



*Eben habe ich zwar ein gutes Auto entwickelt,  
aber es ist schlecht genug, um es trotzdem  
wieder verbessern zu können.*

*August Horch*

## **Kapitel 1**

### **Einführung**

Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Produkte und Integration zusätzlicher Innovationen in das Fahrzeug war von Beginn an Ziel in der Automobilindustrie. Mit zunehmender Erfüllung des grundlegenden Mobilitätsgedankens bestimmen Vernetzung und Individualisierung des Fahrzeugs die aktuellen Entwicklungsziele. Die Internationalisierung erfordert zusätzlich eine verstärkte Berücksichtigung heterogener Kundenanforderungen in unterschiedlichen Fahrzeugmärkten (Ebel, Hofer & Genster, 2014). Die derzeitige Antwort aus Sicht der Hersteller ist eine stetige Erweiterung des Modellangebots bei gleichzeitig deutlich vergrößertem Funktionsumfang. Die dadurch steigende Komplexität der Produkte erfordert auch die Weiterentwicklung der zugehörigen Entwicklungsmethoden und -prozesse.



## 1.1 Motivation

Vor der breiten Verfügbarkeit von Hochleistungs-Computersystemen war eine rein fahrzeugbasierte Entwicklung in Form von Mess- und Testfahrten mittels realer Fahrzeuge der gängige Standard. Aus heutiger Sicht gestaltet sich dieser Prozess, neben dem finanziellen Aspekt beim Aufbau und der Erprobung von Prototypen- und Versuchsfahrzeugen, vor allem als zu zeitintensiv, um die weiter steigende Zahl an Modellen vollständig abdecken zu können. Eine etablierte Strategie ist es deshalb, den Einsatz virtueller Methoden zu forcieren und bei validen Ergebnissen den Realversuch zu ersetzen (Widmann & Hackenberg, 2013).

Der Begriff des Computer-Aided-Engineering (CAE) umschreibt computerbasierte Verfahren, die auf Basis virtueller Modelle die Möglichkeit bieten, Aussagen zu den Eigenschaften eines Fahrzeugs zu treffen. Ihr Einsatz beginnt bereits in der Konzeptphase, dem ersten Abschnitt des Produktentstehungsprozesses. Nach Widmann (2013) zählt dazu, abgesehen von wenigen Ausnahmen wie beispielsweise der Aeroakustik, bereits ein Großteil der Umfänge der Fahrzeugentwicklung. Weiterhin bieten diese Verfahren in der nachgelagerten Serienentwicklungsphase die Chance, Realversuche zu substituieren oder deren Anzahl zu minimieren.

Auch zur Entwicklung des Fahrverhaltens eines Fahrzeugs sind heute bereits ab der Konzeptphase valide Berechnungsmethoden verfügbar, um die fahrdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs abzusichern. Zu Beginn der Serienentwicklungsphase werden, sobald erste Versuchsfahrzeuge verfügbar sind, parallel Messungen und Versuche am Realfahrzeug durchgeführt. Zum Ende des Entwicklungsprozesses wird die Feinabstimmung fast ausschließlich am Realfahrzeug vorgenommen.

Für die Bewertung der fahrdynamischen Eigenschaften werden während der Entwicklung auch subjektive Kennwerte herangezogen. Wie in Kapitel 3 weiter ausgeführt wird, ist das vom Kunden erlebbare Fahrverhalten bestimmend für den Charakter einer Marke und wird deshalb je nach Hersteller auch anhand subjektiver Kriterien verschieden ausgelegt. Zum anderen interagiert der Mensch als Fahrer in mehreren Regelkreisläufen mit dem Fahrzeug, im Detail in Kapitel 2 beschrieben. Da hier individuelle Fähigkeiten und Verhaltensweisen zu berücksichtigen sind, ist während des Abstimmprozesses ein menschliches Subjektivurteil zur Beherrschbarkeit des Fahrzeugs durch erfahrene Entwickler unverzichtbar. Bislang liegt der Vorteil des physischen Entwicklungsprozesses in der Durchgängigkeit von objektiver Messung zu subjektiver Erprobung am realen Fahrzeug. Die virtuelle Entwicklung im Bereich der Fahrdynamik hingegen bietet nur die Möglichkeit der Ermittlung objektiver Kenngrößen.

Um aber eine Reduzierung des physischen Erprobungsbedarfs realisieren zu können, werden virtuelle Methoden benötigt, die auch ein subjektiv geprägtes Erleben von Fahrdynamik ermöglichen.

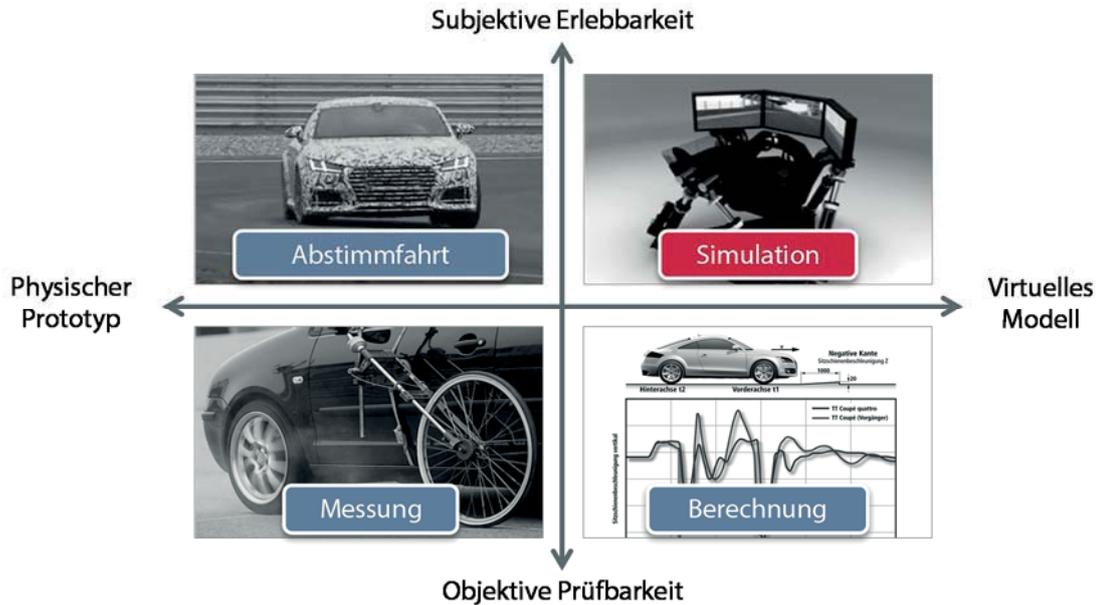


Abbildung 1-1: Erlebbarkeit und Prüfbarkeit in der virtuellen und realfahrzeugbasierten Fahrdynamikentwicklung

Wie in Abbildung 1-1 schematisch dargestellt, bietet Fahrsimulation die geforderte Kombination aus virtueller und zugleich subjektiv geprägter Entwicklungsmöglichkeit<sup>1</sup>. Für Fahrzeugeigenschaften aus dem Bereich der Innenraumentwicklung oder der Fahrerassistenzsysteme wird diese Methode erfolgreich angewandt.

Im Bereich der Fahrdynamik ist der Nachweis zu erbringen, dass ein entsprechend gestalteter Fahr Simulator als virtuelles Pendant zum Versuchsfahrzeug ebenfalls das Potential bietet, das Erleben dieser Gruppe von Fahrzeugeigenschaften zu gewährleisten. Zwei Aspekte sind dabei als wesentliche Vorteile zu betrachten. Zum einen kann eine Steigerung der Entwicklungsqualität erreicht werden. Dies liegt darin begründet, dass virtuelle Techniken wie die Fahrsimulation noch vor der Verfügbarkeit erster Versuchsfahrzeuge zu einem früheren Zeitpunkt im Prozess die Möglichkeit für Subjektivurteile bieten.

<sup>1</sup> Im Kontext dieser Arbeit wird bei der Darstellung einer virtuellen Umgebung von *Simulation* gesprochen. Computergestützte Berechnungsverfahren, für welche dieser Begriff ebenfalls geläufig ist, werden zur Unterscheidung bewusst als *Berechnung* bezeichnet.

Zum anderen bietet sich die Chance zur Reduktion von Versuchsfahrzeugen. Je nach Reifegrad bzw. Stadium im Entwicklungsprozess werden Realfahrzeuge zur Feinabstimmung fahrdynamischer Eigenschaften auch weiterhin zum Einsatz kommen. Durch die virtuelle Bearbeitung grundlegender Fragestellungen im Fahrsimulator kann aber auch für das Themengebiet der Fahrdynamik der Bedarf an ersten, besonders kostenintensiven Versuchsfahrzeugen gesenkt werden.

## 1.2 Begriffsdefinitionen

Zu Beginn erfolgt eine im fachlichen Kontext der Arbeit gültige Definition und Abgrenzung wesentlicher Terminologien. Dies sind die Begriffe Erlebbarkeit und Validität sowie Fahrverhalten, Fahrerverhalten und Fahrdynamik.

### 1.2.1 Erlebbarkeit

Erlebbarkeit wird im Rahmen dieser Arbeit als Eigenschaft einer Versuchsumgebung definiert, einen Sachverhalt „anschaulich“, also mit den menschlichen Sinnessystemen erfassbar, darzustellen.

Im Bereich virtueller Methoden wird ein hoher Grad der Erlebbarkeit durch eine ausreichend hohe Qualität bzw. Realitätsnähe der mittels der Simulationsumgebung erzeugten Sinneseindrücke erreicht.

Ergebnis eines erlebbar gestalteten Simulationssystems sind zwei Aspekte:

- Der Nutzer zeigt in der virtuellen Umgebung ein Verhalten, das auf das Verhalten in der realen Umgebung übertragbar ist.
- Der Nutzer wird befähigt, simulierte Eigenschaften und Funktionen in vergleichbarer Weise zu erfassen und zu bewerten, wie dies in einer realen Umgebung der Fall ist.

### 1.2.2 Fahrverhalten und Fahrerverhalten

„Als Fahrverhalten bezeichnet man allgemein die Reaktion des Fahrzeugs auf Fahrereingaben und auf Störungen wie beispielsweise Seitenwind oder Straßenunebenheiten“ (Pfeffer & Harrer, 2011, S. 125). Demnach bezieht sich der Begriff des Fahrverhaltens rein auf technische und physikalische Werte, die das Fahrzeug betreffen. Größen, die den Fahrer selbst bzw. seine Verhaltensweisen in Form von Regeleingriffen während der Fahraufgabe charakterisieren, werden unter dem Begriff des Fahrerhaltens zusammengefasst.

### 1.2.3 Fahrdynamik

„Die Fahrdynamik beschreibt alle Bewegungen des Fahrzeugs, d. h. die Wege, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen sowie die auf das Fahrzeug einwirkenden Kräfte und Momente“ (Heißing, Ersoy & Gies, 2013a, S. 38). Dabei werden nach den translatorischen Hauptbewegungsrichtungen des Fahrzeugaufbaus die Bereiche Längs-, Quer- und Vertikaldynamik unterschieden (Heißing et al., 2013a). Der Zusammenhang zum Begriff des Fahrverhaltens kann wie folgt definiert werden: „Fahrdynamik ist die analytische und experimentelle Beschreibung, Analyse, Optimierung und Bewertung des Fahrverhaltens vorwiegend mittels systemdynamischer und regelungstechnischer Methoden“ (Schindler, 2007, S. 7).

### 1.2.4 Validität

„Validität oder Gültigkeit eines Tests oder eines Meßverfahrens ist seine inhaltliche Meßgenauigkeit in Bezug auf ein bestimmtes Kriterium. Sie gibt an, ob und in welchem Maße ein Testverfahren mißt, was es messen soll“ (Koschnick, 1995, S. 641).

Nach Harting, Frey und Jude (2012) ist Validität das wesentliche Gütekriterium, da ohne die Gültigkeit eines Tests und seiner Interpretation die Überprüfung von Objektivität und Reliabilität belanglos ist. Eine weiterführende Diskussion des Validitätsbegriffs im thematischen Zusammenhang der Fahrsimulation findet sich in Kapitel 2.3.2.

## 1.3 Gliederung der Arbeit

Nach der Motivation der Arbeit in diesem ersten Kapitel werden in Kapitel 2 die zum Verständnis des Themengebiets notwendigen Grundlagen aufbereitet. Dabei erfolgt auch die Analyse des Forschungsumfelds und des Stands der Technik.

In Kapitel 3 wird basierend auf den beschriebenen Handlungsfeldern der Forschungsansatz entwickelt. Dazu werden die Annahmen dieser Arbeit spezifiziert, eine Abgrenzung zu vergleichbaren Ansätzen gezogen und die zentralen Thesen formuliert.

Kapitel 4, Kapitel 5 und Kapitel 6 bearbeiten in Form von Probandenstudien die zuvor definierten Fragestellungen. Es erfolgt jeweils eine Beschreibung der Zielsetzung, des Versuchsdesigns und der Ergebnisse wie auch die zugehörige Diskussion.

Die übergreifende Diskussion wird in Kapitel 7 geführt, der abschließende Ausblick definiert weitere Handlungsfelder.



## **Kapitel 2**

# **Grundlagen des Fahrerhaltens im Fahrsimulator**

Das zweite Kapitel führt in die Thematik der Arbeit ein. Das Vorgehen dazu orientiert sich an Abbildung 2-1. Zunächst werden in Kapitel 2.1 die regelungstechnischen Modellvorstellungen zur Interaktion von Mensch und Maschine eingeführt und der Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis abgeleitet. Darauf aufbauend beschäftigt sich Kapitel 2.2 mit dem Menschen als zentrales Element des Regelkreises. Insbesondere wird die menschliche Wahrnehmung hinsichtlich fahrdynamischer Größen analysiert. Kapitel 2.3 geht auf die Abbildung des zweiten wesentlichen Elements der Regelstrecke, das Fahrzeug in Form eines Fahrsimulators, ein. Verschiedene Forschungsansätze und der aktuelle Stand der Technik im Bereich der Fahrdynamikdarstellung werden beschrieben.

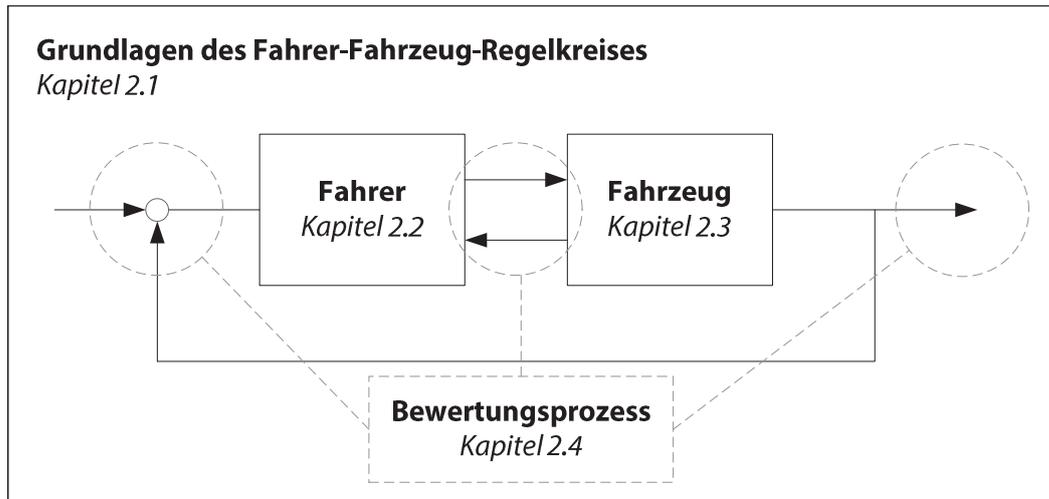


Abbildung 2-1: Schematischer Aufbau von Kapitel 2 anhand des Mensch-Maschine-Regelkreises nach Bernotat (1970) bzw. Bubb (1993)

Abschließend zeigt Kapitel 2.4 Möglichkeiten der subjektiven und objektiven Bewertung von Fahrdynamikeigenschaften. Wie in Abbildung 2-1 angedeutet, werden dazu Ein- und Ausgangsgrößen des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises verglichen, der Bewertungsprozess setzt aber auch direkt an den Schnittstellen zwischen Fahrer und Fahrzeug an.

## 2.1 Modelltheoretische Betrachtung der Fahrzeugführung

Das Zusammenspiel des Fahrers mit seinem Fahrzeug bildet ein komplexes System aus hierarchischen Regelkreisläufen (Bubb, 1993). Die Strukturierung der Fahraufgabe in verschiedene Ebenen wird zunächst beschrieben, anschließend der Zusammenhang zu anderen Modellen hergestellt. Abschließend wird auf die Schnittstellen zwischen Fahrer und Fahrzeug eingegangen.

### 2.1.1 Strukturierung der Fahraufgabe

Zunächst lassen sich die unterschiedlichen Tätigkeiten des Fahrers während der Fahraufgabe in drei grundlegende Ebenen unterteilen (Bubb, 2002; Geiser, 1985). Dabei sind folgende Vorgänge charakteristisch (Bubb, 2001, 2002):

- **Primäre Fahraufgabe:** Diese bezeichnet den eigentlichen Vorgang der Fahrzeugführung, d. h. alle steuernden und regelnden Tätigkeiten des Fahrers, die unmittelbar der Erfüllung der Transportaufgabe dienen. Als wesentliche Bedienelemente sind hier die Lenkung, Schaltung und Pedalerie zu nennen.



- **Sekundäre Fahraufgabe:** Darunter fallen Aufgaben, die durch die Einbindung des Fahrers in das Verkehrsgeschehen oder durch Umwelteinflüsse notwendig sind, aber keinen elementaren Bestandteil der Fahraufgabe bilden. Als typisches Beispiel kann die Betätigung von Lenkstockhebeln wie Fahrtrichtungsanzeiger oder der Wischerhebel angeführt werden.
- **Tertiäre Fahraufgabe:** Hierunter sind Vorgänge im Fahrzeug zu verstehen, die der Befriedigung von Informations- und Komfortbedürfnissen des Fahrers entsprechen. Dazu zählt die Bedienung von Klima- oder Mediensystemen.

Die primäre Fahraufgabe bietet wiederum die Möglichkeit der Gliederung in regelungstechnische Submodelle. Diese Form der Abbildung der Interaktion zwischen Fahrer, Fahrzeug und Umwelt findet sich bereits bei Bernotat (1970). Hier wird eine Unterteilung der Aufgaben des Piloten in die drei Ebenen Navigation, Lenkung und Flugregelung vorgenommen, mit der wesentlichen Erkenntnis, dass der Mensch als adaptiver Regler in den Kreisläufen zu sehen ist. Abbildung 2-2 zeigt den einfachsten Fall eines Regelkreises mit der Aufgabenstellung als Führungs- und der Aufgabenerfüllung als Nachführgröße.

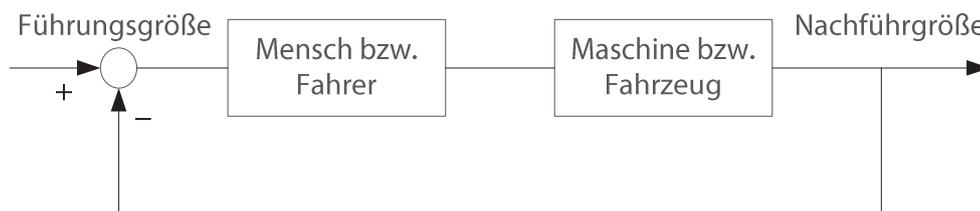


Abbildung 2-2: Der Regelkreis von Fahrer und Fahrzeug nach Bubb (1993) bzw. Bernotat (1970)

Speziell für das Lenkregelverhalten im Fahrzeug präzisiert das Zwei-Ebenen-Modell von Donges (1978) das Verhalten des Menschen im Regelkreis. Zum einen ermöglicht die Vorausschau des Fahrzeugführers eine antizipatorische Steuerung, zum anderen werden Abweichungen von diesem geplanten Sollkurs mittels einer kompensatorischen Regelung ausgeglichen. Für die Fahraufgabe im Straßenverkehr bezeichnet Donges (1982) die zugehörigen Ebenen als Navigations-, Bahnführungs- und Stabilisierungsebene. Folgende Prozesse sind dabei den jeweiligen Ebenen zugeordnet (Braess & Donges, 2006; Donges, 1982, 2012):

- **Navigationsebene:** Hier erfolgt die übergeordnete Planung des zeitlichen und räumlichen Rahmens der Fahrt. Diese Aufgabe wird vom Fahrer örtlich, punktuell und zeitlich diskret durchgeführt. Der zeitliche Horizont erstreckt sich dabei von mehreren Stunden bis in den Minutenbereich.



- **Bahnführungsebene:** Die eigentliche Ausübung der Fahrtätigkeit geschieht in diesem kontinuierlichen Prozess. Dabei wird die Sollspur und Sollgeschwindigkeit als Führungsgröße des Regelkreises festgelegt.
- **Stabilisierungsebene:** Abweichungen der aktuellen räumlichen Position von der Führungsgröße werden durch die angesprochene Regelung kompensiert. Dabei handelt es sich um längs- oder querdynamische Korrekturen im Sekundenbereich.

Die zeitlichen Zusammenhänge werden in Abbildung 2-3 nach Braess und Donges (2006) verdeutlicht. Ausgangspunkt der Grafik ist eine potentiell kritische Verkehrssituation, die in der Quer- oder Längsregelung des Fahrzeugs einen stabilisierenden Fahrereingriff fordert.

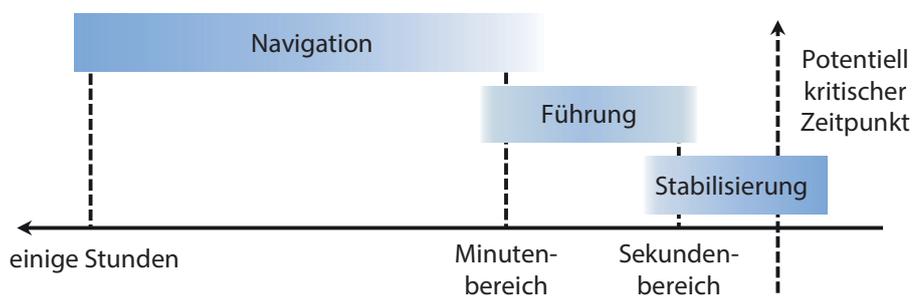


Abbildung 2-3: Zeitverlauf der Ebenen der primären Fahraufgabe nach Braess und Donges (2006)

### 2.1.2 Modellzusammenhänge

Eine umfassende Analyse verschiedener weiterer Modellvorstellungen erfolgt durch Michon (1985). Hier wird gefordert, dass ein allgemeingültiges Modell eine Aufwärts- wie auch Abwärtsstrukturierung kognitiver Prozesse unterstützt und offen für die Einbindung neuer kognitiver Modelle sein muss.

Ein Beispiel einer oftmals dargestellten Verbindung findet sich im Modell der menschlichen Handlungsregulation von Rasmussen (1983) zur Bedienung technischer Systeme. Ohne direkten Bezug zum Fahrzeugkontext werden die drei hierarchischen, hier aufsteigend genannten Ebenen, als fertigkeitbasiertes (skill-based), regelbasiertes (rule-based) und wissensbasiertes (knowledge-based) Handeln definiert.

In der fertigkeitbasierten Ebene wird durch eine Information direkt die erlernte Aktion ausgelöst. Für weniger automatisierte Prozesse existieren auf der nächst höheren Ebene Handlungsregeln, die nach Prüfung der Information Anwendung finden. Erst wenn keine Regel existiert, muss auf Basis von Wissen eine problemlösende Strategie entwickelt werden. (vgl. Hofinger, 2012)



Bei Donges (2012) wird dieses Modell der Handlungsregulation mit den drei Ebenen der primären Fahraufgabe in Zusammenhang gebracht. Abbildung 2-4 zeigt die Anknüpfungspunkte der jeweiligen Ebenen.

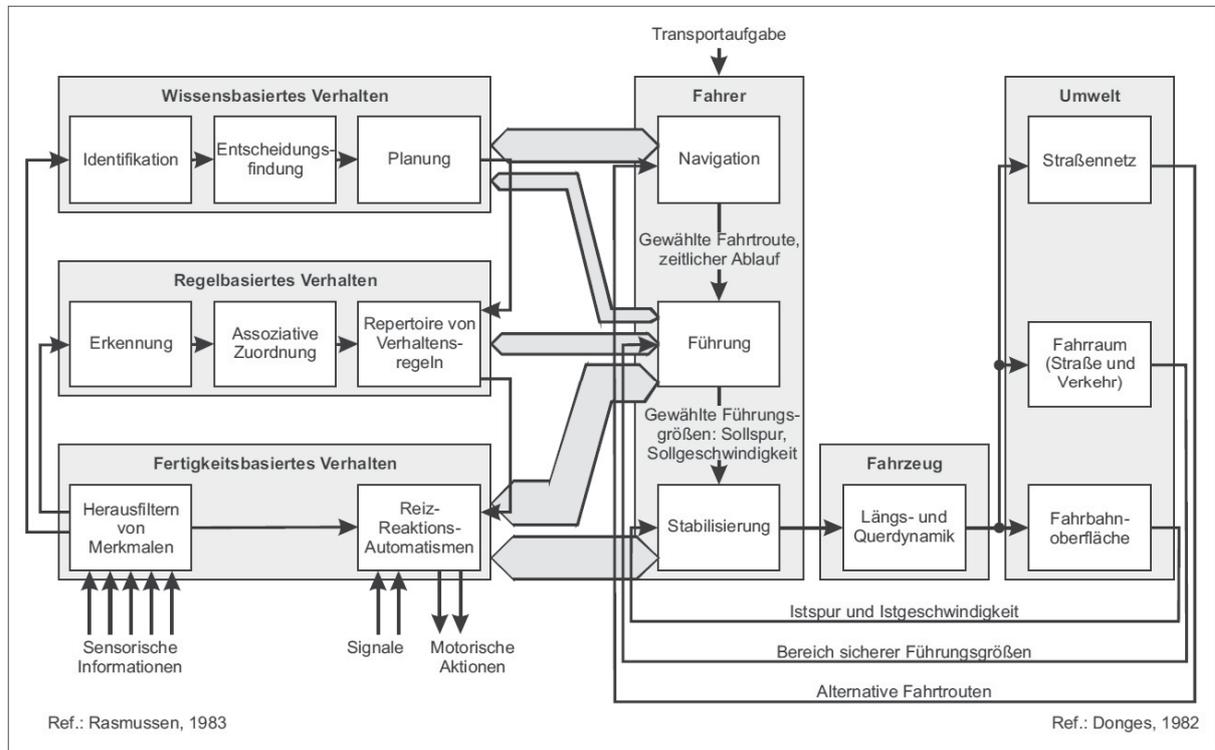


Abbildung 2-4: Verknüpfung des Modells der Handlungsregulation mit dem Drei-Ebenen-Modell der primären Fahraufgabe (Donges, 2012)

In einer fremden Verkehrsumgebung wird auf Navigationsebene wissensbasiertes Handeln ausgeführt. Ist dagegen die Fahrtstrecke bekannt, beschränken sich die Tätigkeiten des Fahrers überwiegend auf die Bahnführungs- und Stabilisierungsebene. Sofern der Fahrer ausreichende Expertise besitzt, werden zur Bahnführung großteils trainierte Fertigkeiten sowie eingübte Regeln benötigt. Andernfalls, beispielsweise bei Fahranfängern, werden auch wissensbasierte Prozesse aktiviert. Der Bereich der Stabilisierung wird ausschließlich von fertigkeitensbasiertem Verhalten bestimmt. (vgl. Donges, 2012)

Dies ist vor allem durch die geringe Zeitdauer, die in dieser Ebene zur Verfügung steht, begründet, wodurch auch keine länger andauernden kognitiven Prozesse möglich sind (Rasmussen, 1983).



### 2.1.3 Der Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis

Basierend auf den zuvor genannten Modellen soll noch einmal der Regelkreis in der von Bubb (1993) präzisierten Form im Detail analysiert werden. Aus heutiger Sicht erfüllt dieser die Forderungen nach einem allgemeingültigen Modell, das in unterschiedlichen Detaillierungsgraden zur Anwendung kommen kann. Abbildung 2-5 zeigt den Regelkreis mit einem Fokus auf das Zusammenspiel von menschlicher Wahrnehmung und Bedienelementen im Fahrzeug. Die dazu folgenden Ausführungen orientieren sich an Bubb (2001).

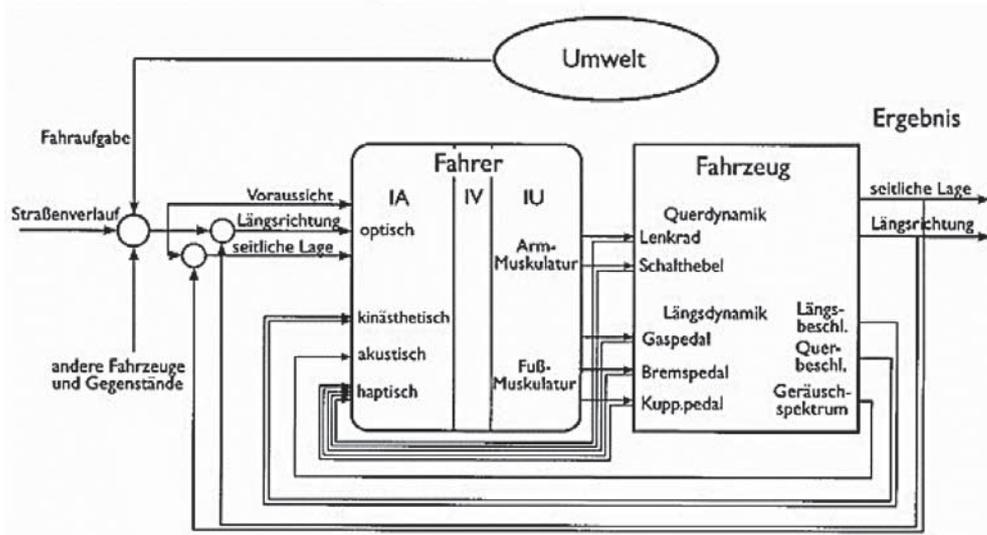


Abbildung 2-5: Der Regelkreis von Fahrer, Fahrzeug und Umwelt nach Bubb (2001)

Die Fahraufgabe bildet als Resultat des Straßenverlaufs und des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer die Führungsgröße der Regelung. Sie ist dabei untergliedert in die momentane Längs- und Querposition, wobei der Voraussicht des Fahrers die bereits angesprochene antizipatorische Steuerungsrolle zukommt. Die Regelstrecke selbst besteht zum einen aus dem Menschen als Fahrer, zum anderen aus dem Fahrzeug mit seinem technisch vorgegebenen Fahrverhalten. Das Ergebnis bzw. die Nachführgröße ergibt sich wiederum aus der Position des Fahrzeugs im Verkehrsraum, also der Lage in Längs- und Querrichtung. Zwischen dem Fahrer und dem Fahrzeug sind diverse Unterregelkreise innerhalb der Regelstrecke dargestellt. Diese entstehen durch die Kopplung des Menschen an das Fahrzeug mittels der Bedienelemente wie Pedalerie und Lenkrad, aber auch durch die menschliche Wahrnehmung für Beschleunigungen und Geräusche. (vgl. Bubb, 2001)

Abbildung 2-5 zeigt die Gliederung des menschlichen Kognitionsprozesses in drei wesentliche Bereiche, die Informationsaufnahme (IA), -verarbeitung (IV) und -umsetzung (IU). Eine Analyse dieser Fähigkeiten und Grenzen des Menschen erfolgt in Kapitel 2.2. Auf die Nachbildung des Elements ‚Fahrzeug‘ durch einen Fahrsimulator wird in Kapitel 2.3 eingegangen.



## 2.2 Der Mensch als Fahrzeugführer

Im folgenden Abschnitt wird analysiert, auf welche Fähigkeiten der Mensch im Fahrzeug oder bei der Nutzung virtueller Systeme wie einem Fahrsimulator zurückgreifen kann. Aufbauend auf der allgemeinen Beschreibung des Wahrnehmungsprozesses werden die für die Fahrzeugführung relevanten Sinnessysteme erklärt. Auf den Zusammenhang zwischen den Sinnesmodalitäten und der Erfassung fahrdynamischer Größen wird speziell in Kapitel 2.2.3 eingegangen. Dazu werden auch die Grenzen der menschlichen Wahrnehmung aufgezeigt.

### 2.2.1 Funktionsprinzip der menschlichen Wahrnehmung

Im Weiteren wird der Prozess der menschlichen Wahrnehmung und Handlung als Kreislauf von Einzelschritten betrachtet und damit die genannte Unterteilung in Informationsaufnahme, -verarbeitung und -umsetzung präzisiert. Die Ausführungen dazu folgen Goldstein (2008).

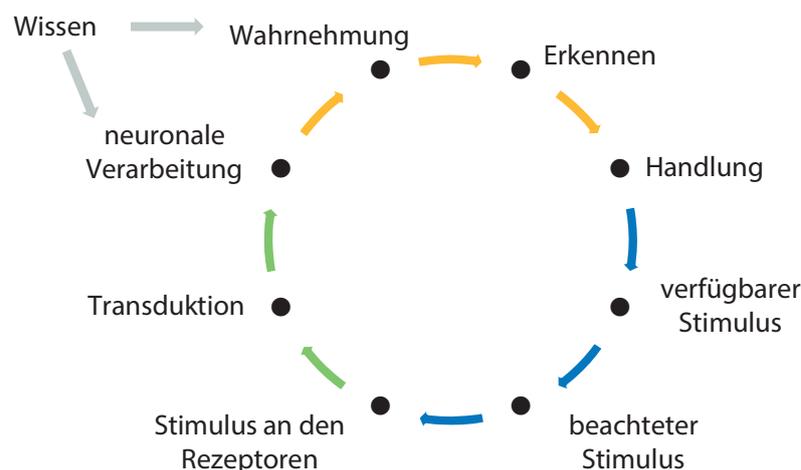


Abbildung 2-6: Der Wahrnehmungsprozess nach Goldstein (2008). Die blauen Pfeile zeigen Reize, die grünen Verarbeitungsprozesse, die orangefarbenen perzeptuelle Antworten.

Goldstein (2008) beschreibt den Wahrnehmungsprozess als Interaktion zwischen der reizgesteuerten Verarbeitung, auch als Bottom-up-Verarbeitung bezeichnet, und der wissensbasierten Verarbeitung, die in Form eines Top-down-Prozesses auf Basis von Vorerfahrungen abläuft. In Folge findet zunächst aus der Vielzahl der Stimuli ein bestimmter Reiz mittels des adäquaten Sinnesorgans Beachtung. Dazu ist es essentiell, dass der Mensch seine Aufmerksamkeit auf diese Reizquelle verlagert. Am Rezeptor des Sinnesorgans beginnt dann der weitere Verarbeitungsprozess, beginnend mit der Transduktion. Darunter versteht man allgemein die Überführung von Energieformen ineinander, hier im Speziellen die Umwandlung der am jeweiligen Rezeptor auftreffenden Energie in ein elektrisches Signal in den Nervenbahnen des Menschen. (vgl. Goldstein, 2008)



Neben der energetischen Wandlung erfolgt beim Prozess der Transduktion auch die Kodierung der Reizintensität. Die Rezeptoren arbeiten dabei innerhalb eines begrenzten Bereichs. Dieser ist zum einen durch eine untere Erregungsschwelle bestimmt, zum anderen aber auch nach oben hin durch ein maximal mögliches Potential, ab dem eine Steigerung der Reizintensität keine weitere Auswirkung besitzt. Hält ein Reiz über längere Zeit an, setzen Gewöhnungseffekte ein, d. h. das Rezeptorpotential geht wieder auf das Ruhepotential zurück. Dies wird als Adaption bezeichnet. (vgl. Handwerker, 2006a; Handwerker & Schmelz, 2010)

Die Potentialänderung im Rezeptor bewirkt anschließend eine Änderung des Aktionspotentials angeschlossener Nervenfasern und damit die Weiterleitung im neuronalen Netz des Menschen. Bei diesem als Transformation bezeichneten Prozess erfolgt eine Wandlung der Amplitude des Rezeptorpotentials in die Frequenz des Aktionspotentials. (vgl. Handwerker & Schmelz, 2010)

Nach der Weiterleitung mittels interagierender Neuronen zum Gehirn setzt die Verarbeitung der Information ein. Wie Abbildung 2-6 zeigt, wird dort mittels lang- oder kurzfristig erworbenen Wissens die Information zur Wahrnehmung gewandelt. Goldstein (2008, S. 6) definiert sie als „bewusste sensorische Erfahrung“. Nachgelagert folgt der ebenfalls wissensbasierte Prozess des Erkennens, also des Zuordnens und Kategorisierens der Wahrnehmung, der dann neue Handlungen auslösen kann (Goldstein, 2008). Gerade deshalb ist für den Prozess der Wahrnehmung und des Erkennens nicht ausschließlich das Leistungsvermögen der Rezeptoren entscheidend. Derselbe Reiz kann geprägt durch persönliche Erfahrungen zu einer interindividuell unterschiedlichen Wahrnehmung führen.

### **2.2.2 Beschreibung relevanter Sinnesmodalitäten**

Nach Handwerker (2006a) besitzt der Mensch vier grundlegende Rezeptortypen zur Erfassung seiner Umwelt. Dies sind mechanische und thermische Rezeptoren sowie Rezeptoren, die auf chemische Reize oder Photonen reagieren. Verschiedene Sinnessysteme vermitteln die dazugehörigen Empfindungen wie Sehen oder Hören, man spricht dann von einer Sinnesmodalität (Handwerker, 2006a).

Wie im folgenden Kapitel 2.2.3 weiter ausgeführt, werden für die Fahrzeugführung maßgeblich das visuelle, auditorische, vestibuläre und somatosensorische System benötigt. Deshalb werden zunächst die wesentlichen Eigenschaften dieser Sinnessysteme näher betrachtet. Auf Basis der Erläuterungen wird anschließend die Interaktion mit fahrdynamischen Eigenschaften diskutiert.



### 2.2.2.1 Das visuelle System

Zur Wahrnehmung von Lichtreizen im Bereich von 400 bis 700 Nanometern bildet das Auge das visuelle System des Menschen, bestehend aus der Iris als Blende, einer Sammellinse zur Bildverkleinerung und der Retina als Projektionsschicht, in der sich die Rezeptoren für die weitere Reizverarbeitung befinden. Insgesamt sind dies rund 120 Millionen Zellen, wovon ca. 6 Millionen Zapfen dem Farbsehen dienen. Diese sind überwiegend im Bereich der Fovea, dem Ort des schärfsten Sehens, lokalisiert. Der zweite Rezeptortyp, die Stäbchen, sind ausschließlich in der Lage, Helligkeitsunterschiede wahrzunehmen. Als blinden Fleck bezeichnet man die Stelle der Retina, an der der Sehnerv ansetzt und deshalb keine Rezeptoren vorhanden sind. (vgl. Goldstein, 2008)

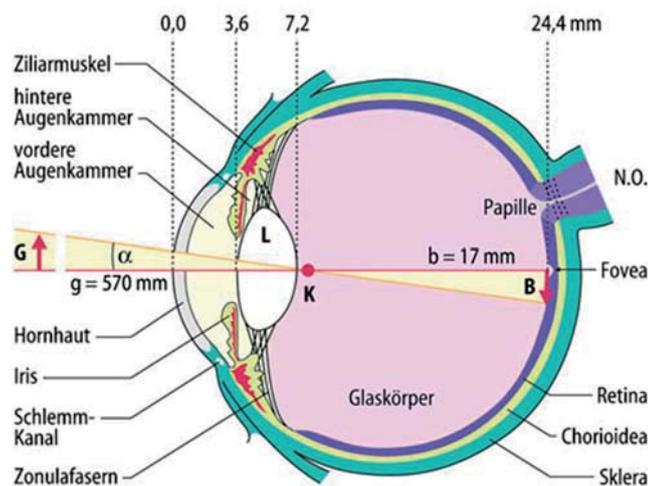


Abbildung 2-7: Schnittdarstellung des Auges mit Illustrierung eines Sichtwinkels  $\alpha$  von  $1^\circ$   
(Eysel, 2010)

Zur Regelung der Helligkeit dient die Pupille, die die Öffnung in der Iris und damit den Lichteinfall begrenzt. Der bereits angesprochene Effekt der Adaption kommt auch beim Auge zum Tragen, der Mensch ist dadurch fähig, Helligkeitsunterschiede von  $10^{-17}$  W (Nachtsehen) bis  $10^{-14}$  W (Tagsehen) zu verarbeiten. Verschieden weit entfernte Objekte lassen sich durch den Mechanismus der Akkommodation scharf auf der Retina darstellen. Dazu werden muskulär die Linse und damit die Brechkraft verändert. Die maximale Krümmung definiert den Nahpunkt, den minimalen Abstand für scharfes Sehen. Diese Entfernung steigt im Alter durch die Aushärtung der Linse an. (vgl. Heinecke, 2012)

Nach Heinecke (2012) gelten folgende physiologische Grenzen:

- Die maximale Auflösung beträgt bei einem normalsichtigen Menschen etwa eine Bogenminute, entsprechend können bei einem Abstand von zehn Metern Unterschiede bis