

# 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 *autonomer* 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])

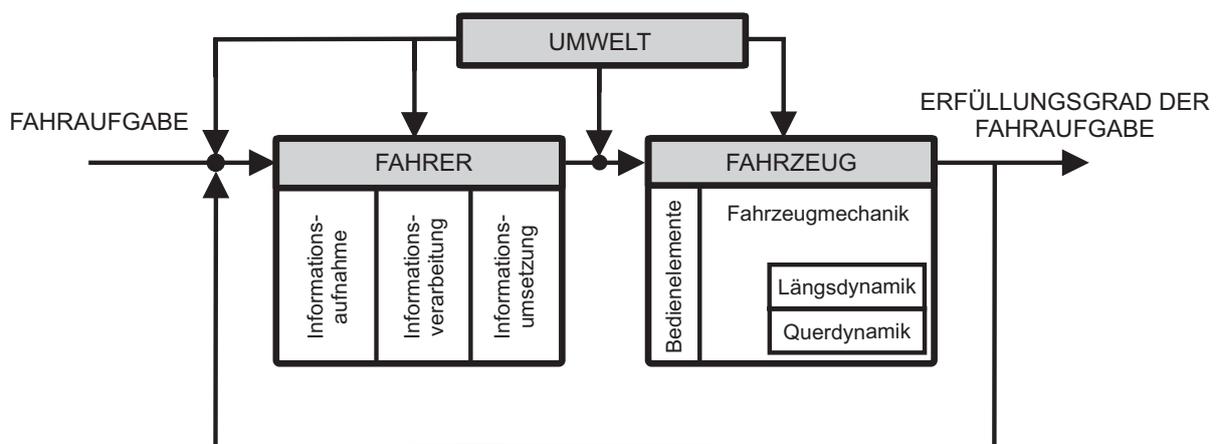


Abbildung 2.1: Allgemeiner Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis, adaptiert nach [73]

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 Fingermuskulatur 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. Systemintitiierte 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 eigenen 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

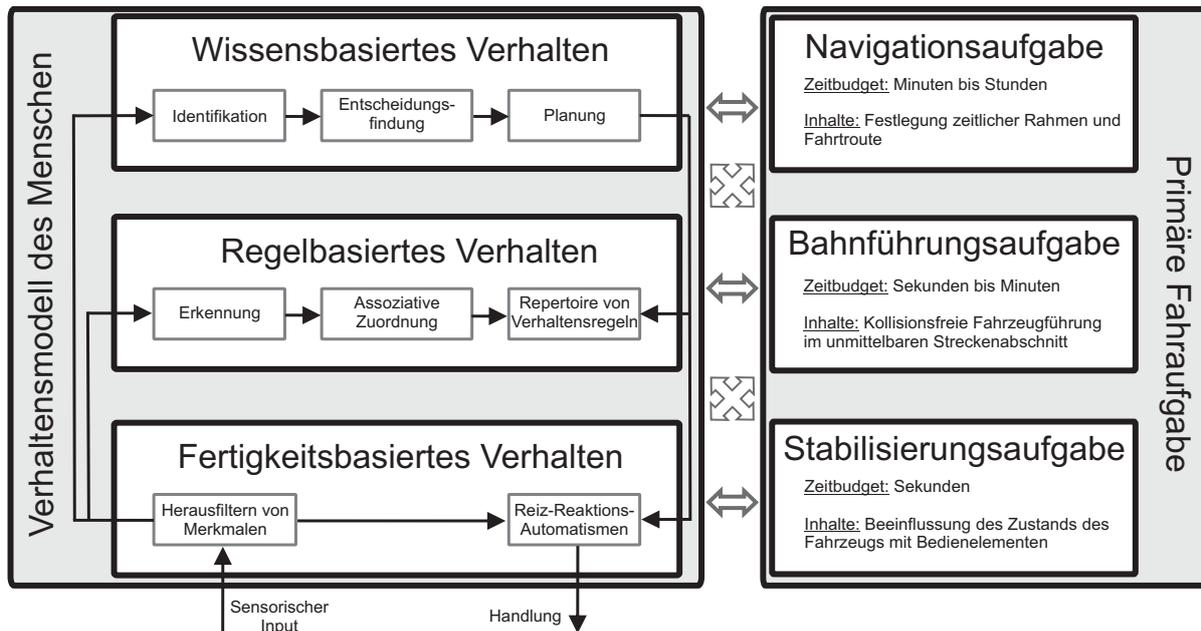


Abbildung 2.2: 3-Ebenen-Modell nach [92] und 3-Ebenen-Hierarchie der primären Fahraufgabe, adaptiert nach [36]

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.