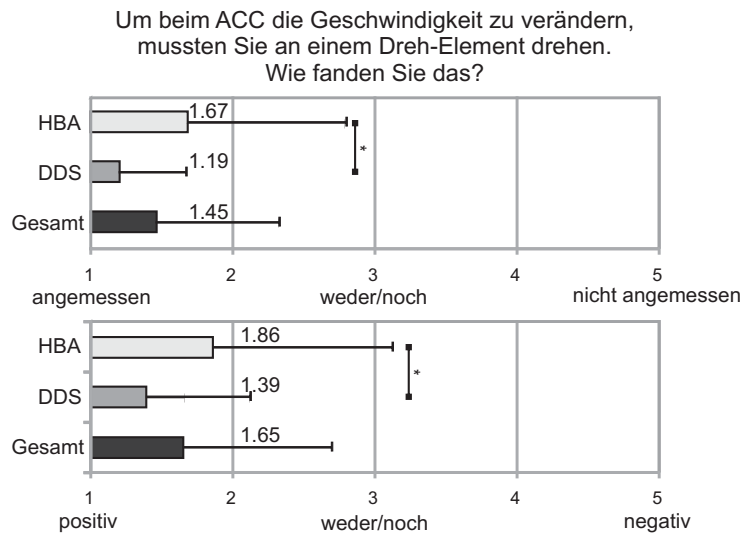


Abbildung 5.10: Subjektive Bewertung der unterschiedlichen Stellelemente zur Geschwindigkeitseinstellung des ACCs

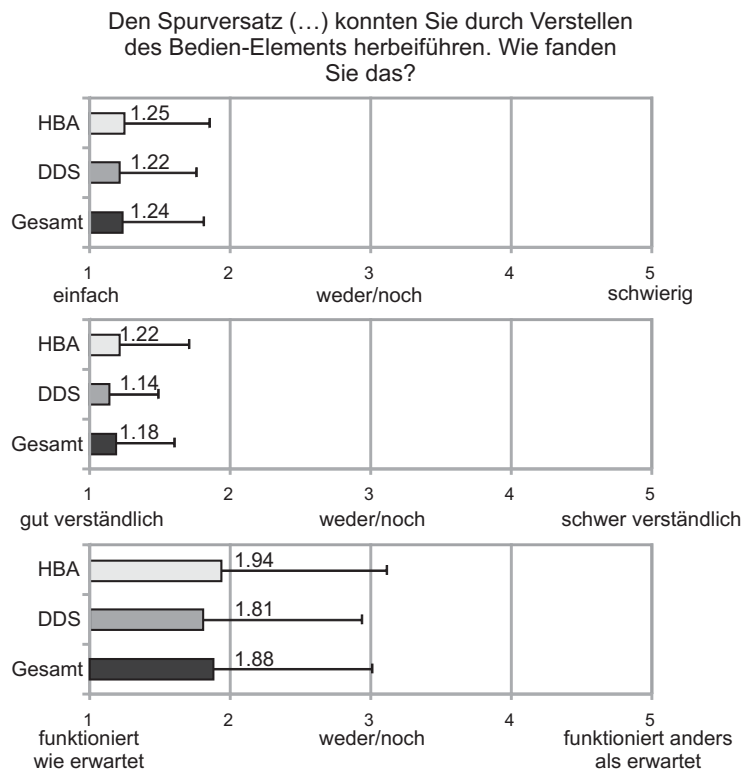


Abbildung 5.11: Subjektive Bewertung der Bedienhandlung zur Einstellung des Spurversatzes

**Bewertung der Bedienung des Modus VA** Die Krafrückmeldung beider Elemente wird tendenziell als *zu schwach* bewertet. Sie ist bei beiden Elementen *zu spüren* und *hilfreich*, gleichzeitig empfinden die Pbn die rückgemeldete Kraft als *verständlich* (F18abcd).



Die Einstellung eines Spurversatzes beim Betrieb des Modus VA empfinden die Teilnehmer mit beiden Elementen als *einfach* und *gut verständlich*. Das Fahrzeug verhält sich entsprechend der Bedieneingabe *erwartungsgemäß* (F19abc, vgl. Abbildung 5.11).

Das Setzen der Manövertrigger im Modus VA wird für beide Elemente ebenfalls sehr positiv bewertet: die Manövertrigger werden als *leicht zu erlernen*, *gut verständlich* und *einfach* eingestuft (F20abc, vgl. Abbildung 5.12).

Die Teilnehmer nehmen beim Übergang vom Modus TA in den Modus VA keine Abnahme der Komplexität der Anzeige und des Bedienelements wahr (F22, F23). Die Veränderungen werden nahezu neutral bewertet. Beide Elemente sind gut von den übrigen auf der Mittelkonsole befindlichen Bedienelementen unterscheidbar. Auch hier werden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Elementen gemessen (F16).

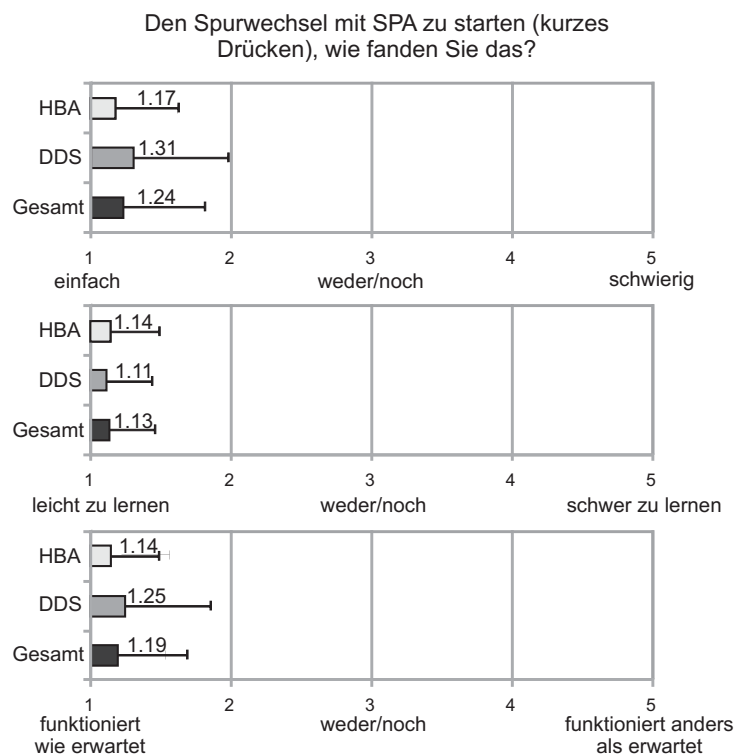


Abbildung 5.12: Subjektive Bewertung der Bedienung von Wechselmanövern

**Bewertung der Anzeige** Die zur Kommunikation der aktuell aktiven Automatisierungsstufe implementierte „Perlenkette“ wird neutral bewertet. Hinsichtlich der Verständlichkeit und der Unterstützung der Wahrnehmung der verschiedenen Automationsgrade fühlen sich die Pbn in ihrer intuitiven Wahrnehmung weder unterstützt noch gehindert (F8abc).

Eine sehr große Mehrheit der Teilnehmer bestätigt einen intuitiv verständlichen Zusammenhang zwischen der umgesetzten Anzeige und dem erprobten Bedienelement für den Regelbereich des FAS im Modus VA: beim Element DDS sind 97.2%, bei der HBA 94.4% der Ansicht, dass der Zusammenhang

„gut passt“. Über alle Modi ist eine hohe Verständlichkeit des Zusammenhangs zwischen Anzeige und Bedienelement gegeben (F11). Im Fragebogen werden den Teilnehmern neben der Umschreibung der Master-Slave-PMS zwei weitere, ähnliche Modellvorstellungen für das erlebte Bedienkonzept zur Auswahl gestellt. Finden die Teilnehmer ihre Vorstellung der erlebten Schnittstelle in diesen drei Modellen nicht wieder, können sie eigene Vorschläge formulieren (siehe Anhang A).

Als Ergebnis dieser Fragestellung zeigt sich, dass keines der Elemente in der Lage ist, allen Pbn das Master-Slave-Prinzip der PMS als inneres Modell zu suggerieren. Beim Element DDS erkennen 33.3% der Teilnehmer die PMS Modellvorstellung im erlebten Bedienkonzept wieder. 16.7% sind der Meinung, das Stickelement entspricht einem Hebel zum Schieben, bei dem die Krafrückmeldung die Leistungsgrenzen des Fahrzeugs widerspiegeln. 36.1% der Teilnehmer assoziieren das Stickelement des Modus VA mit einem Joystick zur Steuerung eines Computerspiels. 13.9% formulieren abweichende, divergierende Modellvorstellungen der Schnittstelle. Beim Konzept HBA assoziieren die meisten Teilnehmer (38.9%) das Element mit dem inneren Modell der Master-Slave-PMS. 22.2% fühlen sich an den suggerierten Schiebehebel erinnert. 25% verbinden die HBA mit dem Joystick für die Steuerung eines Computerspiels; 13.9% formulieren eigene, divergierende Modellvorstellungen der erlebten Schnittstelle. Abbildung 5.13 illustriert die Ergebnisse.

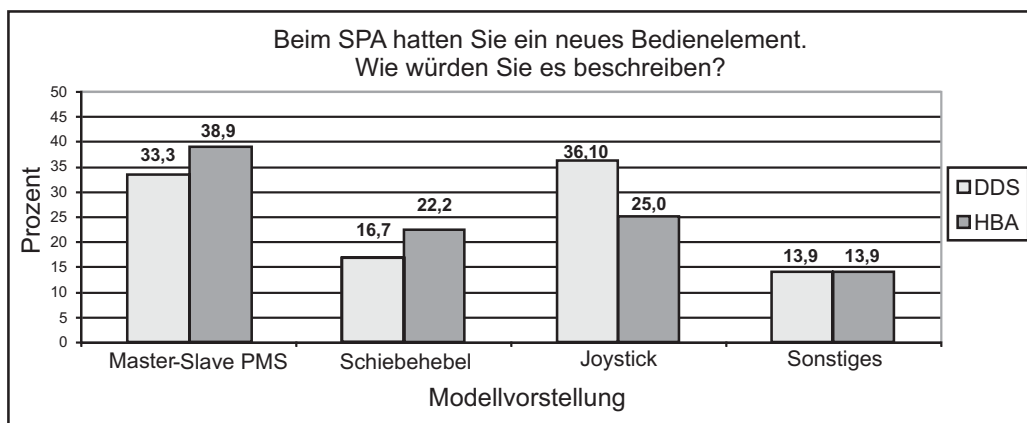


Abbildung 5.13: Subjektiv erlebtes inneres Modell des Modus VA

**Direkter Vergleich** Ein Teilnehmer versäumt es, den vergleichenden Fragebogen (siehe Anhang B) auszufüllen, die nachfolgenden Aussagen beziehen sich daher auf eine Stichprobe von 35 Pbn.

Zur Bedienung des ACC bevorzugen 62.9% den DDS, 37.1% entscheiden sich für die HBA (vgl. Frage 24).

Für die Interaktion mit dem vollautomatisierten SPA ziehen 54.3% den DDS vor, 45.7% bevorzugen das Konzept HBA (vgl. Frage 25).

Die abschließende Frage nach einer finalen Präferenz beantworten 57.6% zugunsten des DDS. 42.4% entscheiden sich für das Element HBA. Zwei Teilnehmer können sich nicht zwischen den beiden Konzepten entscheiden und gehen nicht in die Wertung ein (vgl. Frage 30, N=33). Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.14 dargestellt.

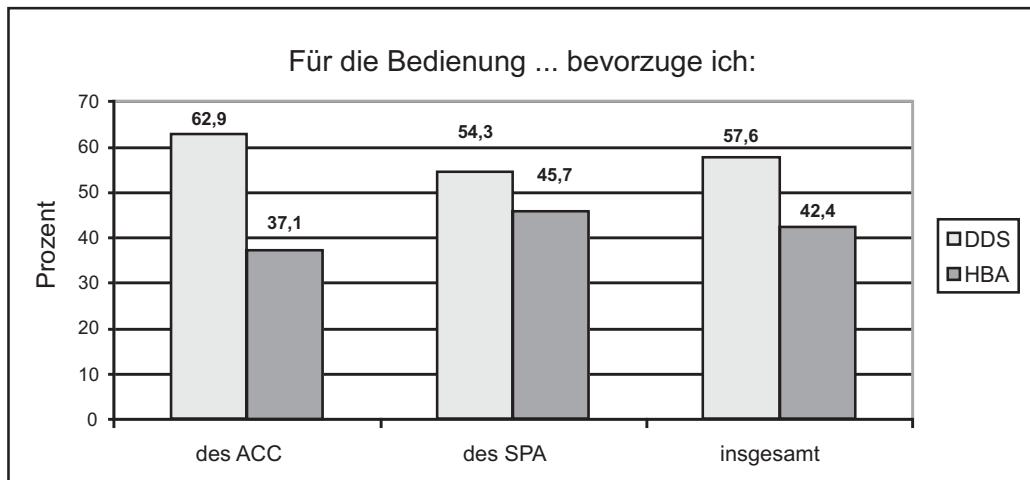


Abbildung 5.14: Subjektive Evaluierung der Bedienung im vergleichenden Fragebogen, Fragen 24, 25 (N=35) und 30 (N=33)

### 5.2.3.2 Objektive Ergebnisse

Die folgenden Abschnitte zeigen die objektiven Ergebnisse der Bedienelement-Studie. Als zentrale Daten werden die fehlerhaften Eingaben der Versuchsteilnehmer bei der Interaktion mit dem ACC und dem SPA betrachtet. Die Daten zum SPA untergliedern sich in Bedienfehler bei der Interaktion mit der vollautomatisierten FAS-Funktion und Bedienfehler bei der Interaktion mit dem Potentialtriggerkonzept.

**Fehlbedienungen Modus TA** Fehler bei der Bedienung des ACC-Systems sind:

- unbeabsichtigte bzw. unaufgeforderte (De-)Aktivierungen
- Distanzeinstellung
  - Manipulation entgegen der geforderten Richtung
  - zu kurze/zu lange Betätigung
  - gleichzeitige Manipulation der Setzgeschwindigkeit
- Geschwindigkeitseinstellung entgegen der geforderten Richtung

Unaufgeforderte (De-)Aktivierungen durch Eingaben am Bedienelement oder durch die Betätigung des Bremspedals werden in der Folge vernachlässigt. Über alle ACC-Fahrten hinweg tritt diese Fehlbedienung bei jedem Bedienelement lediglich einmal auf.

Wie in Tabelle 5.5 aufgeführt, wird für beide Bedienelemente bei der Distanzeinstellung ein vernachlässigbares Fehlerniveau gemessen. Die Unterschiede zwischen dem Element HBA und dem Element DDS sind statistisch nicht signifikant.

Bei der Manipulation der Setzgeschwindigkeit des ACC-Systems mit dem Element HBA wird ein ausgesprochen niedriges Fehlbetätigungs-niveau beobachtet (vgl. Tabelle 5.5), beim Element DDS treten *keine* Bedienfehler auf. Auch hier ist die Differenz der Fehlerhäufigkeit der beiden Bedienelemente nicht signifikant.

Tabelle 5.5: Fehlerhäufigkeiten bei der Bedienung der Modi TA und VA

Modus	Bedienaufgabe	DDS		HBA	
		Mittelwert	Stabw	Mittelwert	Stabw
TA	Distanzeinstellung	0.17	0.39	0.12	0.33
	Geschwindigkeitseinstellung	0	0	0.02	0.14
VA	Spurversatz	0.03	0.18	0.02	0.14
	Wechseltrigger*	0.10	0.45	0.05	0.26
	Potentialtrigger	0.01	0.02	0.02	0.06

**Fehlbedienungen Modus VA** Fehler bei der Bedienung des SPA sind:

- Herstellen eines Versatzes innerhalb des Fahrstreifens
  - zu kurze Betätigung zur Herstellung eines Versatzes
  - unbeabsichtigte Manövertrigger
- Manövertrigger
  - Stellelement wird nicht weit genug ausgelenkt
  - zu lange Betätigung des Stellelements

Insgesamt ist auch bei der Bedienung des SPA ein sehr niedriges Fehlerniveau zu beobachten. Die Ergebnisse für die Fehlbedienungen des Modus VA mit dem Element DDS und dem Element HBA sind in Tabelle 5.5 aufgeführt. Der Unterschied zwischen den Bedienelementen hinsichtlich der Fehlerhäufigkeiten bei der Herstellung des Versatzes ist nicht signifikant (vgl. Abbildung 5.15).

Die Fehlerhäufigkeit beim Triggern eines Spurwechsels bewegt sich sowohl für das Element DDS als auch für die HBA im Vergleich mit der Bedienung des Versatzes auf höherem Niveau. Der Unterschied zwischen den Bedienelementen HBA und DDS ist signifikant, beim Triggern des Wechsels mit dem Element DDS treten signifikant mehr Bedienfehler auf als beim Triggern mit dem Element HBA ( $T(35)=-2,185$ ;  $p=0.036$ , vgl. Abbildung 5.15). Die Berechnung der Fehlerhäufigkeit bei der Bedienung des Potentialtriggers erfolgt analog der vorgelagerten Studie nach Gleichung 5.1. Insgesamt wird zwischen den beiden Elementen kein signifikanter Unterschied gemessen: Wie in Tabelle 5.5 dargestellt, bewegt sich die Fehlerhäufigkeit auf einem sehr niedrigen Niveau. Die ermittelten Werte für die Bedienung des Modus VA sind zusätzlich zur tabellarischen Darstellung in Tabelle 5.5 in Abbildung 5.15 illustriert.

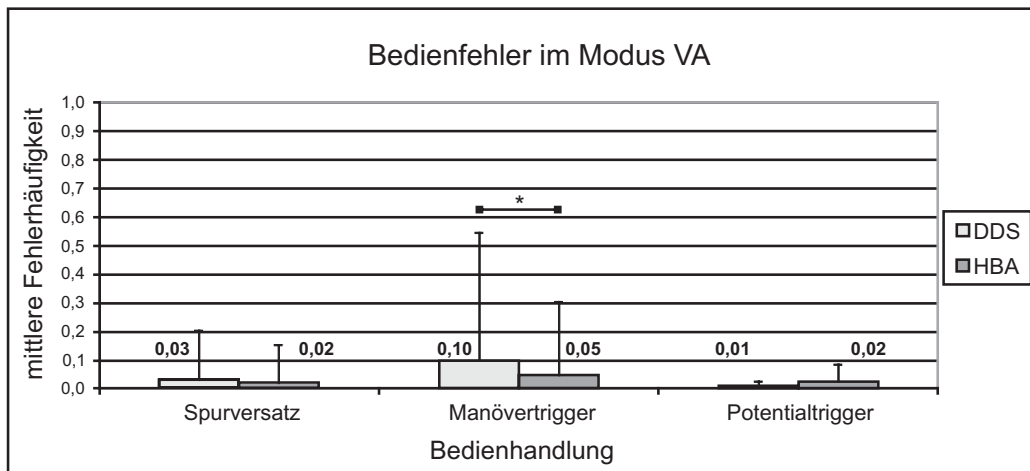


Abbildung 5.15: Mittlere Fehlerhäufigkeiten bei der Interaktion mit dem Modus VA

## 5.2.4 Diskussion

Die subjektiven und objektiven Untersuchungsergebnisse lassen diverse Schlussfolgerungen zu den festgelegten Untersuchungsschwerpunkten zu. Aufgrund der in ihrer Gesamtheit ausgesprochen positiven Beurteilungen der Versuchsteilnehmer sowie des insgesamt niedrigen Fehlbedienungslevels wird zu den untersuchten Konzepten ein durchwegs positives Fazit gezogen.

### 5.2.4.1 Interstrukturelle Interaktion

Das subjektiv geäußerte, klare Verständnis der Struktur des Automationsspektrums deckt sich mit dem niedrigen Fehlerniveau bei der interstrukturellen Navigation innerhalb des Spektrums: Die hierarchische bottom-up-Aktivierung des Modus VA wird einerseits von den Pbn verstanden und akzeptiert, andererseits treten bei der Nutzung von A+ keine Fehler auf. Auffallend ist der signifikante Unterschied zwischen den Elementen in Bezug auf die Auffindbarkeit der Taste A+. Die oben liegende A+-Taste des Elements DDS ist im Vergleich mit der HBA leichter auffindbar.

Eine Mehrheit der Probanden präferiert zudem selbst bei der Möglichkeit zur freien Auswahl eine *hierarchische* Modusaufschaltung. Die alternative, unabhängige Modusaufschaltung steht den Pbn aufgrund des Studiendesigns jedoch nicht als praktisches Anwendungsbeispiel zur Verfügung. Dies kann ein Faktor der positiven Bewertung der hierarchischen Struktur sein. Es wird angenommen, dass das geringe Fehlerniveau bei der bottom-up-Transition zum Teil auf der theoretischen und praktischen Einführung in die Bedienung durch den Versuchsleiter gründet. Jedoch wird an dieser Stelle auch die Intuitivität und das Potential der umgesetzten A+-Funktionalität deutlich. Für das Element HBA besteht eine Möglichkeit zur Verbesserung der A+-Funktionalität in der Untersuchung der alternativen, ursprünglich geplanten Umsetzung von A+ durch eine nutzerinitiierte, servounterstützte Rotation des Grundkörpers.

Die top-down-Transition aus dem Modus VA in den Stand-by des Modus TA wird von den Teilnehmern ebenfalls verstanden und akzeptiert. Durch die Aussage der Pbn, diesen Übergang nicht als zwingend

notwendig zu erachten, kann eine abweichende Erwartungshaltung der Fahrer abgeleitet werden. Die Teilnehmer fühlen sich jedoch durch den plötzlichen, vollständigen Wegfall der automatisierten Fahrzeugführung keineswegs unsicher. Dies lässt auf ein klares Verständnis der Struktur, der Systemgrenzen und des Verhaltens des Automationsspektrums schließen. Dieses Verständnis wird auf die klare und einheitliche seriell-sequentielle Wirkstruktur des SPA-Gesamtsystems zurückgeführt.

Das Element HBA wird ohne separate Darstellung des Modus MF erprobt, während dieser Modus beim DDS dargestellt wird. Eine große Mehrheit der Teilnehmer erachtet die separate Darstellung des Modus MF über das Bedienelement als überflüssig. Für zukünftige Entwicklungen ist daher denkbar, Bedienelemente für dieses Automationsspektrum analog dem Element HBA *ohne* expliziter Darstellung des Modus MF umzusetzen. Vorstellbar ist auch, den Modus MF nicht als Einstiegsmodus zu implementieren, sondern beim Starten des Fahrzeugs direkt in den Stand-by des Modus TA einzusteigen. Hier erhält der Nutzer dann die Möglichkeit zur einer Transition innerhalb des Automationsspektrums nach oben in den Modus VA oder nach unten in den Modus MF.

Die Zeigerwirkung zur Unterstützung der Mode Awareness der Fahrer ist bei den Elementen DDS und HBA gegeben, kann jedoch weiter verbessert werden. Für das Element Hebel ist dieser Aspekt subjektiv nicht ausreichend bewertet. Eine massive Reduzierung der Komplexität der Elemente beim Übergang des Modus TA in den Modus VA ist für die Nutzer nicht gegeben.

Der Zusammenhang zwischen den Bedienelementen und der Anzeige ist für die Pbn nachvollziehbar, die Darstellung des aktuell aktiven Automationsmodus über die implementierte Perlenkette ist jedoch nicht auf Anhieb nachzuempfinden. Ebenso beobachten die Teilnehmer keine Reduzierung der Komplexität der Anzeige beim Moduswechsel TA/VA.

Damit ist das Ziel erreicht, die Anzeige als komplementäres Element des Bedienkonzepts und der Kommunikation der Prinzipien des Master-Slave-Ansatzes umzusetzen. Für die Anzeige des aktiven Automationsmodus muss nach Alternativen zum gewählten Konzept *Perlenkette* gesucht werden. Eine Möglichkeit besteht darin, auf die Intuitivität der Zeigerwirkung der Elemente zu vertrauen und auf eine zusätzliche Modus-Anzeige zu verzichten. Alternativ kann die Lösung diskutiert werden, die Modi durch markantere Farbgebung zu kennzeichnen.

#### 5.2.4.2 Intrastrukturelle Interaktion

Ein weiteres Gütekriterium der entwickelten Bedienkonzepte besteht in der intrastrukturellen Interaktion mit den Modi des Automationsspektrums. Die Pbn erhalten vor der Fahrt eine theoretische und praktische Einführung in die Modus-abhängigen Freiheitsgrade und die Bedienmöglichkeiten der Elemente.

**Bedienung des Modus TA** Der Modus TA repräsentiert in diesem Zusammenhang einen Sonderfall, da für die Bedienung des Trägersystems ACC S&G Bedienkonzepte mit hohem Entwicklungsreifegrad existieren. Aufgrund der durchgeführten Homogenisierungsfahrten mit *allen* Teilnehmern des Versuchs liegt innerhalb der Stichprobe ein vergleichbares Erfahrungsniveau hinsichtlich der ACC-Funktionalität und der Funktionsbedienung mithilfe eines ACC-Lenkstockhebels vor.

In der Probandenstudie wird ein sehr geringes Fehlbedienungslevel bei der Bedienung des Modus TA beobachtet. Lediglich die Distanzeinstellung bietet hier mit einer vergleichsweise erhöhten Anzahl fehlerhafter Eingaben Verbesserungspotential. Die Verstellung mit dem Element DDS durch eine monosta-

bile shortpush-Betätigung kann auf Basis der beobachteten Fehler und der Kommentare vieler Pbn durch ein verbessertes haptisches Feedback und der mechanischen Vorbeugung von unbeabsichtigter Verstellung der Setzgeschwindigkeit bei der Distanzverstellung erfolgen. Ein Lösungsansatz für dieses Problem kann in einer konzertierten Verlängerung des Verstellweges und dem Absenken der Gegenkraft bei der Distanzverstellung bestehen.

Die Elemente zur Verstellung der Setzgeschwindigkeit werden bei beiden Bedienteilen sehr positiv aufgenommen. Das große, umfassende Drehrad des DDS erfährt auf einem ohnehin hohem Niveau signifikant größeren Zuspruch als das kleinere, in den Grundkörper integrierte Drehrädchen der HBA. Dies kann einerseits auf die bessere Sichtbarkeit und Tastbarkeit des DDS-Drehrades zurückgeführt werden. Zudem empfinden die Pbn das große Drehelement der unterlagerten Funktion als signifikant angemessener, d.h. für die zentrale und wichtige Funktion der Geschwindigkeitsverstellung bevorzugen die Probanden ein großes und prominentes Stellelement.

**Bedienung des Modus VA** Die durchgängig geringen Fehlerhäufigkeiten bei der Bedienung des Modus VA, die hohe Verständlichkeit und Klarheit der zur Darstellung der PMS gewählten Anzeigen sowie die durchwegs positiven Bewertungen der Betätigung der Parametrierung und der Wechselmanöver zeigen das große Potential der umgesetzten PMS.

Die auf der Gegenseite gemischt verteilten Antworten auf die Frage nach den durch die Stellelemente transportierten, die Schnittstelle beschreibenden inneren Modellen lässt auf eingeschränktes Verständnis der Nutzer der Master-Slave-PMS schließen. Positiv anzumerken ist, dass ein bemerkenswerter Teil der Pbn in beiden Elementen die Grundzüge des Master-Slave-Prinzips erkennt. Diese bestehen in einer Repräsentation des Fahrzeug-Slaves durch einen miniaturisierten Master als Stellelement und die Projektion der Systemgrenzen des Trägersystems des Modus VA als haptische Barrieren auf das Bedienelement. Jedoch verbindet eine gewisse Zahl der Teilnehmer das Erlebte mit einer anderen der drei suggerierten Modellvorstellungen. Für den DDS ist die Modellvorstellung des Computer-„Joysticks“ nachvollziehbar, da das Stick-Element des Modus VA in der Tat der im Fragebogen vorgeschlagenen Form entspricht. Dass jedoch die haptischen Rückmeldungen an den Stellelementen die „Leistungsgrenzen des Fahrzeugs“ wiedergeben (Schiebehebel) oder die Schnelligkeit der Betätigung Einfluss auf die Geschwindigkeit der resultierenden Fahrzeugbewegung (Joystick) haben, erscheint aufgrund der Funktionsweise des prototypischen SPA widersprüchlich: der Prototyp führt die Positionsparametrierung und die Wechselmanöver mit konstantem Parametersatz aus.

Eine mögliche Ursache für die heterogenen Antworten der Teilnehmer wird in der Art der Fragestellung vermutet, die unter Umständen ungewollt einen Fokus auf den Vergleich *der Gestalt* des Elements legt und die Umschreibung des Regelverhaltens hintenanstellt.

Eine andere Ursache kann in der funktional und technisch limitierten Gestalt der PMS liegen: zum einen ist das Erleben der Schnittstelle eingeschränkt *nur* in Querrichtung möglich. Zum anderen empfinden die Pbn die am Bedienelement anliegenden Kräfte als *zu schwach*. Dies schränkt die Wahrnehmung der haptischen Repräsentation der Regelgrenzen als wesentliches Charakteristikum der PMS ebenfalls ein. Ein weiteres Szenario muss den gewählten Master-Slave-Ansatz der PMS aufgrund des nur teilweise vorhandenen Nutzerverständnisses in Frage stellen. Aufgrund der problemlosen Bedienung der PMS und den hohen Akzeptanzwerten der gewählten Interaktionsformen wird diese Möglichkeit jedoch als unwahrscheinlich erachtet.

Bei der Bedienung des Modus VA wird für das Element DDS auf einem niedrigen Niveau eine signifikant größere Fehlerhäufigkeit beim Setzen des Triggers des Wechselmanövers festgestellt. Gleichzeitig

fällt die subjektive Beurteilung der Interaktion sehr positiv aus. Die objektiv detektierten fehlerhaften Eingaben verringern nicht die subjektive Akzeptanz der Nutzer. Die Ursache für das Ausbleiben des Effekts auf die subjektiven Bewertungen kann im insgesamt sehr niedrigen Fehlbedienungslevel liegen. Eine alternative Erklärung liegt in der Intuitivität des Zusammenhangs zwischen dem inneren Modell und dem Bedienelement. Dieser kann unter Umständen für das Element HBA stärker ausgeprägt sein, was für die Pbn zu einer niedrigeren Fehlerhäufigkeit bei der Bedienung mit dem Element HBA führt. Eine Maßnahme zur Verminderung der fehlerhaften Eingaben kann in einer aus mechanischer Sicht klareren Darstellung der haptischen Rückmeldung am DDS sein. Damit ist es für die Nutzer leichter, die „Fahrbahnmarkierung“ zu ertasten und zwischen einem Manövertrigger und einer Parametrierung zu unterscheiden. Mechanische Verbesserungsmaßnahmen versprechen für beide Elemente eine geringere Zahl an fehlerhaften Betätigungen.

Ansonsten werden in Bezug auf die Bedienung des Modus VA keine signifikanten Unterschiede zwischen den Elementen DDS und HBA gemessen.

Zusammenfassend wird eine ausgesprochen positive Wahrnehmung und ein niedriges Fehlerniveau bei der Interaktion mit der PMS beobachtet. Dem entgegen steht die nicht vollumfänglich ausgeprägte Fähigkeit zur Kommunikation des hinterlegten inneren Modells. Daraus wird das große Potential der entwickelten Master-Slave-PMS zur Bedienung vollautomatisierter Fahrerassistenzmodi gefolgert. Zum anderen wird die Notwendigkeit zur technischen Weiterentwicklung der Elemente abgeleitet: einerseits bieten die Prototypen der Bedienelemente verschiedene Ansatzpunkte zur verbesserten Krafrückmeldung der PMS. Andererseits muss die funktionale Kompetenz des SPA-Prototypen um die x-Dimension erweitert werden. Ein Erleben des Modus VA in allen verfügbaren Dimensionen kann das implizite wie explizite Nutzerverständnis zusätzlich erhöhen.

Im Vergleich zur Potentialtrigger-Studie wird in diesem Fahrversuch ein weitaus niedrigeres Fehlbedienungslevel bei der Interaktion mit dem Potentialtrigger beobachtet. Die Randbedingungen beider Studien unterscheiden sich natürlich in wesentlichen Gesichtspunkten: die Testfahrten zur Evaluierung der Bedienelemente finden auf einem höheren Geschwindigkeitslevel statt, die Probanden werden während der Versuchsfahrten *nicht* mit Nebentätigkeiten abgelenkt. Zudem sind *alle* Pbn mit dem Prinzip des Potentialtrigger-Interaktionskonzepts aus dem vorhergehenden Versuch vertraut. Die Mechanismen der vollautomatisierten Fahrt sind ebenfalls bekannt, jedoch verfügt der SPA im Vergleich zum STA über weitreichendere funktionale Kompetenzen. Eine Vergleichbarkeit beider Studien ist aus diesen Gründen nur stark eingeschränkt gegeben.

Zum einen ist natürlich die geringe Anzahl an Fehlbedienungen sehr positiv zu bewerten. Die funktionale Tragfähigkeit und die Nutzerakzeptanz auf Basis der vorhergehenden Studie vorausgesetzt, wird die Umsetzbarkeit des Interaktionskonzepts damit erneut bestätigt. Die geringere Fehlerhäufigkeit im Vergleich zur Potentialtrigger-Studie kann verschiedene Ursachen haben:

Wie im Potentialtriggerversuch beobachtet, hat die Dynamik der vollautomatisierten Fahrt einen starken Einfluss auf das Aufmerksamkeitsverhalten der Pbn. Das höhere Geschwindigkeitslevel in Verbindung mit den fahrerinitiierten, aber vollautomatisierten Querführungsmanövern heben erfahrungsgemäß das Aufmerksamkeitslevel der Fahrer. Die Fahrer kommen ihrer Überwachungstätigkeit mit Fokus auf ihre visuelle Überwachungsaufgabe nach und haben auf diese Weise die Potentialtriggeranzeige und die resultierenden Triggeraufforderungen häufiger im Blick. Ein anderer Erklärungsansatz kann in der Lernkurve der Teilnehmer liegen. Aufgrund ihrer Vorerfahrung mit dem Konzept sind sie in der Lage, das System mit vergleichsweise wenigen Fehlern zu bedienen.

Zur Bestätigung der erkennbaren, positiven Tendenz hinsichtlich der Fehlerhäufigkeit der Bedienung muss in einem nachfolgenden Schritt das Potentialtriggerkonzept unter realitätsnahen Einsatzbedingun-



gen untersucht werden. Analog der ersten Studie zum Konzept müssen hierbei Ablenkungen der Fahrer mit in Betracht gezogen und Übernahme-situationen untersucht werden.

### 5.2.4.3 Integrative Bedienkonzepte *Hebel, DDS und HBA*

Die Bewertungen der drei integrativen Bedienkonzepte Hebel, DDS und HBA zeigen den Weg für weitere Entwicklungsschritte auf.

Die Expertenevaluierung des Hebels weist auf das hohe Potential und die Probleme der Lösung hin. Als singuläres Element zur Bedienung des Automationsspektrums wird der Hebel durchaus positiv bewertet. Die Nachteile der Ausführung eines integrativen Stellelements als Hebel werden primär bei der gesamtlichen Betrachtung des Packages der Mittelkonsole deutlich. Das massive Stellteil muss zentral und für die betrachtete Nutzerpopulation erreichbar in die Mittelkonsole integriert werden. Zudem erfolgt konzeptbedingt die Differenzierung der Modi (primär) über die Variation der Position des Stellelements. Damit befindet sich das Element zwar in einer für die Modi aus anthropometrischer Sicht optimalen Position, die umgesetzten Verstellwege verursachen jedoch einen nicht zu vernachlässigenden Bedarf an Bauraum. Dieser schränkt einerseits die Ästhetik der gesamten Konsole ein, andererseits werden die Freiheitsgrade anderer Elemente in der Mittelkonsole (Gangwahlhebel, MMI Bedienung etc.) stark eingeschränkt.

Aufgrund der in der Mittelkonsole versenkten Position des Modus MF (und des Modus AUTON) ergibt sich für das integrative Konzept Hebel zudem der Zwang, die Taste A+ - wie in der technischen Umsetzung gezeigt - zur Vermeidung des Einklemmens der Finger über eine longpush-Betätigung auf der Oberseite auszuführen. Die OFF-Taste muss aus identischem Grund ausgelagert werden, ein unerwünschter Nebenaspekt bei der Entwicklung eines *integrativen* Stellelements. Die Schwachstellen des Hebels liegen folglich in konzeptionellen Details, die ihre Ursache - zwar nicht ausschließlich, aber auch - in der Struktur des bedienten Automationsspektrums haben. Für zukünftige Entwicklungen sollte daher die Ausführung eines integrativen Stellelements als Hebel unter Berücksichtigung der konzeptionellen Rahmenbedingungen nicht ausgeschlossen werden.

Insgesamt werden die beiden verbleibenden integrativen Bedienelemente DDS und HBA von den Teilnehmern der Expertenstudie und den Teilnehmern des Fahrversuchs ausgesprochen positiv bewertet. Beide Elemente kommunizieren durch die Änderung ihrer Form und Position den momentan aktiven Modus auf hilfreiche und verständliche Weise.

Auf Basis der direkten Vergleiche im abschließenden Fragebogen und der Analyse der auftretenden Bedienfehler geht für die Bedienung des Modus TA das Element DDS als Gewinner des Vergleiches hervor. Für die Bedienung des Modus VA sind keine klaren subjektiven Präferenzen ableitbar, die signifikant höhere Anzahl an Bedienfehlern bei der Bedienung des Wechselmanövers der PMS mit dem Element DDS lässt hier den Vergleich zugunsten der HBA ausfallen.

Das Element HBA wird insgesamt sehr positiv bewertet und unterliegt im direkten Vergleich dem Element DDS nur knapp. Weitere Entwicklungen zu integrativen Stellelementen zur Bedienung zukünftig verfügbarer Automatisierungsstufen sollen das entwickelte Konzept HBA, oder zumindest vielversprechende Aspekte des Konzepts, berücksichtigen. Ein Nachteil der Umsetzung ist die im Vergleich schlechtere Auffindbarkeit der A+-Funktionalität. Für eine Folgeuntersuchung kann die untersuchte technische Behelfslösung durch die ursprünglich angedachte, nutzerinitiierte Rotation des Grundkörpers ersetzt werden. Die geringere Anzahl an Bedienfehlern bei der Bedienung der PMS kann einerseits in den techni-

schen Randbedingungen des Prototypen begründet sein, kann aber auch Ausdruck einer verbesserten Kommunikation des inneren Modells der PMS sein. Eine höhere Intuitivität der Schnittstelle mit weniger Bedienfehlern kann die Folge sein.

Unter Abwägung aller Aspekte entscheiden sich die Nutzer für die Bedienung des gesamten Spektrums am Ende des Fahrversuchs mit einer kleinen Mehrheit für das **Element DDS**. In Anbetracht aller subjektiven und objektiven Kriterien kann diese Wahl nachempfunden werden. Das Element zeichnet sich durch zahlreiche positive Eigenschaften aus. Insgesamt ist die Bedienung des Automationspektrums mit einem vergleichsweise einfach anmutendem Element möglich. Zusätzlich zu dieser geringen Komplexität des DDS zeichnen sich alle Elemente des Konzepts durch gute Sichtbarkeit und gute Erreichbarkeit aus. Die eingängliche Zeigerwirkung unterstützt die Mode Awareness zwischen den Modi TA und VA und unterstreicht zusätzlich das große Potential und Zukunftsfähigkeit des Element DDS. Zur Verringerung der Fehler bei der Manipulation der Sollzeitlücke im Modus TA und der Fehler beim Triggern des Wechselmanövers im Modus TA sind Lösungsansätze zu erarbeiten.



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit besteht in einer nutzerzentrierten, evolutionären Entwicklung des individuellen Mobilitätsempfindens im Kontext zunehmender Fahrzeugautomatisierung mit der Vision des autonomen Fahrens. Die vorliegende Arbeit dokumentiert die Entwicklung, den Aufbau und die Evaluierung von Bedienkonzepten des automatisierten Fahrens.

Die Ausprägungen der entwickelten und untersuchten Mensch-Maschine-Systeme zeigen Möglichkeiten zur Handhabung der in diesem Kontext zukünftig auf den Fahrer einwirkenden Systemkomplexität.

Die Entwicklungstätigkeiten fußen auf den aufgeführten Grundlagen zur Systemergonomie, der Anthropometrie und dem Stand der Technik zur Mensch-Maschine-Interaktion. Diese werden in einer unspezifischen Anforderungsliste zusammengefasst.

In einem ersten Schritt wird ein Automationsspektrum entwickelt. Die vier Modi (*MF*, *TA*, *VA* und *AUTON*) dieses Spektrums unterstützen den Nutzer durch klare intrastrukturelle Systemgrenzen der einzelnen Modi und einer unveränderlichen interstrukturellen Transition zwischen den Modi.

Der zweite Schritt besteht in der Entwicklung von Konzepten zur Bedienung *dieses* Automationsspektrums.

Aus der Definition des Modus *VA* ergibt sich der Zielkonflikt einer vollautomatisierten Fahrt mit einer Entbindung des Fahrers von der aktiven Fahrzeugführung und der Anforderung an einen aufmerksamen und eingriffsbereiten Fahrer als Überwachungsinstanz und Rückfallebene. Als Lösungsansatz dieses Konflikts wird für den Betrieb des Modus *VA* das kombinierte Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzept *Potentialtrigger* vorgestellt. Das Konzept bedient sich Methoden der direkten und indirekten Fahrerüberwachung und berücksichtigt als externen Einfluss die Kritikalität der aktuellen Verkehrssituation. Diese Eingangsgrößen bestimmen situationsabhängig die variierende Sinkgeschwindigkeit eines in der Windschutzscheibe angezeigten Potentials. Die Probanden werden beim Unterschreiten eines unteren Potential-Schwellwertes zum Setzen eines Triggers aufgefordert. Der Trigger füllt das Potential wieder auf.

Zur Bedienung des Automationsspektrums erfolgt im nächsten Schritt die Beschreibung generischer Konzepte zur Bedienung der vier Modi *MF*, *TA*, *VA* und *AUTON*. Im Anschluss werden die drei Konzeptkategorien *reduziert*, *aufgeteilt* und *integriert* eingeführt. Das Konzept *Standardbedienelemente* als Vertreter der *reduzierten* Konzeptkategorie beschreibt einen Weg zur Bedienung des Spektrums durch Reduzierung der Zahl an zusätzlichen Bedienelementen und der Funktionsintegration bestehender Elemente. Die Konzepte *Gabel* und *Touch* als Umsetzungsbeispiele der *aufgeteilten* Konzeptkategorie werden vorgestellt und detailliert. Sie beschreiben die Interaktion mit einzelnen Modi des Spektrums mit jeweils spezifischen Bedienelementen, die unter Berücksichtigung der variierenden Anforderungen der Modi ausgelegt sind. Die *integrative* Konzeptkategorie wird durch die vorgestellten Konzepte *Drehdrücksteller*, *Handballenablage* und *Hebel* repräsentiert. Die Konzepte stellen Elemente dar, welche durch Änderung von Position, Form und Betätigungscharakteristik die angepasste Bedienung der Modi des Spektrums ermöglichen.

Das entwickelte Automationsspektrum wird prototypisch in einen Versuchsträger integriert. Zudem werden auf Basis einer Bewertung der Konzepte und unter der Prämisse der methodischen Vergleichbarkeit in anschließenden Probandenstudien die drei integrativen Konzepte prototypisch umgesetzt. Die modularen Aufbauten werden austauschbar in den Versuchsträger integriert. Trotz der positiven Bewertung des aufgeteilten Konzepts *Touch* wird der Entwurf im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt. Der Versuchsträger dient als Medium zur Evaluierung der entwickelten Konzepte in Experten- und Probandenstudien mit dem Ziel der Potentialabschätzung der entwickelten Mensch-Maschine-Systeme.

In zwei abschließenden Studien werden die entwickelten Konzepte evaluiert.

In der Potentialtrigger-Studie wird das Konzept in Kombination mit einem vollautomatisierten STA im Rahmen eines experimentellen Fahrversuches untersucht. Die zentralen Untersuchungsaspekte sind die Akzeptanz und das Verständnis des Konzepts bei den Nutzern sowie die funktionale Tragfähigkeit.

Mit Hilfe der Untersuchung wird die hohe Nutzerakzeptanz und das Systemverständnis der Nutzer belegt. Die Gestaltung des Modus VA als einheitliches Gesamtsystem stößt ebenfalls auf breite Akzeptanz. Zudem wird nachgewiesen, dass die Pbn in beinahe allen untersuchten Situationen in der Lage sind, die Fahrzeugführung im Falle einer Übernahmeaufforderung adäquat zu übernehmen. Neben der Ableitung einer aus Nutzer- und Funktionssicht akzeptablen Triggerfrequenz bezieht sich das aus der Untersuchung abgeleitete Verbesserungspotential auf eine Erweiterung der funktionalen Kompetenz und der sensorischen Kapazitäten des Modus VA im Vergleich mit den technischen Gegebenheiten des Versuchsträgers.

Die zweite durchgeführte Evaluierungsstudie ist ebenfalls als experimenteller Fahrversuch konzipiert. Ziel der Erhebung ist die Erprobung des implementierten Automationsspektrums mit den Modi MF, TA und VA. Ein Fokus ist die inter- und intrastrukturelle Interaktion mit dem Spektrum. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Evaluierung und ein Vergleich der drei integrativen Bedienelemente. Die Untersuchung unterteilt sich in einen vorgelagerten Experten-Teil mit drei Bedienelementen zur Bildung einer Rangreihenfolge. Das Ergebnis ermöglicht den Ausschluss eines Bedienelements für den nachgelagerten Probandenversuch.

Als Ergebnis der Expertenstudie werden im Probandenversuch die Elemente DDS und HBA weiterführend untersucht. Das Element Hebel wird vor allem aufgrund des massiven Einflusses auf die Gestaltung der Mittelkonsole, aber auch aufgrund der umständlichen Bedienung der A+-Funktionalität über die longpush-Betätigung einer Sensortaste im Vergleich schlechter bewertet.

Die subjektiven und objektiven Ergebnisse der Probandenuntersuchung zeigen das große Potential der untersuchten Konzepte. Zum einen wird die umgesetzte interstrukturelle Interaktion mit den Modi des Automationsspektrums sehr positiv erlebt. Die hierarchische bottom-up-Aktivierung mittels der A+ Funktionalität und die top-down-Deaktivierung (system- und nutzerinitiiert) des Modus VA in den Rückfallmodus (Modus TA, Zustand *Stand-by*) werden von den Pbn akzeptiert, verstanden und nahezu fehlerfrei angewandt. Unterstützend wirkt hier die Zeigerwirkung durch die Gestaltänderungen der Bedienelemente. Das gewählte Anzeige-konzept muss punktuell überarbeitet werden. Als mögliche strukturelle Verbesserungsmöglichkeit wird der Entfall des Modus MF abgeleitet.

Die intrastrukturelle Bedienung des Modus TA zeigt lokales Verbesserungspotential für beide Bedienelemente auf, die Translation des den Pbn bekannten Lenkstockhebel-Konzepts auf die integrativen Stellelemente in der Mittelkonsole ist jedoch gelungen. Die Bedienung der Master-Slave-PMS des Modus VA erfolgt auf ebenfalls niedrigem Fehlbedienungsniveau, die gewählten Interaktionen werden insgesamt positiv bewertet. Die unbewusste Kommunikation des inneren Modells der PMS ist beiden Ansätzen nur zum Teil gelungen. Die Weiterentwicklung der haptischen Rückmeldung der Module sowie der funktio-

nen Möglichkeiten des Versuchsträgers können als Ausgangsbasis einer Verbesserung der Intuitivität der PMS dienen. Die Zukunftsfähigkeit des Potentialtriggers wird durch das geringe Fehlerniveau bei der Bedienung erneut bestätigt.

Das Element DDS geht als knapper Gewinner des direkten, gesamtheitlichen Vergleichs der beiden Elemente hervor. Jedoch werden sowohl der DDS als auch die HBA insgesamt ausgesprochen positiv bewertet und zeigen Möglichkeiten und Wege für zukünftige Entwicklungen auf.

Die vorliegende Arbeit entwickelt und untersucht Konzepte für die zukünftige Gestaltung von Mensch-Maschine-Systemen. Das gezeigte Automationsspektrum zeigt einen nutzerzentrierten Lösungsweg, der die mittelfristig verfügbaren FAS-Funktionalitäten in einer für den Fahrer handhabbaren Automationsstruktur propagiert. Die sinnfällige Clusterung und Integration der Vielzahl an Funktionen in klar abgrenzbare, verständliche Automationsmodi ist für zukünftige Fahrzeugprojekte unumgänglich. Das Verständnis der Nutzer dieses fahrerzentrierten Ansatzes wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit klar belegt. Für die mittelfristig erwartete, technikgetriebene Umsetzung vollautomatisierter FAS zeigt sich das Potentialtriggerkonzept als unverzichtbarer Baustein zukünftiger Automationsstufen.

Die drei integrativen Bedienelemente repräsentieren *eine* mögliche technische Umsetzung der Bedienkonzepte für das Automationsspektrum. Die Bedienkonzepte unterstützen durch die durch Form- und Positionsvariabilität umgesetzte Zeigerwirkung das Systemverständnis der Nutzer und damit die interstrukturelle Bedienung des Automationsspektrums. Bezüglich der intrastrukturellen Bedienung des Spektrums zeigt die implementierte Master-Slave-PMS einen möglichen, von den Nutzer akzeptierten Weg zur Bedienung des Modus VA auf.

Auf Basis der positiven Bewertung vieler im Rahmen dieser Arbeit diskutierten Konzeptideen ist es wichtig, in einem nächsten Schritt auch andere in dieser Arbeit vorgestellte, vielversprechende Konzepte umzusetzen. Das aufgeteilte Konzept *Touch* muss zur Evaluierung und zum Vergleich mit den integrativen Konzepten prototypisch aufgebaut werden. Das reduzierte Konzept *Standardbedienelemente* zeigt ebenfalls Potential, welches anhand von Prototypen hinsichtlich seiner Zukunftsfähigkeit untersucht werden muss.

Zudem muss zur Komplettierung des Automationsspektrums der Modus AUTON umgesetzt und ins Fahrzeug integriert werden. Die veränderten Rahmenbedingungen für einen dann nicht mehr als Überwachungs- und Rückfallebene verfügbar zu haltenden Fahrer werden in dieser Arbeit nur angeschnitten und bieten zukünftigen Projekten ein breites Spektrum an Untersuchungsaspekten.





# Anhang





## **Anhang A: Fragebögen Potentialtrigger- und Bedienelementstudie**

	<b>Institut für Arbeitswissenschaft, Universität der Bundeswehr, München. Projekt Stau-Assistent - 2012</b>
--	---

**Fragen nach der 1. Fahrt mit**      **Se**      **Gu**      **Ha****Vp:**

Wir sind nun eine Runde gefahren:

Bitte bewerten Sie dieses System:

<b>Wie fanden Sie <u>diesen</u> Stau-Assistenten?</b>			
1.	konnte mich <b>rasch</b> daran <b>gewöhnen</b>	weder/noch	konnte mich <b>nicht</b> daran <b>gewöhnen</b>
	<input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/>		
2.	<b>unangenehm</b>	weder/noch	<b>angenehm</b>
	<input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/>		
3.	<b>anregend</b>	weder/noch	<b>ermüdend</b>
	<input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/>		
4.	<b>nützlich</b>	weder/noch	<b>nutzlos</b>
	<input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/>		
5.	damit wird der <b>Fahr-Komfort kleiner</b>	weder/noch	damit wird der <b>Fahr-Komfort größer</b>
	<input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/>		
Zu <b>lernen</b> , wie man das System <b>bedient</b> , ...			
6.	<b>war schwierig</b>	weder/noch	<b>war einfach</b>
	<input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/>		

7. Ob das System **aktiv** oder **nicht aktiv** ist, ...  
war mir **klar**                      weder/noch                      war mir **nicht klar**  
--------------------

8. Das **Verhalten des Systems** konnte ich ...  
**leicht verstehen**                      weder/noch                      **schwer verstehen**  
--------------------

9. Hilft Ihnen das System, das Sie gerade gefahren sind,  
**Gefahren im Straßenverkehr rechtzeitig zu erkennen?**  
es **hilft nicht**                      weder/noch                      es **hilft**  
--------------------

10. Der eben gefahrene Stau-Assistent ...  
**erhöht die Sicherheit**                      weder/noch                      **verringert die Sicherheit**  
--------------------

11.                      **gängelt mich**                      weder/noch                      **befreit mich**  
--------------------

12.                      **ist aufdringlich**                      weder/noch                      **ist nicht aufdringlich**  
--------------------

13.                      **ist kontrollierbar**                      weder/noch                      **ist nicht kontrollierbar**  
--------------------

14.                      **macht das Autofahren langweilig**                      weder/noch                      **macht das Autofahren interessant**  
--------------------

15. Mit **diesem** Stau-Assistenten **fühlte ich mich ...**

<b>beansprucht</b>	weder/noch	<b>entlastet</b>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

16. **entspannt**                      weder/noch                      **genervt**

.....  .....  .....  .....

17. **unterstützt**                      weder/noch                      **beeinträchtigt**

.....  .....  .....  .....

Damit der Stau-Assistent "**aktiv**" bleibt, musste ich wiederholt den **Resume-Hebel** ziehen.

**Ich finde, das ist ...**

18. **zu oft**                      **gerade richtig**                      **zu selten**

.....  .....  .....  .....

19. **störend**                      weder/noch                      **nicht störend**

.....  .....  .....  .....

20. **ablenkend**                      weder/noch                      **unterstützend**

.....  .....  .....  .....

21. **hilft mir**                      weder/noch                      **behindert mich**

.....  .....  .....  .....

22. Wenn in Ihrem Fahrzeug dieser Stau-Assistent eingebaut wäre, würden Sie ihn **benutzen**?

ja

nein       $\longrightarrow$

Falls nein: Warum nicht? .....

.....

	<b>Institut für Arbeitswissenschaft, Universität der Bundeswehr, München. Projekt Stau-Assistent - 2012</b>
--	---

**Fragen nach der 2. Fahrt mit**      **Se**      **Gu**      **Ha**

**Vp:**

Wir sind nun die zweite Runde gefahren:

Bitte bewerten Sie dieses System:

<b>Wie fanden Sie <u>diesen</u> Stau-Assistenten?</b>		
1.	konnte mich <b>rasch</b> daran <b>gewöhnen</b>	konnte mich <b>nicht</b> daran <b>gewöhnen</b>
	<input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/>	weder/noch
2.	<b>unangenehm</b>	<b>angenehm</b>
	<input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/>	weder/noch
3.	<b>anregend</b>	<b>ermüdend</b>
	<input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/>	weder/noch
4.	<b>nützlich</b>	<b>nutzlos</b>
	<input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/>	weder/noch
5.	damit wird der <b>Fahr-Komfort kleiner</b>	damit wird der <b>Fahr-Komfort größer</b>
	<input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/> ----- <input type="radio"/>	weder/noch



7. Ob das System **aktiv** oder **nicht aktiv** ist, ...  
war mir **klar**                      weder/noch                      war mir **nicht klar**  
--------------------

8. Das **Verhalten des Systems** konnte ich ...  
**leicht verstehen**                      weder/noch                      **schwer verstehen**  
--------------------

9. Hilft Ihnen das System, das Sie gerade gefahren sind,  
**Gefahren im Straßenverkehr rechtzeitig zu erkennen?**  
es **hilft nicht**                      weder/noch                      es **hilft**  
--------------------

10. Der eben gefahrene Stau-Assistent ...  
**erhöht die Sicherheit**                      weder/noch                      **verringert die Sicherheit**  
--------------------

11.                      **gängelt mich**                      weder/noch                      **befreit mich**  
--------------------

12.                      **ist aufdringlich**                      weder/noch                      **ist nicht aufdringlich**  
--------------------

13.                      **ist kontrollierbar**                      weder/noch                      **ist nicht kontrollierbar**  
--------------------

14.                      **macht das Autofahren langweilig**                      weder/noch                      **macht das Autofahren interessant**  
--------------------

15. Mit **diesem** Stau-Assistenten **fühlte ich mich** ...

<b>beansprucht</b>	weder/noch	<b>entlastet</b>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

16. **entspannt**                      weder/noch                      **genervt**

--------------------

17. **unterstützt**                      weder/noch                      **beeinträchtigt**

--------------------

Damit der Stau-Assistent "**aktiv**" bleibt, musste ich wiederholt den **Resume-Hebel** ziehen.

**Ich finde**, das ist ...

18. **zu oft**                      **gerade richtig**                      **zu selten**

--------------------

19. **störend**                      weder/noch                      **nicht störend**

--------------------

20. **ablenkend**                      weder/noch                      **unterstützend**

--------------------

21. **hilft mir**                      weder/noch                      **behindert mich**

--------------------

22. Wenn in **Ihrem Fahrzeug dieser** Stau-Assistent eingebaut wäre, würden Sie ihn **benutzen**?

ja

nein      ↓

Falls nein: Warum nicht? .....

.....

	<b>Institut für Arbeitswissenschaft, Universität der Bundeswehr, München. Projekt Stau-Assistent - 2012</b>
--	---

**Fragen nach beiden Fahrten**

Vp:

1.

Die **Bedienung** des Systems ist ...

einfach

weder/noch

schwierig



2.

Wenn **diese Anzeige** erscheint,  
**bedeutet dies:**


- der Stau-Assistent fährt das Fahrzeug weiterhin
- ich muss in Kürze selber fahren
- ich muss sofort selber fahren

3.

Wussten Sie **sofort**  
bei dieser **Anzeige** im **Head-up-Display**,  
was zu tun ist, um das System **aktiv** zu halten?**Das war für mich ... ..**

- sofort verständlich
- einfach zu lernen
- schwierig zu lernen
- kompliziert





Die "**Füllstands-Anzeige**" im Head-up-Display war für mich bei der Bedienung des Stau-Assistenten...

4. **schwer verständlich**                      weder/noch                      **leicht verständlich**

--------------------

5.                      **hilfreich**                      weder/noch                      **nicht hilfreich**

--------------------

Damit der Stau-Assistent **nicht mehr aktiv** ist (Stand-by-Modus), **mussten Sie bremsen, Gas geben oder lenken.**

Ich finde, das ist ...

6.                      **sinnvoll**                      weder/noch                      **sinnlos**

--------------------

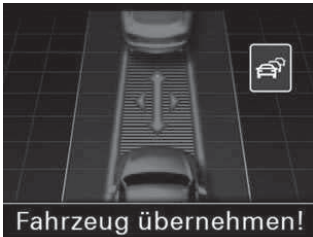
Ich finde, das sollte man **verändern**...

7.                       nein

ja                      ↓

                         Falls ja: Wie? .....

                         .....

8. 

Wenn **diese Anzeige** erscheint, bedeutet dies:

- der Stau-Assistent fährt das Fahrzeug weiterhin
- ich muss in Kürze selber fahren
- ich muss sofort selber fahren

9. Wenn sich das System automatisch ausschaltet, ertönt ein **Warnton**. Haben Sie ihn **gehört**?

ja  
 nein

Falls ja:  
Ich finde den Warnton...

10. **störend**                      weder/noch                      **nicht störend**

.....  .....  .....  .....

11. **Ich finde die Warnung ...**

**hinderlich**                      weder/noch                      **hilfreich**

.....  .....  .....  .....

12.

Während der Stau-Fahrt hatten Sie Gelegenheit, das iPad zu benutzen.  
Ich finde, **das Benutzen des iPads während der Fahrt mit dem Stau-Assistenten** ist ...

**einfach**                      weder/noch                      **schwierig**



13.

**anstrengend**                      weder/noch                      **nicht anstrengend**



14.

**lenkt mich vom Fahren ab**                      weder/noch                      **lenkt mich nicht vom Fahren ab**



15.

Während der Stau-Fahrt (mit dem Stau-Assistenten) konnten Sie **verschiedene Systeme benutzen**.

**Welches** System hat Sie **am wenigsten** beansprucht? (= Platz 1)

**Welches** System hat Sie **am meisten** beansprucht? (= Platz 5)

**Bitte vergeben Sie die Plätze 1, 2, 3, 4 und 5.**

Platz \_\_\_\_\_ Navigations-System

Platz \_\_\_\_\_ auf dem iPad - E-mails lesen

Platz \_\_\_\_\_ auf dem iPad - Internet-Nutzung

Platz \_\_\_\_\_ auf dem iPad - Video-Telefon nutzen


Platz \_\_\_\_\_ auf dem iPad - Spiele spielen.

16.

Angenommen, Sie hätten sich zum Kauf eines Stau-Assistenten entschieden. Welches System würden Sie dann nehmen?

- das **System von Runde 1**  
 das **System von Runde 2**

Herzlichen Dank für Ihre Geduld!



**Institut für Arbeitswissenschaft,  
Universität der Bundeswehr, München.  
Projekt Bedienelemente - 2012**

**Fragen nach der .... Fahrt mit****A**  
Dreh-Drück

Vp:

1. Wir sind nun eine Runde mit den Systemen **ACC** (Adaptive Cruise Control) und **SPA** (Spur-Assistent) gefahren:

Bitte beurteilen Sie:

**Um mit dem SPA (Spur-Assistent) zu fahren, mussten Sie erst das ACC aktiv schalten, dann den SPA. Wie war das für Sie?**

1a. konnte mich **rasch** daran **gewöhnen**                      weder/noch                      konnte mich **nicht** daran **gewöhnen**

○-----○-----○-----○-----○

1b. **unangenehm**                      weder/noch                      **angenehm**

○-----○-----○-----○-----○

1c. **anregend**                      weder/noch                      **ermüdend**

○-----○-----○-----○-----○

1d. **nützlich**                      weder/noch                      **nutzlos**

○-----○-----○-----○-----○

1e. damit wird der **Fahr-Komfort kleiner**                      weder/noch                      damit wird der **Fahr-Komfort größer**

○-----○-----○-----○-----○

2. **Welches System aktiv ist (ACC oder SPA) ...**

**war mir nicht klar**                      weder/noch                      **war mir klar**

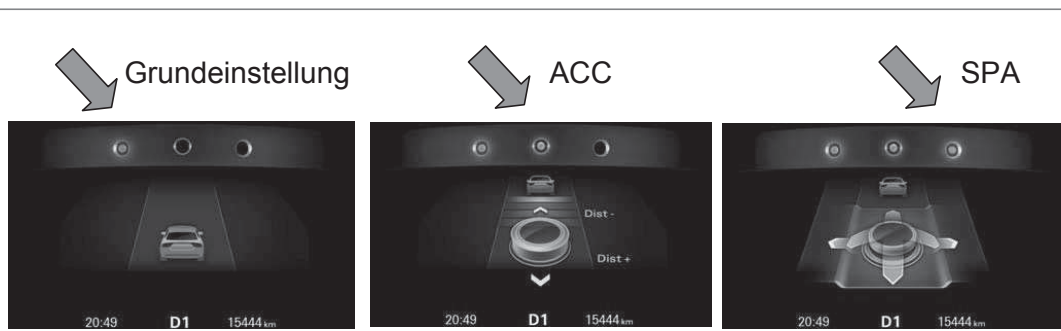
○-----○-----○-----○-----○





Um vom ACC zur SPA (Spur-Assistenz) zu kommen,  
mussten Sie eine Taste drücken.  
Wie fanden Sie das?

- 7a.      war **leicht zu finden**                      weder/noch                      war **schwer zu finden**  
                 ○-----○-----○-----○-----○
- 7b.      war **schwer zu verstehen**                      weder/noch                      war **leicht zu verstehen**  
                 ○-----○-----○-----○-----○



Die **Anzeige über die "Perlenkette"** (siehe Bilder, oben),  
welches der Systeme gerade **aktiv ist**, finde ich ...


- 8a.                      **unklar**                      weder/noch                      **klar**  
                                 ○-----○-----○-----○-----○
- 8b.      **schwer zu verstehen**                      weder/noch                      **leicht zu verstehen**  
                                 ○-----○-----○-----○-----○
- 8c.                      **nicht hilfreich**                      weder/noch                      **hilfreich**  
                                 ○-----○-----○-----○-----○





## 2. Fragen zur ACC-Bedienung

Um beim **ACC** die **Geschwindigkeit zu verändern**, mussten Sie an einem Dreh-Element (Rad) drehen. Wie fanden Sie das?



12a      **angemessen**      weder/noch      **nicht angemessen**

○-----○-----○-----○-----○

12b      **unpraktisch**      weder/noch      **praktisch**

○-----○-----○-----○-----○

12c      **negativ**      weder/noch      **positiv**

○-----○-----○-----○-----○

Um beim ACC den **Abstand** zum Vordermann zu vergrößern oder zu verkleinern, mussten Sie das Bedien-Element kurz nach hinten bzw. nach vorne drücken. Wie fanden Sie das?

13a      **angemessen**      weder/noch      **nicht angemessen**

○-----○-----○-----○-----○


13b      **unpraktisch**      weder/noch      **praktisch**

○-----○-----○-----○-----○

13c      **negativ**      weder/noch      **positiv**

○-----○-----○-----○-----○

Sie haben das ACC per **Taste** wieder aktiviert (RESUME).  
Wie fanden Sie das?



14a **angemessen**                      weder/noch                      **nicht angemessen**

○-----○-----○-----○-----○

14b **unpraktisch**                      weder/noch                      **praktisch**

○-----○-----○-----○-----○

15. Konnten Sie diese **Taste "blind" bedienen**?

- Ich musste **auf die Taste schauen**, um die RESUME-Taste zu finden.
- Ich konnte die **Taste "blind" bedienen**.

16. In der Mittel-Konsole gibt es noch andere Bedien-Elemente, z.B. den Lautstärke-Regler, das MMI-Bedien-Element, usw.  
Wie finden Sie das neue Bedien-Element im Vergleich dazu?

Das Bedien-Element hat sich von den anderen

**gut unterschieden**                      weder/noch                      **nicht gut unterschieden**

○-----○-----○-----○-----○

### 3. Fragen zur SPA-Bedienung (SPA = Spur-Assistenz)



Beim SPA hatten Sie ein **neues Bedien-Element**.

Wie würden Sie es beschreiben?

(1 Antwort ankreuzen, oder eigene Antwort schreiben)

- 17a  Es ist wie ein **Hebel zum Schieben**.  
Ich kann damit die Bewegung meines Fahrzeugs steuern.  
Die Kräfte, die ich spüre, zeigen mir,  
wo die Leistungs-Grenze des Fahrzeugs ist.
- 17b  Es ist ein **Modell für mein Fahrzeug**.  
Es zeigt, wo mein Fahrzeug innerhalb des Fahrstreifens ist.  
Die Kräfte, die ich spüre, zeigen mir, wo die Fahrbahnmarkierung ist.  
Mit dem Bedien-Element kann ich die Position meines Fahrzeugs  
auf der Fahrbahn verändern.
- 17c  Es ist wie ein **Joystick** am Computer.  
Wie bei einem Computer-Spiel kann ich damit die Bewegung  
meines Fahrzeugs steuern.  
Wenn ich stärker schiebe, fährt das Fahrzeug schneller  
in die Richtung, in die ich drücke.
- 17d  Die Beschreibungen passen nicht. Es ist wie .....
- .....
- .....

Am Bedien-Element des SPA haben Sie eine **Kraft gespürt**.  
Wie fanden Sie die?

18a                    **zu stark**                    **genau richtig**                    **zu schwach**  
                          ○-----○-----○-----○-----○

18b                    **gut zu spüren**                    weder/noch                    **schlecht zu spüren**  
                          ○-----○-----○-----○-----○

18c                    **nicht hilfreich**                    weder/noch                    **hilfreich**  
                          ○-----○-----○-----○-----○

18d                    **schwer verständlich**                    weder/noch                    **gut verständlich**  
                          ○-----○-----○-----○-----○

Den **Spur-Versatz** (zum nach vorne Schauen oder zum Bilden einer Rettungsgasse) konnten Sie **durch Verstellen des Bedien-Elements herbeiführen**.  
Wie fanden Sie das?

19a                    **einfach**                    weder/noch                    **schwierig**  
                          ○-----○-----○-----○-----○

19b                    **schwer verständlich**                    weder/noch                    **gut verständlich**  
                          ○-----○-----○-----○-----○

19c                    **funktioniert wie erwartet**                    weder/noch                    **funktioniert anders als erwartet**  
                          ○-----○-----○-----○-----○

19d                    Anmerkungen : .....

                          .....

Den **Spurwechsel mit SPA zu starten** (kurzes Drücken), wie fanden Sie das?

20a **einfach**                      weder/noch                      **schwierig**

○-----○-----○-----○-----○

20b **schwer zu lernen**                      weder/noch                      **leicht zu lernen**

○-----○-----○-----○-----○

20c **schwer verständlich**                      weder/noch                      **gut verständlich**

○-----○-----○-----○-----○

20d Anmerkungen: .....

.....

Wenn Sie als Fahrer eingegriffen haben, wie fanden Sie bei Ihrem Eingriff das **Verhalten von SPA**?



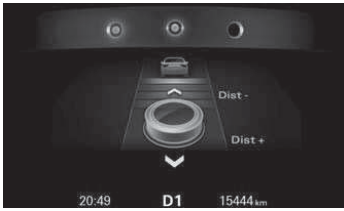
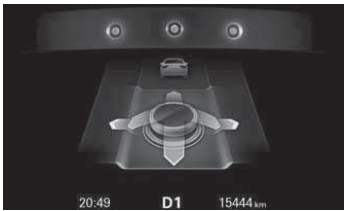
21a Das **Verhalten von SPA** war ...

**verwirrend**                      weder/noch                      **klar**

○-----○-----○-----○-----○



21b **verständlich**                      weder/noch                      **nicht verständlich**

○-----○-----○-----○-----○

Bedien-Element		bei ACC	bei SPA
			
<p>Nehmen Sie nun <b>als Vergleich die Fahrt mit ACC.</b></p>			
<p>Das <b>Bedien-Element von SPA</b> war im Vergleich dazu ...</p>			
22.	<b>komplizierter</b>	weder/noch	<b>einfacher</b>
<p><input type="radio"/>-----<input type="radio"/>-----<input type="radio"/>-----<input type="radio"/>-----<input type="radio"/></p>			
Anzeige		bei ACC	bei SPA
			
<p>Die <b>Anzeige von SPA</b> war im Vergleich dazu ...</p>			
23.	<b>komplizierter</b>	weder/noch	<b>einfacher</b>
<p><input type="radio"/>-----<input type="radio"/>-----<input type="radio"/>-----<input type="radio"/>-----<input type="radio"/></p>			



## **Anhang B: Coverstories Potentialtrigger- und Bedienelemente-Studie**

	<p><b>Projekt</b> <b>„Erprobung der Belastung durch Stauassistent in Kombination mit einem mobilen Büro“</b></p>	<p><small>der Bundeswehr</small> <b>Universität München</b></p> 
---	--	---

Sehr geehrte/r Versuchsteilnehmer/in,



vielen Dank, dass Sie bereit sind, das Institut für Arbeitswissenschaft der Universität der Bundeswehr München bei diesem Forschungsprojekt zu unterstützen. Mit Ihrer Teilnahme helfen Sie uns, Autos weiterzuentwickeln, sicherer zu machen und fahrerfreundlicher zu gestalten.

Der nun folgende Fahrversuch untersucht die Beanspruchung, die sich aus der Nutzung eines Stauassistenten in Kombination mit mobilen Office-Anwendungen ergibt. Ein Stauassistent ist ein Fahrerassistenzsystem, das dem Fahrer in Stausituationen die Fahraufgabe komplett abnehmen kann. Der erzielte Gewinn an Komfort drückt sich auch durch die Verfügbarkeit zusätzlicher Anwendungen im Kontext eines „mobilen Büros“ im Fahrzeug aus.

Fahrerassistenzsysteme im Allgemeinen und der Stauassistent im Speziellen können ihre Vorteile jedoch nur dann voll entfalten, wenn sie auf die speziellen Bedürfnisse und Wünsche der Fahrer angepasst sind, so dass diese die Systeme auch gerne einsetzen und verwenden. Daher ist es ein Ziel unserer Studie, das Fahrerassistenzsystem „Stauassistent“ aus der Kundenperspektive zu prüfen und zu bewerten. Nach einer allgemeinen Einweisung in das Versuchsfahrzeug und die Bedienung des Systems haben Sie die Möglichkeit, den Stauassistenten in Kombination mit zusätzlichen Inhalten des „mobilen Büros“ in einer simulierten Stausituation zu testen und kennen zu lernen.

Im Anschluss haben Sie nun ausgiebig die Möglichkeit, den Stauassistenten zu erproben. Die Funktionsweise und Bedienung des Stauassistenten wird Ihnen unser Versuchsleiter direkt im Auto erklären. Nach den Fahrten interessiert uns natürlich Ihre Meinung zum Stauassistenten.





	<p><b>Projekt</b> <b>„Erprobung der Belastung</b> <b>durch Stauassistent in</b> <b>Kombination mit einem</b> <b>mobilen Büro“</b></p>	<p><i>der Bundeswehr</i> <b>Universität  München</b></p>
---	---	---

Für den Zeitraum der Fahrt werden Sie dazu mit einem Pulsmesser ausgestattet, der Ihre Pulsfrequenz kontinuierlich misst und aufzeichnet. Darüber erhalten wir Aufschluss, welche Situationen und Tätigkeiten von Ihnen als besonders belastend empfunden wurden. Zudem werden Sie nach den Fahrten gebeten einzuschätzen, wie beanspruchend die erlebten Fahrsituationen waren.

Ein Stauassistent bietet dem Fahrer die Möglichkeit, zusätzliche Tätigkeiten neben der eigentlichen Fahraufgabe auszuführen. Neben dem Lesen und Beantworten von Emails können Videoanrufe getätigt, Informationen aus dem Internet abgerufen, Spiele gespielt oder das Navigations- und Infotainmentsystem bedient werden. Unser Versuchsleiter wird Sie während der Fahrt auffordern, verschiedene Aufgaben mit dem im Fahrzeug installierten Apple iPad und dem fahrzeugeigenen Infotainmentsystem auszuführen.

Vielen Dank für die Teilnahme an unserem Fahrversuch!

	<p><b>Projekt</b> <b>„Neue Bedienelemente</b> <b>für ein</b> <b>Spurassistenzsystem“</b></p>	<p><small>der Bundeswehr</small> <b>Universität München</b></p> 
---	--	---

Sehr geehrte/r Versuchsteilnehmer/in,

vielen Dank, dass Sie erneut bereit sind, das Institut für Arbeitswissenschaft der UniBW München (IfA) bei diesem Forschungsprojekt zu unterstützen. Mit Ihrer Teilnahme helfen Sie uns, Autos weiterzuentwickeln, sicherer zu machen und fahrerfreundlicher zu gestalten.

Der nun folgende Fahrversuch untersucht neue Bedienelemente zur Bedienung des Ihnen bekannten ACCs und eines neuartigen *Spurassistenten*. Dieser ist die Weiterentwicklung des *Stauassistenten* aus der letzten Studie.

Assistenzsysteme können ihre Vorteile nur dann voll entfalten, wenn sie auf die Bedürfnisse und Wünsche der Fahrer angepasst sind. Diese sollen die Systeme gerne verwenden. Neben einer hilfreichen Systemausprägung müssen die Fahrer das Assistenzsystem unkompliziert und zuverlässig über ein Bedienelement kontrollieren können.

Das Ziel unserer Studie ist es, neue Bedienelemente für die Systeme ACC und Spurassistent aus der Kundenperspektive zu prüfen und zu bewerten. Nach einer allgemeinen Einweisung in das Versuchsfahrzeug und die Bedienung der Systeme haben Sie die Möglichkeit, die Bedienung beider Systeme ausgiebig zu testen und zu „erfahren“.

Die Funktionsweise und Bedienung der Bedienelemente wird Ihnen unser Versuchsleiter direkt im Auto erklären. Nach den Fahrten interessiert uns natürlich Ihre Meinung zu den erprobten Elementen.

Vielen Dank für die Teilnahme an unserem Fahrversuch!



## **Anhang C: Ergebnistabelle Evaluierungsstudie Bedienelemente**

Tabelle: Subjektive Beurteilung des Mensch-Maschine-Systems zur Bedienung des automatisierten Fahrens

F	Fragestellung	Element	Mittelwert	Stabw
1	Um mit dem SPA zu fahren, mussten Sie erst das ACC aktiv schalten, dann den SPA. Wie war das für Sie?			
1a	konnte mich rasch daran gewöhnen (1) - konnte mich nicht daran gewöhnen (5)	Gesamt	1.14	0.38
		DDS	1.08	0.28
		HBA	1.19	0.47
1b	angenehm (1) - unangenehm (5)	Gesamt	1.92	1.04
		DDS	1.81	0.95
		HBA	2.03	1.13
1e	Fahrkomfort wird größer (1) - Fahrkomfort wird kleiner (5)	Gesamt	1.90	1.03
		DDS	1.81	1.04
		HBA	2.00	1.04
2	Welches System aktiv ist (ACC oder SPA) ...			
	war mir klar (1) - war mir nicht klar (5)	Gesamt	1.24	0.59
		DDS	1.25	0.44
		HBA	1.22	0.72
3	Welche Fahraufgaben das ACC für mich übernimmt ...			
	war mir immer klar (1) - war mir nicht klar (5)	Gesamt	1.21	0.41
		DDS	1.22	0.42
		HBA	1.17	0.45
4	Welche Fahraufgaben der SPA für mich übernimmt ....			
	war mir immer klar (1) - war mir nicht klar (5)	Gesamt	1.11	0.36
		DDS	1.11	0.32
		HBA	1.11	0.40
6	Wenn das System den Zustand wechselt, verändert sich das Bedien-Element in Form und Position. Wie fanden Sie das?			
6a	hilfreich (1) - nicht hilfreich (5)	Gesamt	1.76	0.91
		DDS	1.64	0.83
		HBA	1.89	0.98
6b	einfach (1) - kompliziert (5)	Gesamt	1.99	1.09
		DDS	1.89	1.04
		HBA	2.08	1.16
6c	leicht verständlich (1) - schwer verständlich (5)	Gesamt	1.51	0.76
		DDS	1.47	0.74
				...

Tabelle: Subjektive Beurteilung des Mensch-Maschine-Systems zur Bedienung des automatisierten Fahrens

<b>F</b>	<b>Fragestellung</b>	<b>Element</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>Stabw</b>
		HBA	1.56	0.81
7	Um vom ACC zur SPA (Spur-Assistenz) zu kommen, mussten Sie eine Taste drücken. Wie fanden Sie das?			
7a*	war leicht zu finden (1) - war schwer zu finden (5)	Gesamt DDS HBA	1.56 1.33 1.78	0.86 0.72 0.96
7b	war leicht zu verstehen (1) - war schwer zu verstehen (5)	Gesamt DDS HBA	1.28 1.22 1.31	0.65 0.59 0.75
8	Die Anzeige über die „Perlenkette“, welches der Systeme gerade aktiv ist, finde ich ...			
8a	klar (1) - unklar (5)	Gesamt DDS HBA	2,63 2,56 2,69	1,70 1,7 1,74
8b	war leicht zu verstehen (1) - war schwer zu verstehen (5)	Gesamt DDS HBA	2,26 2,28 2,25	1,47 1,52 1,46
8c	hilfreich (1) - nicht hilfreich (5)	Gesamt DDS HBA	2,75 2,69 2,8	1,59 1,58 1,64
9	Wenn Sie SPA ausschalten, geht auch das ACC in den Zustand Stand-by. d.h. die Unterstützung fällt komplett weg. Wenn Sie wieder ACC fahren wollen, müssen Sie das System aktivieren. Wie finden Sie diesen Ablauf?			
9a	leicht verständlich (1) - schwer verständlich (5)	Gesamt DDS HBA	1.31 1.33 1.28	0.52 0.53 0.51
9b	sicher (1) - gefährlich (5)	Gesamt DDS HBA	1.61 1.64 1.58	0.86 0.87 0.87
9c	notwendig (1) - überflüssig (5)	Gesamt DDS HBA	2.08 2.06 2.11	0.97 0.98 0.98
				...

Tabelle: Subjektive Beurteilung des Mensch-Maschine-Systems zur Bedienung des automatisierten Fahrens

F	Fragestellung	Element	Mittelwert	Stabw
11	Der Zusammenhang zwischen der Anzeige und dem Bedien-Element war für mich ...			
	leicht verständlich (1) - schwer verständlich (5)	Gesamt	1,28	0,53
		DDS	1,19	0,4
		HBA	1,36	0,64
12	Um beim ACC die Geschwindigkeit zu verändern, mussten Sie an einem Dreh-Element drehen. Wie fanden Sie das?			
12a*	angemessen (1) - nicht angemessen (5)	Gesamt	1,45	0,87
		DDS	1,19	0,47
		HBA	1,67	1,12
12b	praktisch (1) - unpraktisch (5)	Gesamt	1,65	1,04
		DDS	1,39	0,73
		HBA	1,86	1,27
12c*	positiv (1) - negativ (5)	Gesamt	1,65	0,99
		DDS	1,39	0,73
		HBA	1,86	1,20
13	Um beim ACC den Abstand zum Vordermann zu vergrößern oder zu verkleinern, mussten Sie das Bedien-Element kurz/länger nach hinten bzw. nach vorne drücken. Wie fanden Sie das?			
13a	angemessen (1) - nicht angemessen (5)	Gesamt	1,65	1,03
		DDS	1,75	1,05
		HBA	1,56	1,03
13b	praktisch (1) - unpraktisch (5)	Gesamt	1,90	1,17
		DDS	1,97	1,18
		HBA	1,83	1,18
13c	positiv (1) - negativ (5)	Gesamt	1,94	1,21
		DDS	2,14	1,38
		HBA	1,75	1,02
14	Sie haben das ACC per Taste wieder aktiviert (RESUME). Wie fanden Sie das?			
14b*	praktisch (1) - unpraktisch (5)	Gesamt	1,51	0,94
		DDS	1,22	0,59
		HBA	1,81	1,14
				...

Tabelle: Subjektive Beurteilung des Mensch-Maschine-Systems zur Bedienung des automatisierten Fahrens

F	Fragestellung	Element	Mittelwert	Stabw
16	In der Mittel-Konsole gibt es noch andere Bedienelemente (...). Wie finden Sie das neue Bedien-Element im Vergleich dazu? Das Bedien-Element hat sich von den anderen ...			
	gut unterschieden (1) - nicht gut unterschieden (5)	Gesamt	1,40	0,70
		DDS	1,39	0,69
		HBA	1,42	0,73
18	Am Bedienelement des SPA haben Sie eine Kraft gespürt. Wie fanden Sie diese?			
18a	zu stark (1) - zu schwach (5)	Gesamt	3,28	1,10
		DDS	3,14	0,96
		HBA	3,42	1,23
18b	gut zu spüren (1) - schlecht zu spüren (5)	Gesamt	2,67	1,64
		DDS	2,44	1,52
		HBA	2,89	1,77
18c	hilfreich (1) - nicht hilfreich (5)	Gesamt	2,08	1,13
		DDS	2,00	1,1
		HBA	2,17	1,18
18d	gut verständlich (1) - schwer verständlich (5)	Gesamt	1,96	1,09
		DDS	2,06	1,15
		HBA	1,86	1,05
19	Den Spurversatz (...) konnten Sie durch Verstellen des Bedien-Elements herbeiführen. Wie fanden Sie das?			
19a	einfach (1) - schwierig (5)	Gesamt	1,24	0,57
		DDS	1,22	0,54
		HBA	1,25	0,60
19b	gut verständlich (1) - schwer verständlich (5)	Gesamt	1,18	0,42
		DDS	1,14	0,35
		HBA	1,22	0,48
19c	funktioniert wie erwartet (1) - funktioniert anders als erwartet (5)	Gesamt	1,88	1,13
		DDS	1,81	1,12
		HBA	1,94	1,17
20	Den Spurwechsel mit SPA zu starten (kurzes Drücken), wie fanden Sie das?			
...				

Tabelle: Subjektive Beurteilung des Mensch-Maschine-Systems zur Bedienung des automatisierten Fahrens

F	Fragestellung	Element	Mittelwert	Stabw
20a	einfach (1) - schwierig (5)	Gesamt	1,24	0,57
		DDS	1,31	0,67
		HBA	1,17	0,45
20b	leicht zu lernen (1) - schwer zu lernen (5)	Gesamt	1,13	0,33
		DDS	1,11	0,32
		HBA	1,14	0,35
20c	gut verständlich (1) - schwer verständlich (5)	Gesamt	1,19	0,49
		DDS	1,25	0,6
		HBA	1,14	0,35
21	Wenn Sie als Fahrer eingegriffen haben, wie fanden Sie bei Ihrem Eingriff das Verhalten des SPA?			
21a	klar (1) - verwirrend (5)	Gesamt	1.17	0.58
		DDS	1.11	0.40
		HBA	1.22	0.72
21b	verständlich (1) - nicht verständlich (5)	Gesamt	1.14	0.51
		DDS	1.14	0.54
		HBA	1.14	0.49
22	Im Vergleich mit der Fahrt mit ACC: Das Bedien-Element von SPA war im Vergleich dazu ...			
	einfacher (1) - komplizierter (5)	Gesamt	2,77	0,79
		DDS	2,89	0,57
		HBA	2,66	0,97
23	Im Vergleich mit der Fahrt mit ACC: Die Anzeige war im Vergleich dazu ...			
	einfacher (1) - komplizierter (5)	Gesamt	3,13	0,73
		DDS	3,06	0,86
		HBA	3,20	0,58





## **Anhang D: Anzeigekonzepte für die Elemente DDS und HBA**

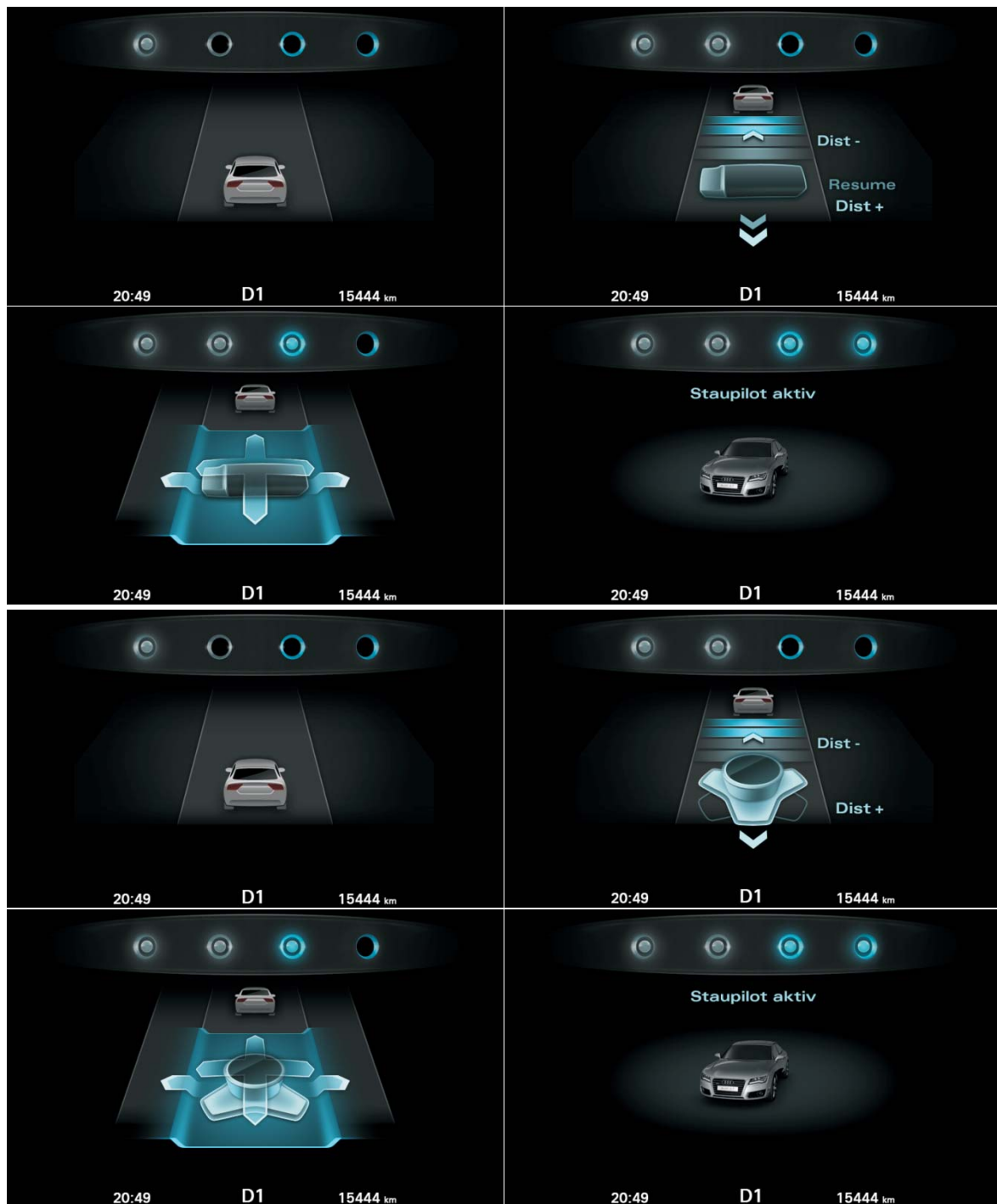


Abbildung: Anzeigekonzept für das Automationspektrum für die Elemente Hebel und HBA



## **Anhang E: Vernetzung des Gesamtsystems des Versuchsträgers**

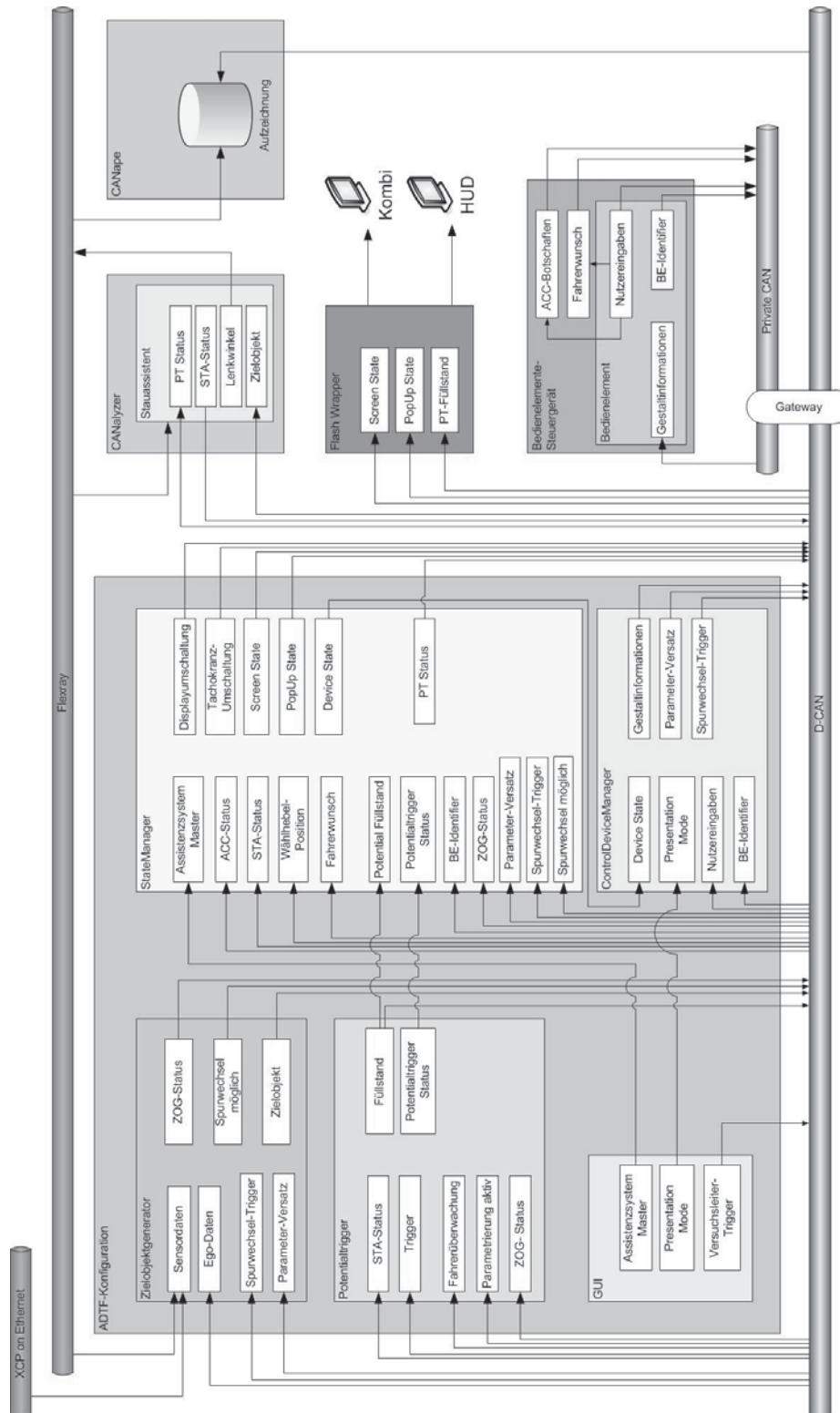


Abbildung: Vernetzung des Gesamtsystems des Versuchsträgers nach [2]

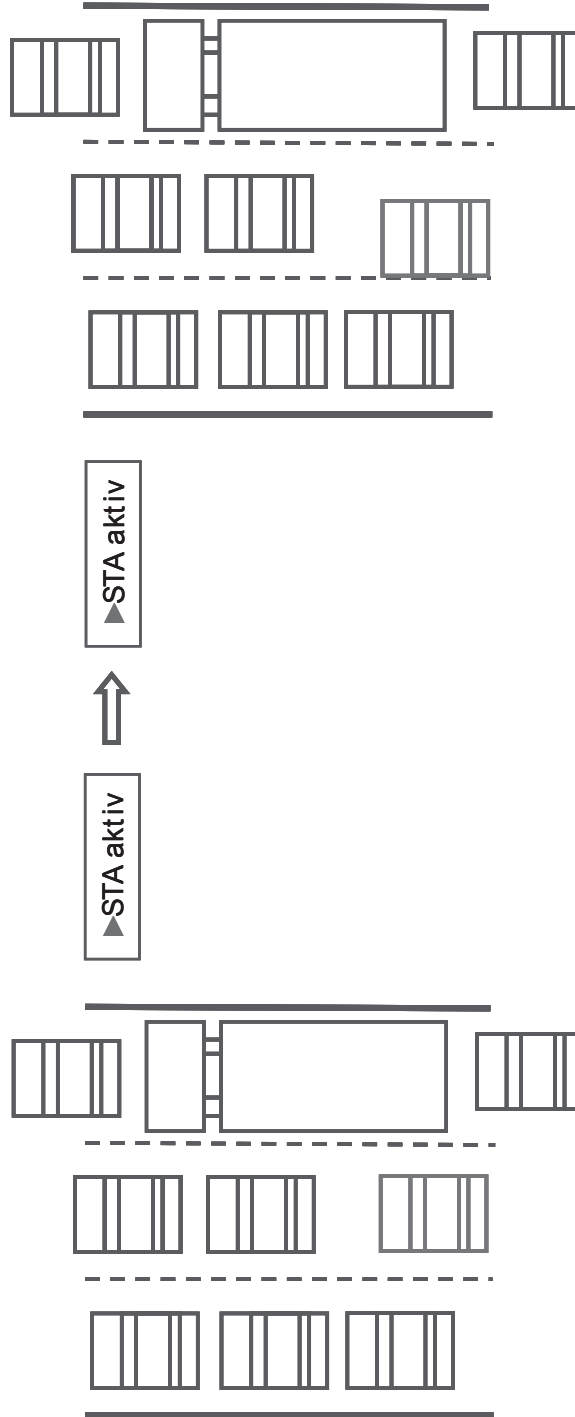


## **Anhang F: Situationsbeschreibung Vorstudie**



Studie Prinzipbedienteile FAS

Situation „Spurversatz“ (Versetzen des Fahrzeugs innerhalb der eigenen Fahrspur)



## Studie Prinzipbedienteile FAS



### **Situationsbeschreibung „Spurversatz“**

Sie befinden sich immer noch im Stau auf Autobahn. Die Sicht nach vorne ist durch einen Kleinlaster eingeschränkt. Um die Staulänge abzuschätzen wollen Sie bei aktivem Stauassistenten Ihr Fahrzeug in der eigenen Fahrspur nach links versetzen.

Mit welcher Bedienhandlung am aktuellen Bedienelement verändern Sie die Querablage Ihres Fahrzeugs?



## Abbildungsverzeichnis

2.1	Allgemeiner Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis, adaptiert nach [73] . . . . .	6
2.2	3-Ebenen-Modell nach [92] und 3-Ebenen-Hierarchie der primären Fahraufgabe, adaptiert nach [36] . . . . .	12
2.3	Bewegungsmöglichkeiten eines Fahrzeugs, adaptiert nach [131] . . . . .	13
2.4	Parallel-simultane (oben), parallel-sequentielle (unten links), seriell-sequentielle und -simultane Kooperationsformen zwischen Mensch und Maschine, adaptiert nach [51] . . . . .	27
2.5	Körperebenen, Bewegungsmöglichkeiten des Hand-Arm-Systems, Gelenkausschläge der Hand und Bewegungszuordnung von funktionellen und anatomischen Achsen nach [20] . . . . .	32
2.6	Sensorik und zugehörige Messbereiche für FAS am Beispiel AUDI A6 nach [45] . . . . .	35
2.7	ACC-Bedienelemente der BMW AG und der AUDI AG, adaptiert nach [10], [5] und [130] . . . . .	36
2.8	ACC-Anzeige-konzept eines AUDI A6 nach [4] . . . . .	37
2.9	Lenkradähnliche Bedienelemente aus [23] (oben), [114] (unten links) und [17] . . . . .	46
2.10	Bedienkonzepte mit stickähnlichen Betätigungselementen nach [35] (oben links, unten links), [113] (oben rechts) und [1] . . . . .	47
2.11	Bedienkonzepte zur Infotainmentbedienung aus [116] (oben links), [22] (oben rechts), [10] (unten links) und [83] . . . . .	48
2.12	Forschungsansätze für form-variable Bedienelemente nach [110] (links), [87] (rechts oben) und [109] . . . . .	49
3.1	Festlegung eines Automationsspektrums und Zuordnung von FAS . . . . .	60
3.2	Funktionslogik des Potentialtriggerkonzepts, adaptiert nach [59] . . . . .	77
3.3	Fuzzy-Sets für die Eingangsgrößen und Ergebnis-Set für die Ausgangsgröße der Potentialtrigger <i>Fuzzy Logic</i> , adaptiert nach [59] . . . . .	78
3.4	Allgemeine Darstellung der Parameter- und Manöverschnittstelle (PMS), adaptiert nach [36] . . . . .	86
3.5	Prinzipdarstellung Reduziertes Konzept <i>Standardbedienelemente</i> , adaptiert nach [100] durch [43] . . . . .	90
3.6	Prinzipdarstellung Integratives Konzept <i>Hebel</i> nach [100] . . . . .	95
3.7	Prinzipdarstellung Integratives Konzept <i>Handballenablage</i> , adaptiert nach [100] durch [43] . . . . .	99
3.8	Prinzipdarstellung Integratives Konzept <i>Drehdrücksteller</i> , adaptiert nach [100] durch [43] . . . . .	101
3.9	Prinzipdarstellung Aufgeteiltes Konzept <i>Gabel</i> , adaptiert nach [100] durch [43] . . . . .	105
3.10	Prinzipdarstellung Aufgeteiltes Konzept <i>Touch</i> , adaptiert nach [100] durch [43] . . . . .	107
4.1	Versuchsträger A7 mit Erweiterungen nach [2] . . . . .	121
4.2	Parametrierung und Wechselmanöver auf Basis des virtuelles Zielobjekts nach [2] . . . . .	126
4.3	Prinzipbedienteile <i>Hebel</i> (links) und <i>Handschlitten</i> mit ihren Freiheitsgraden nach [7] . . . . .	129



4.4	Ergonomische Auslegung der Mittelkonsole auf Basis der Erreichbarkeiten der Nutzerpopulation nach [100] . . . . .	133
4.5	Prototypische Umsetzung und Betätigungsmöglichkeiten des integrativen Stellelements <i>Hebel</i> für die Modi MF (oben links), TA (oben rechts), VA (mitte links) und AUTON (mitte rechts) . . . . .	135
4.6	Qualitativer Betätigungskraftverlauf des integrativen Stellelements <i>Hebel</i> , adaptiert nach [2] . . . . .	136
4.7	2D-Kraftverlauf und Betätigungsverlauf zur <i>Parametrierung</i> (oben) und <i>Manöverbeauftragung</i> (unten) . . . . .	137
4.8	Prototypische Umsetzung und Betätigungsmöglichkeiten des integrativen Stellelements <i>DDS</i> für die Modi MF (oben links), TA (oben rechts), VA (mitte links) und AUTON (mitte rechts) . . . . .	140
4.9	Prototypische Umsetzung und Betätigungsmöglichkeiten des integrativen Stellelements <i>HBA</i> für die Modi MF (oben links), TA (oben rechts), VA (mitte links) und AUTON (mitte rechts) . . . . .	143
4.10	Anzeigekonzept für das Automationsspektrum am Beispiel <i>DDS</i> für die Modi MF (oben links), TA (oben rechts), VA (unten links) und AUTON . . . . .	145
4.11	Vernetzung der Subsysteme im Versuchsträger nach [2] . . . . .	147
5.1	Anzeigen im Mitten- und Head-Up-Display für Potentialtrigger-Fahrversuch . . . . .	154
5.2	Teststrecke der UniBW München mit Wendepunkten (A, B, C), Baustelle (D) und Ausfahrt mit Luftauto (E, F), adaptiert nach [54] . . . . .	157
5.3	Akute Übernahme-situationen <i>Einscherer</i> (links) und <i>Luftauto</i> nach [54] . . . . .	158
5.4	Subjektive Bewertung des Stauassistenten in Verbindung mit dem Potentialtriggerkonzept	161
5.5	Subjektive Bewertung der in Abhängigkeit der Potentialtrigger-Konfiguration geforderten Interaktionshäufigkeit . . . . .	162
5.6	Fehlerhäufigkeit bei der Bedienung des Potentialtriggers in Abhängigkeit der Systemausprägung . . . . .	163
5.7	Reaktionszeiten der Pbn bei den FÜAn in Abhängigkeit der Systemausprägung . . . . .	164
5.8	Subjektive Wahrnehmung der interstrukturellen Moduswechsel . . . . .	174
5.9	Subjektive Bewertung der Zeigerwirkung der Bedienelemente <i>HBA</i> und <i>DDS</i> . . . . .	174
5.10	Subjektive Bewertung der unterschiedlichen Stellelemente zur Geschwindigkeitseinstellung des ACCs . . . . .	175
5.11	Subjektive Bewertung der Bedienhandlung zur Einstellung des Spurversatzes . . . . .	175
5.12	Subjektive Bewertung der Bedienung von Wechselmanövern . . . . .	176
5.13	Subjektiv erlebtes inneres Modell des Modus VA . . . . .	177
5.14	Subjektive Evaluierung der Bedienung im vergleichenden Fragebogen, Fragen 24, 25 (N=35) und 30 (N=33) . . . . .	178
5.15	Mittlere Fehlerhäufigkeiten bei der Interaktion mit dem Modus VA . . . . .	180

## Tabellenverzeichnis

2.1	Anforderungsliste für ein Bedienkonzept des automatisierten Fahrens, adaptiert nach [100]	55
3.1	Bewertung der Bedienkonzepte des automatisierten Fahrens auf Basis der Anforderungsliste aus Tabelle 2.1	117
4.1	Schnitte der Erreichbarkeitsflächen für F05 und M95, adaptiert nach [100]	134
4.2	Funktionale Belegung der integrativen Bedienelemente	144
4.3	Subsysteme der technischen Umsetzung	149
5.1	Triggerzeiten i.A. der Systemausprägung des Potentialtriggers	155
5.2	Übernahmesituationen und ausgeführte Nebentätigkeiten	159
5.3	Beurteilung des STA und des Potentialtriggers im Abschlussfragebogen	160
5.4	Ergebnis der Expertenevaluierung	172
5.5	Fehlerhäufigkeiten bei der Bedienung der Modi TA und VA	179



## Abkürzungsverzeichnis

AALA	AUDI active lane assist
ABS	Anti-Blockier-System
ACC	Adaptive Cruise Control
ACC S&G	Adaptive Cruise Control mit Stop & Go
ADTF	Automotive Data- and Time-Triggered Framework
AUTON	Autonomie
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
CAPL	CAN Access Programming Language
CDM	Control Device Manager
CoP	Code of Practice
D-CAN	Dashboard-CAN
DDS	Drehdrücksteller
EPB	Elektronische Parkbremse
EPS	Electronic Power Steering
ESC	Electronic Stability Control
FAS	Fahrerassistenzsysteme
FSRA	Full Speed Range Adaptive Cruise Control
FÜA	Fahrerübernahmeaufforderung
GRA	Geschwindigkeitsregelanlage
HBA	Handballenablage
HCA	Heading Control Assist
HCCA	Heading Control Center Assist
HMI	Human-Machine-Interface
HUD	Head-Up-Display
LDW	Lane Departure Warning
LKAS	Lane Keeping Assistance System
LOT	Lock-on-Target
LRR	Long-Range-Radarsensoren
MF	Manuelle Fahrt
MMI	Multimedia-Interface
Pbn	Probanden

---

PKW	Personenkraftwagen
PMS	Parameter- und Manöverschnittstelle
RoI	Region of Interest
SbW	Shift-by-Wire
Sifa	Sicherheitsfahrerschaltung
SM	State Manager
SPA	Spurassistent
STA	Stauassistent
STP	Staupilot
TA	Teilautomation
TTC	Time-to-Collision
VA	Vollautomation
VZE	Verkehrszeichenerkennung
ZOG	Zielobjektgenerator

## Literaturverzeichnis

- [1] AGCO GMBH: *Fendt Vario Joystick*. <http://www.fendt-isu.com/318.asp>, 2012. Zugriff am 19.03.2013.
- [2] ALBERT, M.: *Applikation und Integration neuer Bedienelemente für Fahrerassistenzsysteme*, 2012. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie, TU München (unveröffentlicht).
- [3] APPLE INC.: *Apple iPhone*. <http://www.apple.com/de/iphone/>, 2012. Zugriff am 19.03.2013.
- [4] AUDI AG: *Interfacedesign (exemplarisch) des Kombiinstrumentes im AUDI A6*, 2013. Unterlage AUDI Design (nicht veröffentlicht).
- [5] AUDI AG: *Interieur AUDI S7*. [http://www.audi.de/de/brand/de/neuwagen/a7/s7-sportback/erleben/multimedial\\_erleben.html](http://www.audi.de/de/brand/de/neuwagen/a7/s7-sportback/erleben/multimedial_erleben.html), 2013. Zugriff am 19.03.2013.
- [6] BADDELEY, A.: *Human Memory: Theory and Practice*. Psychology Press, 1997.
- [7] BAHLE, L.: *Konzeptskizze Prinzipbedienteile (unveröffentlicht)*, 2010.
- [8] BAINBRIDGE, L.: *Ironies of automation*. *Automatica*, 19(6):775–779, 1983.
- [9] BLASCHKE, C.: *Fahrerzustandserkennung zur Optimierung von Spurhalteassistenzsystemen*. Doktorarbeit, Universität der Bundeswehr München, 2011.
- [10] BMW AG: *BMW iDrive Controller, Multifunktionslenkrad mit ACC Bedieninsel und Interieur 5er*. <http://www.bmw.de/de/footer/publications-links/technology-guide/controller.html> <http://www.bmw.de/de/de/newvehicles/7series/sedan/2010/showroom/comfort/idrive.html>, 2012. Zugriff am 19.03.2013.
- [11] BOLTE, U.: *Das aktive Stellteil - ein ergonomisches Bedienkonzept*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 1992.
- [12] BORTZ, J. und N. DOERING: *Forschungsmethoden und Evaluation: Für Human- und Sozialwissenschaftler*. Springer, 2006.
- [13] BOUZOURAA, M. E.: *Belegungskartenbasierte Umfeldwahrnehmung in Kombination mit objektbasierten Ansätzen für Fahrerassistenzsysteme*. Dissertation, Technische Universität München, München, 2012.
- [14] BRAESS, H. und U. SEIFFERT: *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Vieweg + Teubner, 2007.

- [15] BRUDER, R. und M. DIDIER: *Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen*. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, S. 314–324. Vieweg + Teubner, 2009.
- [16] BRUMMER, M., W. SCHWERTBERGER und K. DÖRNER: *Aktive Gefahrenbremsung unter Berücksichtigung nutzfahrzeugspezifischer Aspekte*. In: *4. Tagung Sicherheit durch Fahrerassistenz*, 2010.
- [17] BUBB, H.: *Arbeitsplatz Fahrer. Eine ergonomische Studie*. *Automobil-Industrie*, 30(3):265–275, 1985.
- [18] BUBB, H.: *Informationswandel durch das System*. In: SCHMIDKTE, H. (Hrsg.): *Ergonomie*, Kap. 5.2, S. 333–390. Hanser Verlag, 3. Aufl., 1993.
- [19] BUBB, H.: *Systemergonomische Gestaltung*. In: SCHMIDKTE, H. (Hrsg.): *Ergonomie*, Kap. 5.3, S. 390–420. Hanser Verlag, 3. Aufl., 1993.
- [20] BULLINGER, H.: *Ergonomie: Produkt-und Arbeitsplatzgestaltung*. Teubner, 1994.
- [21] BULLINGER, H., H. JÜRGENS, W. ROHMERT und H. SCHMIDKTE (Hrsg.): *Handbuch der Ergonomie (Band 1 bis 5)*. Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, 2002.
- [22] CAR DESIGN NEWS: *Hyundai at CES 2011 - Applied Mouse-type Commander with Haptic Wheel and Motion Sensor*. <http://cardesignnews.com/site/home/display/store4/item213862/>, 2012. Zugriff am 19.03.2013.
- [23] CONCEPT CAR: *Bertone Filo Concept Car*. <http://features.conceptcar.co.uk/geneva2001/bertone.php>, 2001. Zugriff am 19.03.2013.
- [24] CONTINENTAL AG: *Leichtes Pulsieren im Gaspedal besser als Warnleuchten oder Töne*. [http://www.conti-online.com/generator/www/com/de/continental/presseportal/themen/pressemitteilungen/3\\_automotive\\_group/chassis\\_safety/press\\_releases/pr\\_2010\\_02\\_23\\_affp\\_hmi\\_de.html](http://www.conti-online.com/generator/www/com/de/continental/presseportal/themen/pressemitteilungen/3_automotive_group/chassis_safety/press_releases/pr_2010_02_23_affp_hmi_de.html), 2010. Pressemitteilung, Zugriff am 19.03.2013.
- [25] DAIMLER AG: *Bitte nicht einschlafen*. Techn. Ber. 2/2008, Daimler HighTechReport: Faszination Technologie, 2008.
- [26] DAIMLER COMMUNICATIONS: *Gelber Engel für aktive Sicherheit*, 2011.
- [27] DAVIS, K.: *The Hero: Charles A. Lindberg and the American Dream*. Doubleday, 1959.
- [28] DIN-33402-2 DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte*, 2006.
- [29] DIN-EN-894-1 DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Sicherheit von Maschinen - Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen - Teil 1: Allgemeine Leitsätze für Benutzer-Interaktion mit Anzeigen und Stellteilen*, 2009.
- [30] DIN-EN-894-3 DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: *Sicherheit von Maschinen - Ergonomische Anforderungen an die Gestaltung von Anzeigen und Stellteilen - Teil 3: Stellteile*, 2009.

- [31] DIN VDE 0119-207-5 DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V., VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK (VDE): *Zustand der Eisenbahnfahrzeuge - Leittechnik - Teil 207-5: Sicherheitsfahrerschaltung (Sifa)*, 2011.
- [32] DONG, Y., Z. HU, K. UCHIMURA und N. MURAYAMA: *Driver inattention monitoring system for intelligent vehicles: A review*. In: *Intelligent Vehicles Symposium, 2009 IEEE*, S. 875–880. IEEE, 2009.
- [33] DONGES, E.: *Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen*. Automobilindustrie, 2:183–190, 1982.
- [34] ECKERMANN, E.: *Vom Dampfwagen zum Auto - Motorisierung des Verkehrs*. Rowohlt Taschenbuch Verlag, 1981.
- [35] ECKSTEIN, L.: *Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeugs mit aktiven Sidesticks*. Doktorarbeit, Universität Stuttgart, 2001.
- [36] EHRHART, F.: *Entwicklung eines Bedienelement für Fahrerassistenzsysteme*, 2012. Bachelorarbeit an der Fakultät Maschinenbau, FH Ingolstadt (unveröffentlicht).
- [37] ELEKTROBIT AUTOMOTIVE GMBH: *EB Assist ADTF Fahrerassistenz*. <http://automotive.elektrobit.com/home/driver-assistance-software/eb-assist-adtf.html>. Zugriff am 19.03.2013.
- [38] ENDSLEY, M.: *Toward a theory of situation awareness in dynamic systems*. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 37(1):32–64, 1995.
- [39] ENGERT, S.: *Prototypische Entwicklung eines kombinierten Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzepts*, 2011. Diplomarbeit am Lehrstuhl für Ergonomie, TU München (unveröffentlicht).
- [40] FAERBER, B.: *Erhoelter Fahrernutzen durch Integration von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen*. In: MAURER, M. UND STILLER, C. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*, S. 141–160. Springer Verlag, 2005.
- [41] FAERBER, B. und B. FAERBER: *Sicherheitsorientierte Bewertung von Anzeige- und Bedienelementen in Kraftfahrzeugen*. FAT Schriftenreihe, (64), 1987.
- [42] FLEMISCH, F., C. ADAMS, S. CONWAY, K. GOODRICH, M. PALMER und P. SCHUTTE: *The H-metaphor as a guideline for vehicle automation and interaction*. NASA TM-2003-212672, 2003.
- [43] FORMVISION GMBH: *Arbeitsunterlage zu Bedienkonzepten des Automatisierten Fahrens*, 2013. Arbeitsunterlage (nicht veröffentlicht).
- [44] FREYER, J.: *Vernetzung von Fahrerassistenzsystemen zur Verbesserung des Spurwechselverhaltens von ACC*. Doktorarbeit, Universität der Bundeswehr München, 2008.
- [45] FREYER, J., L. WINKLER, R. HELD, S. SCHUBERTH, R. KHLIFI und M. POPKEN: *Assistenzsysteme für die Laengs- und Querfuehrung*. Automobiltechnische Zeitschrift ATZ extra, S. 181–187, Januar 2011.
- [46] GASSER, T., C. ARZT, A. M., B. A., L. BÜRKLE, A. EIER, F. FLEMISCH, D. HÄCKER, T. HESSE, W. HUBER, C. LOTZ, M. MAURER, S. RUTH-SCHUMACHER, J. SCHWARZ und W. VOGT:



- Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung - Gemeinsamer Schlussbericht der Projektgruppe*, 2012.
- [47] GEISER, G.: *Mensch-Maschine-Kommunikation im Kraftfahrzeug*. ATZ, 87:74–77, 1985.
- [48] GOPPELT, G.: *Verkehrsforschungsinitiative INVENT präsentiert Ergebnisse*. Automobiltechnische Zeitschrift ATZ, 107:486, 2005.
- [49] GÖTZ, M.: *Die Gestaltung von Bedienelementen unter dem Aspekt ihrer kommunikativen Funktion*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 2007.
- [50] HAJOS, A.: *Sinnesleistungen und Wahrnehmung*. In: SCHMIDKTE, H. (Hrsg.): *Ergonomie*, Kap. 5.2, S. 333–390. Hanser Verlag, 3. Aufl., 1993.
- [51] HAKULI, S., R. BRUDER, F. FLEMISCH, C. LOEPER, H. RAUSCH, M. SCHREIBER und H. WINNER: *Kooperative Automation*. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, S. 647–656. Vieweg + Teubner, 2009.
- [52] HEISE: *Versenkbares Lenkrad von TRW*. <http://www.heise.de/autos/artikel/Versenkbares-Lenkrad-von-TRW-1275056.html>, 2012. Zugriff am 19.03.2013.
- [53] HEISSING, B., M. ERSOY und S. GIES: *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen, Fahrdynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven*. Springer DE, 2011.
- [54] HERMERT, S. und M. KIEHM: *Evaluierung des Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzept Potentialtrigger*, 2011. Studienarbeit am Lehrstuhl für Arbeitswissenschaft, UniBW München (unveröffentlicht).
- [55] HOLST, E.: *Aktive Leistungen der menschlichen Gesichtswahrnehmung*. Studium Generale, 10:232 – 243, 1957.
- [56] HORST, R. v. D. und J. HOGEMA: *Time-To-Collision and Collision Avoidance Systeme*, 1993.
- [57] HÖRWICK, M.: *Sicherheitskonzept für hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 2011.
- [58] HÖRWICK, M. und K.-H. SIEDERSBERGER: *Strategy and Architecture of a Safety Concept for Fully Automatic and Autonomous Driving Assistance Systems*, 2010. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, San Diego, USA.
- [59] HÖRWICK, M. und M. WIMMER: *Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzept für hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme*. In: *3. Fachtagung Fahrermodellierung*, Bd. Reihe 22 Mensch-Maschine-Systeme d. Reihe *Fortschritt-Berichte VDI*, S. 123 – 135. Kolrep, H.; Jürgensohn, T., 2010.
- [60] HÖRWICK, M., M. WIMMER, K.-H. SIEDERSBERGER und N. OSTGATHE: *EP2392501 Verfahren zur Steuerung des Betriebs eines vollautomatischen, zur unabhängigen Fahrzeugführung ausgebildeten Fahrerassistenzsystems eines Kraftfahrzeugs und Kraftfahrzeug*, 2011.
- [61] HUANG, P.: *Regelkonzepte zur Fahrzeugführung unter Einbeziehung der Bedienelementeigenschaften*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 2004.

- [62] HUNSDORFER, A.: *Entwicklung und Konstruktion eines alternativen Bedienelements für Fahrerassistenzsysteme der Führungsebene*, 2011. Semesterarbeit am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, TU München (unveröffentlicht).
- [63] ISO15622:2010 INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION: *Adaptive Cruise Control Systems - Performance requirements and test procedures*, 2010.
- [64] ISO22179:2009 INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION: *Full speed range adaptive cruise control (FSRA) systems - Performance requirements and test procedures*, 2009.
- [65] JÜRGENSOHN, T. und K. TIMPE: *Kraftfahrzeugführung*. Springer, 2001.
- [66] KAUER, M., S. M. und R. BRUDER: *How to conduct a car? A design example for maneuver based driver-vehicle interaction*. In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, S. 1214–1221, 2010.
- [67] KIENLE, M.: *Ergonomisches Praktikum - Systemergonomie - Praktikumsskript*. (unveröffentlichtes) Praktikumsskript zum Ergonomischen Praktikum des Lehrstuhls für Ergonomie der Technischen Universität München, 2009.
- [68] KINECT HACKS: *Kinect Hacks*. <http://www.kinecthacks.com>, 2012. Zugriff am 19.03.2012.
- [69] KINECT HACKS NET: *Skype Clone Kinect Hack*. <http://kinect-hacks.net/kinect-hacks/skype-clone-kinect-hack>, 2012. Zugriff am 10.05.2012.
- [70] KLEEN, A., G. SCHMIDT, J. SISON und B. LATHROP: *Haptische Empfehlungen von Ausweichmanövern in Kollisionssituationen*. In: *4. Fachtagung Sicherheit durch Fahrerassistenz*. Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, April 2010.
- [71] KÖNIG, J.-G.: *Die Geschichte des Automobils*. Philipp Reclam jun., 2010.
- [72] KRAMER, O.: *Fuzzy-Logik*. Computational Intelligence, S. 75–99, 2009.
- [73] LANGE, C.: *Wirkung von Fahrerassistenz auf der Führungsebene in Abhängigkeit der Modalität und des Automatisierungsgrades*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 2008.
- [74] LINDBERG, T.: *Entwicklung einer ABK-Metapher für gruppierte Fahrerassistenzsysteme*. Doktorarbeit, Technische Universität Berlin, 2012.
- [75] LINDBERG, T., T. SCHALLER und B. GRADENEGGER: *Stauassistentz - Unterstützung des Fahrers durch Übernahme der Quer- und Längsführung im Stau*. In: *Der Fahrer im 21. Jahrhundert - Human Machine Interface*, 4. VDI Fachtagung, 2007.
- [76] LINDSAY, P. H. und D. A. NORMAN: *Human Information Processing. An Introduction to Psychology*. 1972.
- [77] MACKWORTH, N.: *Researches on the measurement of human performance*. In: SINAIKO, H. (Hrsg.): *Selected Papers on Human Factors in the Design and Use of Control Systems*, S. 174–331. Dover Publications, 1950.

- [78] MATZKA, S.: *Konzeptionierung, Durchführung und Auswertung einer Evaluierungsstudie für Bedienkonzepte hochautomatisierter Fahrerassistenzsysteme*, 2012. Masterarbeit am Lehrstuhl für Arbeitswissenschaft, UniBW München (unveröffentlicht).
- [79] MAURER, M.: *Fahrerassistenzsysteme im Kraftfahrzeug*. Materialien zur Vorlesung, Technische Universität München, 2006.
- [80] MICROSOFT CORP.: *Xbox 360 Wireless Speed Wheel*. <http://www.xbox.com/de-DE/Xbox360/Accessories/Controllers/Xbox-360-Wireless-Speed-Wheel>, 2011. Zugriff am 19.03.2013.
- [81] MILLER, C. und R. PARASURAMAN: *Designing for flexible interaction between humans and automation: Delegation interfaces for supervisory control*. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 49(1):57, 2007.
- [82] MUIGG, A.: *Implizites Workloadmanagement*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 2009.
- [83] MV MULTIVISION MEDIA GMBH: *Touchwheel Audi A3*. <http://www.motorvision.de/audi/a3/audi-a3-erste-bilder-neuen-48423.html>, 2013. Zugriff am 19.03.2013.
- [84] NINTENDO OF EUROPE GMBH: *Wii Controller*. <http://www.nintendo.de/Wii/Zubehor/Zubeh-ouml-r-Wii-Nintendo-Deutschland-626430.html>, Mai 2011. Zugriff am 19.03.2013.
- [85] PENKA, A.: *Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 2001.
- [86] PETERMANN, I. und M. KISS: *Die Rolle des Fahrers im Spektrum von Automation und Transition*. In: VERKEHRSTECHNIK, V. F. UND (Hrsg.): *Fahrer, Fahrerunterstützung und Bedienbarkeit / 5. VDI-Tagung Der Fahrer im 21. Jahrhundert, Braunschweig, 4. und 5. November 2009. VDI Fahrzeug- und Verkehrstechnik*, Nr. 2085 in *VDI-Berichte*, S. 153 – 166. VDI Wissensforum GmbH, 2009.
- [87] PETROV, A., M. SCHMID und T. MAIER: *HMI with Adaptive Control Elements*. *Automobiltechnische Zeitschrift ATZ*, 8:50–55, 2008.
- [88] PFEFFER, P. und M. HARRER: *Lenkungshandbuch - Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen*, Bd. 1. 2011.
- [89] PFEFFER, P. und M. HARRER: *Lenkungshandbuch - Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen*, Bd. 1., Kap. Elektromechanische Lenksysteme (EPS), S. 345 – 406. 2011.
- [90] PFEFFER, P. und M. HARRER: *Lenkungshandbuch - Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen*, Bd. 1., Kap. Überblick - Fahrerassistenzsystemfunktionen, S. 457 – 470. 2011.
- [91] PONN, J. und U. LINDEMANN: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Systematisch von Anforderungen zu Konzepten und Gestaltungslösungen*. Springer, 2011.

- [92] RASMUSSEN, J.: *Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models.*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 13(3):257–266, 1983.
- [93] RASSL, R.: *Ablenkungswirkung tertiärer Aufgaben im Pkw.* Doktorarbeit, Technische Universität München, Universitätsbibliothek, 2004.
- [94] RESPONSE3: *Code of Practice zur Entwicklung und Validierung von Fahrerassistenzsystemen (ADAS)*, 2006.
- [95] ROCKWELL, T.: *Eye movement analysis of visual acquisition in driving: an overview.* In: *Proceedings of the 6th Conference of the Australian Road Research Board*, Bd. 6, S. 316–331, 1972.
- [96] ROHMERT, W.: *Grundlagen der technischen Arbeitsgestaltung.* In: SCHMIDKTE, H. (Hrsg.): *Ergonomie*, Kap. 6.4, S. 493–502. Hanser Verlag, 3. Aufl., 1993.
- [97] ROSSBERG, R. R.: *Geschichte der Eisenbahn.* Sigloch Service Ed., 1977.
- [98] RUEHMANN, H.: *Isometrische Stellungskräfte an Stellteilen und Betriebsmitteln.* In: SCHMIDKTE, H. (Hrsg.): *Ergonomie*, Kap. 6.3, S. 485–492. Hanser Verlag, 3. Aufl., 1993.
- [99] SCHALLER, T.: *Stauassistenz - Längs- und Querführung im Bereich niedriger Geschwindigkeit.* Doktorarbeit, Technische Universität München, 2009.
- [100] SCHEIFFERT, F.: *Entwicklung und Aufbau eines Konzeptes zur Bedienung des automatisierten Fahrens*, 2011. Diplomarbeit am Institut für Konstruktionstechnik und Design, Universität Stuttgart (unveröffentlicht).
- [101] SCHÄFER, T.: *Statistik II - Inferenzstatistik.* VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2011.
- [102] SCHLICK, C.: *Arbeitswissenschaft.* Springer, 2009.
- [103] SCHMIDKTE, H.: *Arbeitsplatzgestaltung.* In: SCHMIDKTE, H. (Hrsg.): *Ergonomie*, Kap. 6.5, S. 502–520. Hanser Verlag, 3. Aufl., 1993.
- [104] SCHMIDT, R.: *Integrative Funktion des Zentralnervensystems.* In: SCHMIDKTE, H. (Hrsg.): *Physiologie des Menschen.* Springer Berlin, Heidelberg, New York, 1976.
- [105] SCHMIDT, R. und F. LANG: *Physiologie des Menschen: Mit Pathophysiologie.* Springer Medizin Verlag, 2007.
- [106] SCHMIDTKE, H.: *Ergonomie.* Hanser, 1993.
- [107] SCHNEID, M.: *Entwicklung und Erprobung eines kontaktanalogen Head-up-Displays im Fahrzeug.* Doktorarbeit, Universitätsbibliothek der TU München, 2009.
- [108] SCHRAMM, F.: *Durchführung und Auswertung einer Evaluierungsstudie zum "Bedien- und Interaktionskonzept Potenzialtrigger"*, 2012. Masterarbeit am Lehrstuhl für Arbeitswissenschaft, UniBW München (unveröffentlicht).
- [109] SENDLER, J.: *Entwicklung und Gestaltung variabler Bedienelemente für ein Bedien- und Anzeigesystem im Fahrzeug.* Doktorarbeit, Technische Universität Dresden, 2007.

- [110] TECHNOLOGY RESEARCH NEWS: *Haptic Chameleon - Shape-shifting remakes interfaces*. [http://www.trnmag.com/Stories/2004/051904/Shape-shifting\\_remakes\\_interfaces\\_051904.html](http://www.trnmag.com/Stories/2004/051904/Shape-shifting_remakes_interfaces_051904.html), 2012. Zugriff am 19.03.2013.
- [111] TOYOTA MOTOR CORP.: *Safety Driver Monitoring System*. <http://www.lexus.eu/range/ls/key-features/safety/safety-driver-monitoring-system.aspx>, 2012. Zugriff am 14.05.2012.
- [112] TREFFLICH, B.: *Videogestützte Überwachung der Fahreraufmerksamkeit und Adaption von Fahrerassistenzsystemen*. Doktorarbeit, Technische Universität Ilmenau, 2010.
- [113] TRENDS DER ZUKUNFT: *Einhand Steuerung fürs Auto*. <http://www.trendsderzukunft.de/einhand-steuerung-furs-auto/2011/06/20/>, 2012. Zugriff am 18.03.2013.
- [114] TRW AUTOMOTIVE SAFETY SYSTEMS GMBH & CO.KG: *Lenkvorrichtung für ein Kraftfahrzeug*, 1999. Gebrauchsmusterschrift am Deutschen Patent- und Markenamt DE 29 07 180 U1.
- [115] UNITED NATIONS: *Convention on Road Traffic*, 1968.
- [116] VOLKSWAGEN AG: *Infotainmentsystem Discover Pro*. <http://www.volkswagen.de/de/navigation/discover-pro.html>, 2013. Zugriff am 19.03.2013.
- [117] WAGNER, C.: *Entwicklung eines Gesamtkonzepts zur Integration eines neuartigen Fahrerassistenzsystems in einen Versuchsträger*, 2012. Bachelorarbeit an der Fakultät Maschinenbau, FH Ingolstadt (unveröffentlicht).
- [118] WEILKES, M., L. BÜRKLE, T. RENTSCHLER und M. SCHERL: *Stauassistent - teilautomatisierte Fahrzeugführung mit kombinierter Längs- und Querregelung*. In: *13. Aachener Kolloquium fahrzeug- und Motorentchnik*, S. 789 – 802, 2004.
- [119] WIKIPEDIA: *Top-Down und Bottom-Up*. [http://de.wikipedia.org/wiki/Top-down\\_und\\_Bottom-up](http://de.wikipedia.org/wiki/Top-down_und_Bottom-up), 2012. Zugriff am 18.07.2013.
- [120] WIMMER, M., J. MEURLE und H. SACHER: *Vorrichtung zur Bedienung eines Systems zur automatischen Abstands- und/oder Geschwindigkeitsregelung - Bedienelement neben Pralltopf*, 2012. Patenteinreichung am Deutschen Patent- und Markenamt (21.02.2013).
- [121] WIMMER, M., J. MEURLE, H. SACHER und K.-H. SIEDERSBERGER: *Kraftwagen mit einer Fahrerassistenzeinrichtung und Verfahren zum Betreiben eines Kraftwagens - Aufgeteiltes Bedienkonzept für das automatisierte Fahren*, 2012. Patenteinreichung am Deutschen Patent- und Markenamt (offengelegt am 08.08.2013).
- [122] WIMMER, M., J. MEURLE, H. SACHER, K.-H. SIEDERSBERGER und F. SCHEIFFERT: *Vorrichtung zum automatisierten Führen eines Kraftwagens und Verfahren zum Betreiben eines Kraftwagens - Master-Slave Bedienkonzept für das vollautomatisierte Fahren*, 2012. Patenteinreichung am Deutschen Patent- und Markenamt (offengelegt am 08.08.2013).
- [123] WIMMER, M., H. SACHER und K.-H. SIEDERSBERGER: *Verfahren zum Betreiben eines Kraftwagens und Kraftwagen mit einem Fahrerassistenzsystem - Reduziertes Bedienkonzept für automatisiertes Fahren*, 2012. Patenteinreichung am Deutschen Patent- und Markenamt (offengelegt am 08.08.2013).

- [124] WIMMER, M., K.-H. SIEDERSBERGER, J. MEURLE und B. FÄRBER: *Evaluierung des Fahrerüberwachungs- und Interaktionskonzepts Potentialtrigger für hochautomatisierte Fahrerassistenzsysteme*. In: 28. VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und integrierte Sicherheit, Nr. 2166 in VDI-Berichte, 2012.
- [125] WIMMER, M., K.-H. SIEDERSBERGER, H. SACHER, F. EHRHART und F. SCHEIFFERT: *Kraftwagen mit einer Fahrerassistenzeinrichtung und Verfahren zum Betreiben eines Kraftwagens - Integratives Konzept Handballenablage zur Bedienung des Auto*, 2012. Patenteinreichung am Deutschen Patent- und Markenamt (offengelegt am 22.03.2013).
- [126] WIMMER, M., K.-H. SIEDERSBERGER, H. SACHER und A. HUNSDORFER: *Fahrerassistenzsystem für einen Kraftwagen, Kraftwagen und Verfahren zum Betreiben eines Fahrerassistenzsystems - Bedienelement (Dreh-Drück-Steller) für automatisiertes Fahren*, 2012. Patenteinreichung am Deutschen Patent- und Markenamt (offengelegt am 08.08.2013).
- [127] WIMMER, M., K.-H. SIEDERSBERGER, H. SACHER und F. SCHEIFFERT: *Kraftwagen mit einer Fahrerassistenzeinrichtung und Verfahren zum Betreiben eines Kraftwagens - Bedienelement (Bedienhebel) für automatisiertes Fahren*, 2012. Patenteinreichung am Deutschen Patent- und Markenamt (offengelegt am 08.08.2013).
- [128] WINNER, H., S. HAKULI, R. BRUDER, U. KONIGORSKI und B. SCHIELE: *Conduct-by-Wire-ein neues Paradigma für die Weiterentwicklung der Fahrerassistenz*. In: *Workshop Fahrerassistenzsysteme*, Bd. 2006, S. 112–125, 2006.
- [129] WINNER, H. und O. HEUSS: *X-by-Wire-Betätigungselemente - Überblick und Ausblick*. Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug - Cockpits für die Straßenfahrzeuge der Zukunft, S. 79 – 113, März 2005.
- [130] YAHOO INC.: *AUDI ACC Lenkstockhebel und Interieur S7*. <http://www.flickriver.com/photos/m25audi/tags/newaudia4/>, 2013. Zugriff am 19.03.2013.
- [131] ZOMOTOR, A.: *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten*. Nr. 10. Vogel, 1987.







