

# TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Institut für Maschinen- und Fahrzeugtechnik, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik

## Entwicklung eines fahrerbasierten Werkzeugs zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke

Christian Schimmel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. F. Holzapfel

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. B. Heißing, i. R.
2. Univ.-Prof. Dr. phil. K. Bengler

Die Dissertation wurde am 08.06.2010 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 21.10.2010 angenommen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>v</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>Verwendete Formelzeichen</b>	<b>ix</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung . . . . .	1
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	2
<b>2 Bewertung von Handlungeigenschaften im Produktentstehungsprozess</b>	<b>3</b>
2.1 Realversuch . . . . .	3
2.1.1 Open-Loop . . . . .	3
2.1.2 Closed-Loop . . . . .	4
2.1.3 Abstimmungsfahrt . . . . .	5
2.2 Simulation . . . . .	6
2.2.1 Open-Loop . . . . .	6
2.2.2 Closed-Loop . . . . .	7
2.3 Einordnung in den Produktentstehungsprozess . . . . .	7
2.3.1 Bewertungsmethoden im PEP der Automobilindustrie . . . . .	7
2.3.2 Einsatzszenarien der Objektivierung . . . . .	9
2.4 Zusammenfassung . . . . .	11
<b>3 Stand der Technik von Objektivierungsmethoden und Ableitung der Aufgabenstellung</b>	<b>13</b>
3.1 Anforderungen . . . . .	13
3.1.1 Versuchsdurchführung . . . . .	13
3.1.2 Training des Algorithmus . . . . .	16
3.1.3 Bewertungsmethodik . . . . .	18
3.2 Kennwertbasierte Korrelationsanalysen . . . . .	20
3.2.1 Automatisierte Manöverdurchführung . . . . .	21
3.2.2 Manuelle Manöverdurchführung . . . . .	22
3.2.3 Analyse hinsichtlich Einsatzszenarien und Anforderungen . . . . .	23
3.3 Fahrzeugmodellbasierte Objektivierung . . . . .	24
3.3.1 Dynamikmodell . . . . .	25
3.3.2 Lenkungsmodell . . . . .	26
3.3.3 Analyse hinsichtlich Einsatzszenarien und Anforderungen . . . . .	27
3.4 Fahrermodellbasierte Objektivierung . . . . .	29
3.4.1 Regelungstechnische Modelle . . . . .	29
3.4.2 Physiologische Modelle . . . . .	31
3.4.3 Psychologische Modelle . . . . .	31

3.4.4	Analyse hinsichtlich Einsatzszenarien und Anforderungen . . . . .	32
3.5	Zusammenfassung und Ableitung der Aufgabenstellung . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Entwicklung eines fahrerbasierten Objektivierungskonzepts</b>	<b>35</b>
4.1	Gesamtkonzept . . . . .	35
4.1.1	Begründung der fahrerbasierten Betrachtung . . . . .	35
4.1.2	Zugrundeliegende Mechanismen fahrerbasierter Bewertung . . . . .	37
4.1.3	Zweiteiliger Aufbau des fahrerbasierten Objektivierungskonzepts . . . . .	39
4.1.4	Trainingskonzept . . . . .	40
4.1.5	Einsatz des fahrerbasierten Bewertungswerkzeugs . . . . .	41
4.2	Grundlagen der Fahrdynamikbewertung mit einem Empfindungsmodell . . . . .	42
4.2.1	Empfindung und Wahrnehmung . . . . .	42
4.2.2	Menschliche Sensorik . . . . .	44
4.2.3	Funktionsweise und Aufbau des Empfindungsmodells . . . . .	49
4.2.4	Fahrdynamikbewertung mit einem Modell menschlicher Empfindung . . . . .	49
4.3	Empfindung der Fahraufgabe und Fahrzeugreaktionsgrößen . . . . .	50
4.3.1	Optische Wahrnehmung . . . . .	51
4.3.2	Gleichgewichtsorgan . . . . .	51
4.3.3	Kopfbewegung während der Fahrzeugführung . . . . .	55
4.3.4	Weitere fahrdynamisch relevante Organe . . . . .	57
4.3.5	Modellarchitektur für Fahraufgabe und Fahrzeugreaktionsgrößen . . . . .	58
4.4	Empfindung von Lenkradwinkel und -moment . . . . .	59
4.4.1	Somatoviszzerale Sensibilität . . . . .	59
4.4.2	Oberflächensensibilität . . . . .	59
4.4.3	Tiefensensibilität . . . . .	61
4.4.4	Gesamtmodellarchitektur des Empfindungsmodells . . . . .	63
4.5	Lenkradbetätigungsmodell . . . . .	64
4.5.1	Rekonstruktion relevanter Bediengrößen der Fahrzeugquerdynamik . . . . .	65
4.5.2	Manöverabhängige Betrachtung der Fahrerleistung . . . . .	66
4.5.3	Bestimmung der Fahrermodellparameter . . . . .	66
4.5.4	Fahrdynamikbewertung auf Basis des Lenkradbetätigungsmodells . . . . .	67
4.6	Zusammenfassung . . . . .	68
<b>5</b>	<b>Realisierung des fahrerbasierten Objektivierungswerkzeugs</b>	<b>69</b>
5.1	Prozessschnittstellen . . . . .	69
5.1.1	Eingangsgrößen . . . . .	69
5.1.2	Ausgangsgrößen . . . . .	70
5.1.3	Trainingsprozess . . . . .	70
5.1.4	Bewertungsprozess . . . . .	71
5.2	Empfindungsmodell . . . . .	72
5.2.1	Gesamtstruktur des Empfindungsmodells . . . . .	72
5.2.2	Bewegungstransformation in Kopfkoordinatensystem . . . . .	72
5.2.3	Modellierung fahrdynamisch relevanter menschlicher Sinnesorgane . . . . .	75
5.2.4	Empfindungsbasierte Bewertung . . . . .	82
5.3	Lenkradbetätigungsmodell . . . . .	83
5.3.1	Rekonstruktion relevanter Bediengrößen der Fahrzeugquerdynamik . . . . .	83
5.3.2	Manöverabhängige Betrachtung der Fahrerleistung . . . . .	85
5.3.3	Bestimmung der Lenkradbetätigungsmodellparameter . . . . .	86
5.3.4	Bewertung mit dem Lenkradbetätigungsmodell . . . . .	86

5.4	Auswahl der betrachteten Versuchsdurchführungen und Bewertungskriterien	87
5.4.1	Manöver und daraus abgeleitete Kennwerte	87
5.4.2	Subjektive Bewertungskriterien	89
5.5	Zusammenfassung	90
<b>6</b>	<b>Objektivierungsergebnisse und Evaluierung der prototypischen Umsetzung</b>	<b>91</b>
6.1	Objektivierungsergebnisse mit dem Empfindungsmodell	91
6.1.1	Weave-Test	92
6.1.2	Frequenzgang	95
6.1.3	Lenkradwinkelsprung	99
6.2	Objektivierungsergebnisse mit dem Lenkradbetätigungsmodell	102
6.2.1	Lenkradwinkelmodell	102
6.2.2	Lenkradmomentmodell	104
6.3	Evaluierung in Realversuch und Simulation	105
6.3.1	Standardisierte Fahrversuche	106
6.3.2	Abstimmungsfahrt auf der Nordschleife	107
6.3.3	Virtuelle Abstimmungsfahrt auf der Nordschleife	108
6.4	Zusammenfassung	110
<b>7</b>	<b>Abschließende Betrachtungen</b>	<b>113</b>
7.1	Zusammenfassung	113
7.2	Bewertung	114
7.3	Ausblick	114
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>115</b>
	<b>Anhang</b>	<b>121</b>



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der Arbeit . . . . .	2
2.1	Aufbau Kapitel 2 . . . . .	3
2.2	Automobiler Produktentstehungsprozess . . . . .	8
3.1	Aufbau Kapitel 3 . . . . .	13
3.2	Ausnutzung der Dynamik von PKW aus [45] . . . . .	15
3.3	Vorgehensweise kennwertbasierter Objektivierung . . . . .	21
3.4	Lenkroboter und Messtechnik aus [23] . . . . .	21
3.5	Vorgehensweise fahrzeugmodellbasierter Objektivierung . . . . .	25
3.6	Vorgehensweise fahrermodellbasierter Objektivierung . . . . .	29
4.1	Aufbau Kapitel 4 . . . . .	35
4.2	Erweiterter Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis . . . . .	36
4.3	Trainingskonzept fahrerbasierter Objektivierung . . . . .	40
4.4	Bewertungskonzept fahrerbasierter Objektivierung . . . . .	42
4.5	Abbildungsverhältnisse in der Sinnesphysiologie nach [58] . . . . .	44
4.6	Generische Funktionsweise eines modellierten Organs . . . . .	49
4.7	Ablauf der Fahrdynamikbewertung mit einem Empfindungsmodell . . . . .	50
4.8	Aufbau des Gleichgewichtsorgans aus [58] . . . . .	52
4.9	Anregung der Macularorgane aus [58] . . . . .	53
4.10	Anregung der Bogengänge aus [58] . . . . .	54
4.11	Neuronale Vernetzung von Blick- und Kopfstellungsreflexen aus [65] . . . . .	56
4.12	Gesamtarchitektur des Empfindungsmodells ohne Lenkradempfindung . . . . .	59
4.13	Struktur der somatoviszeralen Sensibilität . . . . .	60
4.14	Häufigkeitsverteilung der Rezeptoren in der Handinnenfläche aus [3] . . . . .	60
4.15	Aufbau von Muskelspindel und Golgi-Sehnenorgan aus [3] . . . . .	63
4.16	Schema des antagonistischen Ablaufs der Ellenbogenabknickung aus [72] . . . . .	64
4.17	Gesamtarchitektur des Empfindungsmodells mit Lenkradempfindung . . . . .	64
4.18	Ablauf der Fahrdynamikbeurteilung mit dem Lenkradbetätigungsmodell . . . . .	68
5.1	Aufbau Kapitel 5 . . . . .	69
5.2	Beispiel eines Netzdiagramms zur Fahrdynamikbeurteilung . . . . .	71
5.3	Realisierung des Empfindungsmodells . . . . .	72
5.4	Fahrerkopf- und Fahrzeugkoordinatensystem . . . . .	73
5.5	Aufbau des Informationsstrukturmodells . . . . .	80
5.6	Zeitverlauf von gemessenem und empfundenem Lenkradmoment . . . . .	82
5.7	Gemessene und quasi-empfundene Lenkungshysterese . . . . .	83
5.8	Geometrische Modellgrößen des Lenkradbetätigungsmodells . . . . .	84
5.9	Zeitverläufe von gemessenem und vom Modell simuliertem Lenkradwinkel . . . . .	87
6.1	Aufbau Kapitel 6 . . . . .	91
6.2	Lenkradmoment Mitte über Lenkungssteifigkeit . . . . .	92

6.3	Lenkradmoment Mitte über Lenkungsempfindlichkeit . . . . .	93
6.4	Mittengefühl über Lenkungsempfindlichkeit . . . . .	93
6.5	Lenkungspräzision über Lenkungssteifigkeit und -elastizität . . . . .	94
6.6	Lenkungspräzision über Giergeschwindigkeitstotband . . . . .	94
6.7	Mittengefühl über Lenkungssteifigkeit bei 1,0Hz . . . . .	96
6.8	Mittengefühl über Frequenz des Phasenminimums des Lenkradmoments . . . . .	96
6.9	Lenkradmoment Anlenken über Phasenwinkel bei 0,7Hz . . . . .	97
6.10	Ansprechen über Giereigenfrequenz . . . . .	97
6.11	Ansprechen über mittlerem Amplitudenabfall des Lenkradmoments . . . . .	98
6.12	Lenkungsstößigkeit über Phasenminimum des Lenkradmoments . . . . .	99
6.13	Ansprechen über Antwortzeit des Giergeschwindigkeitsmaximums . . . . .	100
6.14	Ansprechen über Überschwingweite . . . . .	100
6.15	Lenkradwinkelbedarf über stationären Verstärkungsfaktoren . . . . .	101
6.16	Korrelation Eigenlenkverhalten und Lenkradbetätigungsmodell . . . . .	102
6.17	Korrelation Lenkradwinkelbedarf und Lenkradbetätigungsmodell . . . . .	103
6.18	Korrelation Agilität und Lenkradbetätigungsmodell . . . . .	103
6.19	Korrelation Zielgenauigkeit und Lenkradbetätigungsmodell . . . . .	104
6.20	Korrelation Lenkradmoment Kurvenfahrt und Lenkradbetätigungsmodell . . . . .	105
6.21	Evaluierung des Empfindungsmodells in Realfahrt . . . . .	106
6.22	Streckenübersicht der Nordschleife . . . . .	107
6.23	Evaluierung des Lenkradbetätigungsmodells in Realfahrt . . . . .	109
6.24	Evaluierung des Lenkradbetätigungsmodells in Simulation . . . . .	109



# Tabellenverzeichnis

3.1	Angewandte Bewertungsstufen . . . . .	23
3.2	Analyse kennwertbasierter Objektivierung . . . . .	24
3.3	Analyse fahrzeugmodellbasierter Objektivierung . . . . .	28
3.4	Analyse fahrermodellbasierter Objektivierung . . . . .	32
3.5	Gesamtanalyse des Stands der Technik . . . . .	33
4.1	Fahrerinformationsgrößen zur Fahrzeugführung aus [72] . . . . .	48
4.2	In dieser Arbeit betrachtete Fahrerinformationsgrößen . . . . .	48
4.3	Schwellwerte translatorischer Beschleunigungsempfindung . . . . .	53
4.4	Schwellwerte rotatorischer Beschleunigungsempfindung . . . . .	55
5.1	Eingangsgrößen des Handling Monitors . . . . .	70
5.2	Kopfrägheitsmomentparameter bei Wank- und Nickbewegungen . . . . .	75
5.3	Parameter der Navier'schen Bewegungsgleichung . . . . .	76
5.4	Parameter des Momentengleichgewichts am Macularorgan . . . . .	77
5.5	Parameter der zweistufigen Macularmodellierung . . . . .	77
5.6	Parameter des Momentengleichgewichts am Bogengangorgan . . . . .	78
5.7	Parameter des erweiterten Torsionspendels als Bogengang . . . . .	79
5.8	Integratorparameter mit Hochpasseigenschaften als Bogengang . . . . .	80
5.9	Übertragungsfunktionsparameter der Muskelspindel . . . . .	81
5.10	Übertragungsfunktionsparameter des Golgi-Sehnenorgans . . . . .	81
5.11	Adaptionsparameter des Golgi-Sehnenorgans . . . . .	81
5.12	DPID-Modellparameter . . . . .	85
5.13	DPID-Modellparameter zweier Fahrzeugkonfigurationen . . . . .	87
5.14	Analysierte Manöver und abgeleitete Kennwerte . . . . .	88
5.15	Berechnete Subjektivurteile des Handling Monitors . . . . .	89
6.1	Relevante Kurven der Nordschleife . . . . .	108
6.2	Objektivierte Zusammenhänge . . . . .	111



## Häufig verwendete Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
$t$	[s]	Zeit
$\varphi, \dot{\varphi}, \ddot{\varphi}$	[rad]	Wankwinkel, -geschwindigkeit, -beschleunigung
$\vartheta, \dot{\vartheta}, \ddot{\vartheta}$	[rad]	Nickwinkel, -geschwindigkeit, -beschleunigung
$\psi, \dot{\psi}, \ddot{\psi}$	[rad]	Gierwinkel, -geschwindigkeit, -beschleunigung
$x_{FZG}, y_{FZG}$	[m]	GPS-Position des Fahrzeugschwerpunkts
$v_x$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Längsgeschwindigkeit im Fahrzeugschwerpunkt
$v_y$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Quergeschwindigkeit im Fahrzeugschwerpunkt
$v_z$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Vertikalgeschwindigkeit im Fahrzeugschwerpunkt
$a_x$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Längsbeschleunigung im Fahrzeugschwerpunkt
$a_y$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Querb beschleunigung im Fahrzeugschwerpunkt
$a_z$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Vertikalbeschleunigung im Fahrzeugschwerpunkt
$\beta$	[rad]	Schwimmwinkel im Fahrzeugschwerpunkt
$\delta_H$	[rad]	Lenkradwinkel
$M_H$	[Nm]	Lenkradmoment
$\varphi_{Kopf}$	[rad]	Wankwinkel des Kopfs
$\vartheta_{Kopf}$	[rad]	Nickwinkel des Kopfs
$\varphi_{Kopf}^*$	[rad]	Wankrückstellwinkel des Kopfs aus ausgelenkter Position
$\vartheta_{Kopf}^*$	[rad]	Nickrückstellwinkel des Kopfs aus ausgelenkter Position
$v_{x,Kopf}$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Längsgeschwindigkeit im Kopfschwerpunkt
$v_{y,Kopf}$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Quergeschwindigkeit im Kopfschwerpunkt
$v_{z,Kopf}$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Vertikalgeschwindigkeit im Kopfschwerpunkt
$a_{x,Kopf}$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Längsbeschleunigung im Kopfschwerpunkt
$a_{y,Kopf}$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Querb beschleunigung im Kopfschwerpunkt
$a_{z,Kopf}$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Vertikalbeschleunigung im Kopfschwerpunkt
$G$	[divers]	Übertragungsfunktion
$A$	[divers]	Übertragungsfunktion der Adaption
$u$	[divers]	Eingangsgröße
$y$	[divers]	Ausgangsgröße
$K, k$	[divers]	Verstärkungsfaktor
$T$	[s]	Zeitkonstante
$D, d$	$[s^{-1}]$	Dämpfungskonstante
$\theta_{nah}, \theta_{fern}$	[rad]	Sichtwinkel des Lenkradbetätigungsmodells



# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Der heute in der Automobilindustrie angewendete Entwicklungsprozess ist in der Lage, Fahrzeuge exakt in einem von der Markenphilosophie vorgegebenen Segment zu platzieren. Dies gilt insbesondere für Fahreigenschaften, die ansprechend und sicherheitsvermittelnd auszuführen sind. Während die Sicherheitsauslegung auf Basis vorgegebener, teilweise vom Gesetzgeber definierter Kriterien erfolgt, bestehen hinsichtlich der Gefal-lensfrage keine eindeutigen und ausreichend präzisen Zielkorridore. Daher ist ein hoher Aufwand erforderlich, um das Fahrverhalten optimal abzustimmen.

Gerade durch die steigende Relevanz aktiver Systeme erweitert sich der Handlungsspielraum der Fahrdynamikabstimmung zusätzlich. Besonders schwerwiegend ist die umfangreiche Konfigurationsmöglichkeit, die Kunden angeboten wird. Aufgabe der Fahrverhaltensentwicklung ist auf Grund dessen nicht nur die ideale Auslegung eines einzelnen Fahrwerks. Vielmehr müssen alle vom Kunden wählbaren Varianten eines Fahrzeugs optimal abgestimmt sein. Durch das wachsende Produktportfolio nimmt gleichzeitig die Anzahl der angebotenen Derivate stetig zu. In Summe führen diese Entwicklungen zu einer Komplexitätssteigerung im automobilen Entwicklungsprozess.

Diese Tendenz steht im deutlichen Gegensatz zu den betriebswirtschaftlichen Erfordernissen. Die Dynamik des Markts und kürzere Produktzyklen fordern eine Reduzierung der Entwicklungszeiten. In diesem Spannungsfeld besteht daher Bedarf für Verbesserungen im Produktentstehungsprozess. Für die Fahrwerkabstimmung stellt ein leistungsfähiges Werkzeug zur objektiven Beurteilung der Querdynamik als mögliche Lösung dieses Zielkonflikts Effizienzsteigerungen in Aussicht.

## 1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Um die genannten Effizienzsteigerungen zu realisieren, wird in der vorliegenden Arbeit ein fahrerbasiertes Objektivierungskonzept entwickelt. Dessen Umfang leitet sich aus dem aktuellen Vorgehen zur Fahrdynamikabstimmung und dem Stand des Wissens hinsichtlich der Objektivierung subjektiver Fahreindrücke ab. Signifikante Eigenschaften sind die Berücksichtigung kundenrelevanter Manöver und entsprechender Metriken zur Bewertung der Fahrzeugquerdynamik. Mit einem zweigeteilten Ansatz wird der Beurteilungsprozess von Abstimmungsfahrern in wesentlichen Punkten in die Betrachtung integriert. Der erste Teil beinhaltet ein Modell menschlicher Empfindung. Der Zweite nutzt freie Versuchsfahrten im Closed-Loop zur Ermittlung von Urteilen. Die Einsetzbarkeit des Werkzeugs erstreckt sich über den gesamten Produktentstehungsprozess. Zudem

besteht trotz zahlreicher veröffentlichter Ansätze weiterhin ein Bedarf an kausalen Erklärungen, wie Fahrverhalten von Fahrern bewertet wird. Diese Fragestellung wird ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit behandelt.

Die methodischen Anforderungen werden zunächst konzeptionell bearbeitet und anschließend prototypisch umgesetzt. Validierungsversuche in Simulation und Realfahrt weisen die Anwendbarkeit der entwickelten Methode anhand verschiedener Fahrmanöver exemplarisch nach. Hierzu werden sowohl standardisierte Versuchsdurchführungen betrachtet als auch freie Abstimmungsfahrten, beispielsweise auf der Nordschleife des Nürburgrings.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit unterteilt sich in sieben Kapitel. Nach der Einleitung erfolgt eine Diskussion des Umfelds. Abschnitt 3 stellt den Stand der Technik hinsichtlich der Objektivierung subjektiver Fahreindrücke dar. Darauf aufbauend wird in Kapitel 4 ein Konzept für einen fahrerbasierten Objektivierungsprozess entworfen, das in Abschnitt 5 konkretisiert wird. Nach der Evaluierung der Ergebnisse in Kapitel 6 folgen im letzten Abschnitt abschließende Betrachtungen. Abbildung 1.1 fasst den Aufbau der Arbeit schematisch zusammen.

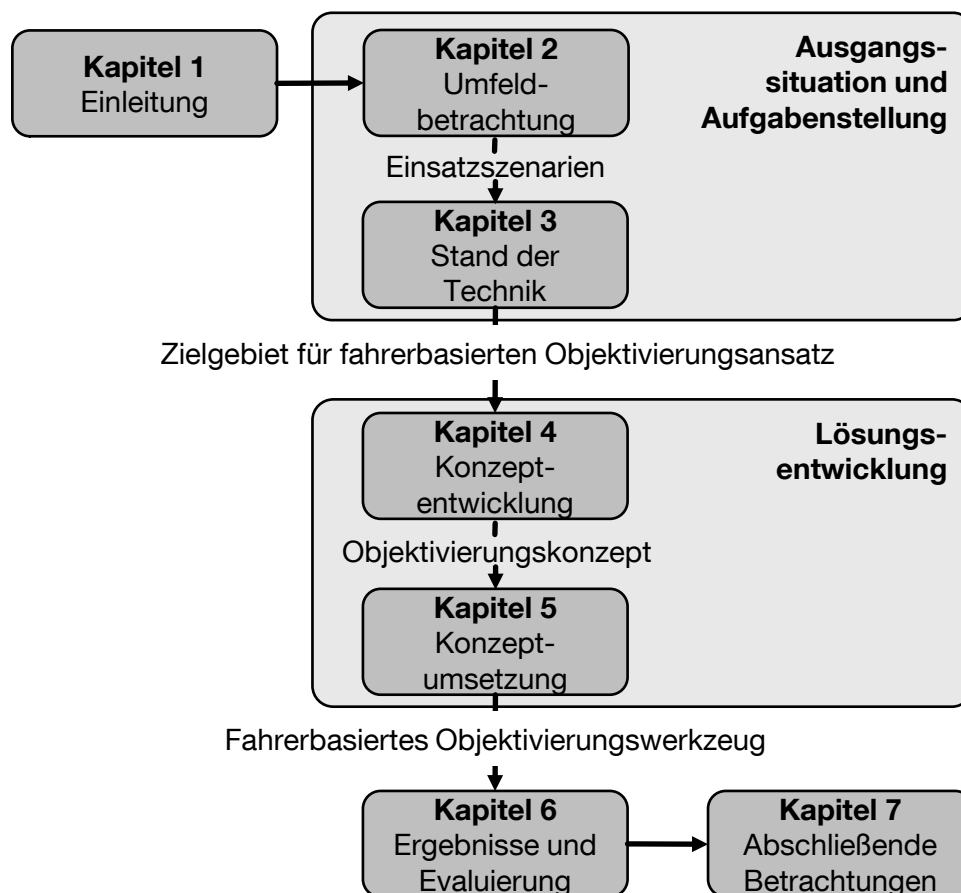


Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit

## 2 Bewertung der Handlingeigenschaften von PKW im Produktentstehungsprozess

Die Entwicklung des Fahrverhaltens von PKW stellt einen wesentlichen Bestandteil des automobilen Produktentstehungsprozesses dar. Die vorliegende Arbeit fokussiert die Abstimmung und Bewertung der Fahrzeugquerdynamik. Diese Entwicklungsumfänge nutzen verschiedene Arten von Bewertungsmethoden. Sie lassen sich zunächst nach dem jeweiligen Einsatzgebiet in Verfahren des Realversuchs und der Simulation einteilen.

In diesem Kapitel werden daher die verschiedenen Untersuchungsverfahren nach den jeweiligen Nutzungsvarianten strukturiert. Anschließend erfolgt die Einordnung der Methoden in den PEP<sup>1</sup> und die Ableitung relevanter Einsatzszenarien für ein Werkzeug zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke. Im letzten Abschnitt werden wesentliche Eigenschaften des Umfelds zusammengefasst. Abbildung 2.1 illustriert diesen Aufbau schematisch.

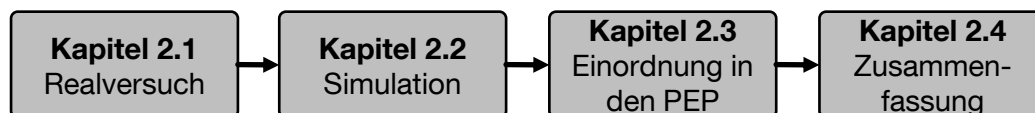


Abbildung 2.1: Aufbau Kapitel 2

### 2.1 Realversuch

Realversuche zur Fahrverhaltensabstimmung sind trotz der zunehmenden Relevanz von Fahrdynamiksimulationen im Entwicklungsprozess nicht zu ersetzen. In diesem Abschnitt werden daher derartige Versuchsfahrten betrachtet und die drei Durchführungsvarianten Open-Loop, Closed-Loop und Abstimmungsfahrt beschrieben.

#### 2.1.1 Open-Loop

Der Anspruch, fahrdynamische Eigenschaften reproduzier- und messbar zu gestalten, führt zu vielen genormten Versuchsdurchführungen in der Klasse der Open-Loop-Manöver. Kennzeichnend ist die Durchführung im offenen Regelkreis. Für die Darstellung der Tests ist in der Regel eine Fahrdynamikfläche erforderlich. Im Fall der Querdynamik werden festgelegte Lenkradwinkelverläufe ohne Berücksichtigung der Fahrzeugreaktion in das Fahrzeug eingegeben. Dazu kann für verbesserte Genauigkeit auch ein Lenkroboter eingesetzt werden. Die Fahrzeuglängsgeschwindigkeit folgt ebenfalls einem definierten Verlauf. Ein Großteil der Manöver wird jedoch bei konstanter Fahrgeschwindigkeit

<sup>1</sup> PEP ist eine Abkürzung für den Produktentstehungsprozess.

durchgeführt. Beispiele für Tests der Open-Loop-Klasse sind die stationäre Kreisfahrt (DIN ISO 4138), der Lenkradwinkelsprung (DIN ISO 7401) oder der Weave-Test (DIN ISO 13674-1). Von hoher Bedeutung für die Bewertung von Stabilisierungssystemen, wie beispielsweise dem ESP<sup>2</sup>, ist das Fahrmanöver Sine-with-Dwell (FMVSS 126).

Diese Versuche dienen als Basis vieler Grundsatzuntersuchungen. Zur objektiven Beurteilung des Fahrverhaltens werden jeweils charakteristische Kennwerte ausgewertet, die teilweise bereits in den entsprechenden Normen definiert sind. Mit diesen ist ein Vergleich unterschiedlicher fahrdynamischer Ausprägungen auf einer definierten Bewertungsgrundlage möglich. Derartiges Vorgehen ist ein essentieller Bestandteil des Stands der Technik in der Automobilentwicklung.

Durch die Durchführung im Open-Loop wird der Einfluss des Fahrers auf die ermittelten Kennwerte minimiert. Dies hat auch zur Folge, dass die in diesen Tests herbeigeführten fahrdynamischen Zustände nicht immer von ausreichender Relevanz für die reguläre Fahraufgabe sind. Insbesondere finden einige Versuche unter rein stationären Bedingungen statt, die in Normalfahrten nicht auftreten. Im Falle der instationären Testmanöver werden die Zustände wiederum teilweise zu intensiv angeregt. Insgesamt besteht unter Versuchen im Open-Loop ein Defizit an Manövern, welche kundenrelevante oder zumindest dem Fahren im Closed-Loop ähnliche Fahrsituationen bewerten können.

### 2.1.2 Closed-Loop

Standardisierte Manöver im geschlossenen Regelkreis ergänzen die verfügbaren Fahrverhaltenstests. Die Versuche werden ebenfalls überwiegend auf Fahrdynamikflächen durchgeführt. In der Klasse der Closed-Loop-Manöver wird auf der einen Seite der Mensch als Fahrzeugführer bewusst integriert. Andererseits reduzieren relativ enge Vorgaben die mögliche Streuung durch unterschiedliche Fahrweisen. Ein repräsentativer Versuch für die Beurteilung der Fahrzeugquerdynamik ist der doppelte ISO-Spurwechsel (DIN ISO 3888-1). Durch Pylonengassen ist ein Rahmen für Fahrspurwechsel vorgegeben. Dieser wird mit steigender Fahrgeschwindigkeit durchfahren. Als objektive Bewertungsgrößen dienen beispielsweise die erzielte Durchfahrtszeit oder die maximale Geschwindigkeit.

Trotz der strikten Definition der Fahraufgabe treten in der Versuchsauswertung zum objektiven Vergleich verschiedener Fahrzeuge in diesen Manövern größere Streuungen als im Open-Loop auf. Dies liegt zum Einen an unterschiedlichen Fahrstrategien, die auch unter erfahrenen Abstimmungsfahrern variieren. Zum Anderen ist ein Kennwert wie die kleinste erreichte Durchfahrtszeit ein Kriterium für das Gesamtsystem Fahrer-Fahrzeug. Unterschiedlich versierte Fahrer erreichen mit dem selben Fahrzeug verschiedene Zeiten. Auch bei der Ausführung aller Versuche mit einem Fahrer besteht die Möglichkeit, dass die Anpassung an ein Fahrzeug leichter fällt als an ein Anderes. Dies kann ein Indiz für unterschiedliche Qualität des Fahrverhaltens sein. Es ist aber ebenfalls möglich, dass die ermittelten Unterschiede rein an die Fähigkeiten des Fahrers gekoppelt sind.

Closed-Loop-Manöver stellen dennoch eine wichtige Erweiterung der Open-Loop-Versuche dar. Insbesondere die Integration menschlicher Regeltätigkeit bietet das Potenzial,

---

<sup>2</sup> Das elektronische Stabilitätsprogramm ist ein etabliertes Fahrdynamikregelsystem, das primär über radselektive Bremsenriffe die Stabilisierung des Fahrzeugs in kritischen Situationen sicherstellt.



Fahrzeuge in kundenrelevanten Szenarien zu bewerten. Diesen Vorteilen stehen jedoch deutlich höhere Ungenauigkeiten in den ermittelten Kennwerten gegenüber. Die Ableitung von objektiven Größen, die ausschließlich die Eigenschaften des Fahrzeugs charakterisieren, ist herausfordernd und bisher nicht vollständig erfolgt.

### 2.1.3 Abstimmungsfahrt

Eine besondere Stellung im Entwicklungsprozess nimmt die subjektive Bewertung in Abstimmungsfahrten ein. Die Freigabe eines Fahrzeugs hinsichtlich querdynamischer Eigenschaften erfolgt ausschließlich auf Basis der im Closed-Loop gefahrenen Versuche, die auf Prüfgeländen, Teststrecken oder im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt werden. Besondere Bedeutung kommt in der praktischen Abstimmungsarbeit der Nordschleife des Nürburgrings zu, da diese Strecke besonders selektiv bezüglich Fahrwerkeigenschaften ist. Die Beurteilung fahrdynamischer Qualität erfolgt in einem detaillierten Bewertungskatalog, wie beispielsweise in [29] vorgestellt. Für jedes der Kriterien, wie zum Beispiel Lenkungsmittengefühl oder Anlenkverhalten, wird nach einem zweistufigen System eine Bewertung ermittelt. Zunächst wird untersucht, ob das Fahrzeug den Ansprüchen des Industriestandards in diesem Merkmal entspricht. Ist dies der Fall, werden Noten von 5 bis 10 vergeben, anderenfalls von 1 bis 4. Zur zusätzlichen Differenzierung werden auch halbe und viertel Notenstufen genutzt.

Abstimmungsfahrten werden in der Regel ohne im Fahrzeug installierte Messtechnik durchgeführt. Die Bewertung erfolgt ausschließlich durch die vom Fahrer induzierten und verarbeiteten Fahrzeugreaktionsgrößen. Diese werden zunächst von den Sinnesorganen des Versuchingenieurs empfunden und parallel in Relation zu inneren Modellvorstellungen gesetzt [13]. Dieses intrinsische Bewertungsschema wird von der Erfahrung des Abstimmungsfahrers ebenso maßgeblich beeinflusst, wie von markenphilosophisch vorgegebenen Zielgrößen für die Ausprägung fahrdynamischer Eigenschaften. Dies führt in Konsequenz zu einer Erklärungsmöglichkeit, weshalb derart bestimmte Subjektivbewertungen prinzipbedingt nicht vollständig reproduzierbar sein können:

Durch die fortwährende Erweiterung des Erfahrungsschatzes eines Versuchsfahrers unterliegt die Vergleichsdatenbank zur Urteilsfindung bereits einem zeitlichen Wandel. Ein weiterer Einfluss ist der Bedarf eines hochaktuellen inneren Modells, da im Gedächtnis abgelegte Informationen nur dann präzise bleiben, wenn sie regelmäßig abgefragt werden [69]. Dies führt dazu, dass Abstimmungsfahrer permanent im Training sein müssen, um verlässliche Urteile abgeben zu können. Je nachdem, wie lange die letzte Bewertungsfahrt mit vergleichbaren Fahrzeugen zurück liegt, können die Urteile sogar bei ansonsten identischer Gedächtnisdatenbank voneinander abweichen. Versuchsfahrer mit verschiedenen Einsatzgebieten, beispielsweise der Entwicklung divergenter Baureihen oder der Zugehörigkeit zu anderen Markenphilosophien, integrieren zudem jeweils gültige Zusatzmetriken in das Bewertungsmodell. Daher sind die Urteile von Abstimmungsfahrern unterschiedlicher Hersteller nicht zwangsläufig gleichbedeutend. Dies wird durch die Randbedingung zusätzlich verschärft, dass der im Konzern verwendete Urteilkatalog meist Interpretationsspielraum bietet, der zu inkonsistenten Bewertungen führen kann. In Kombination mit der tagesabhängigen Schwankung menschlicher Leistungsfähigkeit ist von einem weiteren Faktor auszugehen, der Unsicherheiten in den Urteilen bewirkt. Im Umkehrschluss wird deutlich, welche hohen Anforderungen an Abstimmungsingenieure zu

stellen sind, um den etablierten und zuverlässigen Produktentstehungsprozess zu ermöglichen.

Diese Bewertungsmethode ist, trotz der angesprochenen Einschränkungen, bisher nicht durch objektive Open- oder Closed-Loop-Verfahren zu ersetzen und zudem das bei Weitem leistungsfähigste Werkzeug zur Abstimmung des Fahrverhaltens. Im nachfolgenden Kapitel werden die Manöver dahingehend untersucht, in wie weit sie der Simulation zugänglich sind. Insbesondere ist eine Beurteilungsmethode, die der Abstimmungsfahrt ähnlich ist, derzeit nicht rein virtuell verfügbar. Auf Grund deren präziser Wirksamkeit besteht daher in der Simulation ein ausgeprägtes Defizit in der Fahrdynamikentwicklung.

## 2.2 Simulation

Der Anteil der Eigenschaften und Funktionen von Fahrwerken, die mit virtuellen Entwicklungsmethoden untersucht werden, steigt kontinuierlich [62]. Dies ist zum Einen in der zunehmenden Rechenkapazität und zum Anderen in der sich stetig verbessernden Simulationspräzision begründet. Im Realversuch eingesetzte Open- und Closed-Loop-Manöver stehen der Simulation in analoger Weise zur Verfügung. Ein der Abstimmungsfahrt ähnliches Verfahren existiert nicht, da es bisher nicht gelingt, simulierten Tests den Beurteilungsprozess des Versuchsingenieurs zugänglich zu machen.

### 2.2.1 Open-Loop

Open-Loop-Manöver sind ideal geeignet, um in der Simulation untersucht zu werden. Voraussetzung ist ein valides Fahrzeugdynamikmodell, das die für den jeweiligen Versuch relevanten Eigenschaften abbildet. Normungsgremien, wie beispielsweise der SC9/AA-I9<sup>3</sup>, befassen sich momentan mit der Erstellung einer Modellierungsvorschrift für die valide Berechnung unterschiedlicher Fahrmanöver. Derzeit gibt es dafür keine Normen oder Hilfsdokumente. Daher setzt die Simulation Expertenwissen bei der Durchführung der Berechnung und Interpretation der Ergebnisse unbedingt voraus.

Von einem validen Modell ausgehend, sind die Vorteile der Simulation offensichtlich. Die Manöver sind reproduzierbar und präzise auszuwerten. Mögliche Verfälschungen der Ergebnisse durch fehlerhafte Messtechnik sind ausgeschlossen, da die Bewegungsgrößen unmittelbar bei der Berechnung ausgelesen werden können. Die ermittelten objektiven Kennwerte sind somit äußerst robust. Es ist daher möglich, Einflüsse unterschiedlicher konstruktiver Umsetzungen oder Regelsysteme objektiv in Relation zu setzen. Zudem können zuverlässige Vergleiche verschiedener Fahrzeuge, zum Beispiel eine Gegenüberstellung von aktuellen Modellen und deren Vorgängern, durchgeführt werden. Die Interpretation der Kennwerte erfolgt analog zu denen aus dem Realversuch. Dies führt zu einer hohen Transparenz der Simulation. Nicht zuletzt daher sind Open-Loop-Simulationen ein wesentlicher Bestandteil des Produktentstehungsprozesses.

---

<sup>3</sup> Der SC9/AA-I9 ist ein Normungsgremium des Verbands der deutschen Automobilindustrie (VDA), dem der Autor angehört. Schwerpunkt der Arbeiten sind Normen mit fahrdynamischer Relevanz.

Auf Basis der Simulation können Fahrzeuge weit vor dem Prototypenbau bereits fahrdynamisch optimiert werden. Es ist jedoch nicht möglich, zu diesem Zeitpunkt Abstimmungen durchzuführen, die in der Präzision mit den Ergebnissen von subjektiven Abstimmungsfahrten vergleichbar sind. Dies liegt zum Teil an noch bestehenden Defiziten in der Modellierungsgenauigkeit, vor allem im Bereich des Lenkgefühls und an den Nachteilen der Open-Loop-Versuche, die analog zum Realversuch sind: Durch die Fahrt im offenen Regelkreis werden teilweise Zustände angeregt und bewertet, die regulären Fahrten nicht entsprechen. Daher ist die Übertragbarkeit der Aussagen auf ein subjektives Gefalensmaß nicht zwingend gegeben.

### 2.2.2 Closed-Loop

Manöver im geschlossenen Regelkreis sind der Simulation ebenfalls zugänglich. Anstatt eines realen Fahrers werden Fahrermodelle genutzt. Diese können gestellte Fahraufgaben analog zu Versuchsfahrern bewältigen. Einige der kommerziellen Varianten sind adaptiv ausgeführt. Sie können ihre Fahrweise an die Erfordernisse des Fahrzeugs anpassen. Häufig werden bei Automobilfirmen auch selbst entwickelte oder erweiterte Fahrermodelle eingesetzt. Dies führt vor allem zu einer gesteigerten Nachvollziehbarkeit des Modellverhaltens.

Obwohl die Fahrermodelltechnologie große Fortschritte erfährt, besteht noch immer eine Differenz zu realem Fahrerverhalten. Wie in Kapitel 2.1.2 dargestellt, sind die aus Closed-Loop-Manövern ermittelten Kenngrößen integrale Bewertungen des Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises. Insofern werden bei Bewertungen auf Basis dieser Versuche zwangsläufig Eigenschaften des Fahrzeugs mit denen des Fahrermodells vermischt. Gegenüber realen Fahrern besteht jedoch der Nachteil, dass keine zusätzliche Subjektivaussage über die Durchführbarkeit eines Manövers mit den untersuchten Fahrzeugen abgefragt und berücksichtigt werden kann. Daher kommt Closed-Loop-Simulationen zwar eine gewisse Bedeutung zu, die Interpretation der Ergebnisse erfordert jedoch genaue Kenntnisse über die zu berücksichtigenden Einschränkungen.

## 2.3 Einordnung in den Produktentstehungsprozess und Definition relevanter Einsatzmöglichkeiten für die Objektivierung

In diesem Abschnitt werden die beschriebenen Untersuchungsmethoden in den PEP eingeordnet. Anschließend werden daraus Einsatzszenarien für ein Objektivierungswerkzeug abgeleitet. Diese bilden die Grundlage für die Analyse des Stands der Technik hinsichtlich der Objektivierung subjektiver Fahreindrücke in Kapitel 3.

### 2.3.1 Bewertungsmethoden im PEP der Automobilindustrie

Der in der Automobilindustrie angewendete Produktentstehungsprozess erfährt eine kontinuierliche Komplexitätssteigerung. Dies wird in [62] auch auf globale Trends zurückgeführt. Aus der Verknappung natürlicher Ressourcen und einer starken Tendenz zur Urba-

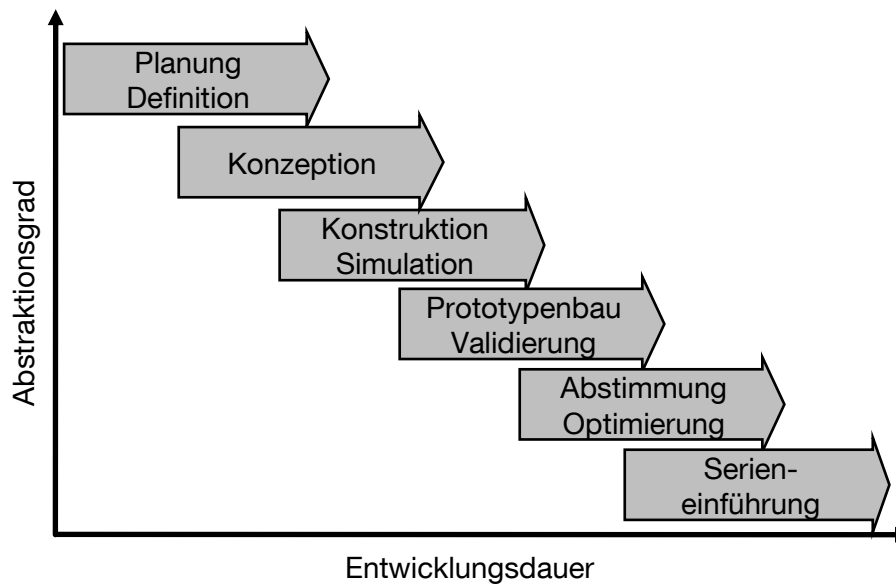


Abbildung 2.2: Automobilier Produktentstehungsprozess

nisierung resultiert ein nachhaltiger gesellschaftlicher Wandel. Zudem verändert sich das Käuferprofil kontinuierlich durch die Alterung der Gesellschaft. Weitere Komplexität vergrößern Faktoren sind die Anforderungen aus geänderten Kundenerwartungen. Durch den starken persönlichen Wunsch der Fahrzeugkäufer, etwas Exklusives zu besitzen, folgt ein sich verschärfender Trend zur Derivatisierung. Innerhalb dieser Fahrzeugvarianten werden ebenfalls Möglichkeiten zur Individualisierung nachgefragt. Im Gegensatz dazu steht nach [9] die gleichzeitige Forderung des dichten Wettbewerbsumfelds, mit innovativen Produkten stets zuerst auf dem Markt vertreten zu sein. Dies zieht die Notwendigkeit nach sich, die Entwicklungszeit zu verkürzen.

Die Automobilindustrie begegnet diesem Zielkonflikt mit einem angepassten Produktentstehungsprozess. Dieser wird nach [28] in Planung und Definition, Konzeption, Konstruktion und Simulation, Prototypenbau und Validierung, Abstimmung sowie Serieneinführung unterteilt. Diese Struktur ist ebenfalls für Entwicklungsumfänge des Fahrwerks gültig. Abbildung 2.2 stellt die Abläufe in zeitlicher Abfolge dar.

Für diese Arbeit sind alle Phasen des PEP relevant. Deutliche Verbesserungen durch ein Objektivierungswerkzeug stehen nur in Aussicht, wenn die Einsetzbarkeit in möglichst vielen dieser Teilprozesse gegeben ist. Simulative Testmethoden werden hauptsächlich in frühen Phasen eingesetzt. Hier besteht nach [62] der Bedarf, möglichst viele Entwicklungsumfänge virtuell abzusichern. Durch fortwährende Überwachung des Reifegrads kann so noch vor dem Aufbau erster Prototypen eine ausreichende Qualität des Konzepts sichergestellt werden. Während der Planungsphase können simulativ Änderungen an Vorgängerfahrzeugen durchgeführt werden, um das Potenzial unterschiedlicher Maßnahmen zu bewerten. In der Konzeptionsphase wird die Simulation genutzt, um Lastenhefte zu präzisieren. Während der Konstruktion und Simulation erfolgt ein kontinuierlicher Abgleich zwischen Berechnungen und Hardware-In-The-Loop-Prüfständen. Letztere bilden ein Bindeglied zwischen virtueller und realer Entwicklungsarbeit.

Mit Beginn der Prototypenerprobung können Gesamtfahrzeugmodelle validiert werden.

Ab diesem Zeitpunkt sind Simulationen des vollständigen Fahrzeugs besonders sicher in ihren Aussagen. Es wird das gesamte Spektrum an Open- und Closed-Loop-Versuchen genutzt. Analoges gilt für reale Prototypen, die jedoch bereits unmittelbar nach der Fertigstellung für Abstimmungsfahrten eingesetzt werden. An dieser Stelle divergieren beide Entwicklungsäste. Dies liegt vor allem daran, dass keine gemeinsame Metrik zur Beurteilung existiert. Für die Abstimmung sind freie Bewertungsfahrten notwendig, die aber keine mit den Ergebnissen der Simulation vergleichbaren Kennwerte generieren. Diese Auseinanderentwicklung innerhalb des PEP verschärft sich bis zur Serieneinführung. Dies äußert sich durch eine starke Abnahme des simulativen Einflusses, der nicht allein aus der Verringerung der Leistungsfähigkeit virtueller Methoden resultiert. Die beschriebene Divergenz führt schließlich zu Einsatzszenarien für ein Werkzeug zur objektiven Beurteilung der Fahrzeugquerdynamik, die im folgenden Kapitel diskutiert werden.

### 2.3.2 Einsatzszenarien der Objektivierung

Im Sinne eines integrierten Entwicklungsprozesses nach [62] ist die Verfügbarkeit von Subjektivurteilen zu jeder Phase im PEP erstrebenswert. Dies kann durch ein leistungsfähiges Objektivierungswerkzeug erreicht werden. Der erfolgreiche Einsatz eines derartigen Hilfsmittels führt jedoch nicht zwingend zu verbesserten Fahrzeugen. Der bestehende Prozess ist bereits in der Lage, die gestellten Anforderungen zu erfüllen. Vielmehr wird der Entwicklungsaufwand durch früheren Erkenntnisgewinn reduziert und die Aussagesicherheit erhöht. Mögliche Einsatzszenarien der Objektivierung subjektiver Fahreindrücke sind nachfolgend beschrieben:

#### **E1 Simulative Potenzialanalyse in der Planungsphase**

In frühen Phasen des PEP ist es erforderlich, Potenzialabschätzungen neuer Technologien auf Basis simulativer Untersuchungen vorzunehmen. Aussagen aus Simulationen sind wegen der Verfügbarkeit ohne reale Prototypen besonders wertvoll. Hier besteht der Bedarf, Analysen auf der Grundlage aussagekräftiger Subjektivurteile durchzuführen. Eine charakteristische Fragestellung dieser Phase ist die eventuelle Einführung neuer aktiver Systeme.

#### **E2 Grundsatzuntersuchungen mit Prototypen in der Planungsphase**

Um die Potenziale von Konzepten oder aktiver Komponenten im Fahrzeug erlebbar zu gestalten, wird auch in der Konzeptions- und Planungsphase häufig auf Prototypen zurückgegriffen. Dies können Umbauten von Vorgängerfahrzeugen mit neuer Technik sein [28]. Die Beurteilung der Innovation erfolgt durch Vorgesetzte oder Abstimmungsfahrer. Kritisch ist die Tatsache, dass neue Technologien teilweise nur bedingt abgestimmt sind und daher nur schwierig eine objektive Bewertung zu ermitteln ist, die nicht auf der unvollständigen Applikation des Systems basiert. Durch ein Objektivierungswerkzeug können Potenziale effizienter und objektiver abgeschätzt werden.

### **E3 Vorabstimmung passiver Fahrzeuge in Konstruktion und Simulation**

Passive Fahrzeuge<sup>4</sup> werden oft durch Zielkorridore für die Kinematik und Elastokinematik vorausgelegt. Diese Methode ist besonders deswegen von Relevanz, weil aus Gesamtfahrzeugsimulationen bisher nur unzureichend auf Gefallensbewertungen zu schließen ist. Mit Objektivierungsergebnissen kann diese Vorauslegung sinnvoll ergänzt werden.

### **E4 Vorabstimmung aktiver Fahrzeuge in Konstruktion und Simulation**

Analoges gilt für die teilweise nachgelagerte Vorauslegung aktiver Komponenten, die jedoch im Gesamtfahrzeugmodell erfolgt. Daher besteht hier im besonderen Maß Bedarf an Objektivierungserkenntnissen aus Simulationen. Bisher werden Systeme häufig anhand simulierter Zeitsignale abgestimmt. Ein aktives Wankabstützungssystem wird daran gemessen, in wie weit Wankwinkel und -geschwindigkeit reduziert werden können. Ein Rückschluss auf Gefallensbewertungen ist bisher nicht vollständig gelungen.

### **E5 Endabstimmung passiver Fahrzeuge in der Abstimmungsphase**

Die Feinabstimmung des passiven Fahrwerks erfolgt im Wesentlichen im Realversuch. Einen Schwerpunkt stellt die Elastokinematik dar. Subjektivurteile von Testfahrern sind in dieser Phase verfügbar. Die enorme Zunahme der Variantenzahl führt jedoch zu einem gesteigerten Abstimmungsbedarf. Die Zahl der Prüfgeländestunden und Versuchsfahrer ist allerdings begrenzt. Durch die Unterstützung eines Objektivierungswerkzeugs stehen daher deutliche Wettbewerbsvorteile in Aussicht.

### **E6 Endabstimmung aktiver Fahrzeuge in der Abstimmungsphase**

Die Applikation von Regelsystemen erfolgt ebenfalls zum Großteil im Realversuch. Neben der Abstimmung des funktionsfähigen Systems sind hier jedoch weitere Umfänge abzusichern, beispielsweise das Verhalten bei teilweisem oder vollständigem Ausfall. Auf Grund der hohen Variantenzahl besteht auch hier ein signifikanter Unterstützungsbedarf im PEP.

### **E7 Monitoring und Benchmarking in allen Phasen**

Der heute vorherrschende Entwicklungsprozess basiert auf einem Zusammenspiel realer und virtueller Verfahren. Daher ist es für die erfolgreiche Nutzung dieses Methodenmix aus Realfahrt und Simulation erforderlich, eine durchgehende Beschreibungsform für die Fahrdynamikabstimmung einzurichten. Erstrebenswert ist ein Hilfsmittel, das in allen Phasen des PEP mit einer homogenen Metrik die Beurteilung von Gesamtfahrzeugen ermöglicht. Dies unterstützt den in [62] angeführten, kontinuierlichen Monitoringprozess. Dieser dient der fortwährenden Überwachung des Entwicklungsstands und mildert Unsicherheiten durch Soll-Ist-Vergleiche ab. Es stehen deutliche Prozessverbesserungen in Aussicht, wenn ein durchgängiges Objektivierungswerkzeug sowohl in Simulationen, Realversuchen und der internen Kommunikation etabliert werden kann.

---

<sup>4</sup> Fahrzeuge ohne aktive Stellelemente (beispielsweise Überlagerungslenkung an der Vorderachse) oder Regelsysteme (zum Beispiel ESP) werden in dieser Arbeit als passiv bezeichnet. Fahrzeuge, deren aktive Systeme deaktiviert sind, werden ebenfalls als passiv eingestuft.

## 2.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden eingangs die vorherrschenden Testverfahren im automobilen PEP vorgestellt. Sowohl in Realfahrt als auch in der Simulation werden Open- und Closed-Loop-Versuche durchgeführt. Jede dieser Analysemethoden weist charakteristische Vor- und Nachteile auf. Daher wird in der Regel auf eine Mischung aus den unterschiedlichen Verfahren zurückgegriffen. Besonders hervorzuheben ist die Rolle der Abstimmungsfahrt. Die dort generierten Urteile sind nach wie vor das alleinige Freigabekriterium für Fahrzeugentwicklungen. Daher wiegt das Fehlen von Subjektivbewertungen im virtuellen Teil der Entwicklung besonders schwer.

Anschließend erfolgt die Diskussion des PEP. Dieser befindet sich in einem Spannungsfeld gegensätzlicher globaler und kundenspezifischer Trends. Die Verknappung natürlicher Rohstoffe stellt hohe Anforderungen an das Fahrzeug der Zukunft. Das agile Marktumfeld fordert innovative Produkte in sich permanent verkürzenden Zyklen. Dies steht im deutlichen Gegensatz zum erhöhten Entwicklungsaufwand, der auf Komplexitätssteigerungen im einzelnen Fahrzeug, aber auch auf die erforderliche Derivatisierung zurückzuführen ist.

Auf Basis dieser Ausgangssituation werden unterschiedliche Einsatzszenarien definiert, die sich über den gesamten PEP erstrecken. Es wird deutlich, dass Bedarf an einem leistungsfähigen Werkzeug zur durchgängigen und objektiven Bewertung der Fahrdynamik besteht. Auf diese Weise können Synergien zwischen realen und virtuellen Teilprozessen genutzt werden. Zudem ist es erst durch ein derartiges Hilfsmittel möglich, eine einheitliche Beurteilungs- und Kommunikationsbasis im Entwicklungsprozess zu etablieren. Da dieses Forschungsfeld bereits intensiv bearbeitet wird, erfolgt im nächsten Abschnitt eine Untersuchung des Stands der Technik zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke der Querdynamik.





## 3 Stand der Technik von Objektivierungsmethoden und Ableitung der Aufgabenstellung

Der Stand der Technik zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke der Querdynamik beinhaltet eine Vielzahl von veröffentlichten Verfahren. Grundlage für die Analyse des Wissensniveaus sind die nachfolgend dargestellten Anforderungen an Beurteilungswerkzeuge. Diese resultieren aus den Inhalten der betrachteten Literatur und dem Erfahrungsschatz zur Objektivierung aus der Anfertigung dieser Arbeit. Die relevanten Quellen lassen sich in drei Obergruppen einteilen: Kennwert-, fahrzeugmodell- und fahrermodellbasierte Ansätze. Repräsentative Arbeiten werden in diesem Kapitel zunächst in diese Kategorien eingeordnet und deren Vorgehensweisen diskutiert. Anschließend erfolgt eine Zusammenfassung und die Ableitung der in dieser Arbeit verfolgten Aufgabenstellung. Abbildung 3.1 stellt diesen Aufbau grafisch dar. Ausführliche Übersichten zum aktuellen Kenntnisstand finden sich zudem in [13, 72].

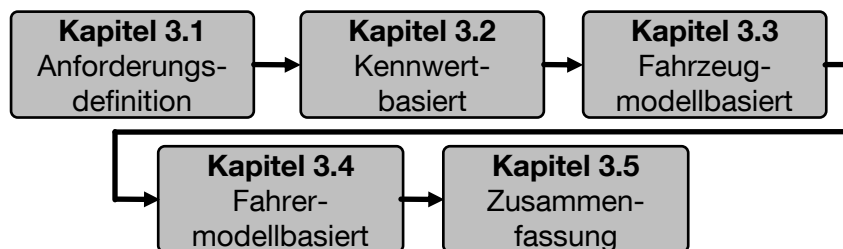


Abbildung 3.1: Aufbau Kapitel 3

### 3.1 Anforderungen

In diesem Abschnitt werden Anforderungen erarbeitet, die an ein leistungsfähiges Objektivierungswerkzeug zu stellen sind. Sie bilden die Grundlage zur Analyse der Arbeiten des Stands der Technik. Sie lassen sich in die drei Kategorien Versuchsdurchführung, Training des Algorithmus und Bewertungsmethodik einordnen.

#### 3.1.1 Versuchsdurchführung

Die Leistungsfähigkeit eines Objektivierungswerkzeugs wird maßgeblich durch die Eigenschaften der Versuchsdurchführung geprägt. Sind die Tests und deren Auswertung unzuverlässig, ist der darauf aufbauende Prozess zur Beurteilung von Fahrzeugen zwangsläufig ebenfalls gewissen Unsicherheiten unterworfen. Zudem müssen die Versuche auch zur Bewertung geeignete Zustände des Fahrzeugs anregen. Auf Grund der steigenden

Relevanz der Simulation ist deren Einsatz in der Versuchsdurchführung vorzusehen. Insgesamt sind in diesem Bereich folgende Anforderungen zu stellen:

#### **A1 Zuverlässigkeit der Fahrversuchsdurchführung und Auswertung**

Objektivierungswerkzeuge basieren in der Regel in zwei unterschiedlichen Phasen auf Fahrversuchen: Während des Trainings des Algorithmus werden Bewertungsfunktionen mit Kennwerten aus den Versuchen parametrisiert. Anschließend wird im Produktiveinsatz aus Messungen mit anderen Fahrzeugen deren subjektive Bewertung prädiziert. Daher ist es für ein Beurteilungsinstrument unbedingt notwendig, dass die zu Grunde liegenden Tests eine hohe Zuverlässigkeit aufweisen. Dies kann durch robuste Durchführung und Erfassung oder geeignete Auswertungsalgorithmen erreicht werden.

Als erste Folgerung wird somit der konsistente Einsatz von leistungsfähiger Messtechnik vorausgesetzt. Weisen die erhobenen Daten Ungenauigkeiten auf, können erstens die in der Trainingsphase ermittelten Kennwerte und die dadurch bestimmten Zusammenhänge mit den Subjektivurteilen fehlerbehaftet sein. Zweitens können die bei der nachfolgenden Prädiktion anderer Fahrzeuge ermittelten Größen messtechnische Artefakte beinhalten, die wiederum zu Falschaussagen aus dem Objektivierungswerkzeug führen. Dies gilt ebenfalls, wenn Simulationen als Basis für die Bewertung herangezogen werden. Hier ist auf einheitliche Positionierung der virtuellen Sensorik zu achten. Besonders bei der Verwendung unterschiedlicher Fahrdynamiksimulationsumgebungen müssen die verwendeten Koordinatensysteme identisch sein. Daher ist Sorgfalt und Präzision in der messtechnischen Erfassung der Bewegungsgrößen eine Grundvoraussetzung für ein leistungsstarkes Bewertungsinstrument.

Unter den genormten Fahrmanövern des Open- und Closed-Loop ist die Wiederholgenauigkeit nicht immer gegeben. Von der Untersuchung werden an dieser Stelle Sensitivitäten des Auswertungsergebnisses hinsichtlich der Fahrzeugkonditionierung ausgeschlossen. Diese sind gesondert zu betrachten, insbesondere sind die Richtlinien in DIN ISO 15037-1 einzuhalten. Zusätzlich werden die Versuchsergebnisse teilweise stark von der Durchführung des Tests beeinflusst. Die größten Ungenauigkeiten treten in der Regel mit Normalfahrern auf. Closed-Loop-Versuche mit dieser Fahrergruppe stellen also tendenziell eine weniger solide Basis zur Objektivierung dar. Andererseits ist zu erwarten, dass die Durchführung von Open-Loop-Versuchen mit Lenkrobotern die größte Genauigkeit aufweist.

Die Streuungen der Versuchsdurchführung können teilweise durch vorteilhafte Auswertungsalgorithmen ausgeglichen werden. Messtechnischen Ungenauigkeiten wird oft mit dem Einsatz von Filtern begegnet. Dies ist bei fehlerfreiem Einsatz möglich. Zudem existieren für verschiedene Durchführungsvarianten bereits umfangreiche Erfahrungswerte, wie robuste Ergebnisse zu erreichen sind. Beispielsweise stellt [13] eine Methode zur Aufbereitung der Bewegungsgrößen aus dem Weave-Test vor. Als Konsequenz ist für Objektivierungswerkzeuge eine verlässliche Auswertung vorauszusetzen. In diesem Fall ist es denkbar, bei geeigneter Nachbearbeitung auch Versuche mit Normalfahrern zur Bewertung heranzuziehen. Es ist jedoch damit zu rechnen, dass die Auswertung komplexer als bei Open-Loop-Manövern ist.

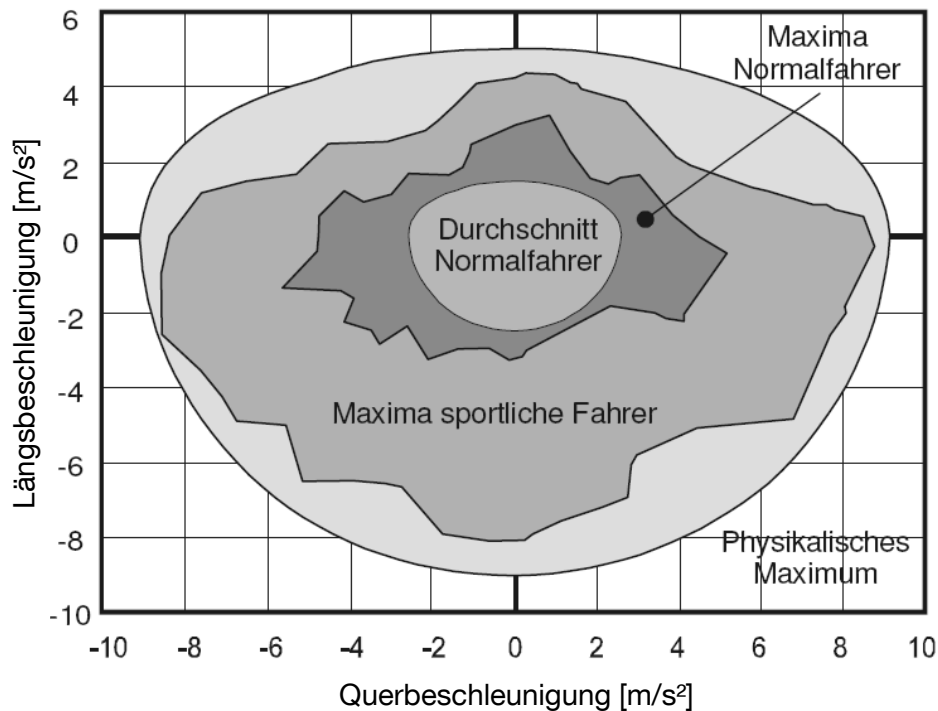


Abbildung 3.2: Ausnutzung der Dynamik von PKW aus [45]

## A2 Realistische und kundenrelevante Testszenerien

Fahrdynamikabstimmung erfolgt nicht zuletzt mit dem Ziel, Kundenanforderungen zu erfüllen. Insofern ist die Berücksichtigung kundenrelevanter Testszenerien eine Anforderung, die an Objektivierungswerkzeuge zu stellen ist. Daraus folgt, dass die von Normalfahrern genutzten Querdynamikpotenziale in der Analyse zu berücksichtigen sind. Abbildung 3.2 stellt die unterschiedliche Potenzialausnutzung von üblichen Kundenfahrten und sportlicher Fahrweise nach [45] gegenüber, die bestehenden Erkenntnissen von beispielsweise [21] entspricht.

Normalfahrer bewegen sich insgesamt sowohl längs- als auch querdynamisch in deutlich niedrigeren Bereichen als sportliche Fahrer. Für übliches Kundenverhalten sind daher besonders Fahrzustände mit niedrigen Querbeschleunigungen relevant. Dennoch muss ebenfalls der hohe Querbeschleunigungsbereich berücksichtigt werden. Dieser ist für sportliche Fahrweise und die öffentlichkeitswirksamen Testberichte etablierter Fachzeitschriften von besonderer Bedeutung. Zudem ist die Beherrschbarkeit im Grenzbereich eine Voraussetzung für die Sicherheit des Fahrzeugs. Gemeinsam sind der Normal-, und der sportlichen Fahrt Übergänge zwischen Geradeausfahrt, Einlenken und Durchfahren der Kurven sowie das Zurücklenken in die Geradeausfahrt. Bei Wechselkurven erfolgt anstatt des Rücklenkens das Einlenken in die Folgekurve. Bei sportlicher Fahrweise findet die Lenkbewegung schneller statt und höhere Querbeschleunigungen werden erreicht. Dennoch ist der Übergang von Geraden in Kurven von signifikanter Bedeutung für das Fahrempfinden und dessen Beurteilung.

Im starken Gegensatz dazu stehen die üblichen Open-Loop-Testverfahren. Diese weisen das Defizit auf, überwiegend stationäre, eingeschwingene oder übertrie-

ben instationäre Zustände des Fahrzeugs anzuregen. Während einer stationären Kreisfahrt wird nach DIN ISO 4138 und [55] die Eigenlenkcharakteristik erfasst, obwohl in regulärer Fahrt derart klinische Zustände nicht auftreten. Im Weave-Test erfolgt die Auswertung erst dann, wenn das Fahrzeug einen eingeschwungenen Zustand erreicht hat. Analog ist das Vorgehen bei der Ermittlung des Frequenzgangs. Dennoch prägt gerade der instationäre Aufbau der Bewegungsgrößen reguläres Kurvenfahren. Ein etablierter Test für instationäres Verhalten ist der Lenkradwinkelsprung aus DIN ISO 7401. Dieser wird mit Lenkradwinkelgeschwindigkeiten von etwa  $300^\circ/s$  gefahren. Normal- und Sportfahrer lenken aber bei Weitem langsamer [75]. Insofern werden instationäre Fahrzustände zwar angeregt, jedoch in einem Maß, wie sie für das reale Fahren irrelevant sind. Zudem bestehen für aktive Fahrwerksysteme teilweise Defizite in der Versuchsauswertung. Dennoch ist nicht auszuschließen, dass Zusammenhänge zwischen Kennwerten aus diesen Manövern und Subjektivbewertungen bestehen. Mit stabilen und allgemeingültigen Korrelationen kann der Anforderung nach kundenrelevanten Manövern folglich indirekt entsprochen werden.

Eine Verbesserung der Kundenrelevanz stellen Closed-Loop-Manöver dar. Sowohl der einfache als auch der doppelte Spurwechsel sind repräsentative Fahrscenarien für reguläres Führen von PKW. Durch die Anpassung der Fahrgeschwindigkeit können unterschiedliche Querdynamikniveaus betrachtet werden. Da auf diese Weise realitätsnahe Versuche im geschlossenen Regelkreis gefahren werden können, ist zu erwarten, dass mit diesen Tests leichter Zusammenhänge zwischen Kennwerten und Subjektivbewertungen gefunden werden können. Dem steht bisher allerdings der erhöhte Aufwand bei der Auswertung gegenüber.

#### **A3 Durchführungsalternativen Realfahrt und Simulation**

Aus dem zunehmenden Bedarf, virtuelle Fahrversuche zur Auslegung von Fahrzeugfunktionalität zu nutzen, leitet sich eine weitere Anforderung an die Versuchsdurchführung eines Objektivierungswerkzeugs ab. Es ist erforderlich, dass Messdaten sowohl aus der Simulation als auch aus der Realfahrt stammen können. Dies stellt besondere Ansprüche an die Bewertungsmethodik. Wenn eine ausreichende Validität des Simulationsmodells besteht, sind virtuelle Fahrten im Allgemeinen einfacher in die Auswertung zu integrieren, da keine Streueffekte auftreten. Werden reale Messdaten genutzt, muss das Objektivierungsverfahren eine geeignete Datenaufbereitung durchführen. Beispielsweise müssen Auswirkungen von eventuell vorhandener Seitenneigung der Fahrbahn rechnerisch korrigiert werden. Alternativ ist methodisch sicherzustellen, dass Schwankungen in den Randbedingungen keinen Einfluss auf die Bewertung haben. Dies gilt beispielsweise ebenfalls für den zu berücksichtigenden Straßenreiwert. Diese Anforderung beinhaltet also, dass die Ergebnisse unabhängig davon sind, ob der Versuch in Realfahrt oder Simulation durchgeführt wird, sofern das Simulationsmodell valide ist.

#### **3.1.2 Training des Algorithmus**

Der Trainingsprozess umfasst diejenigen Abläufe eines Objektivierungswerkzeugs, die zur Generierung der für die Beurteilungsermittlung erforderlichen Metriken dienen. Ergebnis der Trainingsphase sind beispielsweise Regressionsfunktionen, auf deren Basis

im Produktiveinsatz die Notenberechnung erfolgt. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei wesentliche Anforderungen identifiziert, die diesen Bereich betreffen. Diese sind nachfolgend erläutert:

#### **A4 Moderater Bedarf an Trainingsdaten**

Bisher durchgeführte Untersuchungen zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke nutzen im Wesentlichen das statistische Hilfsmittel der linearen Korrelations- und Regressionsrechnung, um Zusammenhänge zwischen Messung und Subjektivurteil zu ermitteln. In [25] werden die aus der Literatur bekannten Randbedingungen genannt, die für derartige Untersuchungen notwendig sind. Ein Kernbestandteil sind Aussagen zu minimalen Datenbeständen und maximaler Größe der Trainingsbasis. Die Beachtung dieser Richtlinien ist notwendig, um statistisch belastbare Aussagen zu gewinnen. Im Zusammenhang mit Untersuchungen zur Objektivierung ist dies jedoch differenziert zu betrachten.

Fahrdynamikmessungen weisen trotz moderner Messtechnik und einem umfangreichen Erfahrungsschatz der Versuchsingenieure Streuungen auf. Dies gilt insbesondere für instationäre Manöver. Abweichungen in äußeren Rahmenbedingungen oder der Durchführungsweise führen zu Änderungen in den Zeitverläufen und in Konsequenz zu differierenden Kennwerten. Diese Einflüsse können durch die Berücksichtigung einer großen Datenbasis abgemildert werden.

Anders verhält es sich mit den Subjektivurteilen der Versuchsfahrer (siehe auch Kapitel 2.1.3). Deren Urteile weisen Schwankungen auf, die von deutlich mehr Parametern beeinflusst sind als von Ungenauigkeiten in der Versuchsdurchführung. Beispielsweise kann durch Unterschiede in der Tagesform von einem einzigen Testfahrer das selbe Fahrzeug abweichend bewertet werden. Dies wirkt umso schwerer, weil in Serie produzierte Fahrzeuge überwiegend gute Bewertungen erhalten und der Notenspielraum somit vergleichsweise eng ist. Die Berücksichtigung von mehreren Stichproben eines Fahrers kann in Folge die gewonnene Aussage bereits verfälschen. Dies kann jedoch nicht durch Mittelwertbildung behoben werden, da in der Regel keine gleichmäßige Verteilung vorliegt. In einigen Arbeiten werden zudem mehrere Versuchsfahrer eingesetzt, um die Verlässlichkeit der Datenbasis zu steigern. Dies erscheint nicht unbedingt zielführend. Zwischen verschiedenen Fahrern eines Konzerns treten bereits Differenzen bei der Urteilsbildung auf, obwohl eine große Übereinstimmung in Begrifflichkeit und Markenphilosophie vorherrscht. Sind die Fahrer aus unterschiedlichen Unternehmen, werden die Differenzierungen der Fahrzeuge teilweise vollständig von den Streuungen der Subjektivurteile überlagert.

Die Forderung nach moderatem Trainingsdatenbedarf ist somit nicht ohne Weiteres eindeutig zu erfüllen. Dennoch ist es ein Maß für die Aussagegüte eines Ansatzes, wenn die angeführten Aspekte ausreichend berücksichtigt werden. Das Einhalten der Richtlinien für statistisch relevante Stichproben kann jedoch nicht als alleiniges Kriterium angesehen werden.

#### **A5 Indikation von erfolgreichem oder erneut notwendigem Training**

Neben einem geeignet dimensionierten Trainingsdatenbestand müssen Objektivierungswerkzeuge Rückmeldung liefern, ob der Trainingsprozess erfolgreich abgeschlossen ist. Dies führt zur Konsequenz, dass strikt zwischen Trainingsphase und

Produktiveinsatz zu unterscheiden ist. Ein leistungsfähiges Werkzeug muss mit definiertem Aufwand parametrisiert und anschließend ohne weitere Anpassungen zur Bewertung genutzt werden können. Um diese Trennung darzustellen, ist ein Indikator vorzusehen, der eindeutig kennzeichnet, ob der Trainingsprozess erfolgreich oder zu wiederholen ist.

Dies kann für die Regressionsrechnung durch eine Kombination aus der betrachteten Menge an Daten und deren Streuung um den identifizierten Zusammenhang erreicht werden. Wenn sogenannte Black-Box-Verfahren<sup>5</sup> angewendet werden, sind analoge Stabilitätskriterien heranzuziehen.

Dieser Indikator kann zudem genutzt werden, um erneuten Trainingsbedarf zu signalisieren. Durch die Veränderung des Stands der Technik in der Automobilentwicklung ist davon auszugehen, dass der einmal ermittelte Bewertungszusammenhang zeitlich begrenzt gültig ist. Beispielsweise werden durch aktuelle Fahrdynamikregelsysteme im Vergleich zum bisherigen Entwicklungsniveau deutlich höhere Gierverstärkungen erreicht. Mit einem geeigneten Testdatensatz sollte das Objektivierungsinstrument dahingehend überprüft werden können, ob der bestehende Trainingsdatensatz weiterhin gültige Ergebnisse liefert. Es ist zu erwarten, dass regelmäßige Aktualisierungen der Trainingsbestände notwendig sind. Daher ist eine eindeutige Indikation für die Erneuerung der Datenbasis notwendig.

#### 3.1.3 Bewertungsmethodik

Die dritte Anforderungsgruppe neben der Versuchsdurchführung und dem Trainingsprozess bildet die Bewertungsmethodik. Deren Funktion ist die Berechnung von Subjektivurteilen aus zuvor erhobenen Daten des Fahrzeugs. Dies können beispielsweise Kennwerte aus Fahrmanövern sein. Im Hinblick auf ein verlässliches Werkzeug zur objektiven Bewertung der Fahrzeugquerdynamik sind folgende Anforderungen zu stellen:

##### A6 Kausalität

Grundvoraussetzung zur Ableitung von möglichst allgemeingültigen Aussagen ist ein kausaler Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen einer Objektivierungsmethode. Aussagen, die auf rein statistisch gewonnenen Relationen basieren, sind als nicht unbedingt zielführend zu bezeichnen, wenn nicht in der Vor- und Nachbereitung geeignete Maßnahmen ergriffen werden, um ursächliche Abbildungen darzustellen.

Eine Möglichkeit, um dieser Anforderung zu entsprechen, ist die Vorauswahl derjenigen Größen, die zur statistischen Analyse herangezogen werden. Für das Lenkgefühl bei hohen Geschwindigkeiten ist beispielsweise von keinem kausalen Zusammenhang mit Kennwerten aus der Fahrt mit niedrigem Tempo auszugehen. Sinnvoll ist somit zum Beispiel eine Strukturierung in Geschwindigkeits- und Querbeschleunigungsniveaus. Eine andere Herangehensweise ist die explizite Betrachtung des Beurteilungsprozesses, den Abstimmungsingenieure nutzen. Je mehr die

---

<sup>5</sup> Unter Black-Box-Verfahren werden statistische Methoden wie z.B. neuronale Netze und Regressionsbäume zusammengefasst. Kennzeichnend sind ein automatischer Lernprozess und geringe Informationen über innere Abläufe.

eingesetzte Metrik auf deren Vorgehensweise basiert, desto wahrscheinlicher ist die Identifikation gültiger ursächlicher Zusammenhänge.

Diese Anforderung ist von hoher Relevanz, um einen signifikanten Fortschritt in der Objektivierung subjektiver Fahreindrücke zu erzielen. Die Analyse des Bewertungsprozesses realer Testfahrer scheint zur Erfüllung notwendig.

#### **A7 Gültigkeit bei aktiven Systemen**

Moderne Fahrzeuge sind durch vermehrten Einsatz aktiver Systeme im Fahrwerk gekennzeichnet. Die Eigenschaften dieser Regelsysteme überlagern sich mit der Auslegung des passiven Fahrzeugs. Für zufriedenstellende Fahreigenschaften ist folglich die Abstimmung der Kombination aus aktiven und passiven Systemen unbedingt erforderlich. Das ist vor allem für aktuelle Forschungsarbeiten in der Automobilindustrie notwendig, die eine Vereinfachung des passiven Fahrwerks durch Aktuatorik auszugleichen versuchen. Zusätzliche Bedeutung erhält diese Anforderung durch umfangreiche Konfigurationsmöglichkeiten des Kunden. Durch Einstellungsvarianten aktiver Komponenten können verschiedene Charakteristika erzeugt werden. Ein Fahrzeug kann darüber hinaus mit unterschiedlichen Regelsystemen ausgestattet werden. Die Aufgabe des OEM<sup>6</sup> ist es, für jede dieser Kombinationen die einwandfreie und ansprechende Funktionalität zu gewährleisten und abzusichern.

Daher sind aktive Systeme von einem Objektivierungswerkzeug zu berücksichtigen. Um eine möglichst große Allgemeingültigkeit zu erreichen, sollte die verwendete Metrik auch mit zukünftigen Regelsystemen valide sein. Dies gilt auch für Entwicklungsumfänge von Zulieferern, deren Funktionsweise dem OEM nicht oder nur teilweise zugänglich ist.

#### **A8 Bewertung auf Basis von Einzelkriterien**

In der Fahrwerkabstimmung wird in der Regel ein detaillierter Bewertungskatalog, beispielsweise nach [29] verwendet. Die Beurteilung erfolgt auf einer Skala von 1 bis 10. Mittelwerte mehrerer Teilmittel, um beispielsweise ein Gesamturteil ableiten zu können, werden zur Abstimmung nicht genutzt. Einzelne Mängel beeinflussen das Gesamturteil derart, dass unter Umständen ein ansonsten ideal abgestimmtes Fahrwerk nicht freigegeben werden kann. Um Akzeptanz im Unternehmen zu finden und in bestehende Prozesse integrierbar zu sein, ist dieses Schema und die entsprechende Skala von einem Objektivierungswerkzeug zu nutzen. Dies stellt eine elementare Anforderung dar und bedingt gleichzeitig einen hohen Reifegrad des Bewertungsverfahrens.

#### **A9 Modulbasierte Bewertung**

Die Endphase des Produktentstehungsprozesses hat häufig die Eliminierung kleinerer Detailabstimmungsmängel zum Inhalt. Das Fahrwerk entspricht in der Regel schon in den meisten Bereichen den Zielvorgaben. Allerdings treten bei der Erprobung teilweise Einzelphänomene auf, die den Gesamteindruck eines ansonsten zufriedenstellenden Fahrwerks verschlechtern. Für diese Untersuchungen ist ein präzises Hilfsmittel notwendig. Da in dieser Phase der Zeitdruck sehr hoch ist, muss der Rüstaufwand minimiert werden. Daher sollten Objektivierungskonzepte

---

<sup>6</sup> OEM ist eine Abkürzung für Original Equipment Manufacturer, den Fahrzeughersteller.

modular aufgebaut sein. Auf diese Weise können beispielsweise unter Einsatz eines Messlenkrads Abstimmungen am Aufbau des Lenkradmoments vorgenommen und bewertet werden, ohne dass zusätzlich die Installation von Inertialmesstechnik notwendig ist. Die Objektivierungsmethode muss durch einen geeignet segmentierten Aufbau auf diese Einsatzszenarien skalierbar sein.

#### **A10 Einsetzbarkeit im gesamten Produktentstehungsprozess**

Wie in Kapitel 2.3 diskutiert, besteht im automobilen Entwicklungsprozess der Bedarf an integrierten Werkzeugen, die im gesamten PEP verwendbar sind. Grundvoraussetzung ist folglich die Verfügbarkeit in Realfahrt und Simulation (A3). Dennoch sind zusätzliche Eigenschaften des Werkzeugs erforderlich, um universell einsetzbar zu sein. Diese betreffen vor allem die Qualität der Gesamtsoftware.

Die Schnittstellen der Bewertungsroutine sind klar zu definieren und an bestehende Prozesse im Unternehmen anpassbar auszuführen. Etablierte Instrumente aus anderen Domänen, beispielsweise Betriebswirtschaft, Package oder Komfort sind auf diese Weise kompatibel. Zudem sind verschiedene Betriebsmodi vorzusehen. Dadurch werden unterschiedliche Detaillierungsstufen und Einsatzarten ermöglicht. Das Werkzeug sollte bei Erprobungsfahrten im Fahrzeug ebenso einsetzbar sein, wie zur nachträglichen Analyse bestehender Mess- und Simulationsdaten. Des Weiteren ist die Verwendung in Besprechungsrunden sowohl zur horizontalen Kommunikation innerhalb der Arbeitsgruppe als auch zur Dokumentation und Begründung in vertikaler Richtung gegenüber Vorgesetzten vorzusehen.

Diese Anforderung ist häufig nicht Bestandteil der Untersuchungen, die im Rahmen einer wissenschaftlichen Tätigkeit durchgeführt werden. Daher ist zu analysieren, in wie weit die prototypisch entwickelte Methodik grundsätzlich für den Einsatz im gesamten Produktentstehungsprozess geeignet ist.

Nachfolgend werden die Veröffentlichungen des Stands der Technik in drei Gruppen vorgestellt. Zudem findet jeweils eine Analyse der Kategorien hinsichtlich der definierten Anforderungen und Einsatzszenarien aus Abschnitt 2.3.2 statt.

## **3.2 Kennwertbasierte Korrelationsanalysen**

Der Klasse kennwertbasierter Korrelationsanalysen gehört ein Großteil der veröffentlichten Methoden an. Kennzeichnend ist der in Abbildung 3.3 dargestellte Ansatz zur Objektivierung. Ausgehend von Fahrversuchen, die häufig im Open-Loop durchgeführt werden, erfolgt die Berechnung objektiver Kennparameter. In weiteren Fahrten werden von Versuchsfahrern Subjektivurteile zum aktuellen Fahrzeug abgefragt. Anschließend findet die statistische Auswertung der Subjektivurteile auf Zusammenhänge mit den ermittelten Kennwerten statt.

Diese Gruppe lässt sich nach der Durchführungsart der Manöver unterteilen. Die nachfolgenden Abschnitte beschreiben die Varianten mit Lenkrobotern zur automatisierten Manöverabsolvierung und diejenigen mit manueller Ausführung. Anschließend wird eine Analyse kennwertbasierter Verfahren bezüglich der Einsatzszenarien und der Anforderungen aus den Kapiteln 2.3.2 und 3.1 durchgeführt.



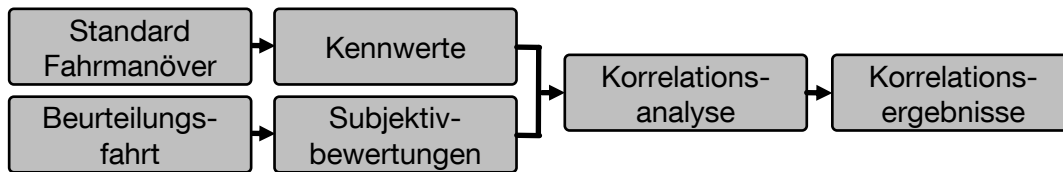


Abbildung 3.3: Vorgehensweise kennwertbasierter Objektivierung

### 3.2.1 Automatisierte Manöverdurchführung

Die automatisierte Durchführung mit Lenkrobotern (siehe beispielsweise Abbildung 3.4 aus [23]) stellt die genaueste Ausführung der Manöver in Aussicht. Daher sind die errechneten Kennwerte präziser als bei allen anderen Versuchen. Umfangreiche Erkenntnisse konnten in [23] gewonnen werden. Teilergebnisse dieser Untersuchung sind zudem in [24, 25] veröffentlicht.



Abbildung 3.4: Lenkroboter und Messtechnik aus [23]

Diese Arbeit ist vor allem wegen der hohen Bandbreite an untersuchten Fahrzeugen von besonderem Interesse. Unterschiedliche Segmente werden von jeweils etwa fünf Fahrzeugen besetzt und in umfangreichen Tests vermessen. Der wesentliche Untersuchungsgegenstand sind Open-Loop-Tests. Die eingesetzten Manöver sind Lenkradwinkelsprünge, Lenkradwinkelrampen, stationäre Kreisfahrt, Einzelsinus, Weave-Test, Geradeausfahrt und Frequenzgang. Durch die große Datenmenge und den Einsatz moderner Messtechnik sind diese Messungen als bisher ausführlichste und genaueste innerhalb der Objektivierungsveröffentlichungen zu bezeichnen. Umfangreichere Versuche werden bisher in keiner Untersuchung durchgeführt. Insofern sind weitreichende Erkenntnisse zu erwarten.

Durch lineare einfache und multiple Regressionsrechnung werden die Kennwerte aus den genannten Manövern auf Korrelationen zu Subjektivurteilen geprüft. Einige zeigen in dieser Untersuchung signifikante Zusammenhänge. Besondere Bedeutung ist der erstmals in dieser Deutlichkeit aufgezeigten Segmentabhängigkeit einiger Abbildungen bei-

zumessen. Andere Beziehungen sind wiederum über alle Sparten konstant. Dies gilt insbesondere für Relationen mit Beteiligung des Lenkradmoments.

Um die Restriktionen von Open-Loop-Manövern zu umgehen, wird im Ansatz in [44] der Lenkroboter mit zusätzlicher Sensorik und einem Regelalgorithmus ausgestattet. Dies ermöglicht reproduzierbare Closed-Loop-Versuche. Dadurch sind kundennähere Szenarien, wie beispielsweise der ISO-Spurwechsel, analysierbar. Die Arbeiten werden aktuell fortgeführt und stellen wegen des gezielt weiterentwickelten Vorgehens umfangreiche Ergebnisse in Aussicht.

Einen fortgeschrittenen Stand hat ein bei der Audi AG eingesetztes Verfahren, das in [64] vorgestellt wird. Unterschiedliche Fahrdynamiksimulationen werden durchgeführt und anschließend deren Kennwerte bestimmt. Diese werden zum Einen mit Realmessungen abgeglichen und zum Anderen für die Prädiktion eines Quasi-Subjektivurteils genutzt. Die Größen werden dabei teilweise in Abhängigkeit voneinander betrachtet. Zudem wird der Beurteilungskatalog kontinuierlich gepflegt. Dies ermöglicht den Einsatz des Verfahrens zur Potenzialabschätzung in der Simulation.

#### **3.2.2 Manuelle Manöverdurchführung**

Um den Rüstaufwand zur Erlangung aussagekräftiger Versuchsergebnisse zu reduzieren, wird in [13] manuell gelenkt. Dadurch sind die durchgeführten Manöver Weave-Test, Frequenzgang und Lenkradwinkelrampe weniger präzise. Dies wird durch einen geeigneten Auswertungsalgorithmus ausgeglichen. Eine methodische Besonderheit dieser Arbeit ist ein Subjektivfragebogen, der gängigen Standards entspricht, diese aber um die explizite Frage nach wahrgenommenen Unterschieden zwischen Fahrzeugen erweitert. Eine Kernaussage ist, dass die Stellungnahmen zur Wahrnehmung deutlich besser mit gefundenen Subjektivurteilen korrelieren. Darüber hinaus wird festgestellt, dass Kennwerte aus Closed-Loop-Versuchen teilweise bessere Regressionen ergeben als Open-Loop-Größen. Dies kann jedoch durch die Kombination mehrerer Kennwerte ausgeglichen werden. Abschließend wird festgestellt, dass eine Trennung in lenkradwinkelbezogene Querdynamik und momentabhängiges Lenkgefühl nicht zielführend erscheint. Die Verknüpfung der vier primären Größen Querbewegung, Giergeschwindigkeit sowie Lenkradwinkel und -moment stellt sich als zu intensiv heraus.

In diversen Untersuchungen zu Geradeauslauf und Seitenwindempfindlichkeit wird häufig im Closed-Loop gemessen. Beispielhaft sind die Arbeiten [14, 19] zu erwähnen. Deren Erkenntnis ist unter anderem, dass das Subjektivurteil zur Geradeausfahrt mit einem Integralwert unter dem Lenkradwinkelspektrum korreliert. Für die Integrationsgrenzen werden ebenso Werte angegeben, wie für die Regressionsgleichungen. Methodisch stellt dies einen Paradigmenwechsel dar. Über die Belastung des Fahrers wird auf Fahreigenschaften geschlossen.

In den Arbeiten [16, 36] wird überwiegend auf Spurwechselmanöver zurückgegriffen. Als Begründung hierfür wird eine große Übereinstimmung zwischen den Subjektivnoten aus genanntem Manöver und der freien Landstraßenfahrt angeführt. Objektive Kriterien und subjektive Bewertungen werden in Einzel- oder multipler Korrelation untersucht. Es wird angeregt, die Wahrnehmung und Informationsverarbeitung des Fahrers in zukünftigen

Untersuchungen zu betrachten. In [36] wird zudem explizit eingeräumt, dass die ermittelten Regressionsergebnisse wegen der Komplexität der Closed-Loop-Tests nur bedingt übertragbar sind.

Kennzeichnend für die kennwertbasierte Objektivierung mit manueller Lenkradbetätigung ist, dass bisher keine Ansätze bekannt sind, die Messdaten aus Abstimmungsfahrten zur Ermittlung der Objektiv-Subjektiv-Korrelationen einsetzen. Dies liegt vor allem daran, dass aus diesen Fahrten nur bedingt Kennwerte abgeleitet werden können. Es ist jedoch zu vermuten, dass es für den Versuchsfahrer möglich ist, während dieser Closed-Loop-Versuche Indikatoren zu ermitteln, aus welchen das gebildete Urteil resultiert.

### 3.2.3 Analyse hinsichtlich Einsatzszenarien und Anforderungen

Jede der drei Kategorien bisher veröffentlichter Objektivierungsansätze wird einer Analyse hinsichtlich der Einsatzszenarien (siehe Abschnitt 2.3.2) und Anforderungen (siehe Kapitel 3.1) unterzogen. Die Einzelgruppen werden als Gesamtheit geprüft. Zunächst wird analysiert, in wie weit die Verfahren für das Szenario geeignet sind. Anschließend wird zusätzlich bewertet, ob die in dieser Arbeit gestellten Anforderungen erfüllt werden können. Es werden die Abstufungen + (einsetzbar, Anforderung erfüllt), o (bedingt einsetzbar, Anforderung teilweise erfüllt) und - (nicht einsetzbar, Anforderung nicht erfüllt) vergeben.

Die Beurteilung bezüglich der Einsatzszenarien erfolgt in dieser Arbeit vor der Einschätzung der Anforderungserfüllung, weil der explizite Bedarf an einer durchgängig einsetzbaren Methodik besteht. Daher ist die positive Bewertung in möglichst vielen Anwendungsfällen besonders ausschlaggebend. Wird dort ein o oder - erzielt, ist das gleichzeitig die maximale Gesamtnote in dieser Spalte, unabhängig vom Erfüllungsgrad der Anforderung. Dieser ist die zweite Wertungsstufe. Daraus resultiert ein Beurteilungsschema, das in Tabelle 3.1 zusammenfasst ist. Die Spalte E beinhaltet die Beurteilung hinsichtlich der Einsatzszenarien. Unter A ist die Relation zu gestellten Anforderung eingetragen.

E	A	Gesamt
+	+	+
+	o	o
+	-	-
o	+	o
o	o	o
o	-	-
-	+	-
-	o	-
-	-	-

Tabelle 3.1: Angewandte Bewertungsstufen

Wegen der gewählten Bewertungsreihenfolge ist zunächst die Einsetzbarkeit kennwertbasierter Verfahren einzustufen. Durch die Verfügbarkeit der benötigten Kennwerte in Simulation und Realversuch sind diese Verfahren sehr universell einsetzbar. Daher sind die Szenarien E3 und E5 mit diesen Methoden bearbeitbar (+). Einschränkungen bestehen bei der Nutzung mit aktiven Systemen (E1, E2, E4, E6), da derartige Regelkonzepte die

Kennwerte teilweise nachhaltig verfälschen (o). Als Beispiel ist der TB-Wert zu nennen, der mit einer Hinterradlenkung an Bedeutung verlieren kann [66]. Um als Benchmarking- und Monitoring-Werkzeug nutzbar zu sein, muss die durchgehende Einsetzbarkeit im gesamten PEP gegeben sein. Dies ist bei kennwertbasierten Verfahren nur stark eingeschränkt gegeben (-), da der hohe Aufwand für die in der Regel komplexen Messungen in späten Phasen nicht mehr aufzubringen ist und Defizite bei der Beurteilung aktiver Systeme bestehen.

Hinsichtlich der in dieser Arbeit definierten Anforderungen zur Versuchsdurchführung sind die kennwertbasierten Ansätze differenziert zu betrachten. Hervorragend (+) ist die Reproduzierbarkeit der Manöver (A1). Kundenrelevante Szenarien (A2) werden in der Regel nicht betrachtet (-). Die Nutzung in Simulation und Realfahrt (A3) ist hingegen möglich (+). Der Trainingsprozess kann einen moderaten Bedarf an Trainingsdaten (A4) aufweisen (o), je nach verwendeter Auswertung. Erfolgreiches Training (A5) wird bisher nicht angezeigt (-).

Den Bedarf an Kausalität (A6) können kennwertbasierte Verfahren nicht decken (-). Dazu sind die gefundenen Zusammenhänge methodisch zu verschiedenen von dem Bewertungsvorgehen der Testfahrer. Die Gültigkeit der Aussagen bei aktiven Systemen (A7) ist nicht immer gegeben (o). Bewertungen auf Basis von Einzelkriterien (A8) werden ermittelt (+). Eine ausreichende Modularität der Beurteilung (A9) ist in der Regel nicht berücksichtigt, kann aber erreicht werden (o). Die Einsetzbarkeit im gesamten PEP (A10) wird bisher nicht ausreichend in die Überlegungen integriert (-). Eindeutige Schnittstellendefinitionen werden meist nicht explizit angegeben. Tabelle 3.2 fasst die Analyse zusammen.

	<b>E1</b> Pla- nung simu- lativ	<b>E2</b> Pla- nung real	<b>E3</b> Vorab- stimm- ung passiv	<b>E4</b> Vorab- stimm- ung aktiv	<b>E5</b> Endab- stimm- ung passiv	<b>E6</b> Endab- stimm- ung aktiv	<b>E7</b> Moni- tor- ing
<b>A1</b> Zuverlässigkeit	o	o	+	o	+	o	-
<b>A2</b> Testszenarien	-	-	-	-	-	-	-
<b>A3</b> Durchführung	o	o	+	o	+	o	-
<b>A4</b> Trainingsbedarf	o	o	o	o	o	o	-
<b>A5</b> Indikation	-	-	-	-	-	-	-
<b>A6</b> Kausalität	-	-	-	-	-	-	-
<b>A7</b> Generalisierung	o	o	o	o	o	o	-
<b>A8</b> Einzelkriterien	o	o	+	o	+	o	-
<b>A9</b> Modularität	o	o	o	o	o	o	-
<b>A10</b> Einsetzbarkeit	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3.2: Analyse kennwertbasierter Objektivierung

### 3.3 Fahrzeugmodellbasierte Objektivierung

Kennwertbasierte Verfahren weisen in der Versuchsdurchführung teilweise erhebliche Ungenauigkeiten auf. Dies lässt sich durch ausreichende Erfahrung und gute Streckenbedingungen auf Prüfgeländen verbessern. Dadurch steigen jedoch sowohl der Aufwand

als auch die Kosten für derartige Versuche und Auswertungen. Fahrzeugmodellbasierte Methoden adressieren vor allem diese Streuungen im Versuchs- und Auswertungsprozess.

Abbildung 3.5 verdeutlicht zwei unterschiedliche Objektivierungsvorgehensweisen auf Basis von Fahrzeugmodellen. Neben der Erhebung von Subjektivurteilen wird parallel ein Fahrzeugmodell derart bedatet, dass die gemessenen Reaktionsgrößen mit den simulierten bestmöglich übereinstimmen. Dazu werden unterschiedliche mathematische Formulierungen, wie Einspur- und Zweispurmodelle verwendet. Die Ermittlung der Parameter kann online<sup>7</sup> und offline<sup>8</sup> erfolgen. Die so bestimmten Fahrzeugmodellparameter werden im ersten Fall anschließend auf Zusammenhänge zu Subjektivurteilen untersucht. Die methodisch aufwändigere Auswertung nutzt das Modell nicht direkt für die Objektivierung. Vielmehr erfolgt die Simulation von Standardfahrmanövern (siehe Kapitel 2). Diese können anschließend mit hoher Präzision ausgewertet und auf Korrelationen mit Subjektivurteilen untersucht werden. Die Methodik stellt somit eine Kombination des kennwertbasierten Ansatzes mit einem ideal bedateten Fahrzeugmodell dar.

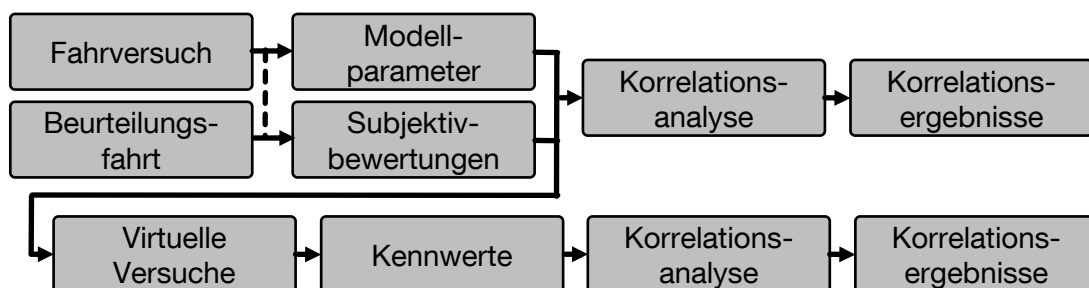


Abbildung 3.5: Vorgehensweise fahrzeugmodellbasierter Objektivierung

Eine Einteilung kann nach der Modellierungstiefe erfolgen. Daher werden in diesem Abschnitt zunächst Ansätze mit einem Modell der Querdynamik und anschließend diejenigen, die um ein Lenkungsmodell erweitert sind, beschrieben. Danach werden diese Ansätze bezüglich der Einsatzszenarien und den Anforderungen aus den Kapiteln 2.3.2 und 3.1 analysiert.

### 3.3.1 Dynamikmodell

Das Grundprinzip der Parameteridentifikation von Fahrzeugmodellen wird zunächst allgemein zur Beurteilung des Fahrverhaltens z.B. in den Arbeiten [34, 74] vorgestellt. Die Objektivierung subjektiver Fahreindrücke steht dort nicht im Vordergrund. In den genannten Veröffentlichungen werden Einspurmodelle parametrisiert. Das Verfahren in [34] läuft offline ab, während in [74] eine Online-Schätzung auf Basis von Kalman Filtern durchgeführt wird. Zusätzlich ist die Erweiterung der Covariance Intersection integriert, die in

<sup>7</sup> In diesem Zusammenhang werden Verfahren, die während der Messfahrt in Echtzeit Berechnungen durchführen, als online bezeichnet.

<sup>8</sup> Erfolgt die Berechnung der Modellparameter nach der Testfahrt mit den aufgezeichneten Messdaten, wird das Verfahren als offline deklariert.

[12] vorgestellt wird. Diese ermöglicht dem Filterverfahren die Selektion von für die Parametrierung relevanten und irrelevanten Fahrzuständen. Der Algorithmus nutzt folglich nur diejenigen Messdaten zur Anpassung des Modells, die zur Verbesserung der Simulation beitragen. In den Arbeiten werden die Modelle auf die grundsätzliche Eignung zur Abbildung querdynamischer Eigenschaften untersucht. Es wird festgestellt, dass Open-Loop-Manöver mit ausreichender Genauigkeit gegenüber der Messung virtuell reproduzierbar sind.

Die Dissertation [40] nutzt diese Herangehensweise zur Objektivierung. Es wird ein erweitertes Einspurmodell aus Fahrversuchen parametriert. Dieses Modell wird als zweckmäßiger Kompromiss aus Modellierungsaufwand und Ergebnisgüte beschrieben. Zudem ist die Modellstruktur generalisiert, kann also beispielsweise auf unterschiedliche Achskonzepte angewendet werden. Als Untersuchungsgegenstand dient ein eigens aufgebautes Fahrzeug [41]. Dieses weist eine hohe Variabilität des passiven Setups auf und kann so eine Spreizung im Fahrverhalten darstellen. Die querdynamischen Eigenschaften sind durch das rein kinematische Achskonzept und die Ausrichtung als Hochleistungssportwagen jedoch nur bedingt mit Serienfahrzeugen vergleichbar. Der Versuch wird von einem grafischen Programm unterstützt, das anzeigt, welche Fahrzustände bereits angefahren sind. Sind alle notwendigen Situationen aufgezeichnet, startet der Offline-Parametrierungsprozess. In der Arbeit wird zudem erstmals explizit zwischen Trainingsprozess und produktivem Einsatz unterschieden.

Im Anschluss an den Fahrversuch werden in der Trainingsphase die ermittelten Parameter zusammen mit dem Subjektivurteil eines Fahrers in einer Wissensdatenbank abgelegt. Durch eine exemplarische Bedatung mit verschiedenen Varianten des Versuchsträgers wird dieser Speicher mit Fahrzeugdaten und Fahrerbeurteilungen gefüllt. Im Produktiveinsatz kann durch Parametrierung eines anderen Fahrzeugs mit einem geeigneten Interpolationsalgorithmus auf die Subjektivnote geschlossen werden.

Die Arbeit [15] zeigt einen weiteren Ansatz, der auf ein Fahrzeugmodell zurückgreift. Zur Bestimmung der Geradeauslaufeigenschaften von PKW unter Seitenwind wird unter anderem ein Vergleich zwischen der Giergeschwindigkeit eines parallel berechneten Einspurmodells und der Messung ausgewertet. Das Fahrzeugmodell ist somit ein integraler Bestandteil des Beurteilungskonzepts und ist nicht ideal in das Bewertungsschema nach Abbildung 3.5 einzuordnen. Dennoch wird die Arbeit an dieser Stelle angeführt, da das Modell ebenfalls zur Bewertung genutzt wird. Methodisch wird der Beurteilungsprozess des Fahrers nachempfunden, da auch der bewertende Testingenieur einen Soll-Ist-Abgleich durchführt. Die Methode setzt allerdings die Messung von Seitenwindstörungen voraus.

#### **3.3.2 Lenkungsmodell**

Mit Verbesserung der messtechnischen Erfassung und zusätzlichen Arbeiten zur Objektivierung setzt sich die Erkenntnis durch, dass dem Lenkradmoment besondere Bedeutung beizumessen ist, siehe z.B. [1, 13, 47]. Daher werden fahrzeugmodellbasierte Verfahren häufig um Lenkungsmodelle erweitert.

Bereits in der Veröffentlichung [1] wird ein lenkungsmodellbasiertes Objektivierungsverfahren vorgestellt, das in [2] ausführlich dokumentiert wird. Eine Besonderheit dieser Ar-

beiten ist, dass die subjektiven Aussagen von geübten Normalfahrern abgegeben werden. Durch eine geeignet geregelte hydraulische Unterstützung wird ein zuvor festgelegtes Lenkradmomentenverhalten auf Basis eines Lenkungsmodells generiert. Dieses wird beurteilt und anschließend auf Korrelationen zu den Parametern des Modells hin untersucht. Wesentliche Erkenntnisse sind sowohl alters- als auch geschlechtsspezifische Vorlieben. Die Untersuchung stellt fest, dass keine Geschwindigkeitsabhängigkeit im erwünschten Lenkradmomentenniveau vorzuliegen scheint. Dies steht im Widerspruch zu beispielsweise den Aussagen in [29, 42, 75]. Zudem wird angeführt, dass ein reales Lenkradmoment durch ein synthetisch erzeugtes ersetzt werden kann. Dies korreliert zur aktuell steigenden Akzeptanz von Elektrolenkungen auch bei anspruchsvollen Herstellern.

Eine vergleichbare Methodik wird in [75] angewendet. Die durchgeführten Auswertungen bauen auf den Erkenntnissen von [2] auf und berücksichtigen neben dem Lenkradmoment noch weitere objektive Kennwerte. Das Lenkungsmodell dient dazu, über einen geeigneten Aktuator ein definiertes Sollmoment zu generieren. Somit ist es Bestandteil des untersuchten Fahrzeugs und nicht der Bewertung, da diese über objektive Kennwerte erfolgt.

In [48] wird das Lenkungsmodell mit einem Fahrzeugdynamikmodell gekoppelt. Dadurch bieten sich umfangreiche Möglichkeiten für die Objektivierung, da die Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Lenkung explizit abgebildet werden. Dies wird in der Arbeit zwar angedeutet, jedoch nicht vollständig durchgeführt. Die existierenden Veröffentlichungen des Autors (z.B. [47]) beziehen sich überwiegend auf kennwertbasierte Auswertungen aus Messdaten. Das Potenzial der Methode wird also noch nicht konsequent abgerufen.

Einen zu [48] verwandten Ansatz beschreibt die Arbeit [50] in Grundzügen. Kernelement ist die Kombination aus Dynamik- und Lenkungsmodell zur Objektivierung. Präzisiert werden die Aussagen in [51]. Die aus Versuchsfahrten gewonnenen Modelle werden in einem nachgelagerten Prozessschritt zur Simulation des Weave-Tests genutzt. Das Vorgehen gewährleistet eine hohe Übereinstimmung der simulierten Kennwerte mit idealen Messungen, ohne dabei jedoch die exakte Durchführungsweise des Versuchs vorauszusetzen. Es können in Folge dessen präzise Auswertungen auf Basis der virtuellen Daten durchgeführt werden, obwohl an die Ausführung der Versuche geringe Anforderungen gestellt werden. Dadurch kann ein Effizienzgewinn im Fahrversuch erreicht werden.

In [51] wird zudem in Trainings- und Einsatzphase unterschieden. Während des Lernprozesses wird das Random-Forest-Verfahren nach [5] zur Identifikation mehrdimensionaler Abhängigkeiten zwischen Fahrerurteil und simulierten Kennwerten eingesetzt. Dies ist ein automatisierter Algorithmus, der besonders für nichtlineare und mehrschichtige Abhängigkeiten geeignet ist. Im Produktiveinsatz wird aus der derart erzeugten Wissensdatenbank die Subjektivbewertung anhand simulierter Kennwerte ermittelt. Aktuell werden die Arbeiten weiter fortgeführt. Der Ansatz hat das Potenzial, neue Objektivierungserkenntnisse aus dem Realfahrversuch zu gewinnen.

#### **3.3.3 Analyse hinsichtlich Einsatzszenarien und Anforderungen**

Analog zum Bewertungsschema in 3.2.3 werden in diesem Abschnitt die fahrzeugmodellbasierten Verfahren bezüglich der definierten Einsatzszenarien und Anforderungen

untersucht. Tabelle 3.3 fasst die Analyse zusammen.

	<b>E1</b> Pla- nung simu- lativ	<b>E2</b> Pla- nung real	<b>E3</b> Vorab- stimm- ung passiv	<b>E4</b> Vorab- stimm- ung aktiv	<b>E5</b> Endab- stimm- ung passiv	<b>E6</b> Endab- stimm- ung aktiv	<b>E7</b> Moni- tor- ing
<b>A1</b> Zuverlässigkeit	-	o	-	-	+	o	-
<b>A2</b> Testszenarien	-	o	-	-	+	o	-
<b>A3</b> Durchführung	-	-	-	-	-	-	-
<b>A4</b> Trainingsbedarf	-	o	-	-	o	o	-
<b>A5</b> Indikation	-	-	-	-	-	-	-
<b>A6</b> Kausalität	-	-	-	-	-	-	-
<b>A7</b> Generalisierung	-	o	-	-	o	o	-
<b>A8</b> Einzelkriterien	-	o	-	-	+	o	-
<b>A9</b> Modularität	-	-	-	-	-	-	-
<b>A10</b> Einsetzbarkeit	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3.3: Analyse fahrzeugmodellbasierter Objektivierung

Die wesentliche Stärke (+) dieser Ansätze ist die Vereinfachung des Realversuchs (E5). Einschränkungen (o) bestehen bei der Nutzung mit aktiven Systemen (E2, E6), da die Identifikation der Regelalgorithmen teilweise äußerst komplex ist. Der Einsatz in der Simulation (E1, E3, E4) ist nur stark eingeschränkt (-) möglich. Es erscheint fraglich, ob durch die Generalisierung der Modelle andere Aussagen zu gewinnen sind, als beispielsweise mit detaillierter Mehrkörpersimulation. Als Benchmarking- und Monitoring-Werkzeug (E7) sind fahrzeugmodellbasierte Verfahren nicht einsetzbar (-), da simulative Auswertungen lediglich eingeschränkt zielführend sind.

Fahrzeugmodellbasierte Verfahren weisen eine hohe (+) Reproduzierbarkeit (A1) auf. Insbesondere die Methode in [51] ist durch die nachgelagerte Simulation sehr präzise. Kundennahe Szenarien (A2) können den Auswertungen zu Grunde gelegt werden (+), da es möglich ist, die Parametrierungen in regulärer Fahrt durchzuführen. Die Anwendbarkeit in der Simulation (A3) ist allerdings nicht gegeben (-). Der Bedarf an Trainingsdaten (A4) kann moderat gehalten werden (o). Die Indikation von erfolgreichem Training (A5) wird bisher nicht behandelt (-).

Da der Beurteilungsprozess von Versuchsfahrern nicht methodisch nachgebildet wird, werden keine signifikanten Erkenntnisse zur Kausalität (A6) von Urteilen gewonnen (-). Aktive Systeme (A7) erfordern eine hohe Modellkomplexität, sind aber grundsätzlich darstellbar (o). Einzelkriterien (A8) können aus den Ansätzen generiert werden (+). Modulare Bewertungen (A9) sind nicht ermittelbar (-), da für die Parametrierung der Modelle immer die vollständige Sensorik notwendig ist. Durch die Verfahren wird ein großer Fortschritt im Realversuch erzielt. Die Verwendbarkeit in der Simulation ist jedoch nicht gegeben. Daher sind fahrzeugmodellbasierte Verfahren bisher nicht als durchgängiges Werkzeug im PEP (A10) geeignet (-).



### 3.4 Fahrermodellbasierte Objektivierung

Die besonders im Realversuch vielversprechenden Erkenntnisse aus den Arbeiten der vorigen Abschnitte führen zu einer weiteren modellbasierten Analysevariante. In fahrermodellgestützten Verfahren wird ein Modell des Fahrers zur Fahrzeugbewertung genutzt. Dieses dient dazu, menschliches Lenkverhalten nachzubilden. Über geeignete Methoden werden die ermittelten Subjektivurteile auf Korrelationen mit Eigenschaften des Fahrermodells untersucht. Abbildung 3.6 skizziert diese Vorgehensweise. Eine ausführliche Übersicht über Fahrermodelle kann in [33] nachgelesen werden.

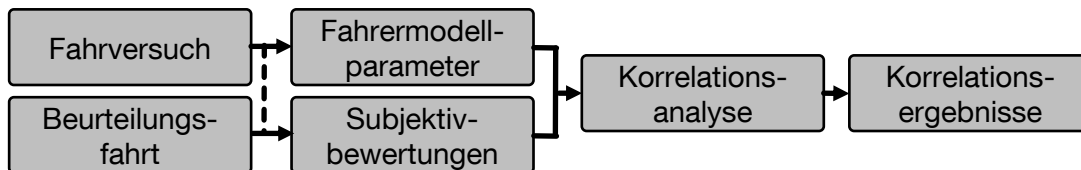


Abbildung 3.6: Vorgehensweise fahrermodellbasierter Objektivierung

Die Methoden dieser Gruppe lassen sich in drei unterschiedliche Arten einteilen. Neben regelungstechnischen und physiologischen Ansätzen existieren auch psychologische Vorschläge für Objektivierungsverfahren. Diese werden in den nächsten Abschnitten vorgestellt. Anschließend findet eine Analyse bezüglich der Einsatzszenarien und den Anforderungen aus den Kapiteln 2.3.2 und 3.1 statt.

#### 3.4.1 Regelungstechnische Modelle

Grundmotivation regelungstechnischer Modellierungsansätze ist die Ausnutzung der Fahreradaptation an ein Fahrzeug (siehe dazu auch Abschnitt 4.1.2). Diese wird in vielen Arbeiten thematisiert und beispielsweise bereits in [39] detailliert untersucht. Nach einer Eingewöhnungszeit sind die Regelstrategien des Fahrers an das Fahrzeug angepasst [4, 42]. Je nach Ausprägung der Fahrdynamik bilden sich in Folge dessen unterschiedliche Fahrweisen aus, da z.B. Fahrzeuge mit indirekterer Lenkübersetzung mehr Lenkradwinkel für die selbe Kurve benötigen.

Diese Hypothesen werden erstmals in [31] zur Beurteilung des Fahrverhaltens herangezogen. Ein regelungstechnisches Fahrermodell nach [18] wird vollständig parametrisiert. Ziel dieser Optimierung ist die ideale Rekonstruktion von gemessenen Lenkradwinkelzeitverläufen realer Fahrer. Wenn das gelingt, werden die ermittelten Parameter hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von Fahrdynamikeigenschaften und unterschiedlichen Kurvenradien analysiert. Das Verfahren deckt viele grundlegende Eigenschaften des Fahrerverhaltens auf. Die Methode wird jedoch nicht bis zur Präzision von subjektiven Einzelurteilen entwickelt.

In den Simulatorversuchen der Arbeit [30] wird ebenfalls ein Zwei-Ebenen-Fahrermodell analog zur Systematik von [18] genutzt. Der Vorsteuerungsanteil wird als inverses Einspurmodell des zu fahrenden Fahrzeugs angenommen. Dies modelliert die ideale Adaptation des Fahrers. Die Parameter der Regelung werden in den Versuchen so angepasst,

dass der Lenkradwinkel des Fahrers mit dem des Modells übereinstimmt. Am detailliertesten erfolgt die Auswertung des doppelten Spurwechsels und von Landstraßenfahrten. Beide werden mit verschiedenen simulierten Fahrzeugen befahren. Parallel findet die Abfrage der Subjektivbewertungen von Versuchsfahrern statt. Anschließend werden charakteristische Größen des Regelkreises aus Fahrer und Fahrzeug sowie die Fahrermodellparameter auf Korrelationen mit den subjektiven Urteilen untersucht. Es zeigen sich vor allem bei der Ermittlung aus dem Frequenzgang des vollständigen Regelkreises aus Fahrer und Fahrzeug signifikante Zusammenhänge zu ausgewählten Kriterien. Mit besonders hoher Präzision können Gesamturteile des Fahrverhaltens hergeleitet werden. Detaillierte Bewertungen einzelner Kriterien nach [29] erweisen sich als weniger zuverlässig. Im Zuge weiterer Forschungsarbeiten wird in [43] ein Ausblick für den Einsatz der Methode in Realfahrt gegeben.

Die Dissertation [67] nutzt ebenfalls einen fahrermodellbasierten Ansatz. Gegenstand der Untersuchung ist jedoch das Seitenwindverhalten von PKW. Wesentlich ist, dass nicht nur die Intensität der Fahrzeugreaktion auf Windanregungen herangezogen wird, sondern vielmehr der geschlossene Regelkreis beim Ausgleich der Störungen. Die Fahrertätigkeit wird in die Komponenten Informationsverarbeitung und -umsetzung untergliedert. Die beiden Anteile werden als regelungstechnische Übertragungsglieder formuliert. Deren Parameter werden durch Optimierung so bestimmt, dass Modell- und Realfahrerverhalten übereinstimmen. Anschließend werden die Kennwerte des virtuellen Fahrers in Relation zu Subjektivurteilen gesetzt. Es werden Zusammenhänge ermittelt, die eine Berechnung der Seitenwindempfindlichkeit ermöglichen. Durch die Ableitung einer Adaptionsvorschrift für das Fahrermodell kann das Verfahren zusätzlich in der Simulation angewendet werden. Daher ist es sowohl im virtuellen als auch im realen Teil des PEP einsetzbar.

Während die bisher angeführten Arbeiten lineare Modelle des Fahrers einsetzen, verfolgt [53] einen komplexeren Ansatz. Dessen Fahrermodell verfügt über die Möglichkeit, während der Fahrt auf plötzliche Änderungen des Fahrverhaltens zu reagieren, indem es die zugrunde liegenden Parameter anpasst. Dies wird zur Bewertung des Fahrverhaltens in kritischen Situationen herangezogen. Das genutzte Fahrermodell besteht jedoch einzig aus einer kompensatorischen Ebene, antizipatorisch steuernde Anteile werden nicht modelliert. Die Korrelation mit Subjektivurteilen wird nicht durchgeführt. Die Auswertung bezieht sich auf einen Vergleich zwischen einem allgemeinen Kritikalitätsmaß des Fahrzeugs für Schrecksituationen und den Parameteränderungen des Fahrers.

Das in [33] vorgestellte Fahrermodell ist ebenfalls nichtlinear. Der hybride Modellierungsansatz besteht aus einem linearen Anteil und der Überlagerung von neuronalen Netzen und Fuzzy-Logic<sup>9</sup>. Eine Feststellung des Autors ist, dass Fahrermodelle bisher nur eingeschränkte Beachtung im Entwicklungsprozess finden, da die vorhandenen Ansätze in ihrer Anwendung zu stark limitiert sind. Dies könne durch komplexere Modelle verbessert werden. Die entwickelten Konzepte werden jedoch in der Arbeit nicht für den Anwendungsfall der Querdynamikobjektivierung eingesetzt.

---

<sup>9</sup> Fuzzy Logic ist eine Teildisziplin der Regelungstechnik. Grundlage derartiger Regler ist die Nutzung unscharfer Mengen für Entscheidungen.

### 3.4.2 Physiologische Modelle

Im Forschungsbereich der Ergonomie existieren diverse Untersuchungen zur Auslegung und Dimensionierung von Bedienelementen im Fahrzeug. Als Beispiel ist das Menschmodell RAMSIS in [32] anzuführen. Diese Arbeiten befassen sich auch mit dem Lenkrad als Eingabemöglichkeit. Neben Fragen der Position und geometrischen Ausprägung des Lenkrads werden fahrdynamische Aspekte analysiert. Eine umfangreiche Arbeit hierzu ist [72], deren Fragestellungen teilweise bereits in [73] diskutiert werden. Zur detaillierten Bewertung verschiedener Ausprägungen von Bedienelementeigenschaften werden unterschiedlich komplexe Mensch-Modelle eingesetzt. Die Spreizung reicht von Mehrkörpersimulationsmodellen menschlicher Knochen, Gelenke, Muskeln und Sehnen in [68] bis hin zu linearen regelungstechnischen Übertragungsgliedern in [6]. Diese Modelle können für umfangreiche Analysen der Fahrerergonomie herangezogen werden. Darüber hinaus ist die Bewertung fahrdynamischer Eigenschaften denkbar.

Dies wird in den Arbeiten [11, 49] durchgeführt. Ein komplexes Modell des menschlichen Hand-Arm-Apparats wird für grundlegende Untersuchungen zum Fahrerverhalten verwendet. Besonderer Fokus liegt auf der Fragestellung, ob das Lenkradmoment oder der -winkel eine höhere Bedeutung als Bediengröße im Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis aufweisen. Auf Basis des neuromuskulären Modells wird herausgearbeitet, dass der menschliche Hand-Arm-Apparat besser für die Einregelung eines Lenkradwinkels als für ein -moment geeignet ist. Dies wird vor allem durch leistungsstarke Reflexmuster begründet. Dennoch wird festgestellt, dass beide Größen für die Führung von Fahrzeugen notwendig sind. Ein wesentliches Ziel ist außerdem die Fahrdynamikbeurteilung. Bislang sind jedoch überwiegend Grundsatzuntersuchungen veröffentlicht, die nicht bis zur präzisen Gefallensbewertung von PKW reichen. Die bisherigen Auswertungen deuten aber das Potenzial des Verfahrens an.

### 3.4.3 Psychologische Modelle

Auch psychologische Fahrermodelle werden für die Objektivierung subjektiver Fahreindrücke genutzt. Diese Ansätze sind durch ein hohes Abstraktionsniveau gekennzeichnet. Das technische System Fahrzeug ist zwar der Versuchsgegenstand, dennoch wird an psychologischen Vorgehensweisen festgehalten. Dies führt zu wertvollen Erkenntnissen zur Auslegung von Lenkungs- und Fahrdynamikeigenschaften, wie beispielsweise in [46].

Die selbe Autorin wirkt auch bei einem Methodenvorschlag in [35] mit. Dieser nutzt ebenfalls die Adaption von Fahrern an Fahrzeugeigenschaften aus. Anstatt regelungstechnischer Modelle wird ein psychologisches verwendet. Es beschreibt Handlungen als kognitiv-energetischen Prozess. Grundsatz ist die Auswertung der Fahrerbelastung auf Basis der Hypothese, dass Fahrer generell versuchen, in einem Zustand minimaler psychologischer Anstrengung zu fahren. In Folge wird angeregt, die Messung der Belastung über das Modell zu ermöglichen. Dieser Ansatz deutet das Potenzial zur Bewertung von Fahreigenschaften an. Bisher sind jedoch keine weiteren Arbeiten zu dieser Thematik veröffentlicht. Zudem ist fraglich, ob minimale Belastungen das Optimum für Fahrerlebnisse darstellen. Ein gewisses Maß an Anstrengung kann für den Fahrer durchaus attraktiv sein.

Dennoch arbeitet die Forschergruppe nach wie vor im Bereich der Fahrdynamikanalyse. In [35] wird die Individualität der Fahrdynamikempfindung und -beurteilung analysiert. In [46] wird auf ähnliche Weise die Wirkung von Zusatzlenkradmomenten untersucht. Zur Bewertung wird eine Skala des Diskomforts eingesetzt und deren Ergebnisse mit Messungen in Relation gesetzt. In dieser Arbeit wird, wie bereits in anderen Veröffentlichungen, herausgearbeitet, dass das Lenkradmoment eine zentrale Rückmeldungsgröße für Fahrer ist.

### 3.4.4 Analyse hinsichtlich Einsatzszenarien und Anforderungen

Auf dem Bewertungsschema in 3.2.3 aufbauend werden in diesem Kapitel die fahrzeugmodellbasierten Ansätze hinsichtlich der definierten Einsatzszenarien und Anforderungen untersucht. Eine Zusammenfassung der Analyse ist Tabelle 3.4 zu entnehmen.

	<b>E1</b> Pla- nung simu- lativ	<b>E2</b> Pla- nung real	<b>E3</b> Vorab- stimm- ung passiv	<b>E4</b> Vorab- stimm- ung aktiv	<b>E5</b> Endab- stimm- ung passiv	<b>E6</b> Endab- stimm- ung aktiv	<b>E7</b> Moni- tor- ing
<b>A1</b> Zuverlässigkeit	o	-	o	-	o	-	-
<b>A2</b> Testszenarien	+	-	+	-	+	-	-
<b>A3</b> Durchführung	-	-	-	-	-	-	-
<b>A4</b> Trainingsbedarf	o	-	o	-	o	-	-
<b>A5</b> Indikation	-	-	-	-	-	-	-
<b>A6</b> Kausalität	o	-	o	-	o	-	-
<b>A7</b> Generalisierung	+	-	+	-	+	-	-
<b>A8</b> Einzelkriterien	-	-	-	-	-	-	-
<b>A9</b> Modularität	o	-	o	-	o	-	-
<b>A10</b> Einsetzbarkeit	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3.4: Analyse fahrermodellbasierter Objektivierung

Aus methodischer Sicht bieten diese Verfahren die breitesten Einsatzmöglichkeiten. Bei entsprechender Konzeption wären alle Einsatzszenarien (E1 bis E7) denkbar (+). Aktuell sind die Verfahren jedoch nicht in Realfahrt umgesetzt. Häufig stützen sich die Untersuchungen auf Simulationen oder Fahrsimulatorversuche. Der Transfer zur Beurteilung aus Messungen stellt jedoch eine große Herausforderung dar, weil für Fahrermodelle eine Sollspur ermittelt oder vorgegeben werden muss. Daher sind Einsatzszenarien im Realversuch (E2, E4, E6, E7) auf dem aktuellen Stand des Wissens nicht ausreichend abgedeckt (-).

Die Zuverlässigkeit der Versuchsdurchführung (A1) ist niedriger (o) als bei den anderen Ansätzen, da Closed-Loop-Versuche genutzt werden. Dies kann jedoch durch geeignete Auswertungsverfahren verbessert werden. Kundenrelevante Manöver (A2) sind einsetzbar (+). Die Verwendung im Realen und Virtuellen (A3) ist grundsätzlich möglich, bisher jedoch nicht realisiert (-). Der Datenbedarf kann moderat (A4) gehalten werden (o). Die Indikation erfolgreichen Trainings (A5) wird bisher nicht behandelt (-).

Durch die Integration fahrerbasierter Betrachtungsweisen ist das Potenzial gegeben, Beiträge zur Kausalität (A6) von Subjektivurteilen zu leisten. Dies ist bisher nicht vollständig erfolgt (o). Durch die Abstraktion vom technischen System Fahrzeug können jegliche Kombinationen von aktiven und passiven Systemen (A7) bewertet werden (+). Die Beurteilung auf Basis von Einzelkriterien (A8) wird bisher nicht konsequent durchgeführt (-). Dies zeigt sich in den Erkenntnissen aus [30], dass eher Gesamturteile mit den Fahrermodellparametern korrelieren. Modulare Objektivierung (A9) ist mit der Methode denkbar, bisher jedoch nicht ausgeführt (o). Die Einsetzbarkeit im gesamten PEP (A10) ist nicht gegeben, solange die Funktion im Realversuch nicht vollständig erreicht wird (-).

### 3.5 Zusammenfassung und Ableitung der Aufgabenstellung

In diesem Abschnitt wird zunächst ein repräsentatives Gesamtbild des momentanen Wissensstands zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke erzeugt. Tabelle 3.5 fasst das Ergebnis der vorangehenden Untersuchung zusammen. Es sind die jeweils höchsten Wertungen des Stands der Technik eingetragen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass dies nicht die Eigenschaften eines einzelnen Ansatzes sind, sondern ein Abbild der aktuellen kombinierten Leistungsfähigkeit aller Methoden.

	<b>E1</b> Pla- nung simu- lativ	<b>E2</b> Pla- nung real	<b>E3</b> Vorab- stimm- ung passiv	<b>E4</b> Vorab- stimm- ung aktiv	<b>E5</b> Endab- stimm- ung passiv	<b>E6</b> Endab- stimm- ung aktiv	<b>E7</b> Moni- tor- ing
<b>A1</b> Zuverlässigkeit	0	0	+	0	+	0	-
<b>A2</b> Testszenarien	+	0	+	-	+	0	-
<b>A3</b> Durchführung	0	0	+	0	+	0	-
<b>A4</b> Trainingsbedarf	0	0	0	0	0	0	-
<b>A5</b> Indikation	-	-	-	-	-	-	-
<b>A6</b> Kausalität	0	-	0	-	0	-	-
<b>A7</b> Generalisierung	+	0	+	0	+	0	-
<b>A8</b> Einzelkriterien	0	0	+	0	+	0	-
<b>A9</b> Modularität	0	0	0	0	0	0	-
<b>A10</b> Einsetzbarkeit	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 3.5: Gesamtanalyse des Stands der Technik

Aus der Analyse des momentanen Stands des Wissens leitet sich die Aufgabenstellung dieser Arbeit ab. Zunächst besteht Bedarf an einem Objektivierungswerkzeug, das die Stärken der unterschiedlichen Ansätze wie im Summenbild in Tabelle 3.5 verknüpft. Dafür ist jedoch eine neuartige Methode erforderlich, da die Fusion bestehender Ansätze wegen der jeweils getroffenen Annahmen nur eingeschränkt möglich ist.

Ein erster Teil der Aufgabenstellung ist folglich die Entwicklung eines Objektivierungsverfahrens, das ebenfalls die Anforderungsbereiche A1 bis A3, A7 und A8 abdeckt. Dort wird jeweils mindestens einmal die Höchstwertung (+) erreicht. Besonders im Realversuch mit passiven Fahrzeugen sind bestehende Erkenntnisse bereits sehr umfangreich.

Die Einschränkungen hinsichtlich aktiver Regelsysteme (E2 und E6) und der Nutzung in der Simulation (E4) sind in dieser Arbeit zu reduzieren.

Neben diesem integrierenden Teilaspekt bildet der zweite Teil der Aufgabenstellung den methodischen Schwerpunkt: Tabelle 3.5 deckt Verbesserungsbedarf hinsichtlich notwendiger Trainingsdaten (A4) und der Modularität des Bewertungsverfahrens (A9) auf. Dort wird bisher maximal die mittlere Wertung (o) erzielt. Noch deutlicher ist das Defizit an eindeutigen Indikatoren für erneutes Einlernen des Algorithmus (A5) und an definierten Schnittstellen zu bestehenden Prozessen (A10) in der Fahrzeugentwicklung. Diese Thematik wird, genauso wie der gesamte Einsatzbereich als Monitoring- und Benchmarkingwerkzeug (E7), bisher kaum betrachtet. Dies zeigt sich in der durchgängig negativen Bewertung (-) des Stands der Technik in diesen Disziplinen. Daher ist es ein explizites Ziel dieser Arbeit, in den genannten Bereichen Verbesserungen des Kenntnisstands zu erzielen.

Darüber hinaus wird ein besonderer Fokus auf die Kausalität der Bewertungsmethode (A6) gelegt. Dies ist bisher nur in Ansätzen durchgeführt, woraus die maximal mittlere Wertung (o) resultiert. Gerade in diesem Umfeld stehen jedoch nachhaltige Fortschritte in der Objektivierungsforschung in Aussicht. Daher wird gezielt ein Verfahren entwickelt, das eine Steigerung der Ursächlichkeit von Subjektivurteilen ermöglicht.

## 4 Entwicklung eines fahrerbasierten Objektivierungskonzepts

Auf Basis der Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel wird in diesem Abschnitt ein fahrerbasiertes Konzept zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke entwickelt. Eingangs wird der konzeptionelle Gesamtrahmen vorgestellt. Anschließend erfolgt die Diskussion der beiden Teilaspekte Empfindungsmodellierung und Lenkradbetätigung. Ersteres teilt sich auf Grund der hohen Komplexität in Grundlagen, die Sensierung von Fahraufgabe und Fahrzeugreaktionsgrößen sowie die Detektion von Lenkradwinkel und -moment auf. Abschließend fasst das letzte Unterkapitel das in dieser Arbeit entwickelte Konzept zusammen. Abbildung 4.1 illustriert den Aufbau schematisch.

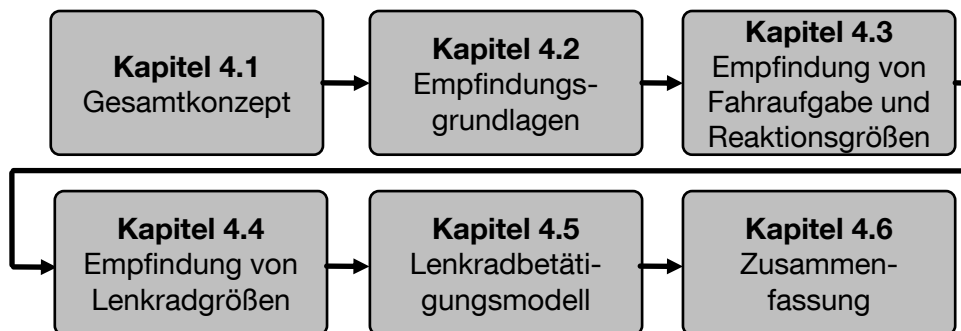


Abbildung 4.1: Aufbau Kapitel 4

### 4.1 Gesamtkonzept

Die Motivation für das fahrerbasierte Gesamtkonzept resultiert zum Einen aus den Betrachtungen des Stands der Technik in Kapitel 3. Zum Anderen existieren einige Zusammenhänge in der Fahrdynamikbewertung, die eine deutliche Fokussierung des Fahrers bedingen. Nach der Diskussion dieser Aspekte findet die Vorstellung der zugrundeliegenden Mechanismen fahrerbasierter Beurteilung statt. Anschließend wird der modulare Aufbau des Konzepts diskutiert, der sowohl analytische als auch synthetisierende Umfänge beinhaltet. Die letzten beiden Unterkapitel beschreiben den Trainings- und Einsatzprozess, der für diesen Ansatz vorgesehen ist.

#### 4.1.1 Begründung der fahrerbasierten Betrachtung

Einer der wesentlichen methodischen Defizite der Objektivierung subjektiver Fahreindrücke ist der Mangel an Kausalität (A6). In dieser Arbeit wird daher der Beurteilungspro-

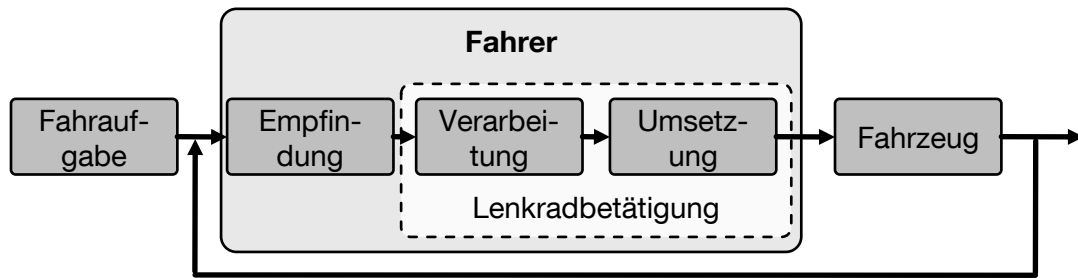


Abbildung 4.2: Erweiterter Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis

zess explizit untersucht und in die Betrachtung mit einbezogen. Ausgangsbasis ist der in Abbildung 4.2 dargestellte erweiterte Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis nach [72].

Der Closed-Loop-Prozess besteht aus Fahrer und Fahrzeug. Zunächst verarbeitet der Fahrzeugführer die Fahraufgabe und die Abweichungen des Fahrzeugverhaltens von diesem Sollscenario. Dieser Vorgang der Verarbeitung physikalischer Reize durch die menschliche Sensorik wird als EMPFINDUNG bezeichnet. Der Unterschied zum Begriff der WAHRNEHMUNG wird in Kapitel 4.2 konkretisiert. Nach der Erfassung von Umwelt- und Fahrzeuginformationen erfolgt die Verarbeitung der Daten. Auf dieser Basis werden Solllenkwinkel und -moment gebildet, die anschließend am Lenkrad umgesetzt werden. Zusätzlich führt ein Versuchsingenieur zur Bewertung parallel die Beobachtung des Fahrzeugs durch. Daraus leitet sich die Einschätzung hinsichtlich des Fahrverhaltens ab. Die Beurteilung der Fahrdynamik ist im Falle subjektiver Abstimmungsfahrten im Wesentlichen von fahrerintrinsischen Vorgängen geprägt. Bisherige Ansätze zur Objektivierung berücksichtigen diesen Sachverhalt nicht ausreichend.

Des Weiteren ist die Höhe einer Fahrdynamikbeurteilung ein Maß für die optimale Anpassung des technischen Systems Fahrzeug an die Eigenschaften, Wünsche und Fähigkeiten des Menschen sowie an die Fahrphysik. Dieser Aspekt ist zunächst unabhängig von der konkreten Realisierung eines Automobils. Teilweise erfolgt eine technologiegetriebene Entwicklung neuer Fahrwerksbestandteile. Diese etablieren sich jedoch nur dann, wenn Kunden vom Verhältnis von Kosten zu Nutzen überzeugt sind. Letztlich abstrahiert der Fahrer, teilweise aus Mangel an Fachwissen, vom konkreten System Fahrzeug. Es wird der Aufwand oder das Vergnügen während der Fahrt beurteilt, unabhängig von beispielsweise elektrischer oder hydraulischer Lenkung. Folglich erscheint eine fahrerbasierte Betrachtung zielführend, um neue Erkenntnisse in der Objektivierung zu erreichen.

In dieser Arbeit wird daher ein deutlicher Fokus auf die im Fahrer ablaufenden Prozesse gelegt. Dazu werden die Vorgänge in Empfindung und Lenkradbetätigung aufgeteilt (siehe Abbildung 4.2). Letztere beinhaltet die Verarbeitung der Informationen und die Umsetzung am Lenkrad. Die Aufteilung wird auf Grund der vorliegenden Literatur der Physiologie vorgenommen. Während dieser Teilzweig der Ergonomie und Medizin viele ausführliche Darstellungen zur menschlichen Empfindung umfasst, gilt dies nicht in diesem Maß für Verarbeitung und Umsetzung. Dort besteht ein Mangel an zuverlässigen Aussagen zu den Vorgängen im Menschen, um sie mit hohem Reifegrad im automobilen PEP einzusetzen.

Der Ansatz dieses Konzepts ist somit, menschliche Vorgänge bei der Urteilsbildung explizit zu berücksichtigen. Eine derartige Herangehensweise schlägt bereits [13] vor. In



der vorliegenden Arbeit wird diese Methode deutlich ausgebaut. Dadurch wird vor allem der Bedarf an kausalen Aussagen (A6) zur Fahrdynamikabstimmung behandelt. Im Folgenden werden die beiden Teilaspekte Empfindung und Lenkradbetätigung mit den relevanten Mechanismen vorgestellt.

#### **4.1.2 Zugrundeliegende Mechanismen fahrerbasierter Bewertung**

Diese Arbeit beschreibt einen fahrerbasierten Objektivierungsansatz, um wesentliche Elemente des Fahrdynamikbeurteilungsprozesses nachzubilden. Dieser lässt sich in zwei Teilaspekte unterteilen, deren Grundmechanismen im Folgenden erläutert werden.

##### **Menschliche Empfindung und Wahrnehmung**

Das vorliegende Konzept berücksichtigt die menschliche Empfindung. Dieser Begriff beinhaltet allein die messtechnische Erfassung physikalischer Reize durch die Sinnesorgane des Menschen. Davon zu trennen ist die Bezeichnung der Wahrnehmung. Darunter wird die Empfindung, die Datenfusion und die Interpretation des Fahrers verstanden. Folglich ist die Wahrnehmung der deutlich komplexere Vorgang. Im Gegensatz zur Empfindung ist die Wahrnehmung als Teil der Fahrdynamikbeurteilung zudem abhängig von der persönlichen Fahrerfahrung. Ein Fahrschüler mit wenig Fahrpraxis interpretiert die selben Dynamikgrößen anders als ein Abstimmungsingenieur. Dies liegt jedoch zunächst nicht an unterschiedlicher Empfindung, also der Erfassung der Größe, sondern an der anschließenden Verarbeitungsweise [58]. Daher eignet sich die Empfindung besser als Grundlage für die Objektivierung subjektiver Fahreindrücke, da keine interindividuellen Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrern einberechnet werden müssen. Die Berücksichtigung der Empfindung führt zu einer einheitlichen Beurteilungsbasis, die deutlich enger als die ausschließliche Messung mit Subjektivaussagen verknüpft ist.

Besondere Relevanz und Zuverlässigkeit erhält dieser Ansatz durch das umfangreiche physiologische Wissen, das in diversen Veröffentlichungen beschrieben ist und im weiteren Verlauf der Arbeit vorgestellt wird. Dies ermöglicht die Nachbildung menschlicher Sensorik in einem EMPFINDUNGSMODELL. Dessen Ausgangsgrößen dienen als Objektivierungsgrundlage. Die Konstanz menschlicher Empfindung über einen weiten Bereich potenzieller Fahrer unterstützt dieses Konzept zusätzlich [71]. Es gilt als gesichert, dass die Eigenschaften menschlicher Sinnesorgane der Fahrdynamik nicht wesentlich vom Alter oder Geschlecht abhängig sind. Dadurch kann mit einem derartigen Modell eine repräsentative Grundlage zur Fahrdynamikbewertung geschaffen werden. Die Altersunabhängigkeit gilt aber beispielsweise nicht für den Hörsinn. Dessen Präzision sinkt mit zunehmendem Alter.

##### **Adaption menschlicher Lenkradbetätigung**

Der zweite konzeptionelle Ansatz berücksichtigt eine weitere Vorgehensweise der Fahrwerkabstimmung. Versuchsfahrer steuern gezielt Zustände des Fahrzeugs an, um dessen Reaktion zu testen. Beobachtet wird die Antwort auf einen Stimulus. Dies erfolgt allerdings mit deutlich spezifischeren Anregungen als bei Open-Loop-Tests. Auf diese

Weise wird das Übertragungsverhalten in bestimmten Situationen eingeschätzt. Durch die Modellierung menschlicher Lenkradbetätigung wird diese fahrerinterne Schätzung des Fahrverhaltens nachgebildet. Dazu können Effekte der Adaption genutzt werden.

Adaption bezeichnet im hier vorliegenden Kontext die Anpassung der Fahrstrategie an die Aufgabe und das Fahrzeug. Diese Arbeit identifiziert vier verschiedene Varianten der Fahreradaptation:

- Die schnellste Adaption menschlicher Fahrstrategie erfolgt auf STÖRUNGEN. Tritt beispielsweise eine Beeinträchtigung des Geradeauslaufs auf, passen Fahrer sofort die Regelparameter an, um auf den äußeren Einfluss zu reagieren. Diese Adoptionsart wird in [67] zur Bewertung von PKW unter Seitenwind genutzt. Für die Objektivierung der Querdynamik spielt dies eine untergeordnete Rolle.
- ZEIT- UND FAHRSITUATIONSVARIANTE FAHRZEUGEIGENSCHAFTEN erfordern ebenfalls die Anpassung der Fahrstrategie. Exemplarisch ist ausgeprägtes Lastwechselverhalten zu nennen. Zudem besteht zum Beispiel bei Fahrzeugen mit Überlagerungslenkung an der Vorderachse der Bedarf an je nach Kurvengeschwindigkeit unterschiedlichen Lenkradwinkeln. Bei Autobahnausfahrten, die mit stetig verringernder Fahrgeschwindigkeit durchfahren werden, ist es oftmals erforderlich, den Lenkradwinkel zu reduzieren, da eine andere effektive Lenkübersetzung vorliegt. Durch die gezielte Auslegung der Systeme wird keine übermäßig schnelle Adaption der Fahrstrategie abverlangt. Dieser Adaptionseffekt ist dennoch für die Beurteilung des Fahrverhaltens relevant.
- Vor allem durch Wiederholversuche und somit vergleichsweise langsam kann eine Adaption an FAHRSITUATIONEN erreicht werden. Dies zeigt sich zum Beispiel deutlich in Fahrsicherheitstrainings. Dort wird häufig ein Spurwechsel unter Grenzbereichsbedingungen durchgeführt. Die Fahrer scheitern zunächst teilweise an der Fahraufgabe. Durch Anpassung der Regelstrategie können Sie den Versuch jedoch erfolgreich absolvieren. Diese Adoptionsart ist stark von den Fähigkeiten und der Erfahrung des Fahrers abhängig und folglich nicht für die Objektivierung geeignet. Zudem muss zuvor eine ausreichende Adaption an das Fahrzeug stattfinden.
- Die Adaption der Fahrstrategie an ein FAHRZEUG ist, neben der Angleichung an zeit- und fahrsituationsabhängiges Verhalten, Kernbestandteil des Teilkonzepts zur Objektivierung mit einem Lenkradbetätigungsmodell. Die konzeptionelle Annahme dieser Arbeit ist, dass Fahrer sich nach ausreichender Eingewöhnungszeit auf ein Fahrzeug einstellen. Das Resultat dieser Anpassung ist eine adaptierte Fahrstrategie, die abhängig vom jeweils gefahrenen Fahrzeug ist.

Für das hier vorgestellte Konzept ist besonders letztere Form der Adaption in Kombination mit Anpassungen an zeit- und fahrsituationsabhängiges Verhalten relevant. Unter der Annahme, dass eine ausreichende Adaption erfolgen kann, stellt die Lenkcharakteristik des Fahrers ein Abbild der Fahreigenschaften des Fahrzeugs dar. Agiles Handling führt zu anderen, sinnvoller Weise einzuregelnden Lenkradwinkeln als träges Verhalten. Diese Adaption wird beispielsweise in [30] genutzt. So können aus dem Fahrerverhalten Rückschlüsse auf das Fahrzeug vollzogen werden. Dazu muss allerdings eine Methode angewendet werden, um die Fahrstrategie geeignet zu erfassen.

Für diesen Zweck wird in dieser Arbeit ein MODELL MENSCHLICHER LENKRADBETÄTIGUNG aufgebaut. Durch ein probates Verfahren ist es möglich, die Fahrstrategie des realen Fahrers abhängig von der Fahrsituation zu konservieren und der objektiven Auswertung zugänglich zu machen. Zusätzlich ist der Prozess auch in simulierten Closed-Loop- und Simulatorversuchen einsetzbar. Dies ermöglicht neuartige Analysen zur Objektivierung. Der nächste Abschnitt erläutert, wie die Teilkonzepte Empfindung und Lenkradbetätigung in einem zweiteiligen Aufbau integriert sind.

### 4.1.3 Zweiteiliger Aufbau des fahrerbasierten Objektivierungskonzepts

Analyse und Synthese sind die beiden grundsätzlichen naturwissenschaftlichen Untersuchungsmethoden. Analytisches Vorgehen ermöglicht fein differenziertes Verständnis für Einzelaspekte. In vielen Bereichen des automobilen PEP finden derartige Erprobungen Verwendung. Charakteristisch ist die Möglichkeit, eine große Zahl an Kennwerten zu generieren. Im Idealfall unterstützen die ermittelten Analyseergebnisse die Lösungsfindung und dienen gleichzeitig zur Steigerung des Systemverständnisses. Letzteres ist angesichts bestehender Arbeiten zur kennwertbasierten Objektivierung bisher nicht immer gegeben. Oftmals werden zwar Zusammenhänge aufgedeckt, ursächliche Wirkprinzipien der Querdynamikbeurteilung lassen sich in der Regel jedoch nur eingeschränkt ermitteln.

In dieser Arbeit wird analytisches Vorgehen dahingehend erweitert, dass die Auswertungen auf Basis der Ausgänge eines Empfindungsmodells durchgeführt werden. Dadurch wird eine vertiefte Untersuchung des Beurteilungsprozesses von Abstimmungsfahrern ermöglicht. Gleichzeitig wird sichergestellt, dass die Aussagen zur Gefallensfrage auf der Grundlage von Zeitsignalen erzeugt werden, die menschlichem Empfinden bestmöglich entsprechen. Daher ist eine Kausalitätssteigerung der getroffenen Aussagen zu erwarten. Dies ist besonders im Bereich des Lenkgefühls notwendig, da hier viele Zusammenhänge noch nicht ausreichend aufgedeckt sind.

Parallel wird mit dem zweiten Konzeptteil der Forderung aus [13] entsprochen, dass die wesentlichen fahrdynamischen Größen in Kombination zu betrachten sind. Alleiniges analytisches Vorgehen erweist sich nicht als ausschließlich zielführend. Beispielsweise können zum Mittengefühl effizient Auswertungen durchgeführt werden, wenn verschiedene Zeitschriebe in Kennfeldern ausgegeben werden. Diesen Grundgedanken greift die vorliegende Arbeit auf. Das bereits erwähnte Lenkradbetätigungsmodell zur Konservierung von Fahrstrategien ermöglicht durch die beschreibenden Parameter eine Beurteilung der Fahrerbelastung. Die Zahl der Parameter ist jedoch begrenzt. Daher ist zu erwarten, dass die Aussagen weniger feingranular sind als analytische Aussagen. Statt dessen werden aber die Größen Querbesehleunigung, Gierreaktion, Lenkradmoment und -winkel integral in Closed-Loop-Fahrten verknüpft. Beispielsweise kann so das Verhalten beim Einlenken von Geradeausfahrt in Kurven sinnvoll bewertet werden. Diese Versuche sind der kennwertbasierten Analyse nur schwer zugänglich, da entsprechende Beschreibungsgrößen kaum abzuleiten sind. An dieser Stelle setzt der synthetisierende Teil des Konzepts an.

Die Teilkonzepte werden zunächst unabhängig voneinander entwickelt. Dies trägt vor allem Anforderung A9 Rechnung, die ein skalierbares Objektivierungswerkzeug bedingt. Beide Module werden jedoch abschließend in einen einheitlichen Bewertungsprozess

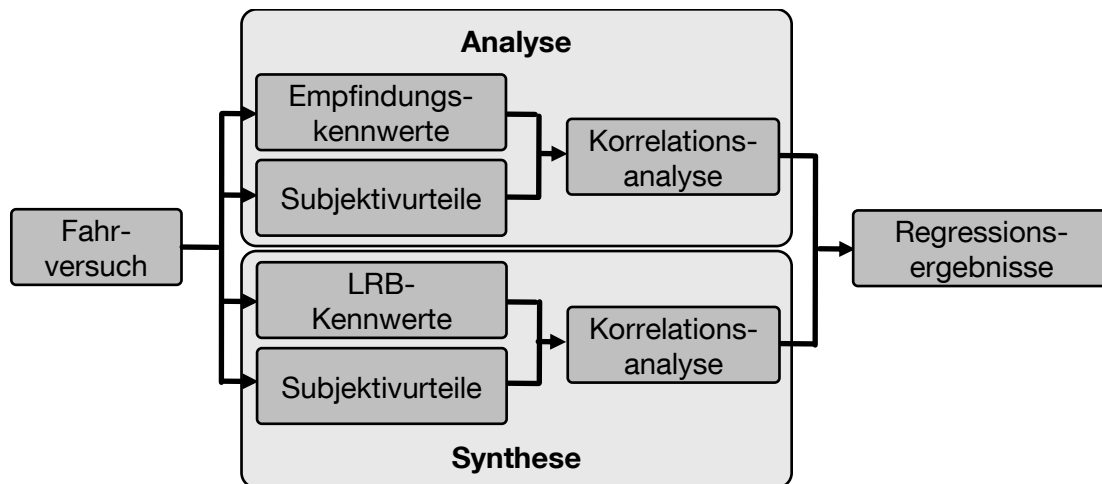


Abbildung 4.3: Trainingskonzept fahrerbasierter Objektivierung

integriert. Voraussetzung für automatisierte Beurteilungen ist das erfolgreiche Training des Algorithmus. Dies ist Inhalt des nachfolgenden Kapitels.

#### 4.1.4 Trainingskonzept

Bisherige Arbeiten nutzen statistische Verfahren zur Ableitung der Beziehungen zwischen Messung und Subjektivbewertung. Dabei wird in der Regel auf entsprechende Verwertbarkeit der Daten geachtet. Dies führt häufig zum Einsatz unterschiedlicher Fahrzeuge mit einer großen Anzahl an Wiederholversuchen. Dies ist zur Absicherung der ermittelten Kennwerte durchaus zielführend. Die Nutzung einer Vielzahl von urteilenden Versuchingenieuren ist nach den Erfahrungen aus der Erstellung dieser Arbeit weniger empfehlenswert. Dies ist vor allem in der Eigenart von Subjektivurteilen begründet, dass die Reproduzierbarkeit eingeschränkt ist (siehe Kapitel 2.1.3). Dies gilt in besonderem Maße für Normalfahrer, die zudem meist ein nicht ausreichend präzises Beschreibungsvokabular aufweisen. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit gezielt versucht, die Bewertungen eines einzelnen versierten Abstimmungsingenieurs nachzubilden. Die Fragestellung unterschiedlicher Urteilsausprägungen von mehreren Fahrern wird folglich explizit von der Betrachtung ausgeschlossen.

Inhalt des Trainingsprozesses ist somit die Ermittlung von Zusammenhängen zwischen Kennwerten aus quasi-empfundene[n] Signalen und dem Lenkradbetätigungsmodell mit den Urteilen des anwesenden Beurteilers. Dazu werden der Bewertungskatalog und die -skala aus [29] herangezogen. Es werden eine repräsentative Auswahl von Serienfahrzeugkonfigurationen in verschiedenen Manövern der Open-Loop-, Closed-Loop- und Abstimmungsfahrtklasse (siehe Kapitel 2) vermessen und parallel die Subjektivurteile abgefragt. Für beide Teilkonzepte werden unabhängige Regressionsgleichungen ermittelt. Anschließend werden die Ausgänge zu einem gemeinsamen Endergebnis zusammengefügt. Dies fasst Abbildung 4.3<sup>10</sup> zusammen.

<sup>10</sup> In Abbildung 4.4 wird die Abkürzung LRB für Lenkradbetätigung genutzt.

Diese Arbeit stützt sich im Wesentlichen auf die Einflussanalyse einzelner Kennwerte auf subjektive Bewertungen. Zusätzlich werden multiple Korrelationen untersucht, allerdings ausschließlich auf Basis der in der einfachen Analyse ermittelten Zusammenhänge. Komplexere Verfahren werden nicht angewendet. Dies ist vor allem in der eingeschränkten Interpretierbarkeit aufwändigerer statistischer Methoden und deren hoher Bedarf an Messdaten begründet.

Die Analyse des Stands der Technik in Kapitel 3 deckt Bedarf an einem Indikator für erfolgreiches Training auf (A5). Dies ist nicht ohne Weiteres zu lösen. Der Ansatz dieser Arbeit ist jedoch, Zusammenhänge mit einem ausgeprägten Optimum zu ermitteln. Für den Aufbau des Lenkradmoments ist beispielsweise davon auszugehen, dass aktuelle Serienfahrzeuge, insbesondere aus dem Hochpreissegment, optimal ausgelegt sind. Durch etablierte aktive und passive Systeme ist anzunehmen, dass die Abstimmungsarbeit nicht durch technische Limitierungen beschränkt ist. Wenn folglich mit bestehenden Fahrzeugen eine Idealkonfiguration ermittelt werden kann, ist davon auszugehen, dass dieses Optimum auch weiterhin Bestand hat. Anders verhalten sich Relationen ohne Notemaximum. In dem Fall ist davon auszugehen, dass zukünftige Entwicklungen erneutes Training erforderlich machen.

### 4.1.5 Einsatz des fahrerbasierten Bewertungswerkzeugs

Die Einsetzbarkeit des Konzepts erstreckt sich von Simulationen über Simulatorversuche bis hin zu Abstimmungsfahrten im Closed-Loop. Das zu untersuchende Fahrzeug ist mit geeigneter Messtechnik auszustatten. Teilweise kann auf bereits bestehende Fahrzeugsensorik zurückgegriffen werden. Für die Konfiguration des Messaufbaus ist jedoch Expertenwissen unbedingt vorauszusetzen. Der Umfang der Messtechnik ist durch das modulare Gesamtkonzept skalierbar (A9). Wird beispielsweise einzig der Aufbau des Lenkradmoments über dem Lenkradwinkel untersucht, ist lediglich ein Messlenkrad notwendig.

Anschließend sind für das zu analysierende Phänomen geeignete Fahrmanöver zu absolvieren. In Kapitel 5 werden die Versuchsvarianten explizit angegeben. Sie reichen von Open-Loop-Manövern bis hin zu Abstimmungsfahrten auf der Nordschleife des Nürburgrings oder anderen Prüfgeländen. Die Durchführung kann von Versuchsfahrern erfolgen, die jedoch nicht zur Beurteilung geeignet sein müssen. Dies stellt einen Vorteil der Methode gegenüber der bisher üblichen subjektiven Abstimmungsarbeit dar. Werden Simulationen als Objektivierungsgrundlage herangezogen, ist zunächst die Validität des Fahrdynamikmodells sicherzustellen. Danach erfolgt die Manöverausführung. Endergebnis der realen und simulativen Erprobungen sind Messdaten. Diese bilden die Grundlage für den anschließenden automatisierten Bewertungsprozess.

Die aufgezeichneten Daten werden vom Objektivierungswerkzeug geladen. Es erfolgt, je nach Manöver, die Aufwertung der gemessenen Zeitsignale zu quasi-empfundene mit dem Empfindungsmodell. Parallel dazu wird die Regelstrategie des Fahrers in Closed-Loop-Fahrten durch einen Parametrierungsprozess ausgewertet. Anschließend werden die Subjektivbewertungen mit den Regressionsgleichungen berechnet und ausgegeben. Abbildung 4.4 fasst diesen Ablauf zusammen.

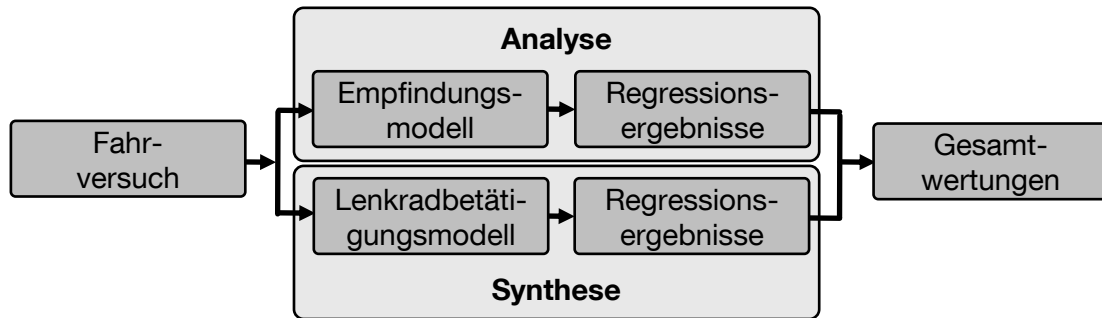


Abbildung 4.4: Bewertungskonzept fahrerbasierter Objektivierung

Das Werkzeug ist sowohl im Fahrzeug als auch in Simulationsabteilungen einsetzbar. Darüber hinaus kann es mit zuvor ermittelten Messdaten betrieben werden. Dies berücksichtigt Anforderung A10, die eine Eignung für Monitoring- und Benchmarkprozesse bedingt. Mit dem Objektivierungsverfahren sind Beurteilungen in Besprechungen berechenbar und anschaulich zu visualisieren. Dadurch können Fachdiskussionen um Aussagen aus dem Werkzeug bereichert werden. Die Untersuchung von Ursachen und Wirkketten wird damit nachhaltig unterstützt. Zukünftige Erweiterungen können auch die Zugänglichkeit verschiedener Beurteilungsmaßstäbe herstellen. Die Realisierung in Kapitel 5 stellt die Kompatibilität zu Hilfsmitteln aus anderen Domänen sicher. Somit ist die Methode in allen Bereichen des PEP einsetzbar und ist nicht ausschließlich auf die Abstimmungsarbeit beschränkt.

## 4.2 Grundlagen der Fahrdynamikbewertung mit einem Empfindungsmodell

In diesem Abschnitt werden die Grundlagen der Objektivierung mit einem Modell menschlicher Empfindung beschrieben. In den Veröffentlichungen [50, 57] sind einige Teile des Vorgehens ebenfalls ausgeführt. Zunächst wird die Differenzierung zwischen Empfindung und Wahrnehmung erläutert. An die Diskussion allgemeiner Eigenschaften menschlicher Sensorik schließt sich die Beschreibung von Funktionsweise und Aufbau des in dieser Arbeit entwickelten Empfindungsmodells an. Im letzten Unterkapitel erfolgt die Darstellung des Fahrdynamikbewertungsprozesses auf Basis des Modells. Als grundlegende Literatur der nachfolgenden Analyse dienen [58, 59, 60].

### 4.2.1 Empfindung und Wahrnehmung

Die Modellierung menschlicher Empfindung erfordert umfangreiches Wissen über die Vorgänge im Menschen von der Reizaufnahme bis zur Interpretation der Information. Der medizinische Teilbereich der Sinnesphysiologie erforscht diese Phänomene. Er besteht wiederum aus folgenden Unterkategorien:

- SUBJEKTIVE WAHRNEHMUNG und Verhaltensweisen werden durch Messung und Verknüpfung objektiver Ereignisse an Sinnesorganen oder im zentralen Nervensystem (beispielsweise durch EEGs<sup>11</sup>) analysiert.
- Auf Basis quantitativer Messungen erfolgt in der PSYCHOPHYSIK die Untersuchung von Zusammenhängen zwischen physischen Reizen und subjektiven Empfindungsgrößen.
- Psychologische Methoden werden auf Empfindung und Wahrnehmung durch die SUBJEKTIVE SINNESPHYSIOLOGIE angewandt.
- Die OBJEKTIVE SINNESPHYSIOLOGIE analysiert menschliche Sensorik mit physikalisch-chemischen Messmethoden.

Untersuchungen der subjektiven Wahrnehmung stellen bisher keine ausreichende Basis für die Bewertung der Fahrdynamik dar. Das Wissen über Vorgänge im menschlichen Gehirn muss deutlich ausgebaut werden, um eine zuverlässige Grundlage für die Objektivierung subjektiver Fahreindrücke darzustellen. Einen höheren Reifegrad erreichen Arbeiten der Psychophysik. Die bekanntesten Zusammenhänge sind das Weber-Fechner-Gesetz und die Stevens'sche Potenzfunktion (siehe [58]). Die Arbeiten von Weber beschreiben die Proportionalität des subjektiv empfindbaren Reizunterschieds zum absoluten Stimulus. Auf den logarithmischen Zusammenhang zwischen Empfindung und gemessener Anregung wird von Fechner durch Integration geschlossen. Die Erkenntnis von Stevens ist, dass die logarithmische Darstellung eine zu starke Verallgemeinerung darstellt. Deshalb erweitert er die Zusammenhänge zur Potenzfunktion. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die menschliche Empfindung mathematisch beschrieben werden kann.

Obwohl umfangreiche Erkenntnisse gewonnen werden, weisen die genannten Ansätze eine zu starke Einschränkung in der Abbildungspräzision menschlicher Wahrnehmung auf. Da Zeitabhängigkeit nicht nachgebildet wird, sind Schwingungsphänomene, phasische Komponenten und andere dynamische Effekte nicht abzubilden. Insbesondere für die Untersuchung fahrdynamischer Zusammenhänge sind jedoch gerade derartige Einflüsse von hoher Relevanz [29]. Ein Beispiel ist die Anforderung nach einem harmonischen, zur Fahrervorgabe proportionalen Aufbau der Fahrzeugreaktionsgrößen.

Die Arbeiten der subjektiven Sinnesphysiologie betrachten die Abläufe nach der Empfindung von Reizen. Nach deren Aufnahme und Weiterleitung an das sensorische Gehirn entstehen Empfindungen. Mittels einem Vergleich mit Erfahrungen des Individuums wird die Wahrnehmung erzeugt. Diese ist zwar an Menschen und Tieren beobachtbar, allerdings nicht messbar. Daher ist die subjektive Sinnesphysiologie ebenfalls nicht für die Auswertung von Fahrdynamikmessungen und deren Beurteilung geeignet.

Die Empfindung ist Forschungsgegenstand der objektiven Sinnesphysiologie. Von der Menge an Umwelteinflüssen, die auf den Menschen einwirken, regen nur wenige Sinnesorgane an. Ist dies der Fall, werden diese Stimuli als Sinnesreize bezeichnet. Sie erzeugen an der Zellmembran von Sensoren eine Potenzialänderung, die zur Erregung zugehöriger Nervenfasern führt. Eine Vielzahl neuronaler Leitungen überträgt die Information zur Verarbeitung in das sensorische Gehirnzentrum. Dieser Teilaspekt menschlicher Wahrnehmung ist beobachtbar und durch geeignete medizinische Apparatur messtechnisch zu erfassen. Daher ist die objektive Sinnesphysiologie geeignet, um durch ein

---

<sup>11</sup> Die Elektroenzephalographie ist ein Bestandteil medizinischer Diagnostik zur Ermittlung der Hirnaktivität durch elektrische Spannungsmessung an der Kopfhaut.

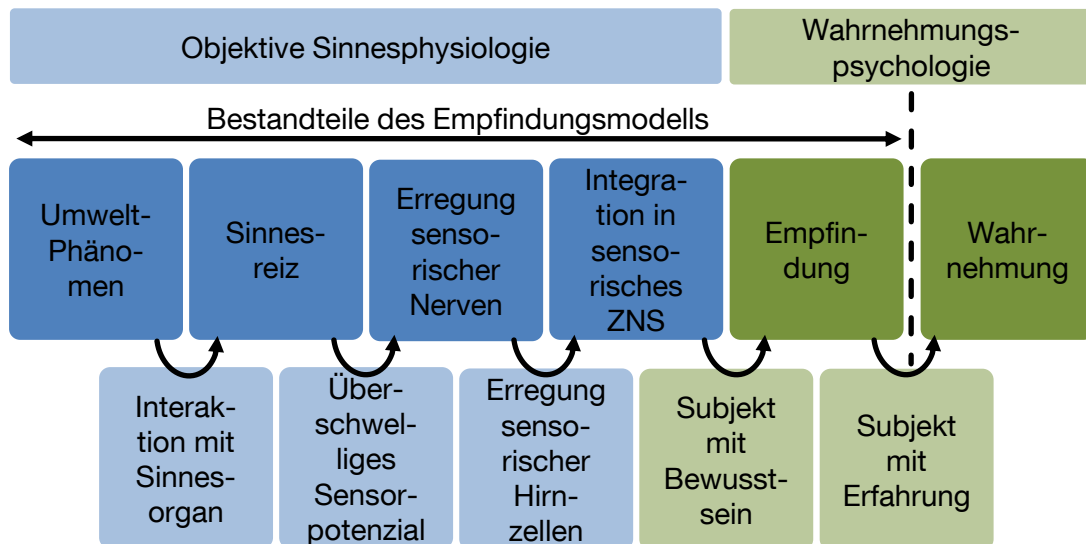


Abbildung 4.5: Abbildungsverhältnisse in der Sinnesphysiologie nach [58]

Modell beschrieben zu werden. Folglich kann sie die Grundlage eines Objektivierungskonzepts sein, welches die Empfindung als zentralen Bestandteil des Beurteilungsprozesses nachbildet. Dazu ist allerdings eine detaillierte Untersuchung menschlicher Sensorik notwendig, um eine geeignete mathematische Beschreibungsform zu ermitteln.

Um die Betrachtung der Grundlagen menschlicher Empfindung und Wahrnehmung zu vervollständigen, fasst Darstellung 4.5<sup>12</sup> die Abbildungsverhältnisse nach [58] zusammen. Ausgehend von Umweltphänomenen entstehen durch Interaktion mit Sinnesorganen Sinnesreize. Unter Voraussetzung geeigneter Sensoren und einer Anregung oberhalb der Wahrnehmungsschwellen erfolgt die Erregung von Nerven. Durch die Aktivierung fühlender Gehirnzellen wird die Integration im sensorischen Zentralnervensystem abgeschlossen. Dies ist der letzte Aspekt objektiver Sinnesphysiologie. Finden diese Abläufe in einem Subjekt mit Bewusstsein statt, resultieren Sinneseindrücke, die als Empfindungen bezeichnet werden. An dieser Stelle endet die in diesem Teilkonzept modellierte Prozesskette. Menschen besitzen einen gewissen Erfahrungsschatz in der Fahrzeugführung, der zusammen mit persönlichen Vorlieben abschließend die Wahrnehmung generiert. Dieser letzte Aspekt ist nicht Bestandteil des hier entwickelten Empfindungsmodells.

## 4.2.2 Menschliche Sensorik

Die Erfassung von Umweltinformationen ist ein wesentlicher Bestandteil der Fahrzeugführung. In diesem Unterkapitel werden daher zunächst menschliche Sensortypen und Empfindungsarten diskutiert. Die Reizübertragung und -kodierung sowie die Sinnesadaptation werden beschrieben. Abschließend erfolgt die Auswahl derjenigen Querdynamikgrößen, die in dieser Arbeit berücksichtigt und modelliert werden.

<sup>12</sup> In Abbildung 4.5 wird die Abkürzung ZNS für das zentrale Nervensystem verwendet.



## Sensortypen und Empfindungsarten

Um Informationen der Umgebung aufzunehmen und den Zustand des eigenen Organismus zu überwachen, benötigen Menschen Sinnesorgane. Diese werden allgemein als REZEPTOREN bezeichnet. MOLEKULARE REZEPTOREN sind für die Regulation innerer Abläufe notwendig und somit nicht Gegenstand fahrdynamischer Empfindung. Der in der Medizin geprägte Begriff der SENSOREN bezieht sich auf SINNESREZEPTOREN. Sie lassen sich physikochemisch nach der Art des adäquaten Reizes<sup>13</sup> einteilen:

- MECHANOSENSOREN reagieren auf mechanische Deformation. Sie befinden sich beispielsweise in Gehör, Gleichgewichtsorgan, Haut und Muskeln.
- Temperaturänderungen stimulieren THERMOSENSOREN, die vor allem in der Haut angeordnet sind. Für die Beurteilung von Fahrdynamik sind sie eher von untergeordneter Bedeutung.
- Die Verarbeitung chemischer Reize erfolgt in CHEMOSENSOREN. Sie sind Bestandteil von Geruchs- und Geschmackssinn, aber auch von Enterosensoren, die auf körpereigene Stoffe ansprechen. Diese Empfindungsarten sind ebenfalls weniger relevant für die Objektivierung von Fahreigenschaften.
- Das menschliche Auge detektiert mit Hilfe von PHOTOSENSOREN einfallendes Licht geeigneter Wellenlänge. Es ist von herausragender Bedeutung bei der Fahrzeugführung.
- NOZISENSOREN sind sensibel für potenziell gewebeschädigende physikalische oder chemische Reize und treten in allen Geweben auf. Sie sind für fahrdynamische Untersuchungen nicht relevant.
- HYGROSENSOREN detektieren Wasserdampf und sind für Fahrverhaltensuntersuchungen ebenfalls zu vernachlässigen.

Für die in dieser Arbeit fokussierte Thematik sind Mechano- und Photosensoren zu berücksichtigen. Deren adäquate Reize sind mechanisch oder sie werden durch Lichteinfall stimuliert. Sinnesorgane reagieren jedoch unter Umständen auch auf andere Einflüsse. Wird bei geschlossenen Augen ein hoher Druck auf die Lider ausgeübt, sind schwarze Ringe wahrnehmbar. Derartige Umweltstimuli, die nicht oder ausschließlich bei übermäßig hohen Intensitäten empfindungsauslösend wirken, werden als inadäquate Reize bezeichnet und sind nicht Bestandteil der in dieser Arbeit durchgeführten Modellierung menschlicher Empfindung. Nach der Auswahl der relevanten menschlichen Sensorik ist im nächsten Schritt zu untersuchen, in welchen SINNESMODALITÄTEN diese auftreten.

Die von einem Reiz erzeugte Empfindung ist neben der Art des Sensors auch vom Sinnesorgan abhängig, in dem er angeordnet ist. Obwohl in den Haarzellen des Gehörs und der Haut die selben Mechanorezeptoren arbeiten, divergieren die generierten Empfindungen. Es existiert also eine Abhängigkeit von der Sinnesmodalität, wie Sehen, Hören, Schmecken, Riechen und Fühlen. Die Differenzierung zwischen unterschiedlichen Modalitäten erfolgt somit nicht durch das Signal, da sich identische Sensoren in verschiedenen Organen befinden. Statt dessen werden detektierte Reize über Nervenfasern zu den charakteristischen sensorischen Gehirnzentren geleitet. Sinnesmodalitäten besitzen

---

<sup>13</sup> Physikalische Größen, die Sinnesorgane geeignet anregen, werden als adäquater Reiz bezeichnet.

jeweils eigene Zentren. Das zentrale Nervensystem kann auf diese Weise verschiedene Sinnesorgane unterscheiden.

Die SOMATOSENTORIK ist eine weitere Sinnesmodalität. Sie besteht aus allen Sinnen, die nicht im Kopf angeordnet sind. Unter EXTEROZEPTION wird der Tastsinn zusammengefasst. Er beinhaltet die Sensierung von Druck oder Vibrationen durch Mechanosensoren in der Haut. Die PROPRIOZEPTION, auch Tiefensensibilität, schließt die Sinneseindrücke durch Erregung von Muskel-, Sehnen- und Gelenkmechanosensoren ein. Im weiteren Verlauf der Arbeit wird für diese Mechanosensoren der Begriff der Extremitäten verwendet. Dadurch entstehen Kraft-, Bewegungs- und Stellungssinn einzelner Körperteile. Unterbewusste Empfindungen, wie beispielsweise die Regelung des Glukosespiegels oder Hungergefühl sind der ENTEROZEPTION zuzuordnen.

Die Sinnesmodalität SEHEN führt zu einem hochauflösenden, dreidimensionalen Eindruck der Umwelt durch Photosensoren der Netzhaut. Das im Ohr befindliche Gleichgewichtsorgan erzeugt den GLEICHGEWICHTSSINN und reagiert auf die Lage des Kopfs sowie auf translatorische und rotatorische Beschleunigungen in allen Raumrichtungen.

Es existieren weitere Modalitäten, die für die Beurteilung der Querdynamik nicht relevant sind. Daher werden sie an dieser Stelle nicht aufgeführt, können jedoch in [58] nachgelesen werden.

### Reizübertragung und -kodierung

Unabhängig von Sinnesmodalitäten und aktiven Sensoren ist die Reizübertragung und -kodierung des Menschen. Empfindungen entstehen durch einen adäquaten Reiz an einem Sensor. Dadurch wird das anliegende SENSORPOTENZIAL von einem Ruhezustand angehoben oder abgesenkt. Dabei öffnen sich Natriumkanäle, wodurch depolarisierende Ionenströmungen entstehen. Dieser Vorgang wird als TRANSDUKTION bezeichnet. Sie ist reizabbildend, Sensorpotenziale liegen also ebenso lang wie der physikalische Reiz an und steigen in ihrer Amplitude mit der Reizintensität. In den zugehörigen Nervenfasern löst das Sensorpotenzial eine Salve von AKTIONSPOTENZIALEN aus, deren Frequenz von der Amplitude des Sensorpotenzials abhängt. Diese Umwandlung wird als TRANSFORMATION bezeichnet. In den Nervenfasern, deren Ruhepotenzial unter den Sinnesmodalitäten variiert, wird die Information, abhängig vom Faserdurchmesser, mit Geschwindigkeiten von 1 bis  $120 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  weitergeleitet. Die Synapse am Ende der Nervenfaser befindet sich, je nach Sinnesmodalität, im Rückenmark oder im zentralen Nervensystem. Dort erfolgt die Umkodierung vom Aktionspotenzial in das SYNAPTISCHE POTENZIAL, die KONDUKTION genannt wird. Anschließend wird dort bei Bedarf wieder in Aktionspotenziale umgewandelt, falls andere Synapsen diese Information benötigen. Aktionspotenziale können bei Versuchstieren an freigelegten Nervenfasern oder mittels Mikroelektroden durch die Haut des Menschen gemessen werden und sind somit eine Maßeinheit für Empfindungen.

Das Sensorpotenzial der meisten Sinnesrezeptoren weist folgende charakteristische Eigenschaften auf, die beispielsweise in [72] beschrieben werden:

- Die Sensorantwort auf einen adäquaten Reiz tritt erst nach Überschreiten einer Schwelle auf. Diese REIZSCHWELLEN begrenzen den Arbeitsbereich der Sinneszelle nach unten.

- Das Sensorpotenzial steigt ab einer gewissen Reizintensität nicht weiter an. Der Arbeitsbereich wird also durch eine SÄTTIGUNG begrenzt.
- Zwischen diesen beiden Grenzen steigt die Amplitude des Sensorpotenzials LOGARITHMISCH MIT DER REIZINTENSITÄT an. Dies deckt sich mit den Beobachtungen von Weber und Fechner, die beispielsweise in [60] zusammengefasst sind.

Durch die logarithmische Übertragung der Reizstärke steigt zum Einen die Größe des Arbeitsbereichs erheblich an. Das menschliche Gehör kann beispielsweise um das  $10^{12}$ -fache variierende Tonintensitäten unterscheiden. Zum Anderen können bei niedrigen Reizstärken bereits kleine Unterschiede empfunden werden. Es ist jedoch anzumerken, dass die Aussagen in der Regel nur für statische Lastfälle gültig sind. Das dynamische Antwortverhalten von Sensoren ist folglich nicht auf diese Weise zu beschreiben.

Menschliche Rezeptoren beinhalten im Wesentlichen zwei unterschiedliche Übertragungseigenschaften: TONISCHE SENSOREN verhalten sich analog zu Proportionalübertragungsgliedern (siehe Grundlagen der Regelungstechnik in [38]). Sie bilden daher die Dauer und Amplitude eines Reizes exakt ab. Analog zu differentiellen Regelstrecken verhalten sich PHASISCHE SENSOREN. Sie reagieren auf die Reizgeschwindigkeit. Die meisten Sensoren weisen jedoch eine Kombination aus tonischem und phasischem Verhalten auf. Letzterer Anteil bildet die Grundlage für die SINNESADAPTION, die einen weiteren grundlegenden Mechanismus menschlicher Empfindung darstellt.

### Sinnesadaption

Dauern Anregungen bei Sensoren mit phasischem Anteil länger an, sinkt das Aktionspotenzial bis auf den tonischen Anteil ab. Solche Sensoren ADAPTIEREN folglich schnell. Je nach Adaptionsgeschwindigkeit werden die Sensoren in SAII<sup>14</sup> (in etwa ein Proportionalglied), SAI (Proportional-differentieller Term) und RA<sup>15</sup> (Differenzielles Glied) eingeteilt. Die SINNESADAPTION ermöglicht die Anpassung des Menschen an unterschiedliche Reizstärken. Besonders stark adaptiert das Auge. Es ist möglich, in Dunkelheit kleine Helligkeiten wie Sterne am Himmel wahrzunehmen und in einer anderen Situation das extrem helle Licht direkter Sonnenstrahlung zu verarbeiten.

Die Sinnesadaption ist folglich ein wesentlicher Aspekt menschlicher Empfindung. Sie ist daher im Empfindungsmodell zu berücksichtigen. Der Begriff ist jedoch klar von der Adaption menschlicher Lenkradbetätigung (siehe Abschnitt 4.1.2) zu trennen.

### Querdyamikgrößen als Fahrerinformation

Von den vorgestellten Mechanismen menschlicher Sinnesverarbeitung sind nicht alle von Relevanz für die Fahrzeugführung. In Tabelle 4.1 sind die für diese Arbeit zu betrachtenden Sinnesmodalitäten gängigen Messgrößen nach [72] gegenübergestellt<sup>16</sup>.

---

<sup>14</sup> SA ist eine Abkürzung für slowly adapting, also langsam adaptierend.

<sup>15</sup> RA steht für rapid adjusting, schnell adaptierend.

<sup>16</sup> In den Tabellen 4.1 und 4.2 wird die Abkürzung GGW-Organ für das Gleichgewichtsorgan verwendet. Zudem werden Quer- und Gierbewegung stellvertretend für Translationen und Rotationen in allen Raumrichtungen eingetragen

	Optisch	Vestibulär	Akustisch	Taktil	Propriozeption	Enterozeption
<b>Organ</b>	Auge	GGW-Organ	Gehör	Haut	Extremität	Innere Organe
<b>Absolutbewegung</b>	$\kappa, v, \beta, \psi$	$a_H, \ddot{\psi}$		$a_B$	$a_B$	$a_B$
<b>Relativbewegung</b>	$\Delta s, \Delta v, \Delta y, \Delta \psi, \Delta \nu$		$L_{Wind}$			
<b>Straße</b>	$b, \kappa_{STR}, \alpha$		$L_{STR}$			
<b>Verkehrsteilnehmer</b>	$v_i, \Delta y_i$		$L_i$			
<b>Fahrzeug</b>			$L_{FZG}$	$M_{LR}$	$M_{LR}$	
<b>Bediengrößen</b>	$\delta_{LR}$			$F_{Ped}$	$F_{Ped}, \delta_{LR}, \alpha_{Ped}$	

Tabelle 4.1: Fahrerinformationsgrößen zur Fahrzeugführung aus [72]

Um ein Objektivierungswerkzeug zu entwickeln, das im gesamten PEP einsetzbar ist (A10), sind neben den Restriktionen messtechnischer Erfassung auch konzeptionelle Aspekte zu berücksichtigen. Der Einsatz von Kameraplattformen zur Spurdetektion ist Gegenstand aktueller Forschungs- und Entwicklungsthemen. Dennoch ist es nicht üblich, derartige Sensorik für Handlingbewertungen zu nutzen. Dies ist vor allem in den hohen Anforderungen an die Bildverarbeitung begründet. Daher werden derartig messbare Größen (Straßenbreite  $b$ , Straßenkrümmung  $\kappa_{STR}$ ) nicht in diesem Teil des Konzepts berücksichtigt. Des Weiteren sind diejenigen Informationen von der Betrachtung ausgeschlossen, die relativ zu anderen Verkehrsteilnehmern oder einer Sollspur des Fahrers ermittelt werden (Spurversatz  $\Delta s$ , Relativgeschwindigkeit  $\Delta v$ , Querversatz  $\Delta y$ , Gierwinkelfehler  $\Delta \psi$  und Kurswinkelfehler  $\Delta \nu$ ). Dies würde eine deutlich komplexere Messtechnik und eine Vorgabe des Sollkurses bedingen. Zudem sind akustische Messungen in der Regel nicht Bestandteil von Fahrdynamikuntersuchungen (Lautstärke des Winds  $L_{Wind}$ , der Straße  $L_{STR}$ , des Verkehrs  $L_i$  und des Fahrzeugs  $L_{FZG}$ ). Die Objektivierung wird in dieser Arbeit außerdem losgelöst von Fragestellungen des Pedalgeföhls im Fußhebelerwerk betrachtet. Daher sind Pedalkräfte  $F_{Ped}$  und -stellungen  $\alpha_{Ped}$  nicht im Fokus. In Tabelle 4.2 sind die daraus resultierenden, für das Empfindungsmodell relevanten Größen aufgelistet. Diese sind beispielsweise mit der üblichen messtechnischen Ausrüstung aus Inertialsensorik und einem Messlenkrad erfassbar.

	Optisch	Vestibulär	Taktil	Propriozeption	Enterozeption
<b>Organ</b>	Auge	GGW-Organ	Haut	Extremität	Innere Organe
<b>Absolutbewegung</b>	$\kappa, v, \beta, \psi$	$a_H, \ddot{\psi}$	$a_B$	$a_B$	$a_B$
<b>Fahrzeug</b>			$M_{LR}$	$M_{LR}$	
<b>Bediengrößen</b>	$\delta_{LR}$			$\delta_{LR}$	

Tabelle 4.2: In dieser Arbeit betrachtete Fahrerinformationsgrößen

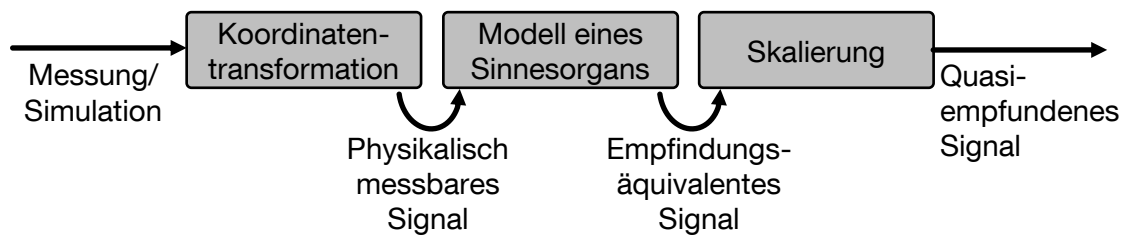


Abbildung 4.6: Generische Funktionsweise eines modellierten Organs

Folglich werden in dieser Arbeit Eigenschaften der Augen (Bahnkrümmung  $\kappa$ , Geschwindigkeit  $v$ , Schwimmwinkel  $\beta$  und Giergeschwindigkeit  $\dot{\psi}$ ), des Gleichgewichtsorgans (Translatorische und rotatorische Beschleunigungen im Kopf:  $a_H$ ,  $\dot{\psi}$ ), der Haut (Translatorische Beschleunigung im Körper  $a_B$ ), der Extremitäten ( $a_B$ , Lenkradmoment  $M_{LR}$  und -winkel  $\delta_{LR}$ ) und der inneren Organe ( $a_B$ ) zunächst genauer betrachtet. Optische Informationen ( $\kappa$ ,  $v$ ,  $\beta$ ) werden insbesondere im Teilkonzept in Kapitel 4.5 berücksichtigt. Das Empfindungsmodell stellt eine Abbildung dieser Größen von der messtechnisch erfassten Eingangsgröße hin zu QUASI-EMPFUNDENEN neuronalen Informationen dar. Dies wird nachfolgend beschrieben.

### 4.2.3 Funktionsweise und Aufbau des Empfindungsmodells

Das Empfindungsmodell querdynamischer Einflüsse stellt eine Abbildung von gemessenen oder simulierten Fahrdynamikgrößen auf quasi-empfundene Signale dar. Dieses Grundkonzept ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Es wird vorausgesetzt, dass zuvor eine Transformation in das Koordinatensystem eines Organs durchgeführt wird. Zur Modellierung des Gleichgewichtsorgans ist also beispielsweise von den gemessenen oder simulierten Referenzsystemen in die Lage des Kopfs umzurechnen. Die Bewertung dieses Teilkonzepts erfolgt auf Basis quasi-empfundener Größen. Diese sind durch die gewählte Modellierung den Empfindungen des Menschen äquivalent. Damit sie quantitativ mit Messgrößen vergleichbar sind, findet anschließend eine Skalierung von Aktionspotenzialen auf physikalische Einheiten statt.

Wie im vorigen Abschnitt ausgeführt, werden die Augen, das Gleichgewichtsorgan, die Haut, Extremitäten und innere Organe auf Modellierbarkeit und fahrdynamische Relevanz geprüft. Zunächst ist aber der mit diesem Modell konzipierte Bewertungsprozess zu beschreiben.

### 4.2.4 Fahrdynamikbewertung mit einem Modell menschlicher Empfindung

Die Bewertung der Fahrdynamik von PKW erfolgt mit aufgezeichneten Mess- oder Simulationsdaten. Die relevanten Größen werden an das Empfindungsmodell übergeben und von den simulierten Übertragungsgliedern menschlicher Sensorik verarbeitet. Anschließend liegen neben den Ausgangsdaten der Messtechnik oder der Simulation zusätzlich quasi-empfundene Signale vor. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die äquivalenten

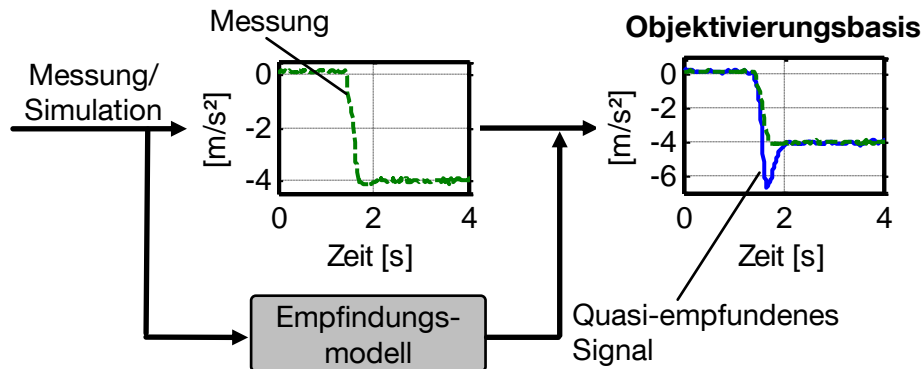


Abbildung 4.7: Ablauf der Fahrtdynamikbewertung mit einem Empfindungsmodell

Signale verglichen. Es wird unter anderem untersucht, in wie weit die von der maschinellen Sensorik erfassten Daten mit denen der menschlichen übereinstimmen. Dies ist jedoch in der Regel nicht der Fall. Es liegen also abweichende Signale zwischen Messung oder Simulation und den zur Beurteilung relevanten empfundenen Verläufe vor.

Bisherige Objektivierungsansätze nutzen ausnahmslos inertielle Messdaten für die Beurteilung, indem Kennwerte berechnet werden. In diesem Konzeptteil werden die Kenngrößen jedoch aus den Ausgängen des Empfindungsmodells berechnet. Aus einem Lenkradwinkelsprung wird somit nicht die gemessene Querbeschleunigung analysiert, sondern die vom Empfindungsmodell ausgegebene. Ein Beispiel für den Unterschied zwischen Messgrößen und quasi-empfundenen Signalen ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Das Überschwingen des Empfindungsmodellausgangs ist auf die Übertragungseigenschaften menschlicher Sensorik zurückzuführen. Daraus resultieren Kennwerte, die sich von den maschinell erfassten unterscheiden und somit ein erhöhtes Potenzial aufweisen, den Beurteilungsprozess von Abstimmungsingenieuren nachzubilden. Dadurch stehen Steigerungen in der Kausalität (A6) der ermittelten Objektivierungszusammenhänge in Aussicht. Diese werden in Kapitel 6.1 durch die Gegenüberstellung quasi-empfundener Kennwerte mit Subjektivurteilen von Versuchsfahrern dargestellt. Die gewonnenen Aussagen werden anschließend in ein Objektivierungswerkzeug integriert, um die automatische Urteilsberechnung zu ermöglichen. Dieses Gesamtkonzept der Fahrtdynamikbewertung mit einem Modell menschlicher Empfindung illustriert Abbildung 4.7.

### 4.3 Empfindung der Fahraufgabe und Fahrzeugreaktionsgrößen

In diesem Kapitel werden physiologische Eigenschaften von Sinnesorganen zur Sensierung der Fahraufgabe und Fahrzeugreaktionsgrößen diskutiert. Das sind nach dem vorigen Abschnitt Augen, Gleichgewichtsorgan, Haut, Extremitäten und innere Organe. Zusätzlich ist die Bewegung des Kopfs in die Betrachtung integriert. Es wird unter anderem geprüft, ob die Charakteristika menschlicher Sensorik Auswirkungen auf die Beurteilung der Fahrtdynamik aufweisen können oder ob die Modellierung keine Steigerung der in Anforderung A6 geforderten Kausalität bewirkt. Als zentrale Literatur für die beschriebenen Zusammenhänge der Physiologie dienen [58, 60, 71].

### 4.3.1 Optische Wahrnehmung

Die Mehrzahl an Informationen, die bewusst vom Gehirn wahrgenommen werden und von Relevanz für die räumliche Orientierung sind, gelangen über die Augen an das zentrale Nervensystem. Dies wird häufig in Fahrermodellen genutzt, die wesentliche Informationen, wie beispielsweise Krümmungen oder Querversatz, aus der Optik beziehen. Eine Einführung in den dioptrischen Apparat des Augapfels und der dort vorherrschenden Abbildungsprinzipien findet sich in [60]. Die darin beschriebenen Effekte der Schärfeeinstellung und Lichtintensitätsanpassung sind grundlegende Mechanismen, die an dieser Stelle jedoch nicht ausgeführt werden.

Von besonderer Bedeutung für das Führen von Fahrzeugen ist die plastische optische Sensierung, auch als TIEFENWAHRNEHMUNG bezeichnet. Gängige Annahme ist, dass binokulares Sehen, also die Nutzung beider Augeninformationen, die aus einem um den Augenabstand unterschiedlichen Blickwinkel ermittelt werden, hauptsächlich für räumliches Sehen verantwortlich ist. Dieser Effekt kann beobachtet werden, die Relevanz sinkt aber mit steigender Entfernung. Ab einem Abstand von etwa 6m ist auf diese Weise räumliches optisches Empfinden nur eingeschränkt möglich [63]. Folglich finden im Fahrer andere Mechanismen Verwendung, um perspektivische Informationen zu generieren.

Monokulares Sehen stützt sich lediglich auf die Daten eines Auges. Nach [63] dienen Informationen der Fahrumgebung dazu, um aus Erfahrung Bewegungszustände, Größen und Orientierung abzuschätzen. Dieser Prozess ist allerdings eingeschränkt leistungsfähig und interpretiert nicht immer fehlerfrei. Zuverlässigere Informationen werden durch Kopfbewegungen generiert. Bei ausreichend langer Betrachtung einer Szene kann durch Längs- und Querbewegungen des Kopfs auf räumliche Informationen geschlossen werden. Ein flüchtiger Blick ist dafür nicht ausreichend. Auf diese Weise sind aber dennoch plastische Informationen für die Fahrzeugführung ermittelbar.

Kennzeichnend für die Untersuchungen menschlicher Sehfertigkeit ist die Erkenntnis, dass die optische Messtechnik höchst präzise arbeitet. Einzig wesentliche Eigenschaft für die Modellierung ist die zeitliche Verzögerung zwischen dem Auftreten eines Reizes und der Umwandlung im Auge. Diese Latenz ist für zentrales und dezentrales Sichtfeld unterschiedlich angegeben und kann in [70] nachgelesen werden. Dieser Verzug ist in das Empfindungsmodell zu integrieren. Die Präzision optischer Informationsaufnahme zeigt sich beispielsweise auch in Fahrsicherheitstrainings. Die Instruktoren lehren die Interpretation optischer Einflüsse, da diese einfacher umzusetzen sind. Beim Bremsen auf  $\mu$ -Split soll beispielsweise das Ausbrechen durch optische Sensierung der Fahrzeuginnenachse relativ zur Fahrspur ermittelt und ausgeregelt werden. Erst erfahrene Versuchsfahrer können zusätzliche Größen zur Fahrzeugführung mittels des Gleichgewichtsorgans nutzen. Dies ist in dessen Übertragungsverhalten begründet und wird nachfolgend diskutiert.

### 4.3.2 Gleichgewichtsorgan

Das Gleichgewichtsorgan, auch als Vestibularorgan bezeichnet, erfasst translatorische und rotatorische Beschleunigungen. Dadurch ermöglicht es die Kontrolle der Körperhaltung und der Augenbewegung (siehe dazu auch Kapitel 4.3.3). Zu den Gleichgewichtsorganen zählen symmetrische Innenohren mit jeweils zwei MACULAR- und drei BOGENGANGORGANEN.

## Macularorgan

Die Macularorgane, Macula Utriculi (Utrikulus) und Macula Sacculi (Sakkulus) werden von translatorischen Beschleunigungen stimuliert. Abbildung 4.8 zeigt nach [58], wie diese tropfenförmigen Elemente in der ENDOLYPHE<sup>17</sup> des Gleichgewichtsorgans angeordnet sind.

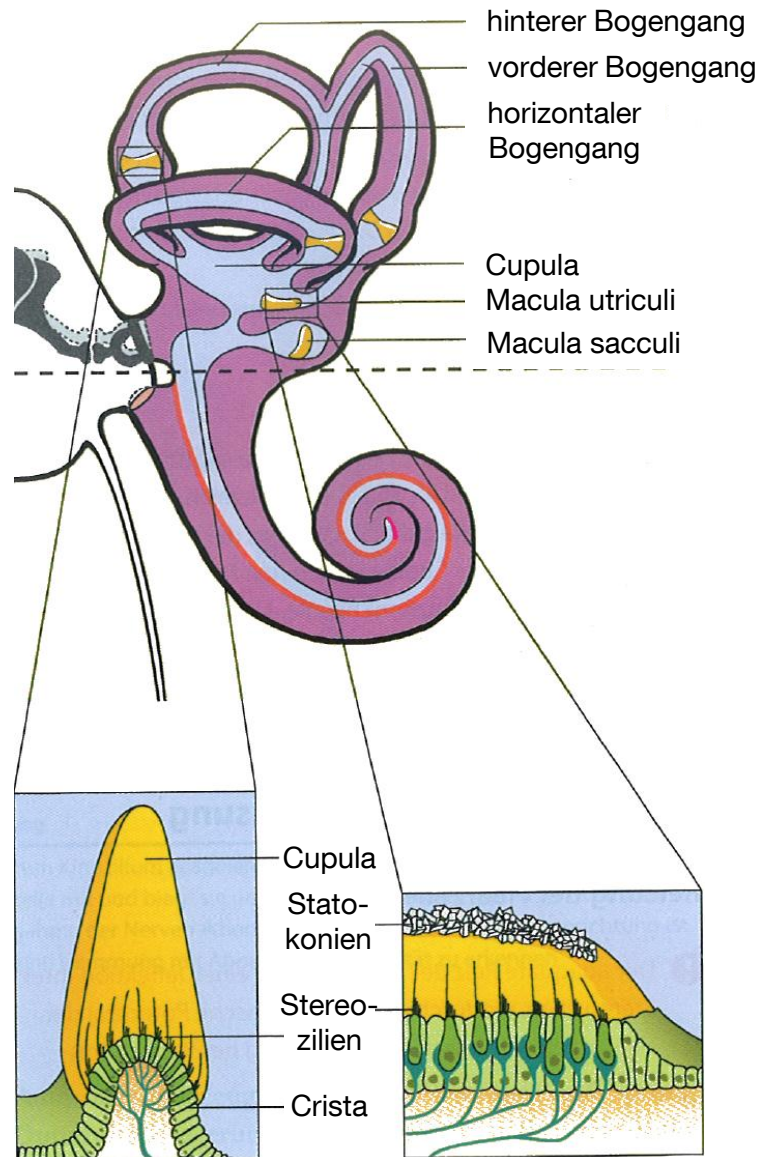


Abbildung 4.8: Aufbau des Gleichgewichtsorgans aus [58]

Die STEREOZILIEN, auch als Otolithenneuronen bezeichnet, sind unidirektional erregbare Mechanorezeptoren. Sie sind der Gruppe der Haarzellen zuzuordnen. Durch Beugung in Richtung des KINOZILIUMS<sup>18</sup> werden Calciumkanäle geöffnet. Dadurch steigt das Ruhepotenzial von etwa 60Hz auf das veränderliche Aktionspotenzial an. Bei umgekehrter

<sup>17</sup> Die Endolymphe ist eine der Lympheflüssigkeit ähnliche Substanz im Labyrinth des Innenohrs.

<sup>18</sup> Die längste Haarzelle eines Stereoziliums wird als Kinozilium bezeichnet.



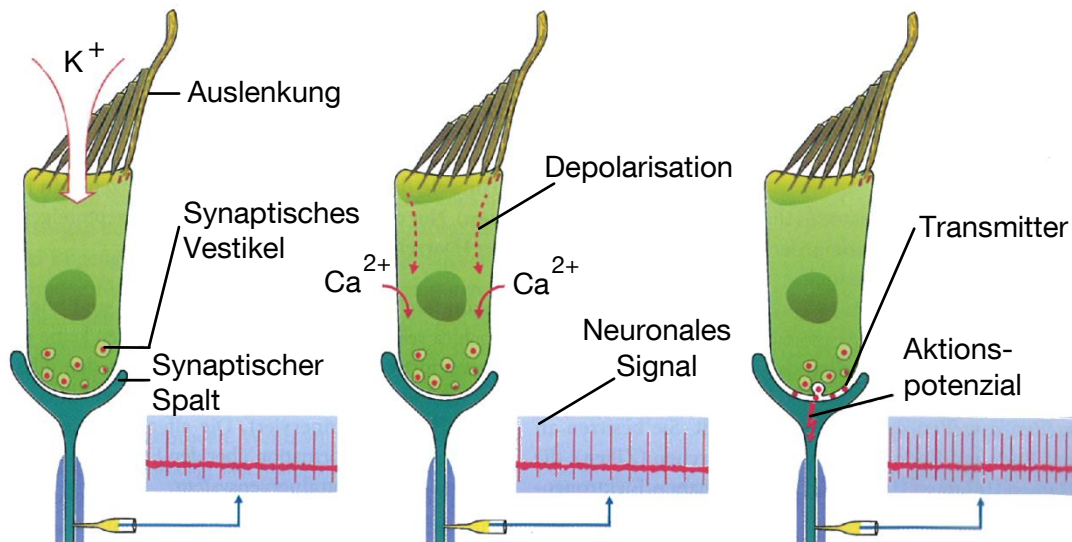


Abbildung 4.9: Anregung der Macularorgane aus [58]

Anregungsrichtung sinkt es wiederum. Die Stereozilien sind in einer elastischen, gallertartigen Membran eingebettet. Auf deren Oberseite sind die STATOKONIEN angeordnet. Sie besitzen die etwa dreifache Dichte der Umgebung. Durch diesen Dichteunterschied wird die Statokonienmembran auf Grund von Trägheitseffekten bei Beschleunigungen ausgelenkt. Diesen Zusammenhang illustriert Abbildung 4.9 nach [58].

Die Stereozilien in den Macularorganen sind nicht einheitlich ausgerichtet. Zusammen mit der zueinander senkrechten Anordnung von Utrikulus und Sakkulus resultiert die dreidimensionale Auflösung von translatorischen Beschleunigungen. Die selbe Anregung führt im gegenüberliegenden Macularorgan zu einem gegensätzlichen Signal. Tritt beispielsweise auf der einen Seite eine Hemmung des Aktionspotenzials auf, steigt es auf der anderen. Anregungen durch Kopfbewegungen werden im Vestibularkern durch Zusatzinformationen aus den Augen und der Stützmotorik aus dem resultierendem Signal gefiltert.

In der Literatur finden sich diverse Angaben zu Wahrnehmungsschwellen. Es werden untere und obere Grenzen angegeben. Einige Quellen beinhalten keine genaue Aussage und geben nur einen generellen Anhaltswert. Tabelle 4.3 fasst nach [2, 71] einige Schwellwerte der Beschleunigungsempfindung zusammen.

Untere Grenze	Keine Angabe	Obere Grenze
-	$0,02 \frac{m}{s^2}$	-
$0,05 \frac{m}{s^2}$	-	$0,1 \frac{m}{s^2}$
$0,1 \frac{m}{s^2}$	-	$0,18 \frac{m}{s^2}$
-	$0,0537 \frac{m}{s^2}$	-

Tabelle 4.3: Schwellwerte translatorischer Beschleunigungsempfindung

Die dynamischen Eigenschaften sind jedoch von diesen Grenzwerten entkoppelt zu betrachten. Etwa 70% der Otolithen sind regulär, 24,5% irregulär und 5,7% intermediär.

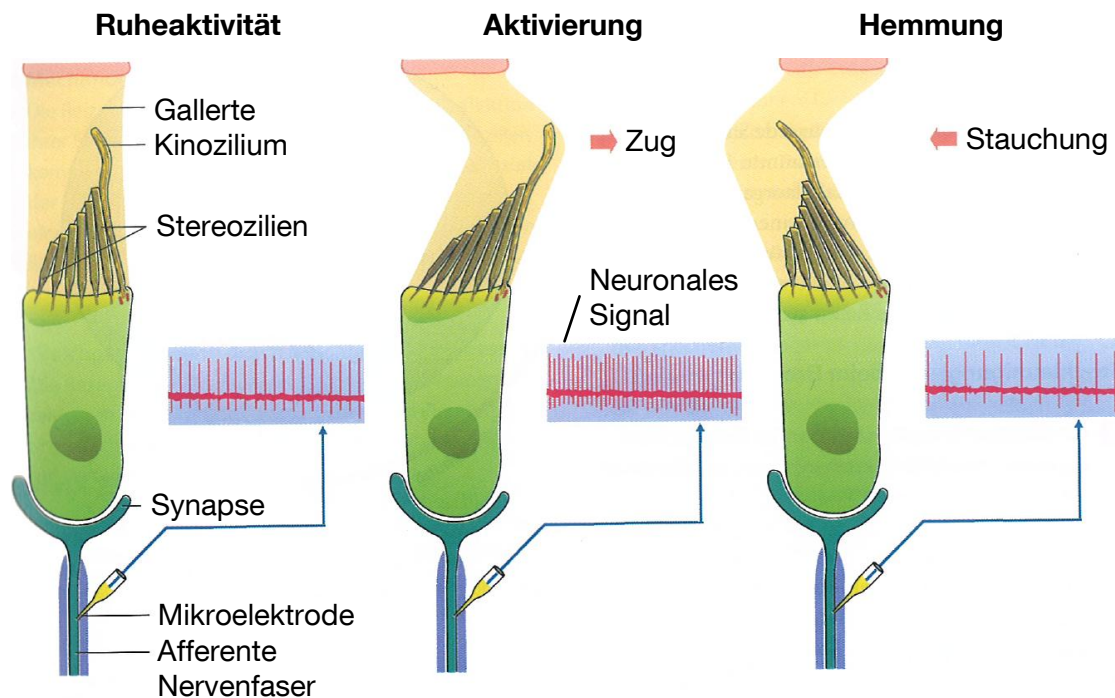


Abbildung 4.10: Anregung der Bogengänge aus [58]

Reguläre und irreguläre Stereozilien unterscheiden sich hinsichtlich der Sinnesadaptation. Nahezu ideal tonisches Verhalten kennzeichnet reguläre, tonisch-phasische Übertragungseigenschaften irreguläre Otolithen. Die Reaktion auf Beschleunigungen erfolgt insgesamt sehr schnell. Dennoch ist das Zeitverhalten bei der Empfindung von Beschleunigungen von hoher Relevanz für die Beurteilung von Fahreigenschaften. Daher sind die Macularorgane vom hier entwickelten Objektivierungswerkzeug zu berücksichtigen.

### Bogengangorgan

Rotatorische Beschleunigungen stellen adäquate Reize für die Bogengänge (siehe Abbildung 4.8) dar. Drehungen um alle Raumachsen sind detektierbar, da die drei Bogengänge eines Gleichgewichtsorgans senkrecht aufeinander stehen. Im Inneren der ringförmigen Strukturen befindet sich die Endolymphflüssigkeit. Von Drehbeschleunigungen um die Drehachse werden Bogengänge bewegt. Die Endolymph reagiert auf Grund der Trägheit verzögert. Dadurch wird die CUPULA, eine elastische Membran in jedem Bogengang, ebenfalls mit Zeitverzug ausgelenkt. Die Verformung der Cupula ist, wie in Abbildung 4.10 aus [58] dargestellt, der Auslöser für den Anstieg oder das Absinken des Aktionspotenzials eines Bogengangs.

Die Cupula beinhaltet, wie auch die Macularorgane, Stereozilien. Drehungen und damit die Verformung der Cupula öffnet Calciumkanäle, die in Folge eine Veränderung des Sensorpotenzials aus dem Ruhezustand von 91Hz bewirken. Im Vestibularkern erfolgt zudem die Unterscheidung zwischen Kopfbewegungen und anderen rotatorischen Bewegungen durch die redundante Information aus dem Gleichgewichtsorgan der anderen Seite, Kräfte an den Nackenmuskeln und der Augenstellung.

Auch für rotatorische Anregungen existieren Angaben zu Empfindungsschwellen. Diese differieren aber deutlicher als bei den Macularorganen. Dies liegt unter Anderem daran, dass die Reizschwellen nicht ausschließlich von der Gierbeschleunigung, sondern ebenfalls von der Anregungszeit abhängig sind. Zudem sind Drehbewegungen durch optische Wahrnehmung deutlicher zu empfinden. Dennoch listet Tabelle 4.4 einige Zahlenwerte nach [2, 71] auf. Die Angaben unterscheiden zwischen der Reizschwelle der ersten, sensibelsten Versuchsperson und einer Grenze, ab der alle Probanden die Anregung empfinden.

Sensibelste Versuchsperson	Jede Versuchsperson
$0,035 \frac{^\circ}{s^2}$	$0,035 \frac{^\circ}{s^2}$
$0,2 \frac{^\circ}{s^2}$	$1 \frac{^\circ}{s^2}$
-	$0,09 \frac{^\circ}{s^2}$
$0,05 \frac{^\circ}{s^2}$	$5 \frac{^\circ}{s^2}$
$0,05 \frac{^\circ}{s^2}$	$1 \frac{^\circ}{s^2}$

Tabelle 4.4: Schwellwerte rotatorischer Beschleunigungsempfindung

Die Empfindung rotatorischer Bewegungen ist ein wesentlicher Bestandteil der Fahrdynamikbeurteilung. Daher ist die Sensierung von Wank-, Nick- und Gierbewegungen in das Empfindungsmodell zu integrieren. Das Zeitverhalten der Bogengänge stellt neue Erkenntnisse zur Gefallensfrage von Fahrwerkeigenschaften in Aussicht.

### 4.3.3 Kopfbewegung während der Fahrzeugführung

Um die Modellierung des Gleichgewichtsorgans zu nutzen, ist zusätzlich eine mathematische Beschreibung menschlicher Kopfbewegung bei der Fahrzeugführung erforderlich. Die physiologische Literatur nennt unterschiedliche Reflexarten, die für die Dynamik der Kopfstellung relevant sind. Diese werden nachfolgend erläutert und deren Auswirkungen diskutiert. In [65] sind die notwendigen Grundlagen beschrieben.

#### Vestibulookularer und optokinetischer Reflex

Der VESTIBULOOKULARE REFLEX bezeichnet eine gezielte Augenbewegung, die auch bei unruhiger Kopfstellung die stabile visuelle Wahrnehmung und Fixierung eines Zielobjekts gewährleistet. Diese Blickstabilisierung ist notwendig, da wegen der begrenzten Verarbeitungsgeschwindigkeit des menschlichen Auges, stehende Bilder besser als bewegte auszuwerten sind [17]. Abbildung 4.11 stellt die neuronale Vernetzung nach [65] dar, die den Reflex ermöglicht.

Bei beginnender Kurvenfahrt wankt der Fahrerkopf zunächst mit dem Fahrzeug. Diese Drehung wird vom Bogengang sensiert. Auf der einen Seite wird das Aktionspotenzial somit gesenkt, während es auf der anderen steigt. Über zwei Synapsen ist die BOGENGANGAFFERENZ<sup>19</sup> mit der Stellmuskulatur der Augen verschaltet. Kurveninnere Muskeln

<sup>19</sup> Nervenfasern, die Sinnesorgane mit dem zentralen Nervensystem verbinden, werden als Afferenz bezeichnet.

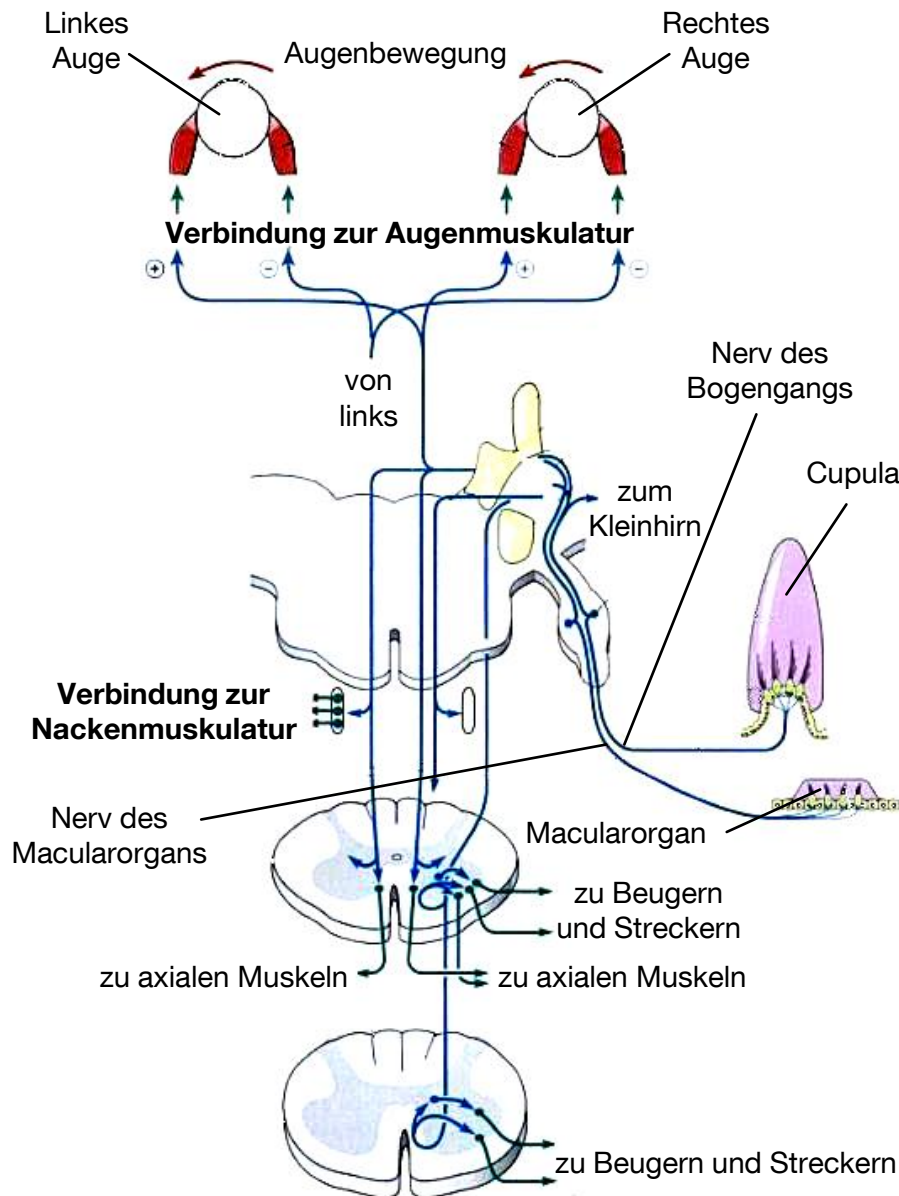


Abbildung 4.11: Neuronale Vernetzung von Blick- und Kopfstellungsreflexen aus [65]

werden also aktiviert, während die andere Seite die Spannung reduziert. Die Vernetzung der Bogengänge mit den Augenmuskeln wird als ANTAGONISCH<sup>20</sup> bezeichnet. Die so bewirkte Augenbewegung stabilisiert den Blick. Analog sind die anderen Bogengänge mit den übrigen Augenmuskeln verbunden. Dadurch werden kompensatorische Augenbewegungen für beliebige Kopfdrehungen ermöglicht. Dieser Reflex bewirkt jedoch keine Stellungsänderung des Kopfs während der Fahrzeugführung und ist somit für die Modellierung des Gleichgewichtsorgans irrelevant.

Der OPTOKINETISCHE REFLEX stabilisiert ebenfalls den Blick durch kompensatorische

<sup>20</sup> Das antagonistische Prinzip beschreibt das muskuläre Zusammenwirken von Beugern (Agonisten) und Streckern (Antagonisten). Um eine Bewegung zu ermöglichen, muss bei der Kontraktion eines Beugers der Strecker gedehnt werden.

Ansteuerung der Augenmuskulatur. Er nutzt jedoch Informationen aus der optischen Wahrnehmung und ist langsamer als der vestibulookulare Mechanismus. Vorteilhaft ist die fehlende Adaption des Auges, wodurch die Detektion langsamer Drehbewegungen ermöglicht wird. Obwohl dies eine Verbesserung gegenüber den Informationen aus den Bogengängen darstellt, unterstützt der optokinetische den vestibulookularen Reflex lediglich ergänzend und leistet einen geringen Beitrag zur Blickstabilisierung. Daher ist dieser Aspekt ebenfalls nicht in das Empfindungsmodell zu integrieren.

#### **Vestibulospinaler Reflex**

Für die in dieser Arbeit notwendige Modellierung ist zu prüfen, ob Reflexe neben den Augen auch die Kopfstellung beeinflussen. Dies wird bereits in [54] beobachtet. Neue Untersuchungen erklären die Kopfbewegung mit dem VESTIBULOSPINALEN REFLEX. Analog zur Vernetzung zwischen Bogengängen und Augenmuskulatur sind optische und vestibuläre Sensoren zusätzlich mit der Nackenmuskulatur verbunden. Dies ist ebenfalls in Abbildung 4.11 illustriert. Primär wird dadurch die aufrechte Körperhaltung ermöglicht. Überwiegend werden Informationen aus dem Gleichgewichtsorgan genutzt. Dies erscheint schlüssig, da Menschen in völliger Dunkelheit problemlos stehen und laufen können. Die Schnelligkeit vestibulärer Daten unterstützt diese Aussage zusätzlich.

Zur Gruppe der vestibulospinalen Mechanismen gehört der VESTIBULOZERVIKALE REFLEX. Er leistet die Blickstabilisierung durch Kopfbewegungen auf Grund antagonistischer Aktivierung der Nackenmuskeln. Dieser Zusammenhang ist in das Modell zu integrieren. Zudem ist zu untersuchen, ob das in [58] vorgeschlagene Übertragungsverhalten eines Verzögerungsglieds zweiter Ordnung zutreffend ist.

#### **4.3.4 Weitere fahrdynamisch relevante Organe**

Augen und Gleichgewichtsorgane sind wesentliche Sensoren der Fahrzeugführung. Zusätzlich ist die Relevanz der Haut, von Extremitäten und inneren Organen für den Beurteilungsprozess zu prüfen.

#### **Haut**

Einige Fahrdynamikgrößen sind über die Haut detektierbar. Dies gilt zum Beispiel für Querschleunigungen, die durch Druck auf die Sitzseitenwangen oder Scherung in der Sitzfläche sensiert werden können. Ein Modell derartiger Empfindung wird in dieser Arbeit nicht erstellt, da zu intensive Abhängigkeiten von Körper- und Sitzgeometrie sowie der beteiligten Stoffe bestehen. Die Berücksichtigung dieser Effekte steht im Widerspruch zu den Anforderungen A3 und A10, die beide die Verwendung in der Simulation beinhalten. In der virtuellen Fahrdynamik sind derartige Einflüsse üblicherweise jedoch nicht abgebildet. Des Weiteren wird die Allgemeingültigkeit des Bewertungsinstruments eingeschränkt, wenn die Aussage abhängig von Sitz- und Fahreigenschaften ist. Zudem ist erweiterte Sensorik notwendig, mit deren Auswertung im Fahrdynamikversuch noch nicht ausreichend Erfahrung vorhanden ist. Dies ist nur eingeschränkt mit den Forderungen A1 (Zuverlässigkeit) und A9 (Modularität) vereinbar. Insgesamt wird daher die Empfindung

der Haut an der Schnittstelle zwischen Sitz und Fahrer in dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Die Sensierung von Bediengrößen am Lenkrad ist jedoch von wesentlicher Bedeutung für die Fahrdynamikbeurteilung und kann über die Haut erfolgen. Dies gilt insbesondere für das Lenkgefühl. Dieser Aspekt wird in Kapitel 4.4 diskutiert.

### **Extremitäten**

Extremitäten dienen zur Bedienung des Fahrzeugs und zur Abstützung des Fahrers gegenüber fahrdynamischen Kräften. Die Beine betätigen das Fußhebelwerk. Da es nicht Gegenstand dieser Untersuchung ist, wird die Pedalnutzung nicht modelliert. Analoges gilt für die Stabilisierung des Fahrers bei extremen Längs- und Querschleunigungen. Unter Grenzbereichsbedingungen nutzen Fahrer die Möglichkeit, sich gegenüber dem Fahrzeuginterieur zu versteifen. Da dies jedoch kein kundenrelevantes und zudem individuell verschiedenes Verhalten ist, wird es ebenfalls nicht berücksichtigt. Des Weiteren werden Trägheitskräfte der Arme und Beine nicht betrachtet, da auch diese zu starke Abhängigkeiten von den Körpermaßen des Fahrers haben.

Die Arme sind, zusammen mit den Händen, die zentrale Schnittstelle zum Lenkrad. Deren Einfluss auf die Empfindung von Bediengrößen ist von hoher Relevanz für die Fahrdynamikobjektivierung und wird in Abschnitt 4.4 behandelt.

### **Innere Organe**

Das Gefühl der Schwerelosigkeit in der Magengrube bei Achterbahnen oder bei der Überfahrt einer Kuppe mit hoher Geschwindigkeit deutet an, dass innere Organe ebenfalls zur Empfindung fahrdynamischer Größen geeignet sind. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Recherche deckt jedoch keine Quellen auf, die eine bewusste Empfindung durch innere Organe beschreiben. Einzig unbestimmte Gefühle der Enterozeption, wie Hunger oder Übelkeit sind nachweislich auf innere Organe zurückzuführen. Daher werden sie nicht in das Empfindungsmodell integriert.

#### **4.3.5 Modellarchitektur für Fahraufgabe und Fahrzeugreaktionsgrößen**

Das in dieser Arbeit aufgebaute Modell beinhaltet folglich zunächst Beschreibungen der Augen, des Gleichgewichtsorgans sowie der Kopfbewegung bei der Fahrzeugführung. Die vorläufige Struktur ist in Abbildung 4.12 zusammengefasst. Die Eigenschaften von Haut und Extremitäten werden in Kapitel 4.4 berücksichtigt. Sie sind daher in dieser Grafik lediglich als Platzhalter eingefügt.

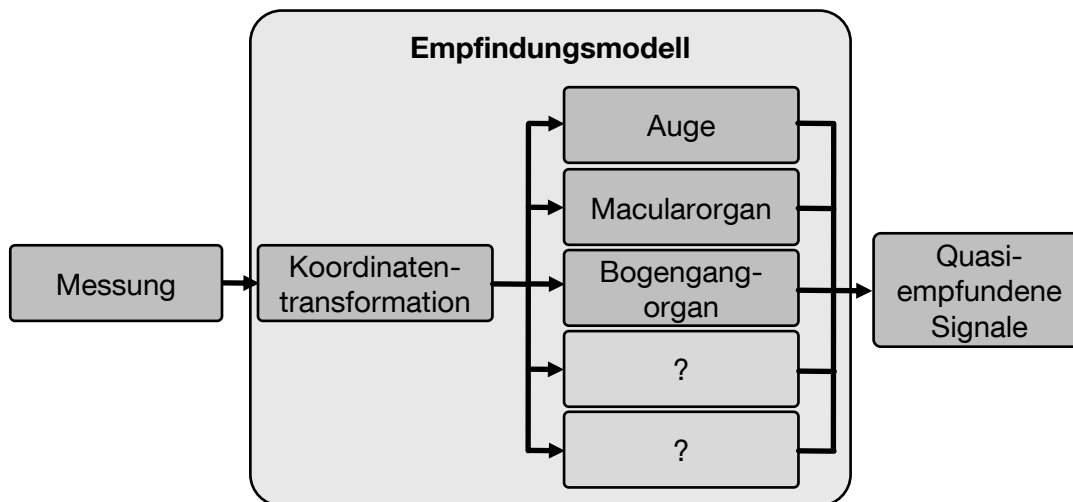


Abbildung 4.12: Gesamtarchitektur des Empfindungsmodells ohne Lenkradempfindung

## 4.4 Empfindung von Lenkradwinkel und -moment

Dieses Kapitel beschreibt die Eigenschaften der Extremitäten zur Empfindung von Lenkradwinkel und -moment. Die zugrundeliegenden Informationen werden [3, 22] entnommen. Drei Sinnesmodalitäten sind an der Sensierung beteiligt und werden auf Einfluss und Modellierbarkeit geprüft: SOMATOVISZERALE, OBERFLÄCHEN- und TIEFENSENSIBILITÄT.

### 4.4.1 Somatoviszzerale Sensibilität

Die somatoviszzerale Sensibilität ist ein Fachgebiet der Neuro- und Sinnesphysiologie. Gegenstand der Untersuchung sind Rezeptoren, die außerhalb des Kopfs angeordnet sind. Dieser Forschungsbereich ist in die Hauptgruppen SOMATOSENSORIK und VISZERALE SENSIBILITÄT (Enterozeption) aufgeteilt. Letztere behandelt innere Organe und wird daher nicht weiter diskutiert. Oberflächensensibilität (Ekterozeption) und Tiefensensibilität (Propriozeption) sind Teile der Somatosensorik. Beide beinhalten Einflüsse, die auf Relevanz für diese Arbeit zu prüfen sind. Abbildung 4.13 stellt diese Einteilung dar.

### 4.4.2 Oberflächensensibilität

Druck-, Berührungs-, Vibrations- und Kitzelempfindungen sind der Oberflächensensibilität zuzuordnen und bilden die Grundlage des menschlichen Tastsinns. Hervorzuheben ist die hohe Empfindlichkeit für mechanische Reize. Es ist möglich, sogar die Bewegung eines einzelnen Haars auf dem Handrücken deutlich zu sensieren. Nachfolgend erfolgt die Diskussion der beteiligten Mechanorezeptoren. Der Aufbau der Haut mit den eingebetteten Sensoren und deren Häufigkeitsverteilung in der Handfläche sind in Abbildung 4.14 nach [3] dargestellt.

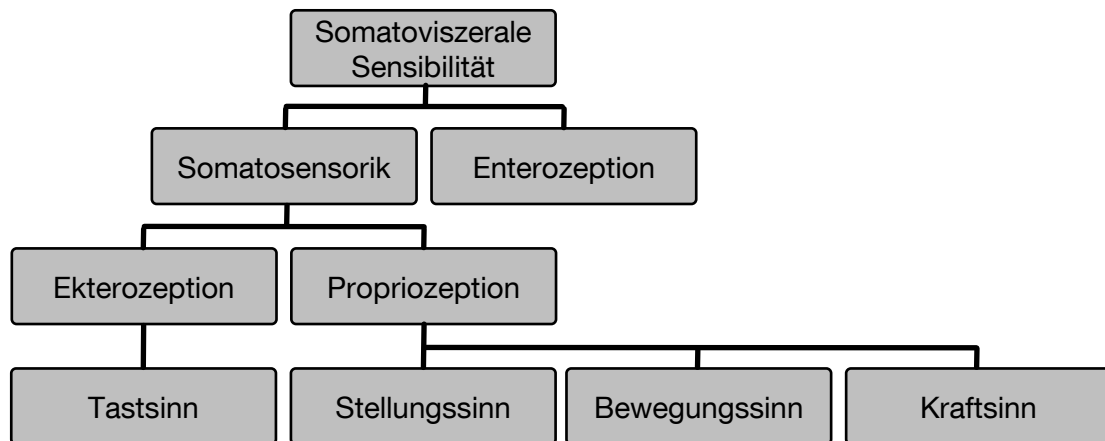


Abbildung 4.13: Struktur der somatoviszzeralen Sensibilität

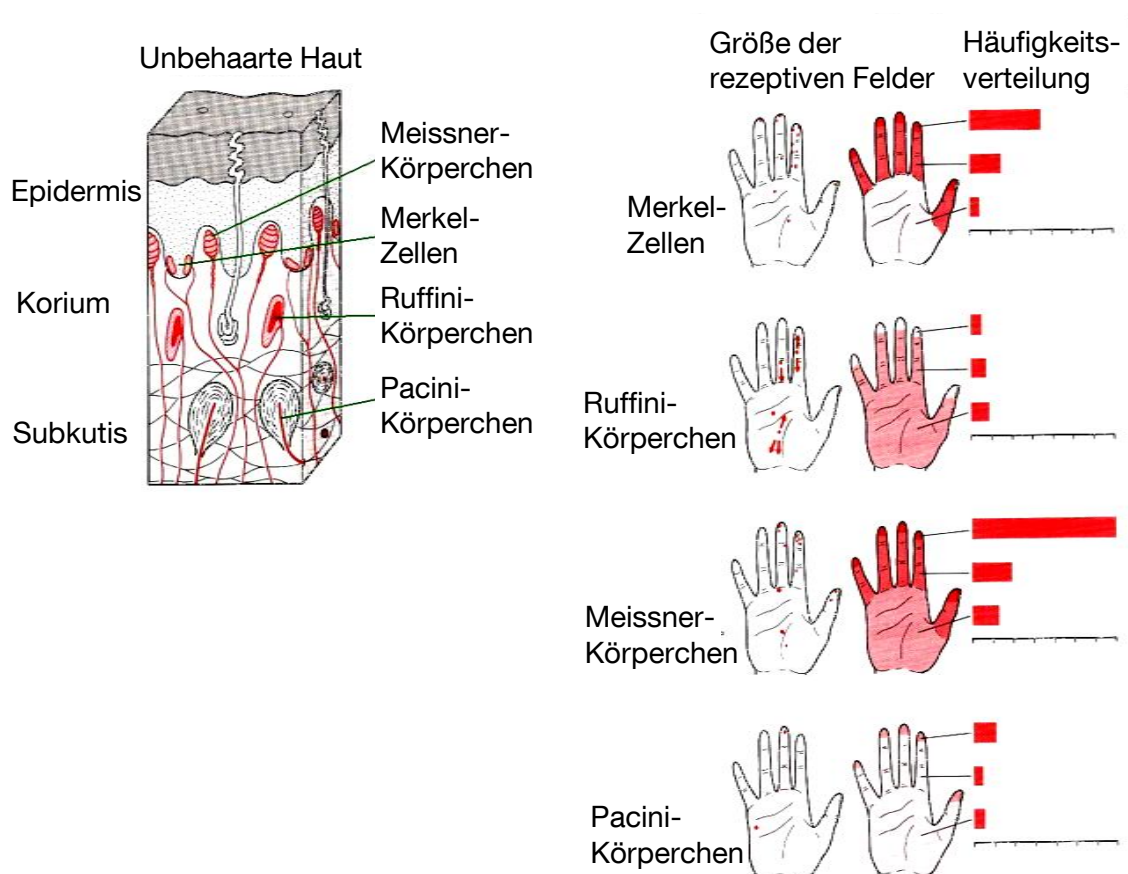


Abbildung 4.14: Häufigkeitsverteilung der Rezeptoren in der Handinnenfläche aus [3]

- MERKEL-ZELLEN zählen zu den langsam adaptierenden Drucksensoren. Sie sind daher in der Lage, die Dauer eines Druckreizes zu detektieren und reagieren auf Stimulationsfrequenzen zwischen 0 und 10Hz. Sie befinden sich, wie in Abbildung 4.14 dargestellt, überwiegend in kleinen Gruppen der untersten Epidermisschicht. Aus der Grafik wird zudem deutlich, dass Merkel-Zellen mehrheitlich in den Finger-



spitzen vorhanden sind. Laut [72] liegen diese jedoch auf Grund der Lenkradgeometrie meist nicht optimal auf, um dem Fahrer Rückmeldung zu bieten. Daher wird dieser Sensortyp nicht in das Empfindungsmodell integriert.

- Ebenfalls langsam adaptierend sind die RUFFINI-KÖRPERCHEN. Anstatt auf Druck reagieren sie auf Scherkräfte zwischen der Hand und dem gegriffenen Gegenstand. Durch die Stimulationsfrequenz von 0 bis 10Hz und das Vorkommen in der Handfläche können diese Sensoren Lenkradmomente empfinden. Die detektierte Scherung ist jedoch stark abhängig von der Haltekraft des Fahrers. Wird das Lenkrad fest umschlossen, treten geringere Scherungen auf als bei lockerem Griff. Durch diese Abhängigkeit vom Fahrertyp und momentaner Haltekraft ist eine allgemeingültige Modellierung kaum möglich. Daher werden diese Rezeptoren gleichfalls nicht modelliert.
- MEISSNER-KÖRPERCHEN adaptieren mittelschnell. Sie sensieren Druckänderungen, die für Fahrdynamikbeurteilungen jedoch irrelevant sind. Durch deren hohe Stimulationsfrequenz zwischen 20 und 50Hz sind sie zudem nicht im relevanten Bereich anzuregen. Daher werden sie im Modell nicht berücksichtigt.
- PACINI-KÖRPERCHEN sind in deutlich tieferen Hautschichten angeordnet. Sie adaptieren sehr schnell und detektieren hochfrequente Anregungen ab 100Hz. Da ausschließlich Vibrationen sensiert werden, entspricht die generierte Empfindung weder dem Lenkradwinkel, noch dem -moment. Daher werden diese Rezeptoren ebenfalls nicht integriert. Für die Auslegung von Fahrerassistenzsystemen, die über Lenkradvibrationen beispielsweise auf das Verlassen der Spur hinweisen, sind Pacini-Körperchen jedoch einzubeziehen.

Die beschriebenen Sensoren sind neben der Handfläche auch in anderen Körperhautpartien angeordnet. Die Stellung von Hand-, Ellenbogen- und Schultergelenken ändert sich bei der Fahrzeugführung. Daraus resultieren ebenfalls Dehnungen und Scherungen der Haut. Dieser Beitrag ist allerdings vernachlässigbar gering. Das führt insgesamt dazu, dass die Rezeptoren der Oberflächensensibilität ausnahmslos nicht in das Empfindungsmodell integriert werden. Auf deren Basis ist kein allgemeingültiger Darstellungsansatz für die Sensierung von Lenkradwinkel und -moment realisierbar.

#### 4.4.3 Tiefensensibilität

Die Tiefensensibilität beinhaltet drei unterschiedliche Sinne. Diese werden nachfolgend beschrieben und hinsichtlich der Modellierungsrelevanz geprüft:

- Der menschliche STELLUNGSSINN ermöglicht die Positionserfassung von Gliedmaßen auch in Dunkelheit. Das visuelle System ist dazu nicht notwendig. Selbst mit geschlossenen Augen können die Fingerspitzen von rechter und linker Hand zusammengeführt werden. Daher wird der Stellungssinn zur Sensierung des Lenkradwinkels ohne Berücksichtigung optischer Sensorik modelliert. Die Gelenkstellung wird durch Muskeldehnungen registriert. Dieser Sinn adaptiert nicht. Auch nach langen Ruhephasen, wie beispielsweise im Schlaf, ist der Mensch sich der Position seiner Extremitäten bewusst. Ausnahmen treten nur dann auf, wenn die Blutzufuhr beeinträchtigt ist.

- Der KRAFTSINN sensiert die zur Bewegung oder Aufrechterhaltung der Gelenkstellung notwendige Kraft. Es ist möglich, Massen, die sich lediglich um 3 bis 10% unterscheiden, durch Anheben nach dem Gewicht zu sortieren. Zudem stellt [3] fest, dass dies durch Drucksensierung mittels Hautmechanosensoren der Oberflächensensibilität deutlich schlechter möglich ist. Die getroffene Annahme, auf diese Sensorgruppe in der Modellierung zu verzichten, wird an dieser Stelle somit zusätzlich gestützt. Im Gegensatz zum Stellungssinn weist der Kraftsinn nach [27] adaptierendes Verhalten auf.
- Richtung und Geschwindigkeit einer Lageänderung werden vom BEWEGUNGSSINN detektiert. Es ist dabei unerheblich, ob die Bewegung aktiv durch die eigene Muskulatur oder passiv durch von außen einwirkende Kräfte ausgelöst wird.

Die beteiligten Rezeptoren sind GELENKREZEPTOREN, MUSKELSPINDELN und GOLGI-SEHNENORGANE. Sie sind nachfolgend beschrieben:

- Über Gelenkrezeptoren ist bisher wenig bekannt. In [3] wird jedoch vermutet, dass dieser Sensortyp hauptsächlich für das Schmerzempfinden verantwortlich ist. Erst bei extremen Winkelstellungen und insbesondere beim Verlassen des physiologischen Arbeitsbereichs des Gelenks werden Aktionspotenziale erzeugt. Daher ist dieser Rezeptor nicht für die angestrebte Modellierung zu berücksichtigen.
- Eine breite Anzahl von Experimenten sichert die Beteiligung der Muskelspindel am Stellungssinn. In Abbildung 4.15 wird deutlich, dass diese aus einer bindegewebsähnlichen Kapsel aufgebaut ist, die von einer gewissen Anzahl an Muskelfasern umschlungen wird. Diese Fasern werden als INTRAFUSAL bezeichnet. EXTRAFUSALE MUSKELFASERN befinden sich außerhalb der Muskelspindel und stellen die eigentliche Arbeitsmuskulatur dar. Für die Funktion der Muskelspindel als Rezeptor des Stellungssinns ist die afferente 1a-Faser entscheidend, die sich mehrmals um das Zentrum der intrafusalen Muskelfasern herumschlingt und somit Dehnungen registriert. Diese Rezeptoren sind zur Modellierung der Lenkradwinkelempfindung zu berücksichtigen.
- In den Sehnen am muskulären Ursprung ist der für den Kraftsinn grundlegende Golgi-Sehnensensor lokalisiert. Analog zu Muskelspindeln besteht er aus einer SEHNENFASZIKEL genannten, bindegewebeartigen Kapsel, die von etwa zehn extrafusalen Muskelfasern umschlungen ist. Die Sensorfunktion wird durch die afferente 1b-Nervenfasern ermöglicht. Diese teilt sich nach Eintritt in die Kapsel in kontinuierlich dünner werdende Äste auf und endet schließlich stark verzweigt in den Sehnenfaszikeln. Bei Muskelkontraktion erhöht sich die Spannung in den Sehnenfasern, wodurch diese dicker werden. In Folge werden die NERVENENDIGUNGEN der 1b-Fasern komprimiert und somit stimuliert. Der adäquate Reiz von Golgi-Sehnenorganen ist also die Spannungsänderung in der Sehne. Sie zeigen jedoch zusätzlich adaptives Verhalten. Deren Übertragungseigenschaften sind bei der Modellierung der Empfindung von Lenkradmomenten einzubeziehen.

Wegen des beschriebenen Aufbaus sind Muskelspindeln und Golgi-Sehnenorgane als Dehnungsrezeptoren zu bezeichnen. Deren Lage relativ zur extrafusalen Muskulatur ist jedoch unterschiedlich. Muskelspindeln (1a) sind parallel, Golgi-Sehnenorgane (1b) in Reihe zur eigentlichen Arbeitsmuskulatur angeordnet. Abbildung 4.15 verdeutlicht die Konsequenzen. Im Fall A ist der Muskel in Ruhelänge. 1a sendet permanente elektrische

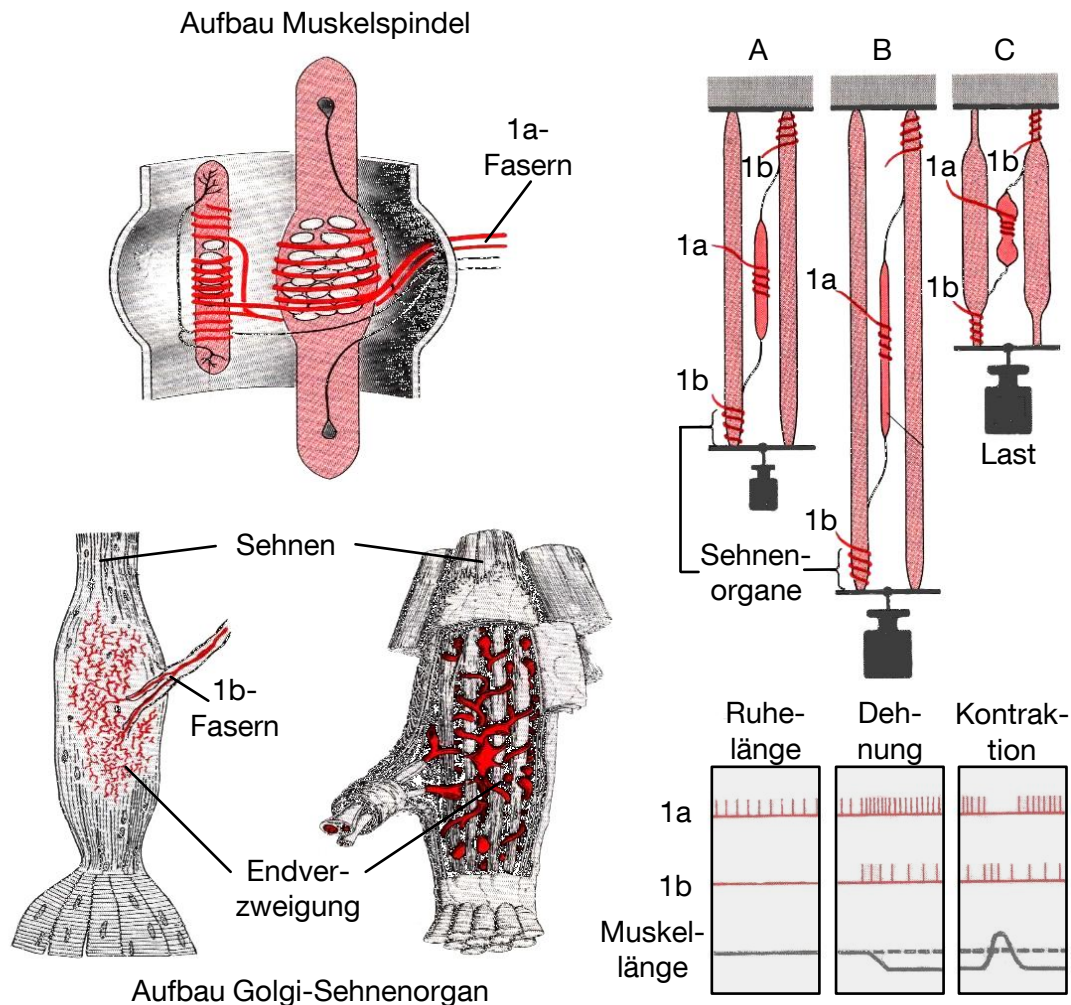


Abbildung 4.15: Aufbau von Muskelspindel und Golgi-Sehnenorgan aus [3]

Impulse, 1b ist passiv. In der Situation B wird der Muskel durch ein Zusatzgewicht gedehnt. Die Entladung von 1a nimmt zu und 1b wird ebenfalls angeregt. Erst zum Zeitpunkt C erfolgt die Muskelkontraktion. Dadurch wird die Muskelspindel kurzzeitig entlastet. Vorübergehend liegt kein 1a-Signal an. Der Golgi-Sehnen sensor hingegen bleibt gedehnt. Dessen Stimulation steigt sogar kurz, da die Beschleunigung der Last zu einer kurzfristig stärkeren Dehnung führt. Vor dem Hintergrund der beschriebenen Entladungsmuster wird deutlich, dass die 1a-Fasern primär Längenänderungen detektieren. Die 1b-Fasern hingegen sensieren die Spannung im Muskel und somit die Kraft. Im folgenden Abschnitt werden diese Aspekte für Lenkradbedienkräfte konkretisiert.

#### 4.4.4 Gesamtmodellarchitektur des Empfindungsmodells

In [7] und [72] wird festgestellt, dass sich die Beanspruchungen des Fahrers beim Lenken vor allem auf die Bewegung von Ober- und Unterarm über eine Winkeländerung im Ellenbogengelenk beschränken. In Abbildung 4.16 ist das antagonistische Zusammenspiel von Bizeps und Trizeps mit den beteiligten Sensoren der Tiefensensibilität schematisch

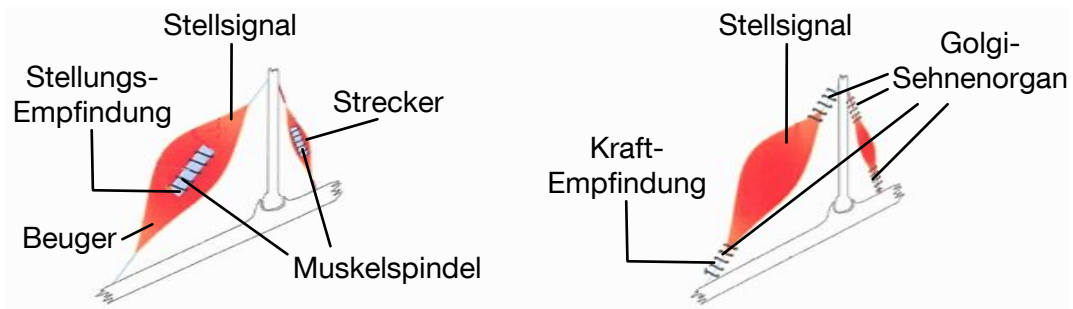


Abbildung 4.16: Schema des antagonistischen Ablaufs der Ellenbogenabknickung aus [72]

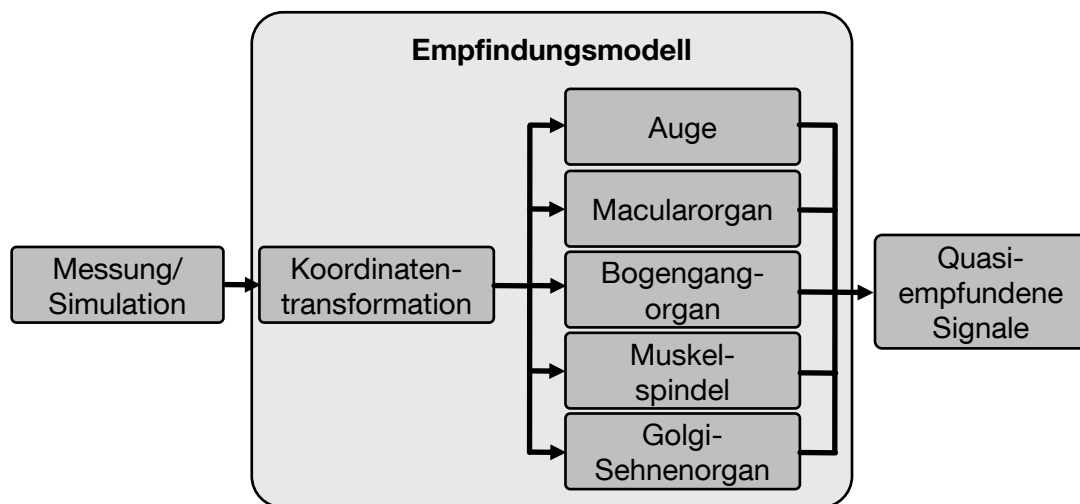


Abbildung 4.17: Gesamtarchitektur des Empfindungsmodells mit Lenkradempfindung

dargestellt. Eine Änderung des Winkels erfolgt über Kontraktion auf der einen Seite, während auf der anderen eine Entspannung stattfindet. Für die Modellierung in dieser Arbeit sind folglich Muskelspindeln und Golgi-Sehnenorgane zu modellieren, um die menschliche Empfindung von Lenkradmoment und -winkel nachzubilden.

Zusammen mit den Erkenntnissen aus Kapitel 4.3 ist an dieser Stelle die Analyse menschlicher Empfindung abgeschlossen. Aus der Diskussion folgt die in Abbildung 4.17 dargestellte Gesamtstruktur des Modellierungskonzepts. Zusätzlich zu den bestehenden Übertragungswegen der Augen und des Gleichgewichtsorgans sind die beiden für Lenkradwinkel und -moment integriert.

## 4.5 Lenkradbetätigungsmodell

Neben der Modellierung menschlicher Empfindung wird ein weiterer konzeptioneller Ansatz entwickelt, dessen Prinzip bereits in [50, 57] dargestellt ist. Kernmotivation ist der Einsatz von Closed-Loop-Messdaten aus Simulationen oder realen Abstimmungsfahrten zur Objektivierung. Bisher ist es lediglich eingeschränkt möglich, Kennwerte aus diesen Versuchen zu bilden, die zur Urteilsanalyse und Prädiktion nutzbar sind. Um die Fahrer-

tätigkeit zu konservieren und der nachträglichen Auswertung zugänglich zu machen, wird in dieser Arbeit ein Lenkradbetätigungsmodell genutzt.

Dieser Abschnitt beschreibt daher zunächst, auf welche Weise die Bediengrößen zu rekonstruieren sind, um die Fahrerbelastung zu ermitteln. Anschließend wird die manöverabhängige Betrachtung vorgestellt. Nach der Konzepterstellung zur Bestimmung der Lenkradbetätigungsmodellparameter findet abschließend die Vorstellung der Fahrdynamikbewertung auf deren Basis statt. Da die bestehende Literatur verwandtes Vorgehen bereits detailliert beschreibt, werden nachfolgend lediglich die wesentlichen Erweiterungen des Funktionsprinzips dargestellt. Für die Grundlagen der Verfahrensweise sei beispielsweise auf [30, 31, 67] verwiesen.

#### 4.5.1 Rekonstruktion relevanter Bediengrößen der Fahrzeugquerdynamik

Wie bereits zuvor ausgeführt und in Abbildung 4.2 illustriert, generiert das Lenkradbetätigungsmodell aus empfundenen Informationen die Bediengrößen Lenkradwinkel und -moment. Die konkrete Auswahl der mathematischen Formulierung setzt voraus, dass zuvor die genutzten Eingänge in das Modell definiert werden.

Aus Abschnitt 4.3 ist ersichtlich, dass primär vestibuläre und optische Daten sowie Informationen des Hand-Arm-Apparats für die Fahrzeugführung zur Verfügung stehen. In diesem Teilkonzept wird das aktive Aufbringen der Bediengrößen zur Bewältigung einer Fahraufgabe fokussiert. Daraus folgt, dass die Empfindung der erforderlichen Stellung und Kraft am Lenkrad in diesem Teil des Konzepts nicht betrachtet wird. Die Rückmeldung durch beispielsweise Änderung des Lenkradmoments wird nicht modelliert.

Nach [31] tragen vestibuläre Informationen nur einen kleinen Teil zum eingestellten Lenkradwinkel bei. Daher werden auch Empfindungen aus dem Gleichgewichtsorgan im entwickelten Lenkradbetätigungsmodell nicht genutzt. Von primärer Bedeutung für das Führen von Fahrzeugen ist nach [72] der optische Informationskanal. Daher nutzt das Modell ausschließlich visuelle Daten, um die Bediengrößen zu generieren. Zudem ist eine mathematische Beschreibungsform zu wählen, die mit üblicher Fahrdynamikmesstechnik realisierbar ist (siehe Abschnitt 4.2). Dies folgt aus Anforderung A10, die eine möglichst harmonische Integration in bestehende Prozesse bedingt. Darum werden Informationen, die im Realversuch beispielsweise aus einer Kameraplattform gewonnen werden, nicht berücksichtigt. Die konkrete Formulierung des Modells findet in Kapitel 5.3 statt. An dieser Stelle ist jedoch konzeptionell eine Modellstruktur festgelegt, die Lenkradwinkel und -moment aus optischen Informationen generiert. Offen ist die Fragestellung, wie diese messtechnisch und in Simulation gleichwertig zu erfassen sind.

Eine weitere Herausforderung für den Ansatz resultiert aus der Eigenschaft von Fahrzeugen, auf Lenkradeingaben mit einem gewissen Maß an Trägheit zu reagieren. Je nach Anregungsfrequenz und Fahrgeschwindigkeit ist dieses Phänomen unterschiedlich stark ausgeprägt. Fahrer kompensieren dies, indem bereits kurz vor Beginn der Kurve mit dem Lenkvorgang begonnen wird. Ein Modell kann dieses Verhalten durch Prädiktion der Fahrspur oder des Sollkurses nachbilden. In der Literatur werden unterschiedliche Ansätze genannt, wie diese Voraussicht erfolgt. In [56] wird beispielsweise von konstanten Vorausschautfernen berichtet. Die Erkenntnisse in [3] begründen jedoch, dass

bei der Fahrzeugführung nicht um eine gewisse Entfernung prädiziert wird, sondern um eine bestimmte Zeit. Daraus resultieren geschwindigkeitsabhängige Vorausschaudistanzen. Diese Eigenschaft menschlicher Fahrweise ist in dem Lenkradbetätigungsmodell zu realisieren.

Das Modell dient dazu, die aufgebrachten Bediengrößen in realen und simulativen Versuchen zu rekonstruieren. Durch ein geeignetes Verfahren werden die Parameter so bestimmt, dass die Fahrertätigkeit und die des Modells für einen Abschnitt der Messung oder Simulation bestmöglich übereinstimmen. Dazu ist der Bereich, in dem die Deckung erzielt werden soll, passend zu ermitteln.

### 4.5.2 Manöverabhängige Betrachtung der Fahrerleistung

Kennzeichnend für das in dieser Arbeit aufgebaute Lenkradbetätigungsmodell ist die Annahme, dass kein Parametersatz existiert, der für alle Fahrsituationen und Fahrzeuge identisch ist. Die Adaption an das Fahrzeug ist expliziter Gegenstand der Bewertungsmethode. Um die Fahrsituationsanpassung der Fahrstrategie davon zu trennen, ist es notwendig, Abschnitte einer Fahrt zu klassifizieren und innerhalb vergleichbarer Gruppen zu analysieren.

Kurvenfahrten sind der wesentliche Untersuchungsgegenstand dieses Teilkonzepts. Geradeauslaufverhalten wird nicht untersucht. Die in diesem Bereich offenen Fragestellungen des Lenkgefühls werden mit dem Empfindungsmodell behandelt. Daher fokussiert die Methode auf Basis des Lenkradbetätigungsmodells primär Anlenk-, Einlenk- und Rücklenkvorgänge sowie die Kurvenfahrt insgesamt. Die durchgeführten Betrachtungen sind auf Lastwechselverhalten und Bremsen in der Kurve erweiterbar, sind jedoch nicht Bestandteil der Arbeit.

Daher ist ein Verfahren zu realisieren, das automatisiert vergleichbare Kurvenausschnitte aus beliebigen Messfahrten ermittelt. Diese Segmente werden anschließend dem Parametrierungsprozess übergeben. In dieser Phase wird das Modell derart bedatet, dass die Fahrereingaben bestmöglich mit den Ausgängen des Lenkradbetätigungsmodells übereinstimmen.

### 4.5.3 Bestimmung der Fahrermodellparameter

Die Adaption der Fahrstrategie an Eigenschaften des Fahrzeugs kann von einem Modell entweder durch eine variable mathematische Struktur oder durch konstanten Aufbau bei veränderlichen Parametern dargestellt werden. In den Untersuchungen dieser Forschungsarbeit stellt sich die zweite Variante als zuverlässiger heraus. Deswegen wird in Abschnitt 5.3 ein fester Modellaufbau definiert. Die Modellstruktur ist generalisiert auszuführen, sodass die Spreizung der Eigenschaften üblicher Fahrzeuge durch entsprechende Bedatung abdeckbar ist. Folglich prägen unterschiedliche Fahreranstrengungen die zugrundeliegenden Parameter. Die Ermittlung erfolgt durch ein geeignetes Optimierungsverfahren.

Es existieren diverse Methoden zur automatisierten und möglichst optimalen Bestimmung von Modellparametern. Die Problemformulierung bildet jeweils den Ausgangspunkt. Im vorliegenden Fall ist es die Aufgabe, die Lenkradbetätigungsparameter so zu wählen, dass eine hohe Übereinstimmung zwischen Modell und realem Fahrer erreicht wird. Die Aufgabe der Fahrzeugführung kann in der Simulation durch ein adaptives Fahrermodell, beispielsweise nach [20], erfüllt werden. In einem iterativen Vorgehen wird, ausgehend von einem Startparametersatz, eine systematische Variation durchgeführt, bis die Übereinstimmung möglichst ideal ist. Details zur Identifikation von Übertragungsgliedern können beispielsweise in [37] nachgelesen werden.

Bestehende Optimierungsverfahren eignen sich prinzipiell für die Aufgabenstellung dieses Teilkonzepts. Allerdings weisen insbesondere gradientenbasierte Verfahren (siehe [52]) den Nachteil auf, überwiegend lokale Optima zu ermitteln. Diese können mit einem globalen zusammenfallen, häufig ist dies jedoch nicht der Fall. Eine Verbesserung stellen genetische Optimierer dar. Diese weisen durch ein an der Evolution orientiertes Berechnungsschema eine deutlich höhere Verlässlichkeit bei der Bestimmung eines idealen Parametersatzes auf. Daher wird ein genetisches Optimierungsverfahren genutzt. Die Implementierung einer eigenen Identifikationsroutine wird auf Grund der vorhandenen und leistungsfähigen Lösungen ausgeschlossen. Statt dessen wird auf bestehende, bereits realisierte Algorithmen zurückgegriffen.

### 4.5.4 Fahrdynamikbewertung auf Basis des Lenkradbetätigungsmodells

Die für einzelne Fahrsituationen bestimmten Parameter des Lenkradbetätigungsmodells dienen anschließend zur Beurteilung der Fahrdynamik. Dazu werden geeignete Versuchsfahrten im Realen oder Virtuellen durchgeführt. Beispielhaft kann dies eine Kurvenfolge auf der Nordschleife des Nürburgrings sein. Für die Betrachtung des Lenkaufwands und der Agilität ist beispielsweise die Hatzenbachschikane repräsentativ. Aus einem derartigen Streckenabschnitt können bisher nur eingeschränkt Kennwerte zur Beurteilung des Fahrverhaltens abgeleitet werden.

Das hier entwickelte Verfahren nutzt Messdaten, um Parameter des Lenkradbetätigungsmodells zu bestimmen. Damit kann die Fahrdynamik objektiv beurteilt werden, obwohl Closed-Loop-Daten die Basis bilden. Dazu ist jedoch ein Zwischenschritt notwendig, der in Kapitel 5 durchgeführt wird: Mittels umfangreicher Simulationsanalysen werden Zusammenhänge zwischen den Modellparametern und bekannten Objektivkennwerten, wie beispielsweise dem Eigenlenkgradienten, ermittelt. Dadurch wird eine anschauliche Interpretation der Parameter ermöglicht. Während Abstimmungsfahrten kann der Beurteilungsprozess von Versuchingenieuren auf diese Weise durch den Einsatz von Messtechnik objektiv nachvollzogen und unterstützt werden. Die so gewonnenen Erkenntnisse sind auch in der Simulation einsetzbar.

Abbildung 4.18 fasst das Objektivierungskonzept mit dem Lenkradbetätigungsmodell zusammen. Optische Informationen aus Closed-Loop-Messdaten der Realfahrt oder Simulation bilden die Eingangsinformationen des Fahrermodells. Für alle von einem Manövererkenner ausgewählten Abschnitte findet über ein genetisches Optimierungsverfahren die Bestimmung der Modellparameter statt. Zusammen mit den in Abschnitt 6.2 ermittelten Regressionsergebnissen erfolgt mit diesen Kennwerten die Berechnung von Subjekturteilen für Lenk- und Kurvenverhalten.

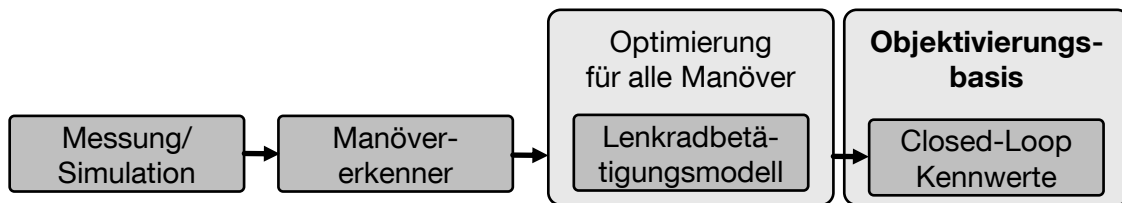


Abbildung 4.18: Ablauf der Fahrdynamikbeurteilung mit dem Lenkradbetätigungsmodell

## 4.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird ein fahrerbasiertes Objektivierungskonzept entwickelt. Es besteht aus zwei Teilaspekten: Einerseits wird übliches, kennwertbasiertes Objektivierungsvorgehen mit einem Empfindungsmodell kombiniert. Andererseits erfolgt in Abstimmungsfahrten mit Hilfe eines Lenkradbetätigungsmodells die Ableitung von Parametern, welche die Bewertung der Fahrdynamik mit Closed-Loop-Messdaten aus Realfahrt und Simulation ermöglichen.

Die menschliche Empfindung ist ein grundlegender Bestandteil des Beurteilungsprozesses von Abstimmungsingenieuren. Die Fahraufgabe, die Reaktionsgrößen des Fahrzeugs sowie Lenkradwinkel und -moment werden während der Fahrt vom Fahrer sensiert. Erst darauf aufbauend erfolgt die Bewertung der Fahrdynamik. Um dies nachzubilden, wird ein Empfindungsmodell entwickelt. Es besteht aus einer mathematischen Beschreibung der Augen, des Gleichgewichtsorgans und der Extremitäten. Gemessene Signale werden von dem Modell analog zur menschlichen Verarbeitung von Umwelteinflüssen umgewandelt. Im Anschluss ist es möglich, mit diesen quasi-empfundenen Größen Auswertungen durchzuführen. Anstatt der in der Literatur angegebenen Beschreibungsgrößen auf Basis von Messdaten werden die äquivalenten Kennwerte aus den quasi-empfundenen Signalen auf Zusammenhänge zu Subjektivurteilen untersucht. Es ist zu erwarten, dass eine Steigerung der Kausalität gegenüber bisherigen Untersuchungen erreicht werden kann, da durch die Nachbildung menschlicher Empfindung ein wesentlicher Bestandteil des Fahrdynamikbeurteilungsprozesses in die Betrachtung integriert ist.

Zudem besteht der Bedarf an einem Verfahren, das zur Objektivierung nutzbare Kennwerte aus Closed-Loop-Messungen in Realfahrt und Simulation berechnet. Der dazu konzipierte Prozess der Lenkradbetätigungsmodellparametrierung ermöglicht fahrsituationsabhängige Analysen der Fahrdynamik. Es ist unerheblich, ob die Ausgangsdaten von Abstimmungsfahrten auf Testgeländen oder aus Simulationen mit einem adaptiven Fahrermodell stammen. Die für einzelne Abschnitte von Messfahrten bestimmten Parameter werden im weiteren Verlauf der Arbeit zur Ermittlung von Objektivierungszusammenhängen genutzt.



## 5 Realisierung des fahrerbasierten Objektivierungswerkzeugs

Dieses Kapitel beschreibt die prototypische Realisierung des fahrerbasierten Konzepts zur Fahrverhaltensbeurteilung. Dazu werden die konzeptionellen Randbedingungen aufgegriffen und in ein Objektivierungswerkzeug integriert. Als Programmierumgebung wird MATLAB/Simulink<sup>21</sup> eingesetzt. Im ersten Schritt findet die Festlegung der Prozessschnittstellen statt. Nach der Umsetzung der Teilaspekte des Empfindungs- und des Lenkradbetätigungsmodells erfolgt abschließend die Auswahl der in dieser Arbeit betrachteten Versuchsdurchführungsvarianten. Die Umsetzung des fahrerbasierten Objektivierungswerkzeugs, dessen Bestandteile im letzten Unterkapitel zusammengefasst sind, wird im weiteren Verlauf als HANDLING MONITOR bezeichnet. Abbildung 5.1 illustriert diesen Aufbau schematisch.

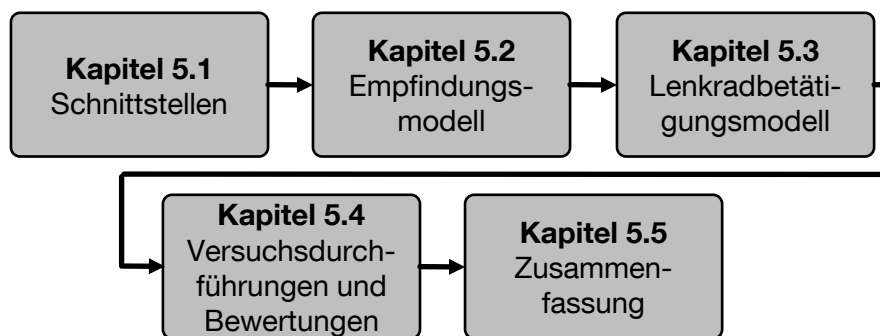


Abbildung 5.1: Aufbau Kapitel 5

### 5.1 Prozessschnittstellen

Ein wesentliches Ziel bei der Entwicklung des fahrerbasierten Objektivierungswerkzeugs ist die einfache Integration in bestehende Prozesse des OEM. Dies ist eine Grundvoraussetzung für die durchgängige Einsetzbarkeit des Handling Monitors (A10). Dazu ist es erforderlich, die Ein- und Ausgangsgrößen explizit zu definieren. Zudem werden der Einlernprozess und das Vorgehen zur Fahrdynamikbewertung spezifiziert.

#### 5.1.1 Eingangsgrößen

Um die Einsetzbarkeit des Handling Monitors im gesamten PEP zu ermöglichen, erfolgt die Urteilsberechnung ausschließlich mit Bewegungsgrößen, die mit üblicher Fahrdyna-

<sup>21</sup> MATLAB ist eine Programmierumgebung und -sprache der Firma The MathWorks, Inc. Die Erweiterung Simulink ermöglicht die grafische Erstellung von beispielsweise Differentialgleichungen.

mikrostechnik erfassbar sind. In der Simulation sind diese ohnehin zugänglich. Tabelle 5.1 beinhaltet eine Auflistung der erforderlichen Daten<sup>22</sup>.

Größe	Kurzzeichen
Zeit	$t$
Querschleunigung	$a_y$
Längsbeschleunigung	$a_x$
Längsgeschwindigkeit	$v_x$
GPS-Positionsdaten	$x_{FZG}, y_{FZG}$
Gierwinkelbeschleunigung	$\ddot{\psi}$
Nickwinkelbeschleunigung	$\ddot{\varphi}$
Wankwinkelbeschleunigung	$\ddot{\theta}$
Gierwinkelgeschwindigkeit*	$\dot{\psi}$
Nickwinkelgeschwindigkeit*	$\dot{\varphi}$
Wankwinkelgeschwindigkeit*	$\dot{\theta}$
Gierwinkel	$\psi$
Schwimmwinkel*	$\beta$
Lenkradwinkel	$\delta_h$
Lenkradmoment	$M_h$
Relativposition des Fahrers	$r_{x1}, r_{y1}, r_{z1}$

Tabelle 5.1: Eingangsgrößen des Handling Monitors

### 5.1.2 Ausgangsgrößen

Endergebnis der Nutzung des Handling Monitors ist die errechnete subjektive Beurteilung der Querdynamik eines Fahrzeugs. Die übliche Darstellung für diese Bewertungen ist ein Netzdiagramm. Abbildung 5.2 illustriert ein Beispiel. Jedes betrachtete Kriterium wird durch einen vom Zentrum radial verlaufenden Strahl repräsentiert. Je weiter eine Einzelwertung von der Mitte entfernt ist, desto besser ist das Urteil in dieser Teildisziplin.

Das fahrerbasierte Objektivierungswerkzeug nutzt die in der Industrie etablierte Skala und den Beurteilungskatalog nach [29]. Dementsprechend werden Noten von 1 bis 10 vergeben. Die betrachteten Wertungskategorien werden in Abschnitt 5.4.2 aufgelistet.

### 5.1.3 Trainingsprozess

Der prototypisch durchgeführte Einlernprozess des Handling Monitors beinhaltet standardisierte Fahrmanöver. Die Durchführung ist teilweise Bestandteil dieser Arbeit, zusätzlich sind die in [23] erhobenen Daten integriert. Des Weiteren werden Closed-Loop-Versuchsfahrten genutzt. Diese erfolgen auf öffentlichen Straßen, auf Prüfgeländen und auf der Nordschleife des Nürburgrings.

<sup>22</sup> Die mit \* markierten Größen sind nicht zwingend erforderlich, sind jedoch zur Interpretation hilfreich.

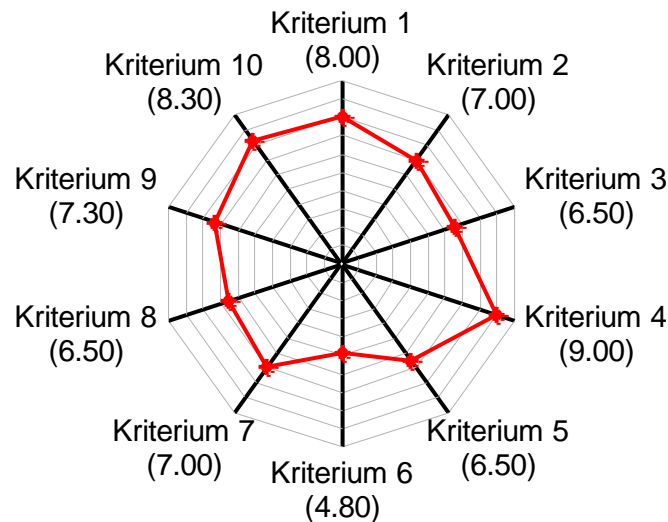


Abbildung 5.2: Beispiel eines Netzdiagramms zur Fahrdynamikbeurteilung

Insgesamt werden sieben Serienfahrzeuge der Mittelklasse bewertet. Zudem ist das in [40] erstmals erprobte Experimentalfahrzeug im Rahmen der Arbeit deutlich weiterentwickelt in die Betrachtung integriert. Die genutzten Fahrzeuge sind teilweise mit aktiven Systemen wie Überlagerungslenkung an der Vorderachse und geregelter Wankstabilisierung ausgestattet. In Kombination mit einer umfangreichen Variation der passiven Fahrwerkeigenschaften wird auf diese Weise eine ausreichende Spreizung des untersuchten Fahrverhaltens erreicht.

Die Beurteilungen der in [23] durchgeführten Versuche stammen von erfahrenen Versuchsfahrern. Es werden nur diejenigen Bewerter betrachtet, die an allen Fahrterminen beteiligt sind. Die selbst gemessenen Tests werden ebenfalls von einem professionellen Abstimmungsingenieur bewertet.

Auf Basis dieser Messdaten und Urteile werden die in 6.1 und 6.2 vorgestellten Regressionsergebnisse mit dem fahrerbasierten Objektivierungsverfahren ermittelt. Fahrzeuge der Mittelklasse können anschließend vom Handling Monitor automatisiert bewertet werden.

#### 5.1.4 Bewertungsprozess

Der in Abbildung 4.4 dargestellte Bewertungsprozess wird vollständig vom Handling Monitor unterstützt. Ausgehend von Mess- oder Simulationsfahrten erfolgt die Beurteilung automatisiert. Es ist lediglich erforderlich, die in den Abschnitten 5.1.1 und 5.4 angegebenen Daten zu ermitteln. Der Anforderung A9 entsprechend, ist eine modulare Bewertung durchführbar. Die vollständige Analyse ist allerdings nur möglich, wenn alle erforderlichen Messungen oder Simulationen vorliegen.

## 5.2 Empfindungsmodell

Eine Hauptmotivation des Teilkonzepts auf Basis des Empfindungsmodells besteht darin, bekannte und zuverlässige Testverfahren weiter zu verwenden. Dadurch kann die Erfahrung in Durchführung und Auswertung der teilweise genormten Versuche genutzt werden. Bei der Kennwertberechnung werden allerdings Empfindungseffekte durch ein Modell menschlicher Sensorik berücksichtigt und somit ein wesentlicher Teil des Beurteilungsprozesses nachgebildet. Die mathematische Formulierung wird nachfolgend hergeleitet.

### 5.2.1 Gesamtstruktur des Empfindungsmodells

Im Handling Monitor ist die in Kapitel 4.4.4 konzipierte Struktur des Empfindungsmodells integriert. Die erarbeitete Architektur wird in den folgenden Abschnitten konkretisiert, indem die einzelnen Sinnesorgane durch Übertragungsfunktionen abgebildet werden. Diese sind für die Bewegungstransformation ( $G_{Transformation}(s)$ ), die Augen ( $G_{Auge}(s)$ ), Gleichgewichtsorgan ( $G_{Macular}(s)$ ) und  $G_{Bogengang}(s)$ ) und die Extremitäten ( $G_{Muskelspindel}(s)$ ) und  $G_{Golgi-Sehnenorgan}(s)$ ) zu ermitteln. Der realisierte Aufbau ist in Abbildung 5.3 dargestellt.

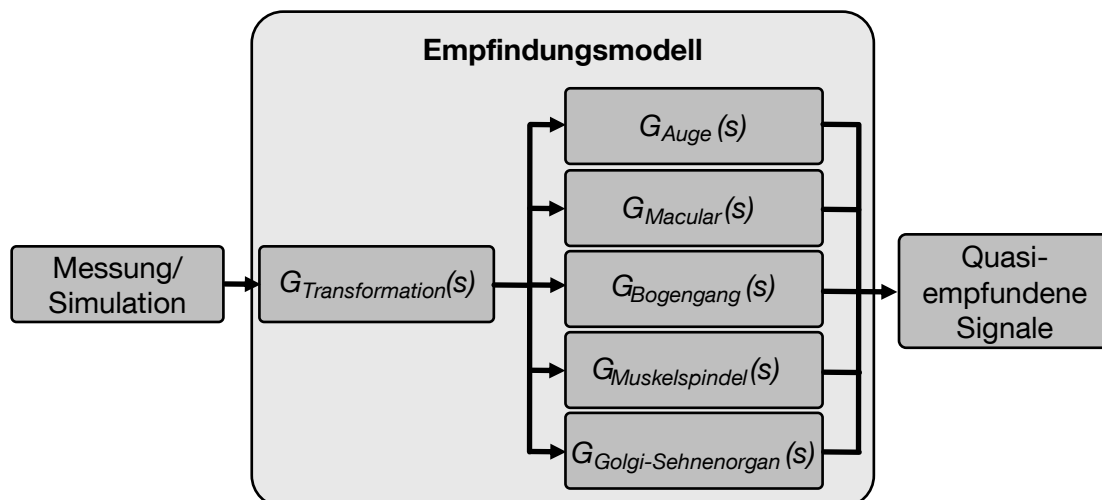


Abbildung 5.3: Realisierung des Empfindungsmodells

### 5.2.2 Bewegungstransformation in Kopfkoordinatensystem

Die Transformation der Bewegungsgrößen vom Fahrzeugschwerpunkt in den Fahrerkopf kann zunächst über die Entfernung beider Schwerpunkte berechnet werden. Zusätzlich ist die Dynamik der Kopfbewegung zu berücksichtigen.

### Transformation vom Fahrzeugschwerpunkt in den Fahrerkopf

Die in dieser Arbeit verwendeten Fahrdynamikmessungen und -simulationen nutzen das Koordinatensystem nach DIN 70000. Als Eingangsgrößen für das Gleichgewichtsorgan sind die Daten jedoch im Kopfkoordinatensystem erforderlich. Abbildung 5.4 stellt die geometrische Relation zwischen beiden exemplarisch für die y-z-Ebene dar. Der Fahrer sitzt um jeweils einen Betrag  $r_{x1}$ ,  $r_{y1}$  und  $r_{z1}$  vom Schwerpunkt  $S$  entfernt. Der Hals als Abnickpunkt  $H$  zwischen fahrzeugfestem Oberkörper und Kopf befindet sich von dieser Position um den Betrag  $r_{x',Kopf}$  in Richtung der Fahrzeughochachse versetzt.

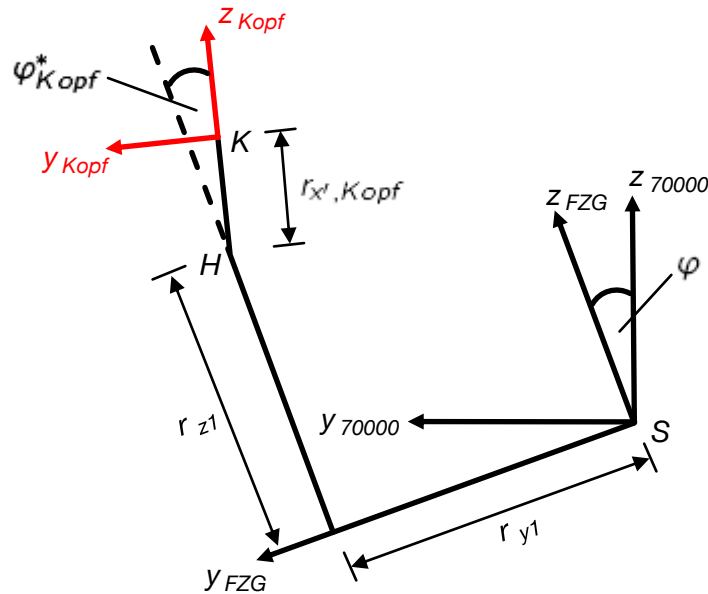


Abbildung 5.4: Fahrerkopf- und Fahrzeugkoordinatensystem

Die Umrechnung der Bewegungsgrößen erfolgt über Gleichung 5.1. Dazu ist der Relativpositionsvektor vom Fahrzeugschwerpunkt zum Kopfschwerpunkt  $\vec{r}_{K,Kopf}$  erforderlich. Dessen Berechnung ist in Formel 5.2 angegeben.

$$\begin{pmatrix} a_{x,Kopf} \\ a_{y,Kopf} \\ a_{z,Kopf} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \ddot{\varphi} \\ \ddot{\vartheta} \\ \ddot{\psi} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} r_{x',Kopf} \\ r_{y',Kopf} \\ r_{z',Kopf} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\vartheta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \times \left[ \begin{pmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\vartheta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} r_{x',Kopf} \\ r_{y',Kopf} \\ r_{z',Kopf} \end{pmatrix} \right] \quad (5.1)$$

$$\vec{r}_{K,Kopf} = \begin{pmatrix} r_{x',Kopf} \\ r_{y',Kopf} \\ r_{z',Kopf} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{x1} \\ r_{y1} \\ r_{z1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\vartheta_{Kopf}^* \cdot r_1 \cdot \cos\left(\frac{1}{2} \cdot \vartheta_{Kopf}^*\right) \\ \varphi_{Kopf}^* \cdot r_1 \cdot \cos\left(\frac{1}{2} \cdot \varphi_{Kopf}^*\right) \\ \Delta r_{z,W} + \Delta r_{z,N} \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

Auf diese Weise kann von inertialen Messdaten in Bewegungsgrößen am Kopf umgerechnet werden. Um das Gleichgewichtsorgan in den entsprechenden Richtungen anzuregen, sind Koordinatentransformationen notwendig. Die dazu erforderlichen Umrechnungsmatrizen sind Gegenstand allgemeiner Kinematikzusammenhänge und werden an dieser Stelle nicht ausgeführt. Die Umformungen sind jedoch beispielsweise in [61] zu finden. Die Veränderung der Relativposition in vertikaler Richtung durch Nicken und Wanken ( $\Delta r_{z,W}$  und  $\Delta r_{z,N}$ ) ist verglichen mit den Verschiebungen in x- sowie y-Richtung zu vernachlässigen. Die Gleichungen beinhalten jedoch die Abknickwinkel  $\varphi_{Kopf}^*$  und  $\vartheta_{Kopf}^*$  im Hals. Deren Dynamik wird nachfolgend modelliert. Somit ist die Umwandlung  $G_{Transformation}(s)$  berechenbar.

### Dynamik der Kopfbewegung

Gleichung 5.1 verdeutlicht, dass zur Umrechnung in das Koordinatensystem des Kopfs dessen Bewegung während der Kurvenfahrt zu berücksichtigen ist. Die Annahme aus [58], dass menschliches Kopfrückstellverhalten durch ein Übertragungsglied zweiter Ordnung für den aperiodischen Grenzfall modelliert werden kann, wird durch Fahrversuche bestätigt. Zur Messung dient eine Infrarotkamera, die fahrzeugfest montiert ist. Mit einer Brille, die mit Hochleistungs-LEDs versehen ist, kann die Relativbewegung zwischen Fahrerkopf und Fahrzeug ermittelt werden. Gleichung 5.3 beschreibt die verwendete Differentialgleichung zweiter Ordnung eines Systems aus Feder, Masse und Dämpfer. In 5.4 erfolgt die Umformung in die Übertragungsfunktion  $G_{Kopfdynamik}(s)$ .

$$T^2 \cdot \ddot{y} + 2 \cdot d \cdot T \cdot \dot{y} + y = k \cdot u \quad (5.3)$$

$$G_{Kopfdynamik}(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{k}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot d \cdot T \cdot s + 1} \quad (5.4)$$

mit Verstärkung  $k$ , Zeitkonstante  $T$  und Dämpfung  $d$

Die modellierte Kopfbewegung beschreibt den Relativwinkel  $\varphi_{Kopf}^*$  zwischen Fahrerkopf und dem Fahrzeugaufbau. Die Abknickung findet im Hals statt. Daraus folgt die in den Gleichungen 5.5 und 5.6 dargestellte Momentenbilanz um den Drehpunkt.

$$c \cdot (\varphi - \varphi_{Kopf}^*) - D \cdot \dot{\varphi}_{Kopf}^* = J_{Kopf} \cdot \ddot{\varphi}_{Kopf}^* \quad (5.5)$$

$$\Rightarrow \frac{J_{Kopf}}{c} \cdot \ddot{\varphi}_{Kopf}^* + \frac{D}{c} \cdot \dot{\varphi}_{Kopf}^* + \varphi_{Kopf} = \varphi \quad (5.6)$$

mit Kopfträgheitsmoment  $J_{Kopf}$ , Drehfedersteifigkeit  $c$  und Dämpfung  $D$

Unter der vereinfachenden Annahme eines kugelförmigen Kopfs kann mit dem Steiner'schen Satz das Trägheitsmoment um den Abknickpunkt wie in Gleichung 5.7 angenähert werden. Tabelle 5.2 fasst die genutzten Parameter zusammen. Diese werden aus DIN 33402-2 entnommen und mit Probandenmessungen gestützt.

$$J_{Kopf} = \frac{2}{5} \cdot m_k \cdot r_k^2 + m_k \cdot r_1^2 \quad (5.7)$$

Parameter	Formelzeichen	Wert
Kopfmasse	$m_k$	5kg
Kopfradius	$r_k$	0,085m
Abstand Kopfschwerpunkt zu Abknickpunkt	$r_1$	0,2m

Tabelle 5.2: Kopfträgheitsmomentparameter bei Wank- und Nickbewegungen

Für die Dämpfungskonstante  $d$  gilt nach [38]  $d = 1$ . Mit der Angabe  $\omega_0 = 5\text{Hz}$  aus [17] können die Parameter der Übertragungsfunktion  $G_{Kopf\,dynamik}(s)$  über Koeffizientenvergleiche berechnet werden. Die erforderlichen Umformungen beschreiben die Gleichungen 5.8 und 5.9. Der Kopfstellungswinkel  $\varphi_{Kopf}$  im horizontalen System kann mit der Beziehung in Gleichung 5.10 aus dem Fahrzeugwankwinkel  $\varphi$  und dem Relativwinkel  $\varphi_{Kopf}^*$  ermittelt werden. Das Vorgehen für den Kopfnickwinkel  $\vartheta_{Kopf}^*$  ist analog.

$$T^2 = \frac{1}{\omega_0^2} = \frac{J_{Kopf}}{c} \quad (5.8)$$

$$D = 2 \cdot T \cdot c \quad (5.9)$$

$$\varphi_{Kopf} = \varphi - \varphi_{Kopf}^* \quad (5.10)$$

### 5.2.3 Modellierung fahrdynamisch relevanter menschlicher Sinnesorgane

Wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, ist die Kopfstellung bei der Umrechnung in die Sinnesorgankoordinatensysteme zu berücksichtigen. Darauf aufbauend werden die Übertragungseigenschaften der Augen, des Gleichgewichtsorgans und der Extremitäten modelliert.

#### Auge

Die optische Empfindung durch die Augen ist sehr leistungsfähig. Nach [70] kann die Umwelt so genau empfunden werden, dass das resultierende Reizmuster exakt der Realität entspricht. Dies setzt lediglich ausreichende Informationen zur Sensierung voraus. Dies resultiert in einer einfachen Integrationsmöglichkeit optischer Größen (siehe Tabelle 4.2) in das Empfindungsmodell. Daten wie die momentane oder prädierte Kurskrümmung werden ebenso wie der aktuelle Schwimmwinkel exakt der Messung entsprechend empfunden. Detailliertere Beschreibungen optischer Signalverarbeitung finden sich beispielsweise in [72].

Einzig zu modellierende Eigenschaften optischer Wahrnehmung sind Zeitverzögerungen durch die Empfindung im Auge. In [70] werden sowohl rotatorische als auch translatorische Informationen gleichermaßen verzögert sensiert. Im zentralen Sichtfeld, das für Fahrverhaltensbeurteilungen relevanter ist, wird die Verzögerungszeit  $\tau_{Auge}$  mit 90ms angegeben. Der dezentrale Bereich weist eine Verzögerung von 150ms auf. Das Modell nutzt zunächst Informationen aus dem zentralen Sichtfeld. Die resultierende Übertragungsfunktion  $G_{Auge}(s)$  ist in Gleichung 5.11 angegeben. Die flexible Implementierung ermöglicht jedoch ebenfalls die Integration von Größen des äußeren Sichtareals.

$$G_{Auge}(s) = e^{\tau_{Auge} \cdot t} \quad (5.11)$$

### Gleichgewichtssinn - Macularorgan

Das Macularorgan sensiert translatorische Beschleunigungen. Durch die tropfenförmige Geometrie ist das Organ nach [26] durch die Finite Element Methode (FEM) abzuschätzen. Die Navier'sche Bewegungsgleichung 5.12 des kontinuierlichen, isotropen und elastischen Materials ist auf diese Weise lösbar. Diese Modellierung ist jedoch sehr komplex und deren Berechnung aufwändig. In Kombination mit noch nicht vollständig bekannten Materialkennwerten eignet sich dieser Ansatz momentan nicht für die Objektivierung subjektiver Fahreindrücke. Die verwendeten Kurzzeichen sind Tabelle 5.3 zu entnehmen.

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \rho \cdot B_i + (\lambda + \mu) \cdot \frac{\partial e}{\partial x_i} + \mu \cdot \sum_j \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_j^2} \quad (5.12)$$

Parameter	Formelzeichen
Dichte	$\rho$
Verschiebung in i-Richtung	$u_i$
Körperkraft pro Volumeneinheit	$B_i$
Lamé Konstanten	$\lambda, \mu$
Divergenz des Verschiebungsvektors $\vec{u}$	$e = \text{div}(\vec{u})$

Tabelle 5.3: Parameter der Navier'schen Bewegungsgleichung

In [10] wird auf Basis der physikalischen Effekte Trägheit, Viskosität und Elastizität eine Kräftebilanz aufgestellt. Daraus resultiert die Differentialgleichung 5.13. Deren Parameter sind in Tabelle 5.4 erläutert. Durch Laplace Transformation kann die Übertragungsfunktion  $G_{m1}(s)$  mit der Eingangsgröße Linearbeschleunigung  $a(t)$  und der Membranverschiebung  $x(t)$  als Ausgang wie in Gleichung 5.14 abgeleitet werden.

$$m_O \cdot \ddot{x}(t) + B \cdot \dot{x}(t) + K \cdot x(t) = a(t) \cdot m_O \cdot \left[1 - \frac{\rho E}{\rho O}\right] \quad (5.13)$$

$$G_{m1} = \frac{x(s)}{a(s)} = \frac{\left[1 - \frac{\rho E}{\rho O}\right]}{s^2 + \frac{1}{T_2} \cdot s + \frac{1}{T_1 \cdot T_2}} \quad (5.14)$$



Parameter	Formelzeichen
Otokonienverschiebung	$x(t)$
Scherkomponente der Linearbeschleunigung	$a(t)$
Otokonienmasse	$m_O$
Viskositätskoeffizient	$B$
Elastizitätskoeffizient	$K$
Spezifische Otokoniendichte	$\rho_O$
Spezifische Endolymphdichte	$\rho_E$

Tabelle 5.4: Parameter des Momentengleichgewichts am Macularorgan

$$\text{mit } T_1 = \frac{B}{K} = 0,1, T_1 = \frac{m_0}{B} = 10^{-4}$$

Die Übertragungsfunktion ist bis 2Hz gültig. Auf höhere Frequenzen spricht das Macularorgan nicht an. Dies wird auch in [71] bestätigt. Dort wird die Dynamik mit der Gleichung 5.17 beschrieben. Sie besteht aus einem Adaptionsterm  $A_m(s)$  in Gleichung 5.15 und einem schwingungsfähigen Teil  $H(s)$  in Formel 5.16. Die Parameter sind in Tabelle 5.5 aufgelistet. Es ist zwischen regulären und irregulären Otolithen zu unterscheiden. Durch den unnatürlichen Exponenten  $K_V$  ist es jedoch nur eingeschränkt möglich, die Dynamik in der Simulation abzubilden. Wegen der getrennten Angabe des Adaptionsanteils ist dieser Teilaspekt jedoch modellierbar.

$$A_m(s) = \frac{K_A \cdot T_A \cdot s + 1}{T_A \cdot s + 1} \quad (5.15)$$

$$H(s) = \frac{K \cdot (T_L \cdot s)^{K_V} + 1}{1 + T_I \cdot s} \quad (5.16)$$

$$G_{m2}(s) = A_m(s) \cdot H(s) = \frac{K_A \cdot T_A \cdot s + 1}{T_A \cdot s + 1} \cdot \frac{K \cdot (T_L \cdot s)^{K_V} + 1}{T_I \cdot s + 1} \quad (5.17)$$

Parameter	Formelzeichen	Wert regulär	Wert irregulär
Adaptionszeitkonstante	$T_A$	66s	87,5s
Adaptionsverstärkung	$K_A$	1,12	1,93
Hochfrequenzkonstante	$T_L$	0,3s	0,3s
Integrationskonstante	$T_I$	0,12s	0,12s
Verstärkung	$K$	1	1
Exponent	$K_V$	0,19	0,43

Tabelle 5.5: Parameter der zweistufigen Macularmodellierung

Einen einfacheren Ansatz mit identischen Parametern nutzt [70], um die Dynamik des Macularorgans zu beschreiben. Deren Formulierung in Gleichung 5.18 beinhaltet das Schwingungsverhalten. Die Parameter werden so bestimmt, dass der Ausgang auf die translatorische Beschleunigung bezogen ist. Dadurch eignet sich die Formulierung für die Integration im Objektivierungswerkzeug.

$$G_{m3}(s) = K \cdot \frac{T_L \cdot s + 1}{T_I \cdot s + 1} \quad (5.18)$$

Irreguläre Otolithen weisen adaptives Verhalten auf. Das ist in Formel 5.18 nicht berücksichtigt. Daher erscheint die Kombination mit dem Adaptionsterm in Gleichung 5.15 zielführend. Die im Handling Monitor implementierte Macularübertragungsfunktion  $G_{Macular}$  ist in Formel 5.19 angegeben.

$$G_{Macular}(s) = G_{m3}(s) \cdot A(s) = K \cdot \frac{T_L \cdot s + 1}{T_I \cdot s + 1} \cdot \frac{K_A \cdot T_A \cdot s + 1}{T_A \cdot s + 1}. \quad (5.19)$$

### Gleichgewichtssinn - Bogengangorgan

Der adäquate Reiz des Bogengangorgans sind rotatorische Beschleunigungen. Die Geometrie der drei senkrecht zueinander stehenden Bogengänge wird in der Literatur als identisch angenommen. Eine anschauliche Modellierung des Sinnesorgans stellt [26] vor. Auf Trägheit, Elastizität und Viskosität basierend, wird mit den Poiseuille-Hagen Beziehungen für Strömung in dünnen Rohren die Differentialgleichung 5.20 abgeleitet. Diese wird aus dem Momentengleichgewicht unter der Annahme vernachlässigbarer Verzögerung aufgestellt. Deren Kurzzeichen sind in Tabelle 5.6 erläutert. Durch Laplace Transformation kann die in Formel 5.21 angegebene Übertragungsfunktion  $G_{b1}(s)$  mit der Gierrate als Eingang und der Cupula-Auslenkung als Ausgang abgeleitet werden. Diese Formulierung ist durch den Bezug auf die Verformung der Cupula nicht für die Fahrverhaltensbeurteilung geeignet. Es ist eine Formulierung in Relation zu Größen notwendig, die mit fahrdynamischer Messtechnik erfassbar sind. Nachteilig ist zudem, dass keine Adaption berücksichtigt ist.

$$\ddot{q} = \ddot{\Theta} + \frac{B}{I} \cdot \dot{\Theta} + \frac{K}{I} \cdot \Theta \quad (5.20)$$

Parameter	Formelzeichen
Auslenkung der Endolymphe	p
Drehung des Kopfs	q
Relative Verschiebung	$\Theta$
Trägheitsmoment der Endolymphe	I
Viskositätskoeffizient der Endolymphe	B
Elastischer Koeffizient der Cupula	K

Tabelle 5.6: Parameter des Momentengleichgewichts am Bogengangorgan

$$G_{b1}(s) = \frac{\Theta}{\dot{q}}(s) = \frac{I}{K} \cdot \frac{s}{(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1)} \quad (5.21)$$

$$\text{mit } T_1 = \frac{I}{B} \text{ und } T_2 = \frac{B}{K}$$

Die Arbeit [71] stellt die Übertragungsfunktion  $G_{b2}(s)$  in Formel 5.25 auf. Die Grundgleichung basiert auf einem Torsionspendel  $T(s)$ . Zusätzlich sind Adaptionsterme  $A_b(s)$  und eine erhöhte Sensitivität für hochfrequente Anregungen  $F(s)$  integriert. Diese sind in den Gleichungen 5.22, 5.23 und 5.24 angegeben. Die ermittelten Parameter sind in Tabelle 5.7 zusammengefasst.

$$T(s) = \frac{1}{(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1)} \quad (5.22)$$

$$A_b(s) = \frac{T_A \cdot s}{T_A \cdot s + 1} \quad (5.23)$$

$$F(s) = \frac{T_L \cdot s}{(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1)} \quad (5.24)$$

$$G_{b2}(s) = A(s) \cdot [T(s) + F(s)] = \frac{T_A \cdot s}{T_A \cdot s + 1} \cdot \frac{T_L \cdot s + 1}{(T_1 \cdot s + 1)(T_2 \cdot s + 1)} \quad (5.25)$$

Parameter	Formelzeichen	Wert
1. Zeitkonstante	$T_1$	0,003s
2. Zeitkonstante	$T_2$	5,7s
Adaptionskonstante	$T_A$	80s
Hochfrequenzkonstante	$T_L$	0,049s

Tabelle 5.7: Parameter des erweiterten Torsionspendels als Bogengang

Die Analyse der resultierenden Aktionspotenziale zeigt eine Ähnlichkeit des Zeitverlaufs zur Giergeschwindigkeit auf, weshalb in der Literatur unterschiedliche Angaben zum Bogengangorgan existieren (siehe beispielsweise [72]). Einerseits wird die Rotationsgeschwindigkeit als auslösender Reiz beschrieben, andererseits die Drehbeschleunigung. Nach den Erkenntnissen dieser Arbeit ist der adäquate Reiz die Rotationsbeschleunigung. Die resultierenden quasi-empfundene Signale ähneln jedoch in weiten Teilen dem zeitlichen Verlauf der Giergeschwindigkeit.

Daraus resultiert die Formulierung  $G_{b3}(s)$  in Gleichung 5.26 aus [70] mit den Parametern in der Tabelle 5.8. Der Bogengang wird dort als Integrator beschrieben. Er hat die Hochpasseigenschaften von Formel 5.25, beinhaltet jedoch keine Adaption. Als Eingang dient die rotatorische Beschleunigung. Der Ausgang ist auf die Drehgeschwindigkeit bezogen.

$$G_{b3}(s) = K \cdot \frac{T_L \cdot s + 1}{T_I \cdot s + 1} \quad (5.26)$$

In dieser Arbeit wird eine Kombination der Gleichungen 5.23 und 5.26 zur Modellierung des Bogengangorgans verwendet. Dadurch können alle Eigenschaften des Sinnesorgans abgebildet werden. Zudem sind Ein- und Ausgänge auf physikalisch messbare Größen bezogen. Die resultierende Übertragungsfunktion  $G_{Bogengang}(s)$  ist in Formel 5.27 angegeben.

Parameter	Formelzeichen	Wert
Verstärkung	$K$	5,9
Hochfrequenzkonstante	$T_L$	0,11s
Integrationskonstante	$T_I$	5,9s

Tabelle 5.8: Integratorparameter mit Hochpasseigenschaften als Bogengang

$$G_{Bogengang}(s) = G_{b3}(s) \cdot A_b(s) = K \cdot \frac{T_L \cdot s + 1}{T_I \cdot s + 1} \cdot \frac{T_A \cdot s}{T_A \cdot s + 1} \quad (5.27)$$

### Extremitäten

Die Eigenschaften menschlicher Regeltätigkeit in Mensch-Maschine-Systemen wird bereits intensiv untersucht. Grundlagen sind in [7, 8] beschrieben. Dort genannte Ansätze sind das TUSTIN- und das PRÄZISIONSMODELL. Eine wesentliche Einschränkung dieser Beschreibungen ist die begrenzte Berücksichtigung von Kraft- und Wegrückmeldung. Das erstmals in [6] beschriebene Informationsstrukturmodell beinhaltet diese Aspekte. Dessen Grundstruktur ist in Abbildung 5.5 dargestellt.

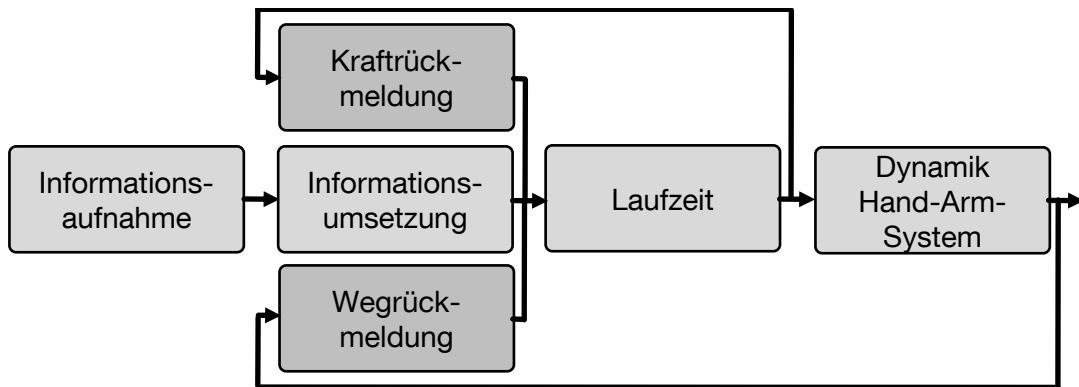


Abbildung 5.5: Aufbau des Informationsstrukturmodells

Auf eine ausführliche Beschreibung des Informationsstrukturmodells wird an dieser Stelle verzichtet. Einzelheiten sind in [6] nachzulesen. Für die Sensierung der Lenkradbediengrößen sind lediglich die WEG- und die KRAFTRÜCKMELDUNG zu modellieren.

Die Rückführung des Lenkradwinkels erfolgt, wie in Abschnitt 4.4 dargestellt, über Muskelspindeln. Der adäquate Reiz ist laut [6] und [8] nicht die innere Muskellänge, sondern die Auslenkung des Lenkrads. Dies bestätigt die in [13] getroffenen Aussagen zur Schnittstellenverschiebung. Daraus folgt, dass die Dynamik des Hand-Arm-Systems in diesem Modell zu vernachlässigen ist. Die resultierende Übertragungsfunktion  $G_{Muskelspindel}(s)$  in Gleichung 5.28 kann folglich ohne Erweiterung direkt in das Empfindungsmodell integriert werden. Eine Auflistung der verwendeten Parameter beinhaltet Tabelle 5.9.

$$G_{Muskelspindel}(s) = \frac{V_W \cdot (T_{Wd} \cdot s + 1)}{T_{Wi} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_W \cdot s} \quad (5.28)$$

Parameter	Formelzeichen	Wert
Verstärkung	$V_W$	46,6
Vorhaltezeit	$T_{Wd}$	103ms
Verzögerungszeit	$T_{Wi}$	20ms
Totzeit	$\tau_W$	20ms

Tabelle 5.9: Übertragungsfunktionsparameter der Muskelspindel

Die Empfindung des Lenkradmoments erfolgt nach Kapitel 4.4 über Golgi-Sehnenorgane. Die Übertragungseigenschaften  $G_{g1}(s)$  werden in [6] wie in Formel 5.29 angegeben. Neuere Berichte zum Informationsstrukturmodell beschreiben die Dynamik jedoch lediglich als Proportionalterm mit einer Verzögerungszeit. Die erforderliche Übertragungsfunktion  $G_{g2}(s)$  ist in Gleichung 5.30 angeführt. Die Parameter sind in Tabelle 5.10 gelistet.

$$G_{g1}(s) = K_K \cdot (T_K \cdot s + 1) \cdot e^{-\tau_K \cdot s} \quad (5.29)$$

$$G_{g2}(s) = K_K \cdot e^{-\tau_K \cdot s} \quad (5.30)$$

Parameter	Formelzeichen	Wert
Verstärkung	$K_K$	0,5
Totzeit	$\tau_K$	20ms

Tabelle 5.10: Übertragungsfunktionsparameter des Golgi-Sehnenorgans

Die Übertragungsfunktionen  $G_{g1}(s)$  und  $G_{g2}(s)$  beinhalten keine Adaptionseffekte, die nach Abschnitt 4.4 zu modellieren sind. Daher wird der Adaptionsterm  $A_g(s)$  in Formel 5.31 und den Parametern aus Tabelle 5.11 zusätzlich eingeführt. Deren Bestimmung erfolgt auf Basis der Aussagen in [27]. Die letztlich im Handling Monitor integrierte Gesamtfunktion  $G_{Golgi-Sehnenorgan}(s)$  der Kraftrückmeldung beschreibt Gleichung 5.32.

$$A_g(s) = \frac{K_A}{T_A^2 \cdot s^2 + 2 \cdot D_A \cdot T_A \cdot s + 1} \quad (5.31)$$

Parameter	Formelzeichen	Wert
Verstärkung	$K_A$	0,25
Zeitkonstante	$T_A$	1,25s
Dämpfungs-konstante	$D_A$	$1s^{-1}$

Tabelle 5.11: Adaptionsparameter des Golgi-Sehnenorgans

$$\begin{aligned} G_{Golgi-Sehnenorgan}(s) &= G_{g2}(s) \cdot (1 - A_g(s)) = \\ &= K_K \cdot e^{-\tau_K \cdot s} \cdot \left(1 - \frac{K_A}{T_A^2 \cdot s^2 + 2 \cdot D_A \cdot T_A \cdot s + 1}\right) \end{aligned} \quad (5.32)$$

Die Übertragungsfunktion  $G_{Golgi-Sehnenorgan}(s)$  erhält als Eingang nach [7, 8] die Muskelspannung. Diese ist über das inverse Hand-Arm-System aus dem Lenkradmoment zu

errechnen. Daraus wird durch  $G_{Golgi-Sehnenorgan}(s)$  die empfundene Muskelkraft ermittelt. Um einen Bezug zum gemessenen Lenkradmoment herstellen zu können, ist das Hand-Arm-System in Vorwärtsrichtung zu durchlaufen. Nach [6] ist es als lineares, zeit-invariantes System beschreibbar. Durch die Hintereinanderschaltung kann nach [38] der Einfluss des Hand-Arm-Systems auf die Gesamtübertragungseigenschaften vernachlässigt werden.

### 5.2.4 Empfindungsbasierte Bewertung

Das in Kapitel 4.2.4 konzipierte Vorgehen zur empfindungsbasierten Bewertung wird hier exemplarisch anhand des Weave-Tests diskutiert. Die Auswertung anderer Manöver erfolgt analog. Nach der Durchführung des Fahrversuchs werden die aufgezeichneten Messdaten als Eingangsgrößen für das Empfindungsmodell genutzt. Daraus resultieren gemessene und quasi-empfundene Zeitschriebe. Abbildung 5.6<sup>23</sup> stellt beides für das Lenkradmoment dar. Parallel liegen diese Größen auch für den Lenkradwinkel vor.

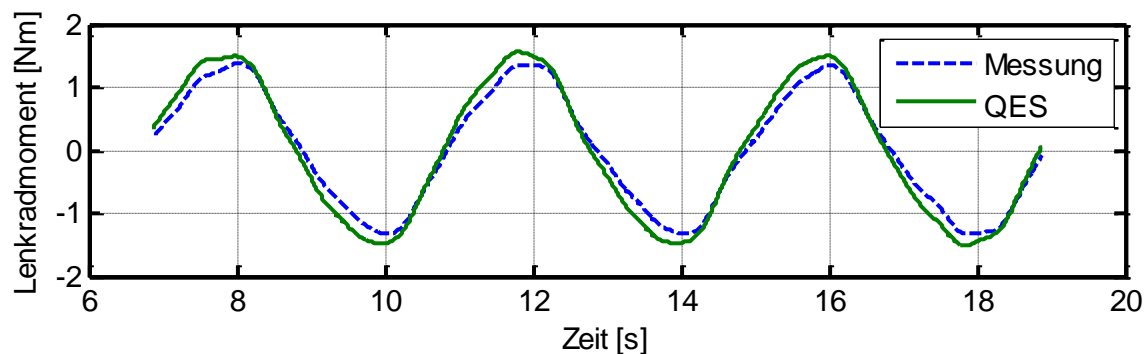


Abbildung 5.6: Zeitverlauf von gemessenem und empfundenem Lenkradmoment

Aus den Zeitverläufen von Lenkradwinkel- und moment kann eine Lenkungshysterese sowohl mit gemessenen als auch mit quasi-empfundene Daten ermittelt werden. In [23] wird die Steigung aus Null heraus, die sogenannte Lenkungssteifigkeit, als Parameter identifiziert, der mit Subjektivbewertungen des Mittengefühls in Korrelation steht. Diese kann aus beiden Hysteresediagrammen, die in Abbildung 5.7 für ein Fahrzeug der Mittelklasse dargestellt sind, berechnet werden.

In Abschnitt 6.1 wird gezeigt, dass gemessene Kennwerte Zusammenhänge mit dem Subjektivurteil zum Mittengefühl aufweisen. Dort wird jedoch ebenfalls exemplarisch belegt, dass die quasi-empfundene Parameter deutlich ausgeprägter mit Gefallensbewertungen verknüpft sind. Auf Basis der ermittelten Regressionsergebnisse kann, ausgehend von Kennwerten aus dem Empfindungsmodell, mit gesteigerter Präzision auf Subjektivurteile geschlossen werden.

<sup>23</sup> In den Abbildungen 5.6 und 5.7 sind die Signale zur besseren Erkennbarkeit gefiltert dargestellt. Zudem wird die Abkürzung QES für quasi-empfundene Signale verwendet.

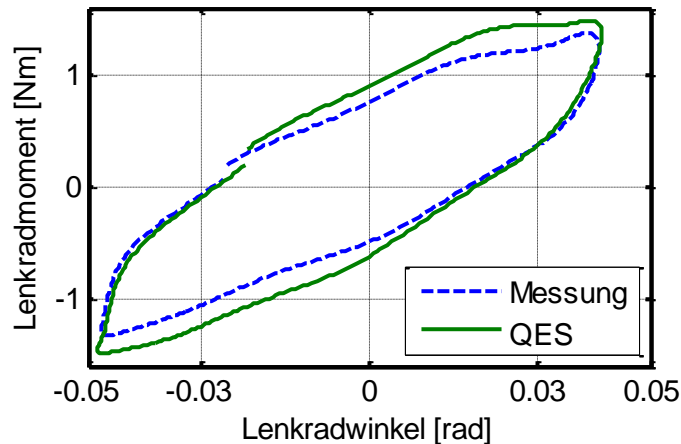


Abbildung 5.7: Gemessene und quasi-empfundene Lenkungshysterese

## 5.3 Lenkradbetätigungsmodell

Um Kennwerte aus regulären Abstimmungsfahrten im Closed-Loop zu ermitteln, beinhaltet der fahrerbasierte Objektivierungsansatz einen weiteren Aspekt: Durch die Rekonstruktion der Bediengrößen mit einem Lenkradbetätigungsmodell ist die Fahrstrategie konservierbar. Diese ist zum Einen vom Fahrzeug abhängig, zum Anderen auch vom durchgeführten Manöver. Zur Bestimmung der Modellparameter wird ein geeignetes Optimierungsverfahren in den Handling Monitor integriert. Die anschließende Bewertung nutzt die ermittelten Kennwerte der Fahrstrategie.

### 5.3.1 Rekonstruktion relevanter Bediengrößen der Fahrzeugquerdynamik

In Voruntersuchungen dieser Arbeit erfolgt die Analyse diverser Fahrermodellierungsansätze zur Rekonstruktion von Lenkradwinkel und -moment. Ein wesentliches Defizit der Mehrzahl an veröffentlichten Ansätzen ist die Notwendigkeit einer Sollspur. Häufig ist eine regelnde Ebene integriert, die eine Abweichung des Ist-Kurses von der geplanten Trajektorie ausgleicht. Spurversatzmessung setzt jedoch entweder eine Kameraplattform oder eine vorhergehende Festlegung einer Sollbahn voraus. Beides ist für Abstimmungsfahrten unüblich. Dies steht im Widerspruch zu Anforderung A10, da die durchgängige Nutzung im Entwicklungsprozess auf diese Weise stark eingeschränkt wird. Die ungeklärte Grundsatzfrage, ob Fahrer generell a priori einen Sollkurs festlegen, führt zusätzlich dazu, dass sollspurbasierte Ansätze nicht berücksichtigt werden.

Daher nutzt der Handling Monitor eine mathematische Modellierung, die auf der Gleichung aus [56] basiert. Die Modellstruktur in Formel 5.33 nutzt optische Informationen zweier Prädiktionpunkte in definierten Abständen  $s_{nah}$  und  $s_{fern}$  vor dem Fahrzeug. Zwischen deren Verbindungen zum Fahrzeugschwerpunkt und der Fahrzeugorientierung treten die Vorausschauwinkel  $\theta_{nah}$  und  $\theta_{fern}$  auf. Die Gleichung beinhaltet die Parameter  $k_{p,nah/fern}$  und  $k_{l,nah}$  zur Berechnung des Lenkradwinkels. Es ist mit diesem Modell möglich, basierend auf gemessenen GPS-Spurlinformationen, die Fahrereingabe zu rekonstruieren. Dazu ist die Gleichung 5.33 für Zeitpunkte  $t_b$  zu lösen, die um das Intervall

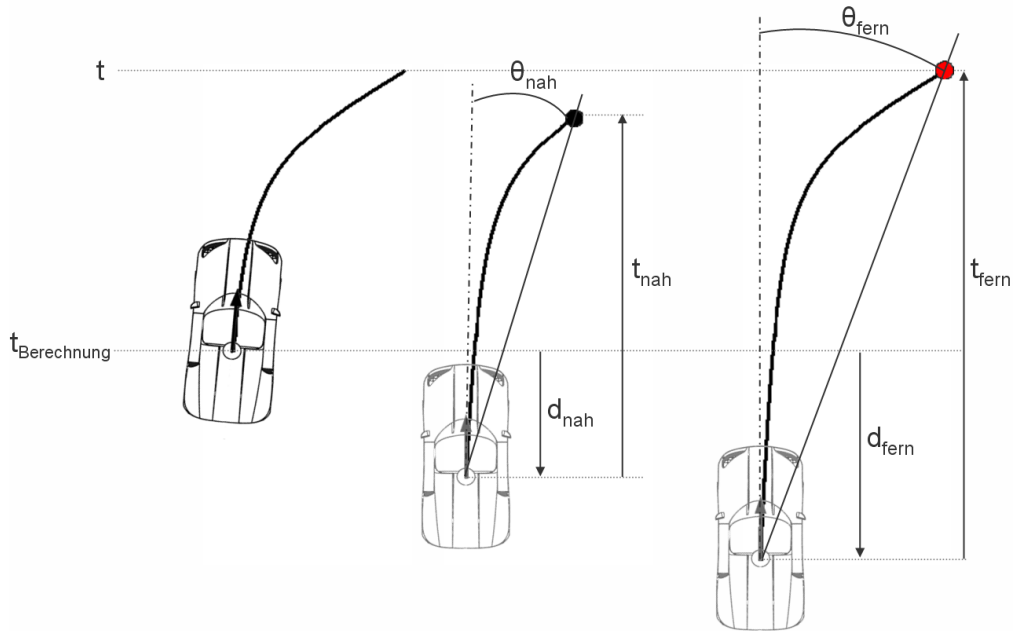


Abbildung 5.8: Geometrische Modellgrößen des Lenkradbetätigungsmodells

$t_{fern} = \frac{s_{fern}}{v_x}$  mit der momentanen Fahrgeschwindigkeit  $v_x$  verschoben sind. In Abbildung 5.8 sind die Modellgrößen illustriert.

$$\delta_{DPID}(t_b) = k_{p,nah} \cdot \theta_{nah}(t_{b,nah}) + k_{I,nah} \cdot \int_0^{t_{b,nah}} + k_{p,fern} \cdot \theta_{fern}(t_{b,fern}) + k_{I,fern} \quad (5.33)$$

mit  $t_b = t - t_{fern}$

Trotz der grundsätzlichen Eignung zur Lenkradbetätigungsrekonstruktion sind Erweiterungen erforderlich, um die mögliche Übereinstimmung zwischen Modell und Realfahrer zu erhöhen. Diese sind ausführlich in [57] dargestellt. Basierend auf den Erkenntnissen von [30] nutzen Fahrer Vorausschauzeiten anstatt konstanter Prädiktionsentfernungen zur Fahrzeugführung. Dies wird durch festgelegte Intervalle  $t_{nah} = 0,5s$  und  $t_{fern} = 1,5s$  modelliert. Zudem wird das Modell zunächst zu einem doppelten PID-Regler (DPID) erweitert, der in Gleichung 5.34<sup>24</sup> mit den Parametern  $k_{p,nah/fern}$ ,  $k_{I,nah/fern}$  und  $k_{d,nah/fern}$  beschrieben ist. Als weitere Variablen werden Verzögerungszeiten  $d_{nah}$  und  $d_{fern}$  eingeführt. Dadurch wird die Zeitdifferenz zwischen Informationsaufnahme und Umsetzung mit dem Hand-Arm-System modelliert. Diese Struktur wird auf unterschiedliche Fahrsituationen, Fahrer und Fahrzeuge zur Rekonstruktion angewendet. In Tabelle 5.12 sind die in dieser Untersuchung ermittelten Parametergrenzen zusammengefasst. Diese bilden die Randbedingungen für die Optimierung in Abschnitt 5.3.3. Es ist zu beachten, dass unterschiedliche Wertebereiche für Lenkradwinkel und -moment erforderlich sind. Zudem erweisen sich Integrationsterme als nicht notwendig.

<sup>24</sup> Die Gleichungen 5.34 und 5.35 gelten sowohl für den Lenkradwinkel  $\delta_{DPID}(t_b)$  als auch für das -moment  $M_{DPID}(t_b)$ . Die Formeln beinhalten  $\delta_{DPID}(t_b)$  stellvertretend für beide Größen.



$$\begin{aligned} \delta_{DPID}(t_b) = & k_{p,nah} \cdot \theta_{nah}(t_{b,nah}) + k_{I,nah} \cdot \int_0^{t_{b,nah}} \theta_{nah}(\tau) d\tau + k_{d,nah} \cdot \dot{\theta}_{nah}(t_{b,nah}) + \\ & + k_{p,fern} \cdot \theta_{fern}(t_{b,fern}) + k_{I,fern} \cdot \int_0^{t_{b,fern}} \theta_{fern}(\tau) d\tau + k_{d,fern} \cdot \dot{\theta}_{fern}(t_{b,fern}) \end{aligned} \quad (5.34)$$

mit  $t_b = t - t_{fern} - d_{fern}$ ,  $t_{b,nah} = t_b + d_{nah} - t_{nah}$  und  $t_{b,fern} = t_b + d_{fern} - t_{fern}$

Parameter	Formelzeichen	Wertebereich Moment	Wertebereich Winkel
Proportionalverstärkung nah	$k_{p,nah}$	0 – 80	0
Integralverstärkung nah	$k_{I,nah}$	0	0
Differentialverstärkung nah	$k_{d,nah}$	0	0 – 20
Verzögerungszeit nah	$d_{nah}$	0–2s	0 – 2s
Proportionalverstärkung fern	$k_{p,fern}$	0	0 – 20
Integralverstärkung fern	$k_{I,fern}$	0	0
Differentialverstärkung fern	$k_{d,fern}$	0 – 40	0
Verzögerungszeit fern	$d_{fern}$	0 – 2s	0 – 2s

Tabelle 5.12: DPID-Modellparameter

### 5.3.2 Manöverabhängige Betrachtung der Fahrerleistung

Kurvenfahrten sind der wesentliche Untersuchungsgegenstand der Bewertungsmethodik mit dem Lenkradbetätigungsmodell. Um aussagekräftige Ergebnisse zur Objektivierung zu erhalten, ist die Auswahl relevanter Fahrmanöver erforderlich. Dazu sind unterschiedliche Verfahren im Handling Monitor integriert:

- Durch geeignete Dimensionierung von Schwellwerten ist die zuverlässige Erkennung von Kurvenfahrten möglich. Als Detektionsgrößen eignen sich beispielsweise Querbeschleunigung, Kurvenkrümmung und Lenkradwinkel.
- Eine andere Möglichkeit stellt das Ausschneiden von Manövern aus GPS-Daten dar. Dies ist jedoch nicht vollkommen zu automatisieren. Für Abstimmungsfahrten ist somit für jede Strecke einmal die Definition der zu untersuchenden Kurven notwendig.

In den durchgeführten Analysen dieser Arbeit erweist sich das schwellwertbasierte Verfahren als besonders für Simulationsfahrten geeignet. Dies ist vor allem darin begründet, dass in virtuellen Untersuchungen weder Rauschen in den Messdaten noch andere Störungen auftreten. Daher können die Grenzwerte sehr eng gewählt werden. Einlenkvorgänge sind dadurch präzise zu erfassen.

Dennoch ist die GPS-basierte Ausschneidemethodik zu bevorzugen. Diese ist ohne Einschränkungen für Realfahrt und Simulation geeignet. In der Realfahrt können Kurven ideal zur Auswertung markiert werden. Zudem finden Abstimmungsfahrten häufig auf festgelegten Strecken im Straßenverkehr oder auf Prüfgeländen statt. Es ist folglich mit geringem Aufwand verbunden, eine Fahrt in Kurvensegmente zu unterteilen, da dies lediglich einmal erforderlich ist. In nachfolgenden Versuchen sind über einen integrierten Algorithmus automatisiert vergleichbare Manöverabschnitte ermittelbar.

### 5.3.3 Bestimmung der Lenkradbetätigungsmodellparameter

Aus Kapitel 5.3.1 folgt mit Gleichung 5.34 und Tabelle 5.12 die vereinfachte Modellstruktur des Lenkradbetätigungsmodells zur Rekonstruktion von Lenkradwinkel und -moment in Formel 5.35. Die Optimierungsaufgabe beinhaltet folglich vier Parameter ( $k_{p,fern}$ ,  $k_{d,nah}$ ,  $d_{nah}$  und  $d_{fern}$ ).

$$\delta_{DPID}(t_b) = k_{d,nah} \cdot \dot{\theta}_{nah}(t_{b,nah}) + k_{p,fern} \cdot \theta_{fern}(t_{b,fern}) \quad (5.35)$$

mit  $t_b = t - t_{fern} - d_{fern}$ ,  $t_{b,nah} = t_b + d_{nah} - t_{nah}$  und  $t_{b,fern} = t_b + d_{fern} - t_{fern}$

Über einen Zeitbereich, der durch den Manövererkenner vorgeben ist, erfolgt die Parameterbestimmung. Die Implementierung im Handling Monitor nutzt einen genetischen Optimierer von MATLAB. Dieser gewährleistet die optimale Konservierung der Fahrstrategie. Gradientenbasierte Verfahren erweisen sich als nicht ausreichend robust und werden daher nicht genutzt.

### 5.3.4 Bewertung mit dem Lenkradbetätigungsmodell

Das Bewertungskonzept aus Abschnitt 4.5.4 wird unmittelbar in den Handling Monitor integriert. Die Vorgehensweise wird nachfolgend an einem Beispiel der Realfahrt erläutert. Ein Fahrer führt zwei unterschiedliche Fahrzeugkonfigurationen durch eine Kurve. Zuvor wird ausreichend Zeit zur Adaption der Fahrstrategie eingeräumt. Durch den Manövererkenner wird jeweils eine Kurve pro Variation der Fahreigenschaften zur Bewertung ermittelt. Ein resultierender Zeitverlauf des Lenkradwinkels ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Das Vorgehen für das Lenkradmoment ist analog.

Durch Optimierung werden die Parameter des Lenkradbetätigungsmodells bestimmt. Für dieses Beispiel sind sie in Tabelle 5.13 angegeben. Abschließend werden die ermittelten Kennwerte mit den in Kapitel 6.2 zusammengefassten Regressionsergebnissen zur Berechnung von Subjektivurteilen genutzt. In diesem exemplarischen Versuch kann die Agilitätswertung von 8,0 für Konfiguration 1 berechnet werden. Das schlechtere Ergebnis mit 7,0 für die andere Variante ist auf deutlich geringeren Luftdruck an der Vorderachse, der verzögerten und reduzierten Seitenkraftaufbau bewirkt, zurückzuführen. Die erforderliche Lenkbewegung muss folglich früher ( $d_{fern}$  sinkt) und stärker ( $k_{p,fern}$  steigt) erfolgen, um die Fahraufgabe zu absolvieren. Weitere Zusammenhänge zwischen Fahreigenschaften und Modellparametern werden in Abschnitt 6.2 vorgestellt.

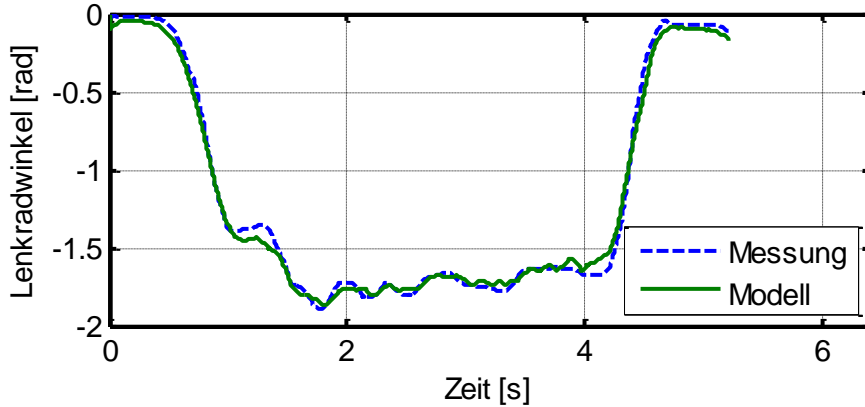


Abbildung 5.9: Zeitverläufe von gemessenem und vom Modell simuliertem Lenkradwinkel

Parameter	Formelzeichen	Variante 1	Variante 2
Differentialverstärkung nah	$k_{d,nah}$	1,75	1,75
Verzögerungszeit nah	$d_{nah}$	0,26s	0,26s
Proportionalverstärkung fern	$k_{p,fern}$	8,24	8,76
Verzögerungszeit fern	$d_{fern}$	0,41s	0,39s

Tabelle 5.13: DPID-Modellparameter zweier Fahrzeugkonfigurationen

## 5.4 Auswahl der betrachteten Versuchsdurchführungen und Bewertungskriterien

Im Rahmen der prototypischen Realisierung des Handling Monitors wird eine Auswahl unterschiedlicher Manöver im Open- und Closed-Loop sowie der Abstimmungsfahrtklasse betrachtet. Die daraus ermittelten Kennwerte dienen anschließend mit den Regressionsergebnissen aus Kapitel 6.1 und 6.2 zur Berechnung von Subjektivurteilen. Die folgenden Abschnitte beinhalten die Auflistung der Fahrmanöver und der subjektiven Bewertungskriterien.

### 5.4.1 Manöver und daraus abgeleitete Kennwerte

Grundlage der Auswertungen des Handling Monitors sind Weave-Tests, Frequenzgangmessungen und Lenkradwinkelsprünge. Diese Open-Loop-Versuche sind im Wesentlichen Gegenstand der Analyse mit dem Empfindungsmodell. Zusätzlich werden Closed-Loop-Messungen und Abstimmungsfahrten mit dem Lenkradbetätigungsmodell untersucht. Tabelle 5.14 listet alle betrachteten Manöver mit den daraus abgeleiteten Kennwerten auf, für die aussagekräftige Objektivierungserkenntnisse gewonnen werden (siehe Abschnitte 6.1 und 6.2). Des Weiteren ist das zur Bestimmung der Charakteristika erforderliche Diagramm angeführt. Die jeweiligen Definitionen sind im Anhang angegeben.

Fahrmanöver	Diagramm	Kennwert	Formelzeichen
Weave-Test	Lenkradmoment über -winkel	Lenkungssteifigkeit	$LS_{Weave}$
	Giergeschwindigkeit über Lenkradwinkel	Gierverstärkung	$GV_{Weave}$
		Giersteifigkeit	$GS_{Weave}$
		Maximum der Gierrate	$MGR_{Weave}$
	Giergeschwindigkeit über Lenkradmoment	Giergeschwindigkeitstotband	$GTB_{Weave}$
Querbesehleuni-gung über Lenkradwinkel	Lenkungsempfindlichkeit	$LE_{Weave}$	
Frequenz-gang	Lenkradmoment zu -winkel	Lenkungssteifigkeit bei 0,4 Hz	$LS04_{Fre}$
		Lenkungssteifigkeit bei 0,7 Hz	$LS07_{Fre}$
		Lenkungssteifigkeit bei 1,0 Hz	$LS1_{Fre}$
		Mittlerer Amplitudenabfall zwischen 0,7 und 1,0 Hz	$MAA_{Fre}$
		Phasenwinkel bei 0,7 Hz	$PW07_{Fre}$
		Phasenwinkel bei 1,0 Hz	$PW1_{Fre}$
		Phasenminimum	$PM_{Fre}$
		Frequenz des Phasenminimums	$FPM_{Fre}$
	Querbesehleuni-gung zu Lenk-radwinkel	Verstärkung bei 0,4 Hz	$AV04_{Fre}$
		Verstärkung bei 0,7 Hz	$AV07_{Fre}$
		Verstärkung bei 1,0 Hz	$AV1_{Fre}$
	Giergeschwindig-keit zu Lenk-radwinkel	Verstärkung bei 0,4 Hz	$GV04_{Fre}$
		Verstärkung bei 0,7 Hz	$GV07_{Fre}$
		Giereigenfrequenz	$GEF_{Fre}$
Lenkrad-winkelsprung	Giergeschwindig-keit über Zeit	Stationärer Verstärkungsfaktor	$GV_{LRWS}$
		Empfundenes Überschwingen	$ES_{LRWS}$
		Antwortzeit des Maximums	$AM_{LRWS}$
		25% Antwortzeit	$AZ025_{LRWS}$
		50% Antwortzeit	$AZ050_{LRWS}$
	Querbesehleuni-gung über Zeit	Stationärer Verstärkungsfaktor	$AV_{LRWS}$
Closed-Loop	-	Differentialverstärkung nah	$k_{d,nah}$
		Proportionalverstärkung nah	$k_{p,nah}$
		Proportionalverstärkung fern	$k_{p,fern}$
		Vorausschauzeit fern	$t_{fern}$
		Integralwert fern	$I_{fern}$

Tabelle 5.14: Analyierte Manöver und abgeleitete Kennwerte

### 5.4.2 Subjektive Bewertungskriterien

Auf Basis der Kennwerte aus Abschnitt 5.4.1 werden die nachfolgend beschriebenen Subjektivbewertungen ermittelt. Die generierten Wertungen sind in Tabelle 5.15 mit einer Kurzbeschreibung zusammengefasst. Detailliertere Erläuterungen beinhalten die Arbeiten [23, 28, 29].

Subjektivkriterium	Kurzbeschreibung
Lenkradmoment Mitte	Das Lenkradmoment aus der Mittellage ist von wesentlicher Relevanz für die Zentrierung der Lenkung und die Geradeausfahrt.
Lenkradmoment Anlenken	Der Aufbau des Lenkradmoments beim Anlenken gibt Rückmeldung über den Bewegungszustand des Fahrzeugs.
Lenkradmoment Kurvenfahrt	Das Lenkradhaltemoment in Kurven ist ein Maß für die Rückmeldung des Fahrzeugs und den erforderlichen Kraftaufwand.
Mittengefühl	Das Mittengefühl beschreibt den Aufbau des Lenkradmoments und der Fahrzeugantwort aus der Mitte.
Lenkungspräzision	Die Lenkungspräzision wird durch Reibungs- und Spielfreiheit im Lenkungsstrang und den Aufbau der Fahrzeugreaktion beeinflusst.
Lenkungsstößigkeit	Die Lenkungsstößigkeit ist ein Maß für die Empfindlichkeit von Lenkungen auf vertikale Einzelhindernisse.
Eigenlenkverhalten	Ausgewogenes Untersteuerverhalten deutet den Grenzbereich ausreichend früh an, ohne die Einlenkagilität zu beeinträchtigen.
Lenkradwinkelbedarf	Die Fahraufgabe erfordert angemessene Lenkradwinkel, wenn das Fahrzeug weder hektisch noch passiv auf Lenkradwinkel reagiert.
Ansprechen	Das Ansprechen beinhaltet die Schnelligkeit und Intensität der Fahrzeugreaktionen auf mittel- bis hochfrequente Lenkradwinkeleingaben aus der Geradeausfahrt.
Agilität	Beim Einlenken in Kurven werden die Fahrzeugreaktionen auf Lenkradwinkeleingaben hinsichtlich Schnelligkeit, Intensität und ausreichend schnellem Erreichen von stationären Zuständen bewertet.
Zielgenauigkeit	Möglichst lineares Fahrverhalten in den meisten Fahrsituationen ist für Kunden vorhersehbar und ermöglicht die präzise Führung in Kurven.

Tabelle 5.15: Berechnete Subjektivurteile des Handling Monitors

## 5.5 Zusammenfassung

Dieses Kapitel beschreibt die prototypische Realisierung des fahrerbasierten Objektivierungsansatzes. Das Bewertungswerkzeug Handling Monitor besteht aus unterschiedlichen Teilmodulen. Um die effiziente Integration in bestehende Prozesse von OEM zu ermöglichen, werden zunächst die Prozessschnittstellen definiert. Dadurch sind Ein- und Ausgangsgrößen festgelegt. Anschließend erfolgt die Spezifikation des Trainings- und Bewertungsprozesses.

Ein wesentlicher Umfang dieses Abschnitts ist die mathematische Beschreibung eines Modells menschlicher Fahrdynamikempfindung. Hierzu werden Übertragungsfunktionen für die nach Kapitel 4 erforderlichen Sinnesorgane abgeleitet. Als Basis dienen umfangreiche veröffentlichte physiologische Untersuchungen und vorhandene Objektivierungserkenntnisse. Die Regressionsergebnisse zur Notenermittlung nutzen quasi-empfundene Daten statt inertial gemessener Zeitschriebe.

Der zweite grundlegende Bestandteil ermöglicht die Ermittlung von Kennwerten aus dem Closed-Loop. Um diese beispielsweise aus Abstimmungsfahrten zu identifizieren, wird ein Lenkradbetätigungsmodell zur Rekonstruktion von Lenkradwinkel und -moment implementiert. Durch automatisierte Manövererkennung und einen genetischen Optimierungsalgorithmus kann die Fahrstrategie in Modellparametern konserviert und der Auswertung zugänglich gemacht werden. Mit diesen erfolgt anschließend die Beurteilung von Fahrzeugen auf Basis von Regressionsgleichungen aus dem nächsten Kapitel.

Abschließend werden die betrachteten Manöver und die daraus abgeleiteten Kennwerte beschrieben. Dies sind Weave-Tests, Frequenzgangmessungen und Lenkradwinkelsprünge. Zudem werden Closed-Loop-Versuche ausgewertet. Die berechneten Bewertungskriterien sind Kategorien des Lenk- und Kurvenverhaltens sowie des Mittengefühls.

## 6 Objektivierungsergebnisse und Evaluierung der prototypischen Umsetzung

Dieser Abschnitt beschreibt die Objektivierungsergebnisse, die mit dem Empfindungs- und Lenkradbetätigungsmodell des Handling Monitors ermittelbar sind. Dazu werden die Regressionszusammenhänge beider Teilaspekte getrennt diskutiert. Danach erfolgt die Evaluierung der Aussagen in Realfahrt und Simulation. Abschließend werden die wesentlichen Erkenntnisse zusammengefasst und in Relation zur Aufgabenstellung aus 3.5 gesetzt. Abbildung 6.1 stellt den Aufbau dieses Kapitels schematisch dar.

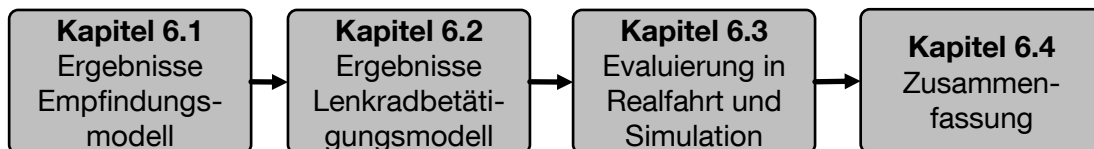


Abbildung 6.1: Aufbau Kapitel 6

### 6.1 Objektivierungsergebnisse mit dem Empfindungsmodell

Das Empfindungsmodell dient dazu, gemessene Größen zu quasi-empfundenen Signalen aufzuwerten. Aus beiden Datenreihen sind jeweils die Kennwerte aus Tabelle 5.14 ermittelbar. Diese werden durch Regressionsrechnung mit Ansätzen zweiter Ordnung auf signifikante Übereinstimmungen mit den Subjektivbewertungen von Abstimmungsfahrern zu den Kriterien in Tabelle 5.15 untersucht. Zur Ableitung der Zusammenhänge werden verschiedene Fahrzeuge und Versuchskonfigurationen eingesetzt. Die nachfolgenden Darstellungen beinhalten einen repräsentativen Teilversuch mit fünf Serienfahrzeugen.

Die Kennwerte der Manöver Weave-Test, Frequenzgang und Lenkradwinkelsprung weisen deutliche Korrelationen mit Subjektivurteilen auf. Es werden verschiedene Varianten dieser Versuche (variierte Fahrgeschwindigkeit, Querbewegung und Lenkfrequenz) analysiert. Für den Weave-Test sind die Konfigurationen mit 80 und 100km/h, 0,5Hz Lenkfrequenz und Querbewegungen von  $4\text{m/s}^2$  optimal auszuwerten. Frequenzgangmessungen in den selben Geschwindigkeitsstufen und analogen Querbewegungen beinhalten ebenfalls deutliche Korrelationen. Der Lenkradwinkelsprung wird nach DIN ISO 7401 durchgeführt.

### 6.1.1 Weave-Test

Kennwerte des Weave-Tests korrelieren mit dem Lenkradmomentenaufbau aus der Mitte, dem Mittengefühl und der Lenkungspräzision. Zudem bestehen Zusammenhänge mit dem Lenkradwinkelbedarf. Diese Ergebnisse sind nachfolgend beschrieben.

#### Lenkradmoment Mitte

Der Aufbau des Lenkradmoments aus der Mittellage ist eine wesentliche Beurteilungsgröße des Fahrverhaltens. Übliche Kundenfahrten umfassen einen hohen Anteil an geraden Strecken. Daher ist eine optimale Auslegung der Kraftcharakteristik für dieses Szenario erforderlich. Das Kriterium ist relativ eng definiert und sollte für diesen Versuch lediglich mit Kennwerten aus dem Diagramm des Lenkradmoments über dem Lenkradwinkel korrelieren. Der deutlichste Zusammenhang im Rahmen dieser Untersuchung wird für die Lenkungssteifigkeit ermittelt. Abbildung 6.2<sup>25</sup> illustriert, dass für gute Beurteilungen ein hoher Kennwert erforderlich ist. Ein Optimum deutet sich nicht an, da keines der betrachteten Fahrzeuge einen zu starken Anstieg des Lenkradmoments aus der Mitte aufweist. Die Aussagen aus dem Empfindungsmodell sind analog zur inertialen Messung. Das Bestimmtheitsmaß der gemessenen Größen wird jedoch übertroffen. Die Berücksichtigung menschlicher Sensorik ist für diesen Kennwert allerdings nicht unbedingt notwendig.

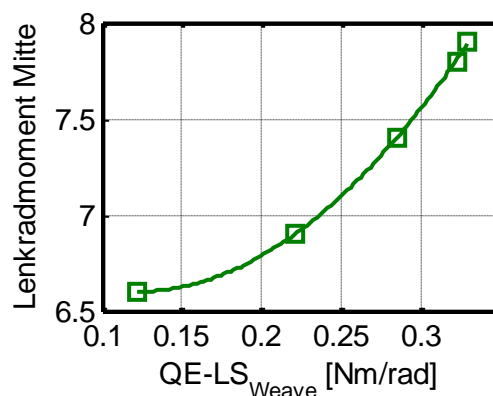


Abbildung 6.2: Lenkradmoment Mitte über Lenkungssteifigkeit

Der Zusammenhang in Abbildung 6.3 ist hingegen nur mit dem Empfindungsmodell in dieser Deutlichkeit zu ermitteln. Er beinhaltet eine Abhängigkeit des Urteils für das Lenkradmoment um die Mittellage von der Lenkungsempfindlichkeit. Die Bewerter trennen folglich nicht explizit zwischen dem Kraftniveau und der Fahrzeugreaktion. Der Verlauf weist aber eine Sättigung auf. Sobald ein gewisses Maß an Fahrzeugreaktion vorhanden ist, hat die Kenngröße keinen weiteren Einfluss auf die Beurteilung.

<sup>25</sup> In den folgenden Abbildungen werden die Abkürzungen aus Tabelle 5.14 genutzt. Kennwerte aus quasiempfundene Signalen werden durch ein vorangestelltes QE- gekennzeichnet. Auf der y-Achse sind die Subjektivbewertungen der Fahrzeuge für das betrachtete Kriterium auf der Skala von 1 bis 10 aufgetragen.



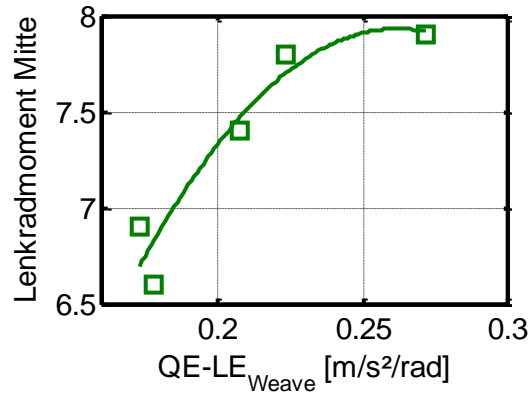


Abbildung 6.3: Lenkradmoment Mitte über Lenkungsempfindlichkeit

### Mittengefühl

Für optimales Mittengefühl ist eine harmonische Abstimmung der Lenkcharakteristik erforderlich. Dies zeigt sich in einer starken Übereinstimmung mit den Aussagen des vorigen Abschnitts. Eine gute Bewertung für das Lenkradmoment aus der Mittellage ist Voraussetzung für zufriedenstellendes Mittengefühl.

Die schwierige Differenzierung zwischen beiden Kriterien zeigt auch die ausgeprägte Korrelation der Lenkungsempfindlichkeit mit dem Mittengefühl. Sie weist, anders als beim Lenkradmomentenaufbau aus der Mitte jedoch keine Sättigung auf (siehe Abbildung 6.4). Das Urteil verbessert sich mit steigenden Kennwerten. Für eine ausreichend hohe Aussagegesicherheit ist die Berücksichtigung von Empfindungseffekten erforderlich. Die Messung lässt den grundsätzlichen Zusammenhang zwar erkennen. Gerade im mittleren Wertebereich weist die Korrelation allerdings zu große Streuungen auf.

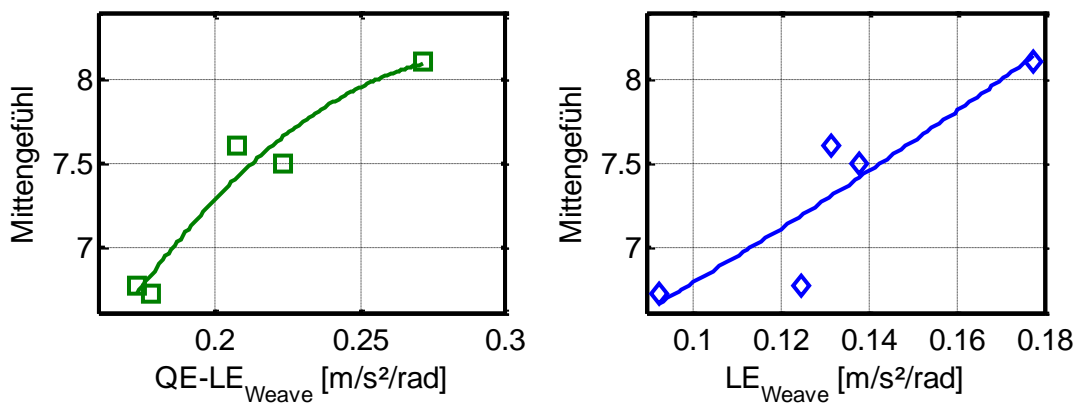


Abbildung 6.4: Mittengefühl über Lenkungsempfindlichkeit

### Lenkungspräzision

Auch die Lenkungspräzision kann durch Kennwerte des Weave-Tests beschrieben werden. In Abbildung 6.5 sind die Korrelationen der Beurteilung mit der Lenkungssteifigkeit

und der -empfindlichkeit aufgetragen. Die Zusammenhänge entsprechen den Erkenntnissen für das Lenkradmoment um die Mittellage und das Mittengefühl. Beide sind folglich für hohe Lenkungspräzision vorauszusetzen. Es ist jedoch nicht unbedingt erforderlich, Empfindungseinflüsse zu berücksichtigen, da sich die Aussagen entsprechen.

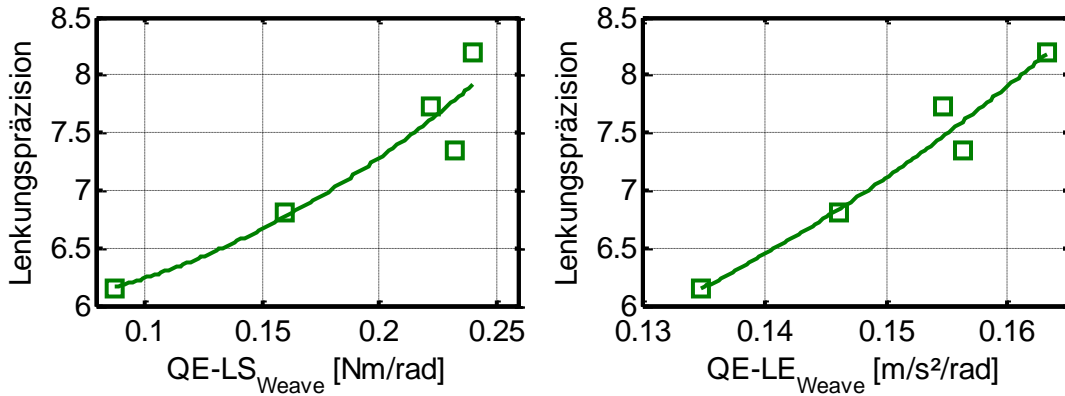


Abbildung 6.5: Lenkungspräzision über Lenkungssteifigkeit und -elastizität

Um die Lenkungspräzision vollständig zu erfassen, ist eine weitere Korrelation heranzuziehen, die nur unter Berücksichtigung menschlicher Sensoreigenschaften ermittelbar ist. Abbildung 6.6 verdeutlicht, dass mit quasi-empfundene[n] Signalen eine deutliche Forderung nach einem möglichst hohen Wert für die Verzögerung der Gierantwort auf das Lenkradmoment abzuleiten ist. Inertial gemessene Kennwerte beschreiben diesen Zusammenhang nicht ausreichend. Zudem erscheint es nicht plausibel, dass der Kennwert ein Notenminimum aufweist. Wird der Ansatz zweiter Ordnung durch eine lineare Funktion ersetzt, ist zwar der grundsätzliche Verlauf verständlich, das Übereinstimmungsmaß ist jedoch gering.

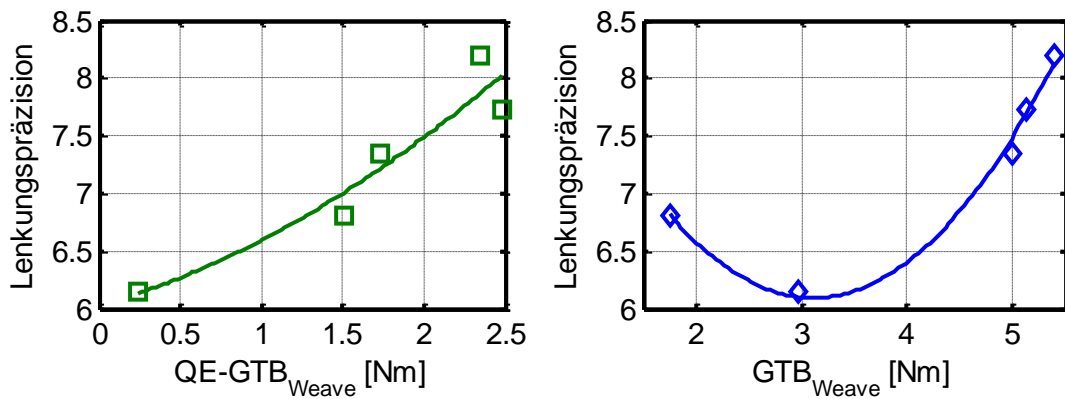


Abbildung 6.6: Lenkungspräzision über Giergeschwindigkeitstotband

Die Lenkungspräzision ist das bisher komplexeste Subjektivkriterium dieser Untersuchung. Es setzt eine harmonische Gestaltung des Lenkradmoments um die Mitte und ausreichendes Mittengefühl voraus. Zusätzlich werden Lenkungen dann als präzise eingestuft, wenn durch deutliches Phasenvoreilen des Lenkradmoments eine exakte Fahrzeugführung ermöglicht wird. Diese wird also begünstigt, wenn Fahrzeugreaktionen un-

mittelbar auf Lenkradwinkel erfolgen. Die präzise Dosierung des Lenkradwinkels wird durch die Vorphase des Lenkradmoments ermöglicht. Daraus resultiert in Summe eine gute Bewertung der Lenkungspräzision.

### **Lenkradwinkelbedarf**

Auch für den Lenkradwinkelbedarf sind Korrelationen zu ermitteln. Deutlich sind die Übereinstimmungen mit der Gierverstärkung, der Giersteifigkeit und dem Maximum der Gierate. Möglichst hohe Kennwerte sind gleichbedeutend mit guten Bewertungen. Die Berücksichtigung von Empfindungseinflüssen ist nicht erforderlich. Für dieses Kriterium sind die Aussagen aus dem Lenkradwinkelsprung jedoch insgesamt präziser.

### **6.1.2 Frequenzgang**

Die meisten Objektivierungszusammenhänge weist in dieser Untersuchung der Frequenzgang auf. Das Lenkradmoment in Mittellage kann abgeschätzt werden. Deutlicher sind die Ergebnisse für das Mittengefühl, das Lenkradmoment beim Anlenken, Ansprechverhalten, Lenkungsstößigkeit und Lenkradwinkelbedarf.

### **Lenkradmoment Mitte**

Durch die Auswertung der Messung in Bode-Diagrammen erfolgt eine Mittelung der Lenkungshysteresen. Dies bewirkt gerade im nichtlinearen Bereich kleiner Lenkradwinkel Informationsverluste. Die Aussagen sind dementsprechend unpräziser als Kennwerte aus dem Weave-Test. Dennoch können die Erkenntnisse des Sinuslenkens bestätigt werden. Für gute Bewertungen des Lenkradmoments um die Mittellage ist eine hohe Lenkungssteifigkeit bei 0,4, 0,7 und 1,0 Hz erforderlich.

### **Mittengefühl**

Aus dem Weave-Test wird deutlich, dass für gutes Mittengefühl ebenfalls eine hohe Lenkungssteifigkeit vorauszusetzen ist. Auch hier sind die Korrelationen aus dem Frequenzgang analog. Die Aussage ist für 0,4, 0,7 und 1,0 Hz sowohl in der Messung als auch in der Quasi-Empfindung gültig. Beispielhaft ist dies in Abbildung 6.7 für 1,0 Hz dargestellt.

Eine neuartige Aussage ist durch das Empfindungsmodell möglich, wenn das Phasenminimum aus dem Bode-Diagramm des Lenkradmoments als Reaktion auf Lenkradwinkel analysiert wird. Der quasi-empfundene Kennwert muss für gutes Mittengefühl hoch sein. Daraus folgt, dass der Phasengang möglichst konstant bei niedriger Nacheilung auszulegen ist. Die reine Messung kann diesen Zusammenhang nicht wiedergeben. Zum Einen besteht eine hohe Streuung der Kennwerte um die Regressionsfunktion. Zum Anderen erscheint der Zusammenhang unplausibel. Eine niedrige Frequenzlage des Phasenminimums beschreibt eine ausgeprägte Abhängigkeit der Phasenlage schon von geringen

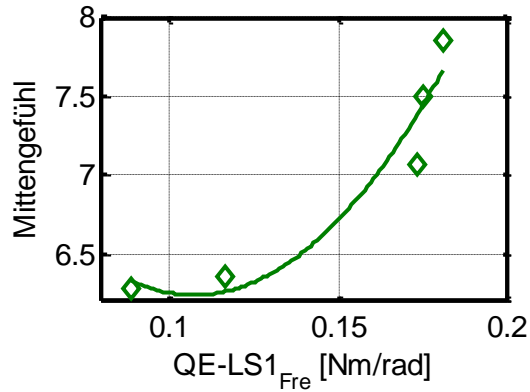


Abbildung 6.7: Mittengefühl über Lenkungssteifigkeit bei 1,0 Hz

Lenkfrequenzen. Dies führt zu einem schwer vorhersehbaren und damit ungünstigen Mittengefühl. Beide Zusammenhänge sind in Abbildung 6.8 dargestellt.

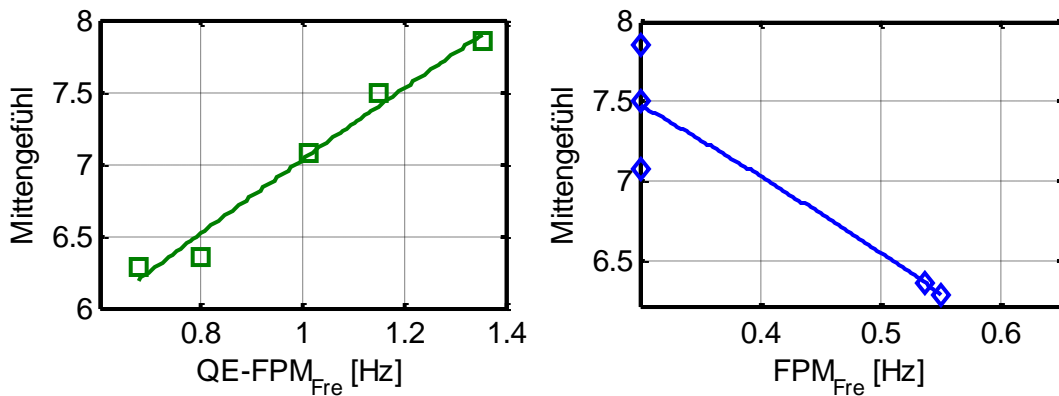


Abbildung 6.8: Mittengefühl über Frequenz des Phasenminimums des Lenkradmoments

### Lenkradmoment Anlenken

Der Aufbau des Lenkradmoments beim Anlenken aus der Geradeausfahrt ist maßgeblich für das transiente Lenkgefühl. Zur subjektiven Beurteilung werden unterschiedliche Lenkfrequenzen bis zur maximal aufzubringenden Lenkrate genutzt. Aus dem Frequenzgang sind die Lenkungssteifigkeiten von 0,3 bis 0,7 Hz mit dem Urteil verknüpft. Hohe Kennwerte sind für gute Wertungen erforderlich. Die Nutzung quasi-empfundener Signale steigert die Präzision der Korrelation.

Sowohl gemessene als auch quasi-empfundene Phasenwinkel bei 0,7 und 1,0 Hz des Lenkradmoments weisen eine intensive Kopplung mit dem Aufbau der Lenkkräfte beim Anlenken auf. Aus den Kennwerten des Empfindungsmodells ist zu folgern, dass die Minimierung der Phasennacheilung zu besseren Urteilen führt (siehe Abbildung 6.9). Das ist ein potenzielles Indiz dafür, dass eine quasi-empfundene Phase von 0° optimal ist. Für die Bestätigung dieser Hypothese sind jedoch weitere Untersuchungen erforderlich. Die Ableitung eines ursächlichen Zusammenhangs direkt aus der Messung ist eingeschränkt, da die annähernd lineare Regression ohne Anzeichen eines Idealwerts über die Grenze

von Nach- zu Vorseilung verläuft. Es erscheint jedoch fraglich, dass eine Erhöhung der Vorphase des Lenkradmoments gegenüber dem Winkel ohne Optimum verlaufen kann.

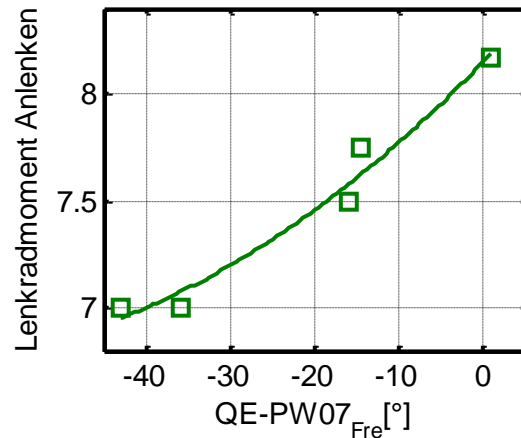


Abbildung 6.9: Lenkradmoment Anlenken über Phasenwinkel bei 0,7Hz

## Ansprechen

Das querdynamische Ansprechen aus der Geradeausfahrt ist wesentlich für agiles Handling. Stationäre Kennwerte weisen keine signifikanten Korrelationen mit dem Urteil auf, da diese Fahrzeugeigenschaft vor allem bei schnellen, hochfrequenten Lenkbewegungen beurteilt wird. Für gute Wertungen ist eine hohe Giereigenfrequenz notwendig. Der Zusammenhang ist für inertielle Messung und quasi-empfundene Signale gültig. Die Berücksichtigung menschlicher Sensordynamik steigert jedoch die Präzision. Der Zusammenhang ist in Abbildung 6.10 dargestellt. Analoge Aussagen sind aus dem Phasenwinkel des Lenkradmoments bei 1Hz zu erhalten.

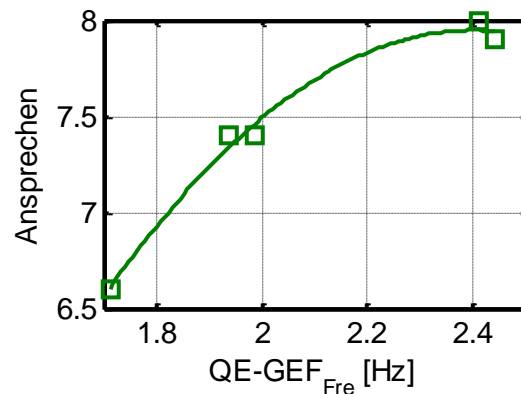


Abbildung 6.10: Ansprechen über Giereigenfrequenz

Der mittlere Amplitudenabfall des Lenkradmoments zwischen 0,7 und 1,0Hz ist ebenfalls signifikant mit dem Subjektivurteil korreliert. Ein möglichst geringer Gradient ist gleichbedeutend mit einem bis in hohe Lenkfrequenzen konstantem Maß an Lenkungssteifigkeit.

Die Bewertung des Ansprechens ist also keine ausschließliche Frage der Fahrzeugreaktion, sondern setzt ebenfalls ein ausreichendes Gefühl für die Lenkungsdosierung voraus. In Abbildung 6.11 sind die Korrelationen für Messung und Quasi-Empfindung aufgetragen. Deutlich ist, dass durch die Modellierung menschlicher Sensorik präzise zwischen den Wertungen 7,5 und 8,0 unterschieden werden kann. Die Genauigkeit gemessener Kennwerte ist dafür nicht ausreichend.

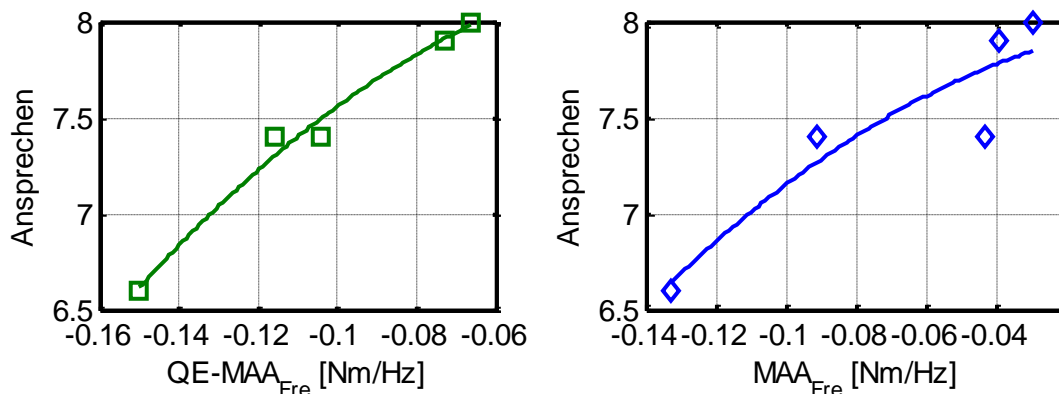


Abbildung 6.11: Anspreichen über mittlerem Amplitudenabfall des Lenkradmoments

## Lenkungsstöbigkeit

Lenkungsstöbigkeit beschreibt die Fähigkeit von Lenksystemen, Schwingungen von Einzelhindernissen zu isolieren. Aus Messungen sind bisher keine aussagekräftigen Korrelationen bekannt. Dies kann daraus resultieren, dass mit üblichen Fahrverhaltenstests keine definierten Vertikalstörungen angeregt und gemessen werden. Insofern ist das Fehlen klarer Zusammenhänge zu diesem Urteil eventuell auf ungünstige Testbedingungen zurückzuführen.

Die Integration menschlicher Sensorikeigenschaften ermöglicht die Identifikation einer plausiblen und signifikanten Abhängigkeit der Beurteilung vom Betrag des Phasenminimums des Lenkradmoments. Dies ist in Abbildung 6.12 illustriert. Für gute Lenkungsstöbigkeiten ist folglich ein kleiner minimaler Phasenbetrag anzustreben. Dies ist vor allem dadurch plausibel, dass das Phasenminimum bei allen untersuchten Fahrzeugen im hochfrequenten Bereich von etwa 1,5 Hz liegt. Derartig hohe Lenkfrequenzen werden in der Regel nur durch Fahrbahneinflüsse und nicht durch den Fahrer angeregt. Die Aussagen aus der Messung sind für diesen Kennwert nicht ausreichend präzise. Zum Einen weist der Verlauf bei quadratischer Approximation ein Minimum auf. Bei linearer Approximation ergibt sich ein zu geringes Bestimmtheitsmaß. Zum Anderen ist die Spreizung der Kennwerte zwischen den Wertungen von 7,5 und 9 sehr gering.

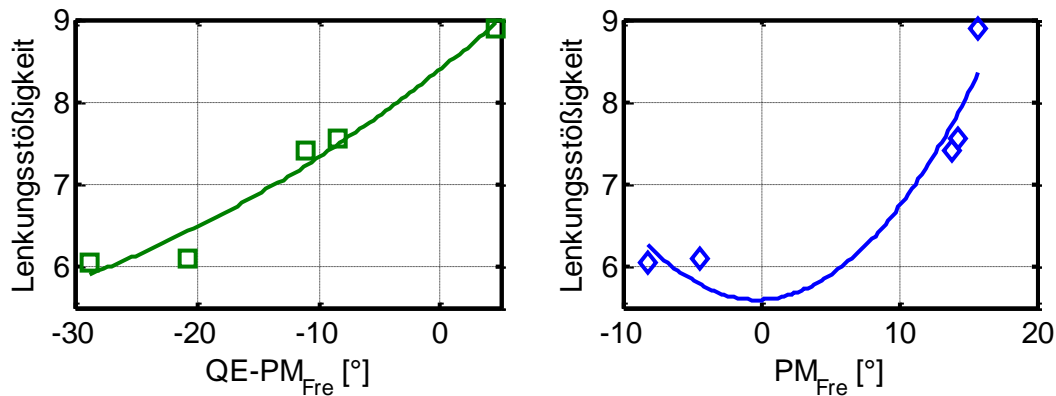


Abbildung 6.12: Lenkungsstößigkeit über Phasenminimum des Lenkradmoments

Trotz des deutlichen Zusammenhangs ist von weiteren Einflussfaktoren für das Kriterium auszugehen. Diese Kennwerte sind jedoch im Frequenzbereich über 2Hz zu vermuten. Um Lenkungsstößigkeit detailliert zu objektivieren, sind zusätzliche Untersuchungen erforderlich.

### Lenkradwinkelbedarf

Der Lenkradwinkelbedarf ist aus dem Frequenzgang sowohl mit Messungen als auch durch Quasi-Empfindung zu objektivieren. Eindeutige Zusammenhänge weisen die Verläufe der Verstärkungsfaktoren von Querschleunigung und Giergeschwindigkeit auf. Die zur Auswertung relevanten Lenkfrequenzen sind 0,3 und 0,7Hz. Es ist also erforderlich, im nieder- bis mittelfrequenten Anregungsspektrum möglichst hohe Fahrzeugreaktionen zu erreichen. Für die Querschleunigung weist auch die Verstärkung bei 1Hz eine deutliche Korrelation auf. Es ist zu erwarten, dass Fahrzeuge ab einer Grenzverstärkung als zu nervös eingestuft werden. Keines der in dieser Untersuchung vermessenen Fahrzeuge weist dieses Verhalten auf. Präzisere Aussagen zum Lenkradwinkelbedarf ermöglicht der Lenkradwinkelsprung, dessen Ergebnisse nachfolgend beschrieben sind.

### 6.1.3 Lenkradwinkelsprung

Der Lenkradwinkelsprung als Manöver zur Abschätzung des transienten Fahrverhaltens weist nach dem aktuellen Stand des Wissens verhältnismäßig geringe Korrelationen zu Subjektivurteilen auf. Einerseits ist dies in zu intensiver Anregung begründet. Lenkradwinkelgeschwindigkeiten von ungefähr  $300^\circ/s$  sind im Vergleich zu Kunden- und Testfahrten bei Weitem zu hoch. Andererseits verfügen die anderen Manöver vor allem unter Berücksichtigung des Lenkradmoments über aussagekräftige Regressionen. Die Kraftniveaus beim Lenkradwinkelsprung entziehen sich durch die Nutzung von Lenkmaschinen oder Anschlägen jedoch einer sinnvollen Auswertung. Die geringe Zahl bekannter Relationen aus dem Lenkradwinkelsprung ist nach den Erkenntnissen dieser Arbeit also vor allem in der Vernachlässigung des Lenkradmoments begründet.

Dennoch können Objektivierungszusammenhänge für zwei Kriterien ermittelt werden. Ansprechen aus der Mittellage und Lenkradwinkelbedarf eignen sich zur Beurteilung.

## Ansprechen

Das Ansprechen der Fahrzeugreaktion auf Lenkradwinkeleingaben kann mit dem Lenkradwinkelsprung trotz der intensiven Anregung untersucht werden. Die Messung ist dafür grundsätzlich geeignet, weist jedoch eine geringere Aussagepräzision auf. In Abbildung 6.13 sind die Verläufe der Subjektivbewertung über der Antwortzeit des Giergeschwindigkeitsmaximums dargestellt. Der Trend zu besseren Bewertungen bei kürzerer Antwortzeit des Giermaximums ist bei beiden Diagrammen identisch. Die Genauigkeit der Messung ist jedoch geringer. Die Verläufe deuten ein Optimum an. Daraus folgt, dass möglichst geringe Antwortzeiten nicht immer zu einer guten Beurteilung führen. Dies wird bereits in vorangehenden Untersuchungen vermutet. Eine Begründung für dieses Phänomen wird im Folgenden durch das Empfindungsmodell abgeleitet.

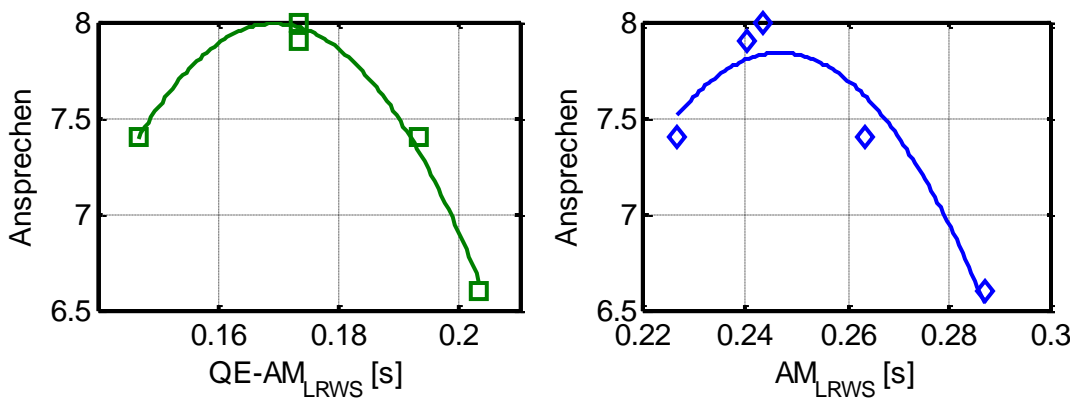


Abbildung 6.13: Ansprechen über Antwortzeit des Giergeschwindigkeitsmaximums

Die Berücksichtigung dynamischer Effekte menschlicher Sensorik ermöglicht die Berechnung eines neuartigen Kennwerts. Aus der Messung wird mit der Überschwingweite eine beschreibende Größe ermittelt, die das Maximum eines Zeitverlaufs in Bezug zum Stationärwert setzt. Im quasi-empfundene Zeitsignal tritt nach einem Gierüberschwingen jedoch ein im Vergleich zu gemessenen Größen bei Weitem ausgeprägteres Minimum auf. Das quasi-empfundene Überschwingen wird als Giergeschwindigkeitsdifferenz der maximalen zur minimalen Gierrate nach der Anregung am Lenkrad definiert. Dessen Korrelation mit dem Ansprechenverhalten ist in Abbildung 6.14 illustriert.

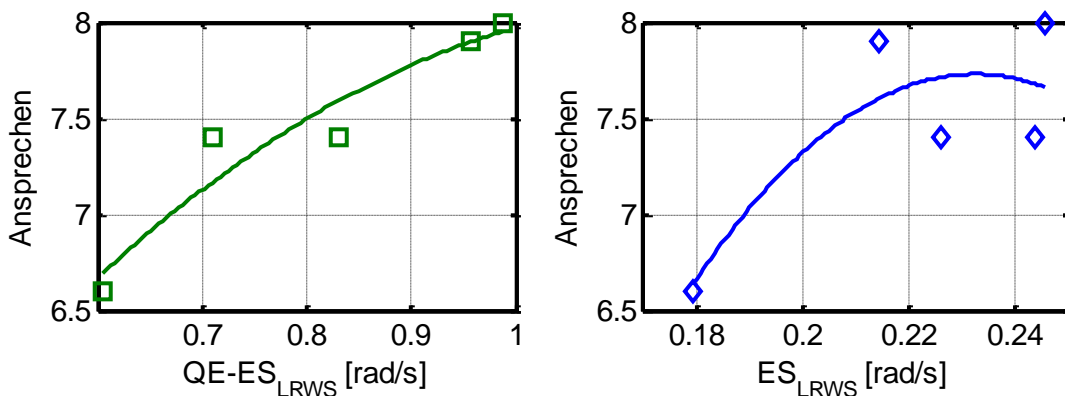


Abbildung 6.14: Ansprechen über Überschwingweite



Es ist ersichtlich, dass gutes Ansprechen mit möglichst großem quasi-empfundene Überschwängen verknüpft ist. Aus Abschnitt 4.3 wird deutlich, dass dies im Wesentlichen auf eine agile Reaktion der Gierbeschleunigung auf Lenkradeingaben zurückzuführen ist. Bemerkenswert ist die Unsicherheit der Aussage bei den Fahrzeugen mit der Wertung von etwa 7,5. Diese sind in Abbildung 6.13 jeweils links und rechts vom Optimum angeordnet. Das Fahrzeug mit höherem empfundenen Überschwängen weist eine kleinere Antwortzeit der maximalen Giergeschwindigkeit auf. Bei dem anderen verhält es sich umgekehrt. Daraus lässt sich folgern, dass beide Größen zur Beurteilung in Kombination zu betrachten sind.

Weitere stabile Korrelationen sind aus den 25 und 50% Antwortzeiten zu ermitteln. Die Aussagen aus der quasi-empfundene Betrachtung decken sich, abgesehen von der Präzisionssteigerung. Für gute Wertungen beim Ansprechen sind die Zeitwerte jeweils bis zu einem Grenzwert zu minimieren. Das Fahrzeug, dessen Reaktion in Abbildung 6.13 als zu spontan eingestuft wird, zeigt auch in diesen Zusammenhängen, dass zu schnelles Ansprechen ebenfalls nicht optimal ist. Die reine Messung bildet diesen Aspekt ungenauer ab.

### Lenkradwinkelbedarf

Hinsichtlich des Lenkradwinkelbedarfs zeigt die Berücksichtigung von Empfindungseffekten sowohl in Weave-Tests als auch im Frequenzgang keine Vorteile. Dies ist darauf zurückzuführen, dass vor allem Stationärwerte eindeutige und aussagekräftige Zusammenhänge mit den Subjektivbewertungen aufweisen. Vor diesem Hintergrund erscheint es verständlich, dass mit dem Eigenlenkgradienten ein eindeutiges Kriterium für stationäres Lenkverhalten bereits etabliert und anerkannt ist. Für Bewertungen ohne transiente Phänomene ist die Integration menschlicher Sensorikeigenschaften nicht erforderlich.

Der Lenkradwinkelbedarf von Fahrzeugen kann mit den Verstärkungsfaktoren der Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung mit ausreichend hoher Genauigkeit objektiviert werden. Aus Abbildung 6.15 wird deutlich, dass keine weitere Präzisionssteigerung notwendig ist. Hohe Kennwerte sind gleichbedeutend mit stimmigem Lenkradwinkelbedarf und handlichem Fahrverhalten. Das Kriterium ist jedoch immer als Kompromiss zur ausreichenden Fahrstabilität bei hohen Geschwindigkeiten auszulegen.

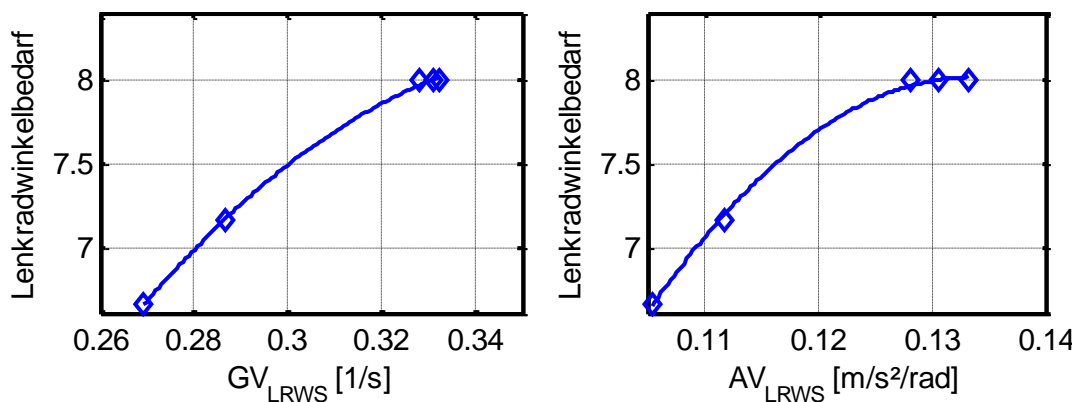


Abbildung 6.15: Lenkradwinkelbedarf über stationären Verstärkungsfaktoren

## 6.2 Objektivierungsergebnisse mit dem Lenkradbetätigungsmodell

Im vorangegangenen Abschnitt sind Korrelationen zwischen Kennwerten aus Open-Loop-Manövern und Subjektivbewertungen beschrieben. In diesem Kapitel werden die Parameter des Lenkradbetätigungsmodells auf Relationen zu Fahrdynamikgrößen, deren Interpretation hinsichtlich Subjektivbewertungen bekannt ist, untersucht. Dies ermöglicht die objektive Beurteilung des Fahrverhaltens auch aus Closed-Loop-Versuchen. Im Weiteren wird zwischen dem Modell zur Rekonstruktion des Lenkradwinkels und des -moments unterschieden.

### 6.2.1 Lenkradwinkelmodell

Durch die Rekonstruktion des Lenkradwinkels aus Closed-Loop-Messungen können die Kriterien Eigenlenkverhalten, Lenkradwinkelbedarf, Agilität und Zielgenauigkeit objektiv bewertet werden. Nachfolgend sind die dafür erforderlichen Korrelationen fahrdynamischer Kennwerte mit Parametern des Lenkradbetätigungsmodells beschrieben. Die Analysen finden auf Basis eines validen Mehrkörpersimulationsmodells statt. Die Fahrversuche erfolgen entweder im Open-Loop oder im geschlossenen Regelkreis mit einem kommerziellen Fahrermodell.

#### Eigenlenkverhalten

Das Eigenlenkverhalten ist durch die stationäre Kreisfahrt und den daraus ableitbaren Eigenlenkgradienten ausreichend beschrieben. Nachteilig ist, dass der Versuch auf einem Prüfgelände erfolgen muss. Mit dem Handling Monitor ist es möglich, über den Parameter  $I_{fern}$  auch aus Closed-Loop-Messungen das Eigenlenkverhalten zu beurteilen. Abbildung 6.16 stellt die Korrelation beider Größen dar.

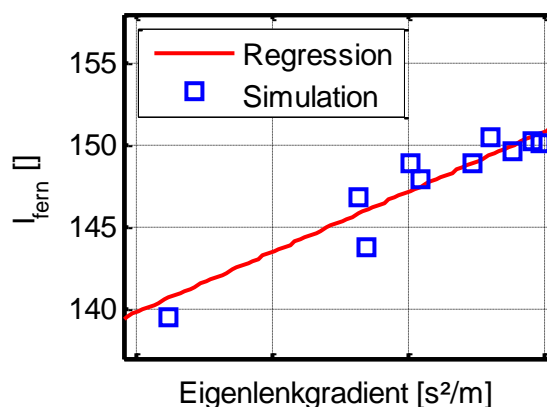


Abbildung 6.16: Korrelation Eigenlenkverhalten und Lenkradbetätigungsmodell

### Lenkradwinkelbedarf

Wie in Abschnitt 6.1 erläutert, ist der Lenkradwinkelbedarf durch stationäre Verstärkungsfaktoren der Giergeschwindigkeit und der Querbewegung zu objektivieren. Diese Größen sind aus verschiedenen standardisierten Fahrmanövern ermittelbar, beispielsweise aus dem Lenkradwinkelsprung. Nachteilig ist wiederum, dass ein Prüfgelände und gegebenenfalls ein Lenkroboter notwendig sind. Mit dem Parameter  $k_{p,fern}$  kann der Lenkradwinkelbedarf aus Messungen im geschlossenen Regelkreis bestimmt werden. Die Korrelation der Kennwerte ist in Abbildung 6.17 illustriert.

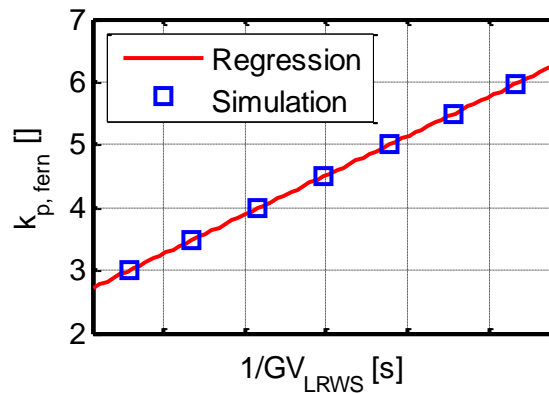


Abbildung 6.17: Korrelation Lenkradwinkelbedarf und Lenkradbetätigungsmodell

### Agilität

Der Agilitätsbegriff steht in engem Zusammenhang mit dem Ansprechverhalten. Die Bewertung erfolgt allerdings nicht durch Anlenken auf Geraden, sondern durch Einlenken in Kurven. Dennoch sind die Ansprechzeiten der Giergeschwindigkeits- und Querbewegungsreaktion auf Lenkradwinkleingaben für die Beurteilung signifikant. Diese können aus dem Lenkradwinkelsprung auf Prüfgeländen ermittelt werden. Abbildung 6.18 verdeutlicht, dass analoge Aussagen auch mit dem Parameter  $k_{d,nah}$  gewonnen werden.

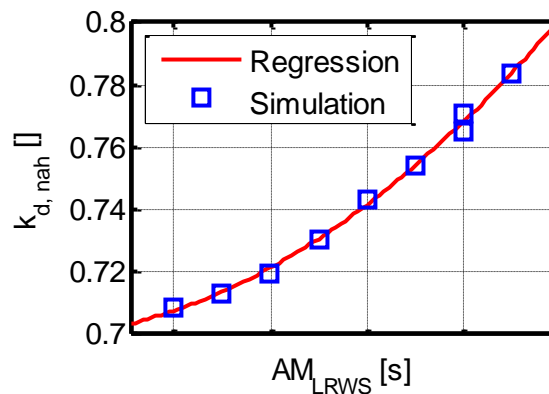


Abbildung 6.18: Korrelation Agilität und Lenkradbetätigungsmodell

## Zielgenauigkeit

Für die Zielgenauigkeit existieren bisher keine eindeutigen Kenngrößen. Dies liegt vor allem daran, dass das Kriterium ausschließlich im geschlossenen Regelkreis untersucht werden kann, da der Aufwand zur Kurshaltung bewertet wird. Fahrzeuge mit hoher Zielgenauigkeit erfordern geringe Lenkkorrekturen und ermöglichen das präzise Einlenken in Kurven. Im Rahmen dieser Arbeit stellen sich Elastizitäten im Lenkungsstrang als wesentliche Größen heraus, die im Zusammenhang mit der Beurteilung der Zielgenauigkeit stehen. Sind diese zu hoch, wird mit relativ großem Überschwingen des Lenkradwinkels in Kurven eingefahren. Derartige Effekte werden als störend empfunden. In Abbildung 6.19 ist dargestellt, dass die Vorausschauzeit  $t_{fern}$  mit dieser Kenngröße korreliert.

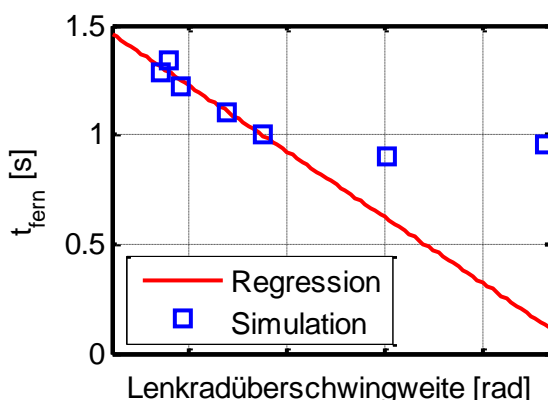


Abbildung 6.19: Korrelation Zielgenauigkeit und Lenkradbetätigungsmodell

Die ersten fünf Werte weisen eine lineare Regression des übermäßigen Einlenkens mit dem Parameter  $t_{fern}$  auf. Die Variation der Lenkungselastizität ist größer als bei üblichen Serienfahrzeugen. Die weiteren Daten entstammen Versuchen mit extrem weichen Lenkungen. Diese sind durch das vorgestellte Verfahren nicht mehr mit dieser Relation zu bewerten. Derartige Fälle treten jedoch nicht bei regulären Fahrzeugen auf.

Dieser Zusammenhang ermöglicht die Beurteilung der Zielgenauigkeit im geschlossenen Regelkreis. Zudem kann eine anschauliche Interpretation des Kriteriums erfolgen: Die Präzision des Lenkvorgangs steigt mit sinkender Lenkungselastizität. Die verringerte Notwendigkeit zu Kurskorrekturen zeigt sich im Lenkradbetätigungsmodell durch eine höhere Vorausschauzeit. Es erscheint plausibel, dass es zielgenaue Fahrzeuge ermöglichen, den Blick in Kurven weiter voraus zu wenden. Dies führt zu entspannter, präziser Fahrweise. In dieser Kategorie weniger gute Fahrzeuge erfordern schnellere Regelaktivitäten zur Spurhaltung. Dazu ist es nötig, Informationen in kürzerer Entfernung vor dem Fahrzeug zu nutzen. Dies stellt jedoch höhere Anforderungen an den Fahrer und wird hinsichtlich der Zielgenauigkeit schlechter beurteilt.

### 6.2.2 Lenkradmomentmodell

Durch die Rekonstruktion des Lenkradmoments aus Closed-Loop-Messungen kann auf Fahreigenschaften geschlossen werden. Dies setzt jedoch sehr störungsarme Messdaten voraus. In den meisten Fällen werden jedoch Kanaldeckel, Streckenrandsteine oder

andere Einzelhindernisse überfahren. Diese werden von Lenkungen nicht vollständig isoliert und beeinflussen folglich die ermittelte Lenkkraft. Um die Daten dennoch für die Beurteilung nutzen zu können, ist eine Filterung mit niedriger Eckfrequenz erforderlich. Dadurch werden alle hochfrequenten Stöße und Vibrationen aus dem Signal eliminiert. Dies ermöglicht die Rekonstruktion der Bediengröße.

Der wesentliche Nachteil dieser Vorgehensweise ist, dass dynamische Eigenschaften der Lenkung, die das Lenkradmoment betreffen, nicht analysiert und bewertet werden können. Letztlich eignet sich ausschließlich das Kriterium Lenkradmoment in Kurven für die Objektivierung mit dem Verfahren. Open-Loop-Tests sind bei allen transienten Beurteilungskategorien deutlich präziser.

### Lenkradmoment Kurvenfahrt

Durch die erforderliche Filterung ist lediglich das quasi-stationäre Haltemoment für die Auswertung mit dem Lenkradbetätigungsmodell zugänglich. Dessen Relation zur Fahrzeugreaktion ist jedoch mit dem Kriterium des Lenkradmoments in Kurven verknüpft. Die Korrelation des Parameters  $k_{p, nah}$  mit dieser Kenngröße ist in Abbildung 6.20 dargestellt. Dessen Aussagen sind die letzte im Handling Monitor integrierte Bewertungsfunktion.

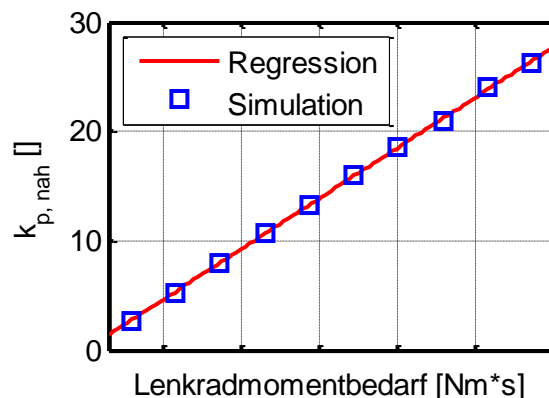


Abbildung 6.20: Korrelation Lenkradmoment Kurvenfahrt und Lenkradbetätigungsmodell

## 6.3 Evaluierung in Realversuch und Simulation

Die Evaluierung des Handling Monitors in Realfahrt erfolgt mit unterschiedlichen Vergleichsfahrzeugen. Dazu werden beispielhaft einige Bewertungsergebnisse des Objektivierungswerkzeugs beschrieben. Die nachfolgenden Abschnitte beschränken sich jedoch auf ein Validierungsfahrzeug der Mittelklasse, an dem Modifikationen vorgenommen werden. Die erste Auswertung bezieht sich auf Versuche im Open-Loop. Die zweite nutzt Messdaten der Nordschleife des Nürburgrings. Im dritten Teilkapitel wird die Einsetzbarkeit auch in virtuellen Abstimmungsfahrten nachgewiesen.

### 6.3.1 Standardisierte Fahrversuche

Die Fahrversuche für diesen Teil der Evaluierung werden auf einem Prüfgelände durchgeführt. Das verwendete Fahrzeug weist, anders als die in Kapitel 6.1 analysierten eine sportliche Fahrwerkabstimmung und eine Überlagerungslenkung an der Vorderachse auf. Abbildung 6.21 fasst die berechneten Urteile für drei Konfigurationen zusammen. Diese decken sich mit den Aussagen des Versuchsfahrers. Neben dem Serienzustand (Variante 1) werden Winterreifen montiert (Variante 2). In Konfiguration 3 wird untersucht, ob die Einflüsse der weicheren Gummimischung durch eine Spurverbreiterung an der Vorderachse kompensierbar sind.

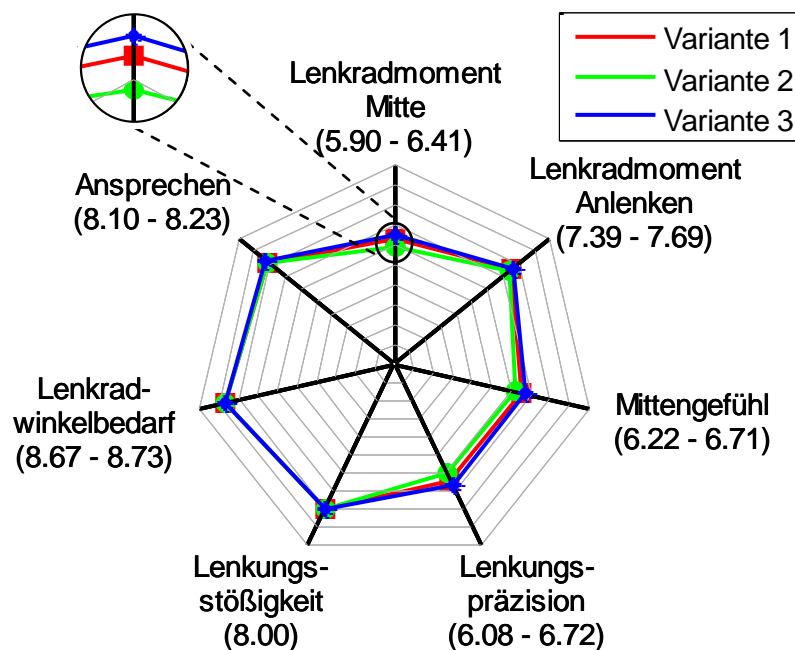


Abbildung 6.21: Evaluierung des Empfindungsmodells in Realfahrt

Zunächst fallen allgemeine Trends in der Bewertung auf, die unabhängig von den Variationen sind. Die Beurteilungen des Lenkradmoments in Mittellage, des Mittengefühls und der Lenkungspräzision sind jeweils schlechter als 8. Wie in Kapitel 6.21 beschrieben, sind diese Kriterien eng mit der Lenkungssteifigkeit verknüpft. Durch die Überlagerungslenkung entstehen Abstützmomente des Aktuators am Lenkrad. Diese führen zu einer negativen Veränderung des empfundenen Lenkradmoments. Daraus resultieren geringere Bewertungen, die in ähnlicher Weise für andere Fahrzeuge mit derartigen Lenksystemen zutreffen. Die Kompensation des zusätzlichen Lenkradmoments ist bisher nicht vollständig gelungen. Die Bewertung des Anlenkmoments ist davon nicht betroffen. Eine wesentlich bessere Beurteilung wird jedoch beim Lenkradwinkelbedarf erreicht. Die aktiv variierte Lenkübersetzung führt bis zu Fahrgeschwindigkeiten von etwa  $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  zu handlicherem Fahrverhalten. Die Lenkungsstößigkeit kann wegen fehlender Messdaten im relevanten Frequenzbereich nicht untersucht werden und wird stellvertretend für alle Konfigurationen auf die Note 8 festgelegt.

Die berechnete Differenzierung zwischen den Modifikationen erfolgt ebenfalls analog zu den Subjektivbewertungen. Der negative Einfluss der Winterreifen auf das Ansprechen ist

gering, da die Reifendimension der Sommerbereifung entspricht. Die weichere Gummimischung führt zu kleineren Lenkungssteifigkeiten und dadurch zu schlechteren Bewertungen für alle Urteile, die auf dem Lenkradmoment in Mittenlage aufbauen. Durch die Spurverbreiterung kann dies aber sogar überkompensiert werden. Das Anlenkmoment ist, ebenso wie der Lenkradwinkelbedarf, kaum von den Modifikationen beeinträchtigt.

Das Verfahren eignet sich also für die Untersuchung mit Open-Loop-Manövern. Grenzen bestehen durch die Beschränkung des Trainings auf die Mittelklasse. Beispielsweise werden Fahrzeuge der komfortablen Oberklasse auf dem aktuellen Stand des Algorithmus zu schlecht bewertet. Um deren geringere Dynamik zu berücksichtigen, sind weitere Untersuchungen in anderen Segmenten erforderlich.

### 6.3.2 Abstimmungsfahrt auf der Nordschleife

Die Nordschleife des Nürburgrings ist ein wesentlicher Bestandteil der Fahrdynamikabstimmung. Die Strecke stellt hohe Anforderungen an das Fahrwerk und ist daher besonders geeignet, um das Fahrverhalten abschließend zu beurteilen und zu optimieren. Wegen der hohen Relevanz von Versuchen auf der Nordschleife stellt ein dort einsetzbares Objektivierungswerkzeug eine wesentliche Verbesserung des Entwicklungsablaufs dar.

Die insgesamt 73 Kurven weisen stark unterschiedliche Charakteristika auf. Daher eignen sich nicht alle für die Beurteilung mit dem Lenkradbetätigungsmodell. Besonders Abschnitte, die mit niedrigen Querschleunigungen angefahren werden, sind sehr zuverlässig bei der Kennwertermittlung. Schnelle Wechselkurven erhöhen für spätere Lenkervorgänge meist die Ungenauigkeit der Messgrößen. Diese sind daher nicht optimal zur Analyse geeignet. Tabelle 6.1<sup>26</sup> listet diejenigen Kurven auf, die in dieser Arbeit zur Fahrdynamikbewertung genutzt werden. Abbildung 6.22 stellt die Gesamtstrecke mit den relevanten Abschnitten dar.



Abbildung 6.22: Streckenübersicht der Nordschleife

<sup>26</sup> Kurven mit besonders genauen Aussagen erhalten die Wertung +. Geeignete Kurven werden mit o beurteilt. Abschnitte mit - sind unpräzise auszuwerten.

Kurve	Lenkradmoment	Lenkradwinkel
Hatzenbach	0	+
Flugplatz	+	0
Aremberg	+	-
Adenauer Forst	+	+
Kallenhard	+	+
Wehrseifen	+	+
Ex-Mühle	-	+
Bergwerk	+	0
Karussell	+	0
Hohe Acht	0	+
Eschbach	+	+
Brünnchen	-	+
Schwalbenschwanz	+	0

Tabelle 6.1: Relevante Kurven der Nordschleife

Das Versuchsfahrzeug wird während der Untersuchung aus Sicherheitsgründen nicht durch Umbauten modifiziert. Die Leistungsfähigkeit des Handling Monitors wird vielmehr am Reifenverschleiß eines Testtags nachgewiesen. Durch die hohe Beanspruchung auf der Nordschleife stellt sich insbesondere an der Vorderachse starker Abrieb ein. Dies führt zum Einen zu ungünstigerem Eigenlenkverhalten, da sich die Griffigkeit an der Vorderachse reduziert. Dadurch sinkt gleichzeitig das Lenkradmoment in Kurven. Zudem wird auch die Anlenkagilität beeinflusst, da der Seitenkraftaufbau weniger spontan erfolgt. Diese Veränderungen sind subjektiv von erfahrenen Beobachtern spürbar und führen zu schlechteren Subjektivbewertungen in den genannten Kriterien. Mit dem entwickelten Objektivierungswerkzeug ist es möglich, diese Effekte messtechnisch zu erfassen und objektiv auszuwerten. Anhand dreier Runden mit unterschiedlich fortgeschrittenem Reifenverschleiß stellt Abbildung 6.23 die berechneten Subjektivbewertungen<sup>27</sup> dar. Diese decken sich mit der Einschätzung des Versuchsfahrers.

Die genannten Subjektivbewertungen werden valide berechnet. In Konsistenz zu den Fahreraussagen sind die anderen ausgegebenen Urteile konstant. Der Handling Monitor ist folglich zur Fahrdynamikbeurteilung auf der Nordschleife geeignet. Im nächsten Abschnitt wird erläutert, dass dies ebenfalls für virtuelle Versuche gilt.

### 6.3.3 Virtuelle Abstimmungsfahrt auf der Nordschleife

Aktuelle Markterfordernisse bewirken eine kontinuierliche Verkürzung der Entwicklungszeiten. Dies führt zu einer steigenden Relevanz virtueller Untersuchungen. Bisher werden überwiegend standardisierte Fahrmanöver simuliert, da deren Interpretation analog

<sup>27</sup> Variante 1 ist der Ausgangszustand mit eingefahrenen Reifen. Bei Variante 2 ist bereits Reifenverschleiß spürbar. Der letzte Fall stellt die abschließende Runde mit diesem Reifensatz dar. Der Abrieb ist besonders an den Seitenflanken erkennbar, dennoch sind die Reifen noch nicht vollständig verschlissen und entsprechen ohne Einschränkung der Straßenverkehrsordnung.



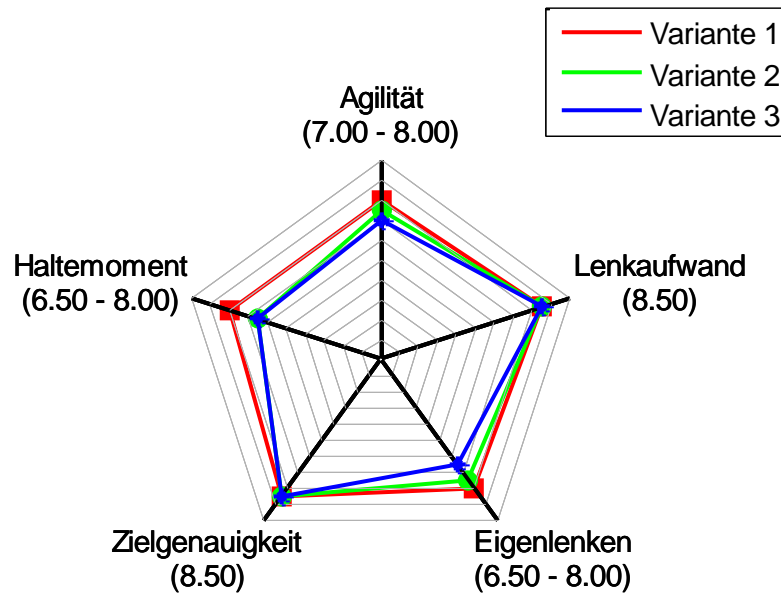


Abbildung 6.23: Evaluierung des Lenkradbetätigungsmodells in Realfahrt

zum Realversuch möglich ist. Mit dem Handling Monitor sind auch virtuelle Closed-Loop-Fahrten zur Fahrdynamikbewertung nutzbar.

Als Beispiel wird in dieser Arbeit ein virtuelles Abbild der Nordschleife erzeugt. Dazu wird die Ideallinie der Strecke dreidimensional erfasst und in eine Simulationsumgebung übertragen. Anschließend fährt ein kommerzielles Fahrermodell mit verschiedenen Fahrzeugvarianten jeweils eine Runde. Die auf diese Weise aufgezeichneten Fahrmanöver sind danach die Basis der Analysen des Handling Monitors. Abbildung 6.24 stellt beispielhaft die Bewertungen von drei verschiedenen Applikationsständen aktiver Stabilisatoren dar.

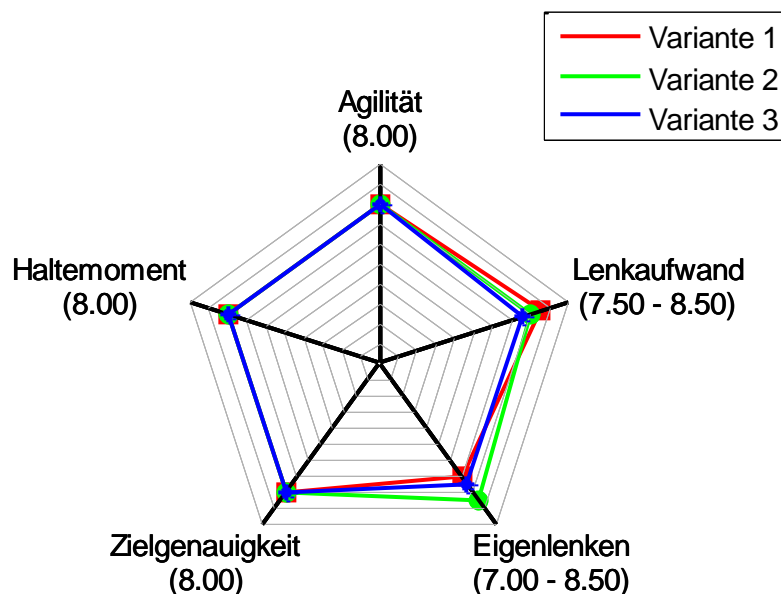


Abbildung 6.24: Evaluierung des Lenkradbetätigungsmodells in Simulation

In den dargestellten Varianten sind analoge Stabilisatorregler zur Wankwinkelminimierung verbaut. Variante 1 stellt mehr Zusatzmoment an der Hinterachse, Konfiguration 3 an der Vorderachse. Modifikation 2 beinhaltet eine gleichmäßige Kraftverteilung. Abbildung 6.24 verdeutlicht, dass durch die intensivere Ansteuerung der Hinterachse ein geringerer Lenkaufwand entsteht. Umgekehrt ist Fahrzeug 3 in diesem Kriterium ungünstiger. Es bestehen aber auch Wechselwirkungen mit dem Eigenlenkverhalten. Die Konfigurationen mit ungleichen Kraftverteilungen werden schlechter bewertet. Dies liegt bei Variante 1 an der zu geringen Untersteuertendenz, die Kunden den Grenzbereich schwer erkennen lässt. Andererseits wird auch das zu intensive Eigenlenken von Modifikation 3 ebenfalls als weniger gut eingestuft. Die übrigen Kriterien sind von den aktiven Stabilisatoren durch das Regelkonzept nicht beeinflusst.

Insgesamt zeigt dieses Beispiel, dass auch aktive Systeme mit dem Handling Monitor bewertet werden können. Zudem ist das Werkzeug auch in Simulationen einsetzbar. Damit eignet es sich auch für Fragestellungen früher Entwicklungsphasen. In Kombination mit der Aussagekraft in Realfahrt wird deutlich, dass mit diesem Verfahren die durchgängige Unterstützung des gesamten Entwicklungsprozess möglich ist.

### 6.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel beschreibt die Ergebnisse des fahrerbasierten Objektivierungswerkzeugs. Sehr präzise Aussagen werden aus den Open-Loop-Manövern Weave-Test und Frequenzgang gewonnen. Auch der Lenkradwinkelsprung ist in einigen Aspekten zur Objektivierung geeignet. Die Nutzung eines Modells menschlicher Empfindung ermöglicht die Berechnung quasi-empfundener Kennwerte. Dies führt für einen Großteil der Kriterien zu präziseren Regressionen als inertial gemessene Größen. Zudem sind einige Zusammenhänge erst auf diese Weise zu ermitteln. Aus Closed-Loop-Versuchen sind ebenfalls Subjektivbewertungen ableitbar. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchung fasst Tabelle 6.2<sup>28</sup> zusammen.

Diese Regressionen bilden die Grundlage der Bewertungsfunktionen des Handling Monitors. Dessen Leistungsfähigkeit wird in Szenarien des Realversuchs und in Simulationen evaluiert. Die Nutzung von Serienfahrzeugen zeigt die hohe Präzision der ermittelten Aussagen. Die Eignung des Ansatzes für Abstimmungsfahrten auf der Nordschleife des Nürburgrings stellt zudem einen neuartigen Anwendungsfall eines Objektivierungsverfahrens dar.

Die Ergebnisse sind abschließend der in Abschnitt 3.5 abgeleiteten Aufgabenstellung gegenüberzustellen. Das Bewertungsverfahren des Handling Monitors integriert Erkenntnisse des Stands der Technik, die besonders im Realversuch mit passiven Fahrzeugen sehr umfangreich sind. Darüber hinaus werden Verbesserungen hinsichtlich aktiver Systeme (E2, E6) und dem Einsatz in Simulationen (E4) erzielt.

Den methodischen Schwerpunkt bilden zum Einen Anforderungen an das Training des Algorithmus. Durch die Verwendung von Serienfahrzeugen kann das Bewertungsverfahren

---

<sup>28</sup> Werden durch die Berücksichtigung menschlicher Sensorik oder Lenkradbetätigung nur unwesentliche Korrelationsverbesserungen erreicht, erfolgt die Beurteilung o. Bei Präzisionssteigerung wird ein + vergeben. Werden vollständig neuartige Zusammenhänge ermöglicht, wird die Aussage mit ++ bewertet.

Subjektivkriterium	Manöver	Kennwert	Einfluss der Fahrer-eigenschaften
Lenkradmoment Mitte	Weave-Test	$LS_{Weave}$	0
		$LE_{Weave}$	+
Lenkradmoment Anlenken	Frequenzgang	$PW07_{Fre}$	+
		$PW1_{Fre}$	+
		$LS03_{Fre}$	+
		$LS07_{Fre}$	+
Lenkradmoment Kurvenfahrt	Closed-Loop	$k_{p,nah}$	+
Mittengefühl	Weave-Test	$LS_{Weave}$	0
		$LE_{Weave}$	+
	Frequenzgang	$FPM_{Fre}$	++
Lenkungspräzision	Weave-Test	$LS_{Weave}$	0
		$LE_{Weave}$	0
		$GTB_{Weave}$	++
Lenkungsstöbigkeit	Frequenzgang	$PM_{Fre}$	++
Eigenlenkverhalten	Closed-Loop	$I_{fern}$	+
Lenkradwinkelbedarf	Lenkradwinkelsprung	$GV_{LRWS}$	0
		$AV_{LRWS}$	0
	Closed-Loop	$k_{p,fern}$	+
Ansprechen	Frequenzgang	$GEF_{Fre}$	+
		$PW1_{Fre}$	+
		$MAA_{Fre}$	+
	Lenkradwinkelsprung	$AM_{LRWS}$	+
		$AZ025_{LRWS}$	+
		$AZ050_{LRWS}$	+
		$ES_{LRWS}$	++
Agilität	Closed-Loop	$k_{d,nah}$	+
Zielgenauigkeit	Closed-Loop	$t_{fern}$	+

Tabelle 6.2: Objektivierte Zusammenhänge

mit einer relativ kleinen Stichprobe an Messdaten bedatet werden (A4). Die Identifikation von Optimalauslegungspunkten kann grundsätzlich die Indikation von erfolgreichem Einlernen (A5) ersetzen. Da viele Zusammenhänge dieser Untersuchung jedoch kein Optimum aufweisen, werden lediglich unwesentliche Verbesserungen erzielt. Zum Anderen bestehen Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Urteilsberechnung. Durch den modularen Aufbau (A9) und definierte Schnittstellen zu bestehenden Prozessen (A10) eignet sich der Handling Monitor als durchgängiges Monitoring- und Benchmarkingwerkzeug (E7). Dies ermöglicht eine methodische Verbesserung der Fahrdynamikentwicklung.

Mit der Berücksichtigung von Empfindungs- und Lenkradbetätigungseinflüssen erfolgt die Nachbildung von Bestandteilen des Beurteilungsprozesses von Abstimmungsingenieuren. Dadurch wird eine Steigerung der Ursächlichkeit des Bewertungsverfahrens (A6) erreicht. Dieser Kausalitätsgewinn äußert sich in der höheren Präzision vieler Objektivierungszusammenhänge. Darüber hinaus werden einige Korrelationen identifiziert, die mit ausschließlicher Messung nicht zu ermitteln sind.



## 7 Abschließende Betrachtungen

### 7.1 Zusammenfassung

Herausforderungen aus einem agilen und komplexen Wettbewerbsumfeld, sich ändernden Kundenanforderungen sowie ökologischen Randbedingungen bedingen eine nachhaltige Effizienzsteigerung im automobilen Entwicklungsprozess. Dies gilt auch für Aspekte des Fahrwerks. Die vorherrschende Kombination unterschiedlicher Methoden in Realfahrt und Simulation kann von einem leistungsfähigen Objektivierungswerkzeug unterstützt werden. Die Nutzung eines solchen Verfahrens stellt deutliche Wettbewerbsvorteile in Aussicht.

Eingangs wird in dieser Arbeit mit einer ausführlichen Analyse bestehender Fahrdynamikabstimmungsverfahren und der Untersuchung bereits veröffentlichter Objektivierungsinstrumente ein Zielkorridor für das entwickelte Abstimmungswerkzeug ermittelt. Besonderer Bedarf besteht an der Kausalitätssteigerung berechneter Urteile, der Nutzung von kundenrelevanten Manövern und durchgängiger Einsetzbarkeit im gesamten Entwicklungsprozess.

Durch die Integration eines Modells menschlicher Empfindung wird daher ein wesentlicher Bestandteil des Fahrdynamikbeurteilungsvorgangs in den Objektivierungsprozess einbezogen. Die Bewertung erfolgt nicht direkt auf den von üblicher Messtechnik erfassten Größen. Statt dessen werden quasi-empfundene Signale zur Auswertung genutzt, die vom Empfindungsmodell aus den ermittelten Daten konventioneller Sensorik berechnet werden. Dadurch weisen die Zusammenhänge einen erhöhten Bezug zur Beurteilungsmethode von Abstimmungsingenieuren auf. Daraus resultiert eine gesteigerte Ursächlichkeit der Aussagen.

Einen zweiten Aspekt stellt ein Verfahren dar, das aus Closed-Loop-Messungen oder Simulationen aussagekräftige Kennwerte zur Fahrdynamikbeurteilung berechnet. Mit dem entwickelten Parametrierungsprozess für ein Lenkradbetätigungsmodell kann die Fahrstrategie des Fahrzeugführers konserviert werden. Dies ermöglicht die objektive Bewertung querdynamischer Eigenschaften, die analog zum subjektiven Abstimmungsverfahren in regulärer Kurvenfahrt erfolgt. Daher sind kundenrelevante Manöver in den Bewertungsprozess integrierbar.

Auf Basis dieser beiden Teilaspekte werden Korrelationen beschrieben, die Zusammenhänge zwischen Subjektivurteilen und Messungen herstellen. Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass die auf dem Empfindungsmodell aufbauenden Auswertungen, verglichen mit konventionellen Analysen, präzisere und teilweise vollständig neuartige Aussagen zur Gefallensfrage aufdecken. Durch die Nutzung von Closed-Loop-Daten ist es zudem möglich, Abstimmungsfahrten beispielsweise auf der Nordschleife des Nürburgrings als Grundlage zur Objektivierung zu nutzen. Beide Verfahren sind in einem Bewertungswerkzeug integriert, dessen Einsetzbarkeit prototypisch für unterschiedliche Versuche nachgewiesen wird. Wesentlich für das fahrerbasierte Objektivierungsinstrument ist die

äquivalente Einsetzbarkeit in Realfahrt und Simulation. Daraus resultieren universelle Nutzungsmöglichkeiten im gesamten Entwicklungsprozess.

### 7.2 Bewertung

Die erfolgten Auswertungen stellen einen neuartigen Beitrag zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke dar. Durch die partielle Nachbildung des Fahrdynamikbeurteilungsprozesses mit einem Modell menschlicher Empfindung wird eine Kausalitätssteigerung erreicht. Die konsequente Ausrichtung an bestehenden Prozessen und Werkzeugen der Automobilindustrie stellt zudem die Verwendung im gesamten Entwicklungsprozess sicher.

Darüber hinaus kann durch die parallele Integration von Open- und Closed-Loop-Tests ein Fokus auf kundenrelevante Szenarien gelegt werden. Insbesondere sind Auswertungen, die Abstimmungsfahrten des Realversuchs ähneln, in der Simulation darstellbar. Daher ist eine aussagekräftige Beurteilung bereits in frühen Phasen der Entwicklung möglich.

### 7.3 Ausblick

Das in dieser Arbeit umgesetzte Verfahren weist die Funktionalität exemplarisch für das Segment der Mittelklasse nach. Um es in einem Automobilkonzern zu etablieren, ist eine Erweiterung der Datenbasis erforderlich. Vor allem sind Fahrzeugklassenabhängigkeiten zu integrieren, um die in der Regel hohe Spreizung im Produktportfolio der Hersteller abbilden zu können. Zudem besteht weiterhin ein Bedarf an Kenngrößen, die erneuten Trainingsbedarf der Objektivierungsdatenbasis anzeigen.

Allgemein ist der momentane Kenntnisstand hinsichtlich der Objektivierung subjektiver Fahreindrücke als umfangreich zu bezeichnen. Weitergehende Ergebnisse stehen durch die Nutzung neuer, aktiver Fahrwerkkomponenten in Aussicht. Es ist jedoch zu erwarten, dass Objektivierungswerkzeuge auch in Zukunft keinen uneingeschränkten Ersatz für subjektive Abstimmungsfahrten darstellen. Vielmehr ist eine homogene Integration in die sich stetig weiterentwickelnde Kombination unterschiedlicher Methoden der Fahrdynamikentwicklung anzustreben.

## Literaturverzeichnis

- [1] BARTHENHEIER, T.; WINNER, H.: *Das persönliche Lenkgefühl*. Technische Universität Darmstadt, 2003.
- [2] BARTHENHEIER, T.: *Potenzial einer fahrertyp- und fahrsituationsabhängigen Lenkradmomentengestaltung*. Doktorarbeit, Technische Universität Darmstadt, 2007.
- [3] BIRBAUMER, N.; SCHMIDT, R.: *Biologische Psychologie*. Springer Verlag, 2006.
- [4] BISIMIS, E.; HELMS, H.: *System Fahrbahn-Kraftfahrzeug-Fahrer: Vorschläge für Forschungsthemen*. Technische Universität Braunschweig, 1977.
- [5] BREIMANN, L.: *Random Forests*. University of California, 2001.
- [6] BUBB, H.: *Ergonomie des Mensch-Maschine-Systems*. Habilitationsschrift, Technische Universität München, 1977.
- [7] BUBB, H.: *Systemergonomie*. In Ergonomie (Schmidtke, H.; Hanser Verlag), 1993.
- [8] BUBB, H.; BOLTE, U.: *Regelungstechnische Simulation der Schnittstelle Mensch-Maschine*. Zeitschrift für Arbeitswissenschaften, 1990.
- [9] CLARK, K.; FUJIMOTO, T.: *Automobilentwicklung mit System*. Campus Verlag, 1992.
- [10] CLARKE, A.: *Neuere Aspekte des vestibulo-okulären Reflexes*. Universitätsklinikum Benjamin Franklin Berlin, 1995.
- [11] COLE, D.: *Neuromuscular Dynamics and Steering Feel*. University of Cambridge, 2008.
- [12] COVARIANCE INTERSECTION, WORKING GROUP: *A culminating advance in the theory and practise of data fusion, filtering and decentralized accumulation*. CIWG, 1996.
- [13] DECKER, M.: *Zur Beurteilung der Querdynamik von Personenkraftwagen*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 2009.
- [14] DEPPERMAN, K.: *Fahrversuche und Berechnungen zum Geradeauslauf von Personenkraftwagen*. Doktorarbeit, Technische Universität Braunschweig, 1989.
- [15] DETTKI, F.: *Methoden zur objektiven Bewertung des Geradeauslaufs von Personenkraftwagen*. Doktorarbeit, Universität Stuttgart, 2005.
- [16] DIBBERN, K.: *Ermittlung eines Kennwertes für den ISO-Fahrspurwechsel in Versuch und Simulation*. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe, 1992.
- [17] DIERINGER, N.: *Vergleichende Neurobiologie der Organisation von blickstabilisierenden Reflexsystemen bei Wirbeltieren*. Naturwissenschaften, 1986.
- [18] DONGES, E.: *Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug*, 1978.

- [19] ENGELS, A.: *Geradeauslaufkriterien für PKW und deren Bewertung*. Doktorarbeit, TU Braunschweig, 1994.
- [20] FREZZA, R.; ET. AL.: *Smart Driver: a Research Project for closed Loop vehicle simulation in msc.adams*. Loughborough University, 2004.
- [21] FUCHS, J.: *Beitrag zum Verhalten von Fahrer und Fahrzeug bei Kurvenfahrt*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 1993.
- [22] HANDWERKER, H.: *Somatosensorik*. Springer Verlag, 2006.
- [23] HARRER, M.: *Characterisation of Steering Feel*. Doktorarbeit, University of Bath, 2007.
- [24] HARRER, M.: *Objective assessment of steering characteristics*. Dr. Ing. h.c. F. Porsche AG, 2008.
- [25] HARRER, M.; ET. AL.: *Steering Feel - objective Assessment of passenger cars*. University of Bath, 2006.
- [26] HASLWANTER, T.: *Das vestibuläre System*. ETH Zürich, 2004.
- [27] HAUSER-BISCHOF, C.: *Schulterrehabilitation in Orthopädie und Traumatologie*. Thieme Verlag, 2002.
- [28] HEISSING, B.; ERSOY, E.: *Fahrwerkhandbuch*. Vieweg Verlag, 2008.
- [29] HEISSING, B.; BRANDL, H.-J.: *Subjektive Bewertung des Fahrverhaltens*. Vogel Fachbuch Verlag, 2002.
- [30] HENZE, R.: *Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe eines Fahrermodells*. Doktorarbeit, Technische Universität Braunschweig, 2004.
- [31] HORN, A.: *Fahrer-Fahrzeug-Kurvenfahrt auf trockener Straße*. Doktorarbeit, Technische Universität Braunschweig, 1985.
- [32] HUDELMAIER, J.: *Das Menschmodell RAMSIS*. Technische Universität München, 2009.
- [33] JÜRGENSOHN, T.: *Hybride Fahrermodelle*. Doktorarbeit, Technische Universität Berlin, 1997.
- [34] KOBETZ, C.: *Modellbasierte Fahrdynamikanalyse durch ein an Fahrmanövern parameteridentifiziertes querdynamisches Simulationsmodell*. Doktorarbeit, Technische Universität Wien, 2003.
- [35] KRÜGER, H.-P.; ET. AL.: *Bewertung von Fahrzeugeigenschaften - vom Fahrgefühl zum Fahrergefühl*. Universität Würzburg, 1999.
- [36] KUDRITZKI, D.: *Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens*. Doktorarbeit, Technische Universität Berlin, 1989.
- [37] LJUNG, L.: *System Identification*. Prentice Hall PTR, 2006.
- [38] LUTZ, H.; WENDT, W.: *Taschenbuch der Regelungstechnik*. Verlag Harri Deutsch, 2007.
- [39] MCRUER, D.; WEIR, D.: *Theory of manual vehicular control*. Ergonomics 12, 1969.



- [40] MEYER-TUVE, H.: *Entwicklung eines modellbasierten Analysetools zur Bewertung der Querdynamik anhand von objektiven Bewegungsgrößen*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 2008.
- [41] MEYER-TUVE, H.; ET. AL.: *Experimental Handling Vehicle für Lehre und Forschung*. Automobiltechnische Zeitung, 2007.
- [42] MITSCHKE, M.; WALLENTOWITZ, H.: *Dynamik der Straßenfahrzeuge*. Springer Verlag, 2003.
- [43] MÜLLER-BESSLER, B.; ET. AL.: *Reproduzierbare querdynamische Fahrzeugbewertung im doppelten Fahrspurwechsel*. Automobiltechnische Zeitung, 2008.
- [44] MÜLLER-BESSLER, B.; STOCK, G. HOFFMANN J.: *Reproduzierbares Fahren im Grenzbereich*. race.tech, 2006.
- [45] NEGELE, H. J.: *Anwendungsorientierte Konzipierung von Fahrsimulatoren für die Fahrzeugentwicklung*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 2007.
- [46] NEUKUM, A.; ET. AL.: *Wirkung diskreter Zusatzlenkmomente: Subjektive Bewertung und Fahrer-Fahrzeug-Interaktion*. Universität Würzburg, 2009.
- [47] PFEFFER, P.; HARRER, M.: *Lenkgefühl: Die Kunst der Beschreibung*. Hochschule München, 2009.
- [48] PFEFFER, P.: *Interaction of Vehicle and Steering System regarding on-centre handling*. Doktorarbeit, University of Bath, 2006.
- [49] PICK, A.; COLE, D.: *A Mathematical Model of Driver Steering Control including Neuromuscular Dynamics*. University of Cambridge, 2008.
- [50] PIETSCH, R.; SCHIMMEL, C.: *Objective assessment of handling performance*. Technische Universität München, 2009.
- [51] PIETSCH, R.; HEISSING B.: *Modellbasierte Beurteilung des Lenkgefühls*. Technische Universität München, 2009.
- [52] POHLHEIM, H.: *Evolutionäre Algorithmen*. Springer-Verlag, 1999.
- [53] REICHEL, W.: *Ein adaptives Fahrermodell zur Bewertung der Fahrdynamik von PKW in kritischen Situationen*. Doktorarbeit, Technische Universität Braunschweig, 1990.
- [54] RITZMANN, E.: *Über die Verwendung von Kopfbewegungen bei den gewöhnlichen Blickbewegungen*. Springer Verlag, 1874.
- [55] ROMPE, K.; HEISSING, B.: *Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen*. Verlag TÜV Rheinland, 1984.
- [56] SALVUCCI, D.; ET. AL.: *Toward an Integrated Model of Driver Behavior in a Cognitive Architecture*. Nissan Cambridge Basic Research, 2000.
- [57] SCHIMMEL, C.; HEISSING, B.: *Fahrerbasierte Objektivierung subjektiver Fahreindrücke*. Technische Universität München, 2009.
- [58] SCHMIDT, R.; LANG, F.: *Physiologie des Menschen*. Springer Medizin Verlag, 2007.
- [59] SCHMIDT, R.: *Physiologie kompakt*. Gustav Fischer Verlag, 1995.

- [60] SCHMIDT, R.; SCHAIBLE H.-G.: *Neuro- und Sinnesphysiologie*. Springer Medizin Verlag, 2006.
- [61] SCHRÖDER, J.; ET. AL.: *Technische Mechanik 3*. Springer-Verlag, 2008.
- [62] SEIFFERT, U.; GOTTHARD, R.: *Virtuelle Produktentstehung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz*. Vieweg+Teubner Verlag, 2008.
- [63] SILBERNAGEL, S.; DESPEROPOULUS, A.: *Taschenatlas der Physiologie*. Thieme Verlag, 2001.
- [64] SPANN, O.; KREIGEL, T.: *Von der objektiven Größe zur subjektiven Bewertung der Fahrdynamik*. Audi AG, 2007.
- [65] SPECKMANN, E.; ET. AL.: *Physiologie*. Elsevier, Urban and Fischer, 2008.
- [66] STAMER, N.: *Ermittlung optimaler PKW-Querdynamik und ihre Realisierung durch Allradlenkung*. Doktorarbeit, VDI Verlag, 1997.
- [67] WAGNER, A.: *Ein Verfahren zur Vorhersage und Bewertung der Fahrerreaktion bei Seitenwind*. Doktorarbeit, Universität Stuttgart, 2003.
- [68] WANG, XUGUANG: *Digital Humans for Ergonomic design of products* (<http://www.dhergo.org/>). Technische Universität München, 2009.
- [69] WELZER, H.: *Das kommunikative Gedächtnis - Eine Theorie der Erinnerung*. C. H. Beck Verlag, 2002.
- [70] WENTNIK, M; ET. AL.: *Development of the Motion Perception Toolbox*. Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, 2006.
- [71] WILDEN, A.: *Analyse und Modellierung vestibulärer Information in den tiefen Kleinhirnkernen*. Doktorarbeit, Ludwig-Maximilians-Universität München, 2002.
- [72] WOLF, H.: *Betrachtung des Lenkgefühls beim Führen eines Kraftfahrzeugs unter besonderer Berücksichtigung ergonomischer Erkenntnisse und Methoden*. Doktorarbeit, Technische Universität München, 2009.
- [73] WOLF, H.; BUBB, H.: *Ergonomie in der Fahrzeugentwicklung - Wo und wie kann sie hilfreich sein?* Technische Universität München, 2005.
- [74] ZOMOTOR, Z.: *Online-Identifikation der Fahrdynamik zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW*. Doktorarbeit, Universität Stuttgart, 2002.
- [75] ZSCHOCKE, A.: *Ein Beitrag zur objektiven und subjektiven Evaluierung des Lenkkomforts von Kraftfahrzeugen*. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe, 2009.

## Studentische Arbeiten

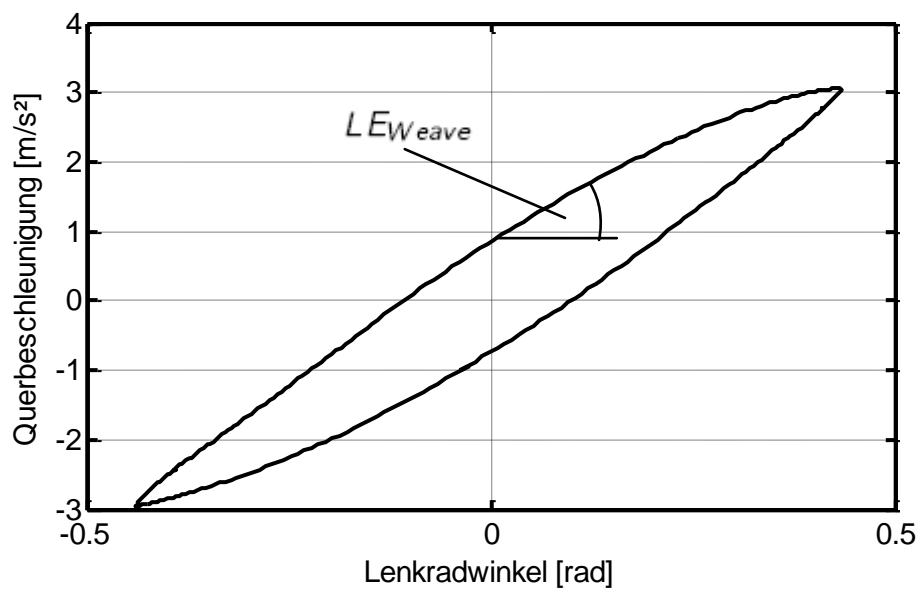
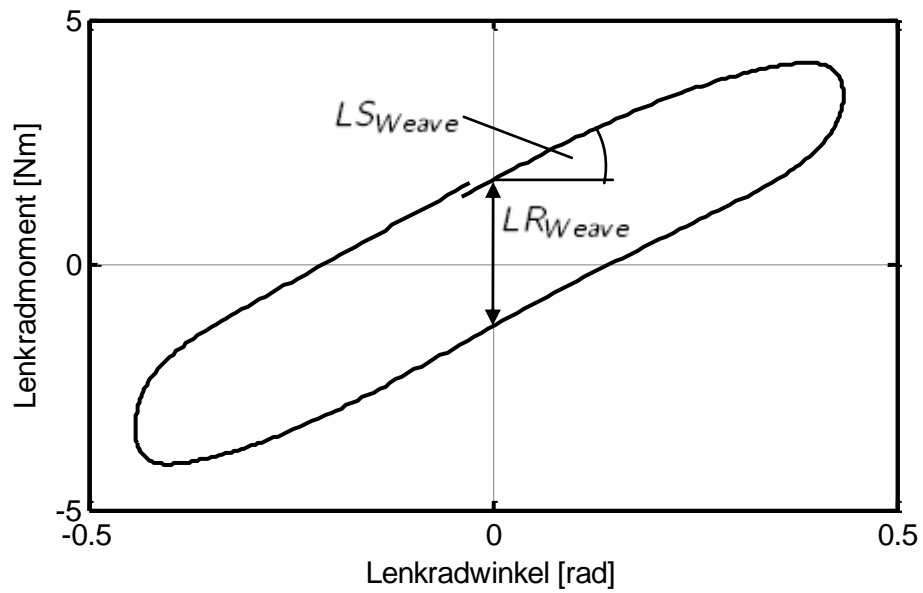
Während der Anfertigung dieser Dissertation wurden diverse studentische Arbeiten betreut. Im Folgenden sind die für die Objektivierung subjektiver Fahreindrücke relevanten Semester- und Diplomarbeiten aufgeführt. Vielen Dank an die Bearbeiter für die umfangreiche Unterstützung im Rahmen dieses Forschungsprojekts.

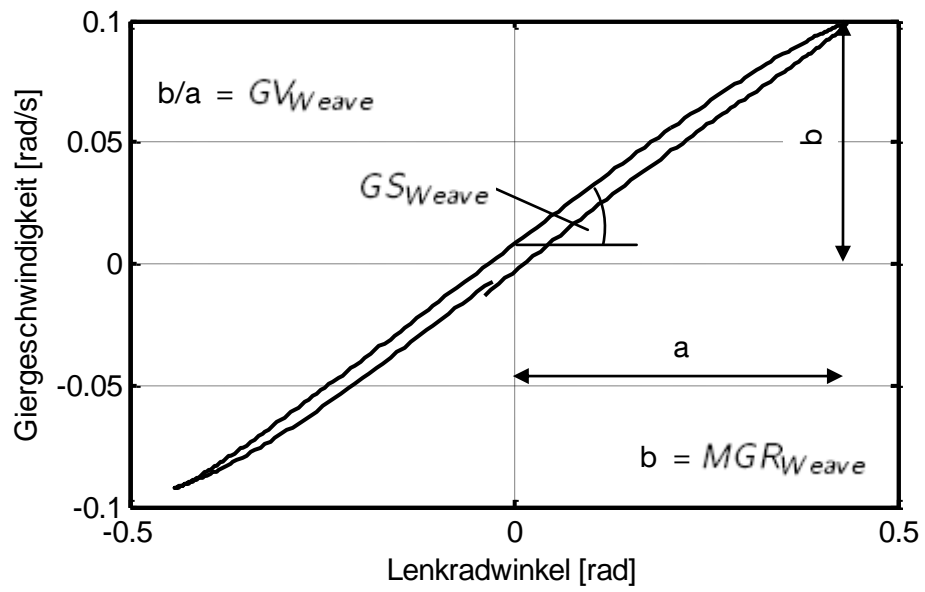
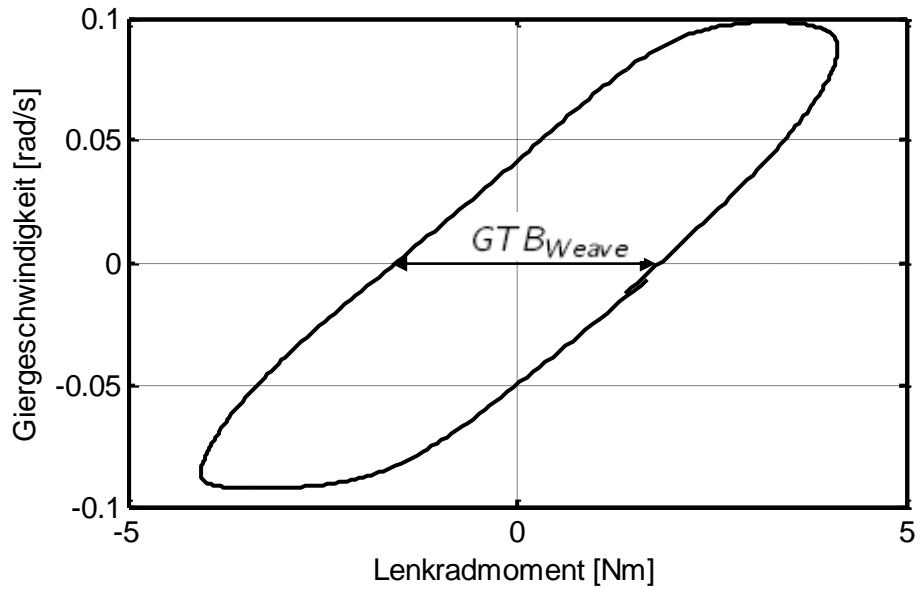
- [1] BENDER, S.; *Beurteilung der Querdynamik von PKW mit einem Lenkradbetätigungsmodell durch Versuche in Closed-Loop Versuchsszenarien in Realfahrt und Simulation*. Diplomarbeit, 2010
- [2] BURDA, P.; *Entwicklung und Parametrierung eines Fahrermodells zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke*. Diplomarbeit, 2008
- [3] GREIL, S.; *Automatisierte Analyse der Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen mittels Mehrkörpersimulation*. Semesterarbeit, 2010
- [4] HIRSCH, P.; *Fahrdynamiksimulationen mit VI-CarRealtime*. Semesterarbeit, 2009
- [5] KECHT, S.; *Objektivierung querdynamischer Fahrzeugbewertungen in Open-Loop Versuchen mit einem Modell menschlicher Empfindung*. Diplomarbeit, 2010
- [6] KECHT, S.; *Wahrnehmungsmodellierung ausgewählter Größen der Fahrzeugquerdynamik*. Semesterarbeit, 2009
- [7] KÖNIG, J.; *Entwicklung eines modularen Software-Frameworks zur Querdynamikbeurteilung von Straßenfahrzeugen*. Semesterarbeit, 2010
- [8] KRESO, B.; *Korrelation zwischen Fahrdynamikbewertungen aus dem Frequenzgang und Versuchen im geschlossenen Regelkreis*. Semesterarbeit, 2010
- [9] LANGE, A.; *Weiterentwicklung eines Fahrermodellparametrierungsprozesses zur Beurteilung querdynamischer Eigenschaften von PKW*. Semesterarbeit, 2010
- [10] MAURER, G.; *Entwicklung einer echtzeitfähigen Testumgebung zur Durchführung virtueller und Planung realer Fahrversuche*. Semesterarbeit, 2009
- [11] ÜBERBACHER, M.; *Untersuchung von veröffentlichten Ansätzen zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke und Umsetzung im Handling Monitor*. Semesterarbeit, 2009
- [12] VOGL, D.; *Beurteilung des Lenkgefühls von PKW auf Basis des Weave-Tests mit einem Modell menschlicher Empfindung*. Semesterarbeit, 2009
- [13] WASSERTHEURER, B.; *Konzeption und Realisierung alternativer Sensorik für Fahrversuche*. Semesterarbeit, 2010
- [14] ZÄH, R.; *Weiterentwicklung und Validierung eines fahrermodellbasierten Ansatzes zur Querdynamikbeurteilung von Straßenfahrzeugen*. Diplomarbeit, 2009



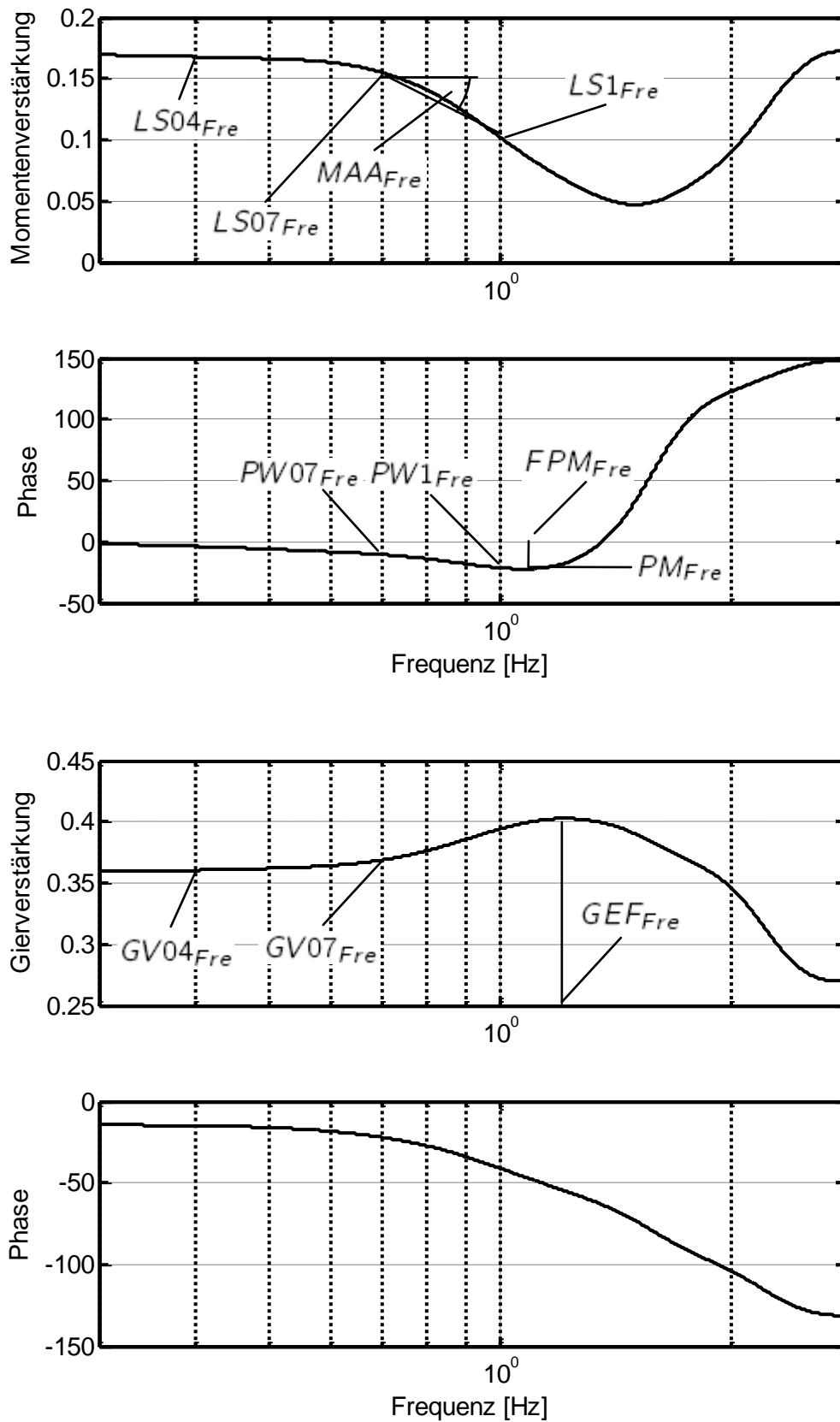
# Anhang

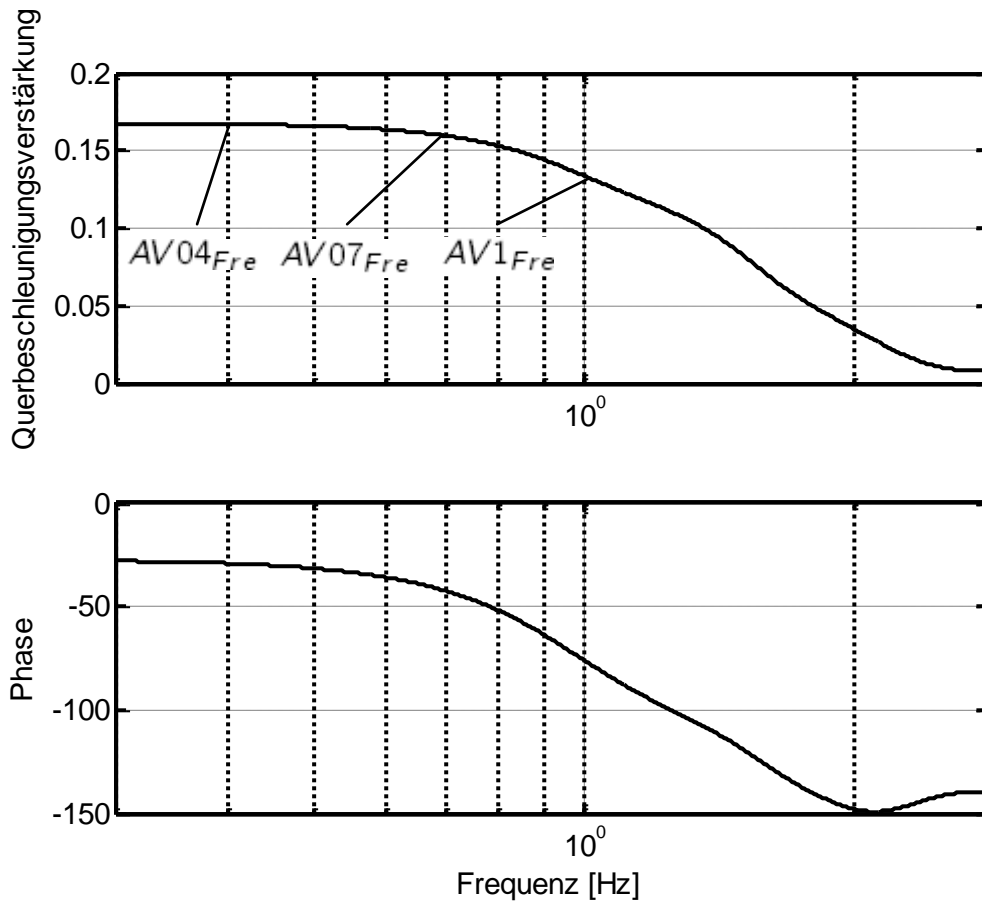
## Kennwerte des Weave-Tests



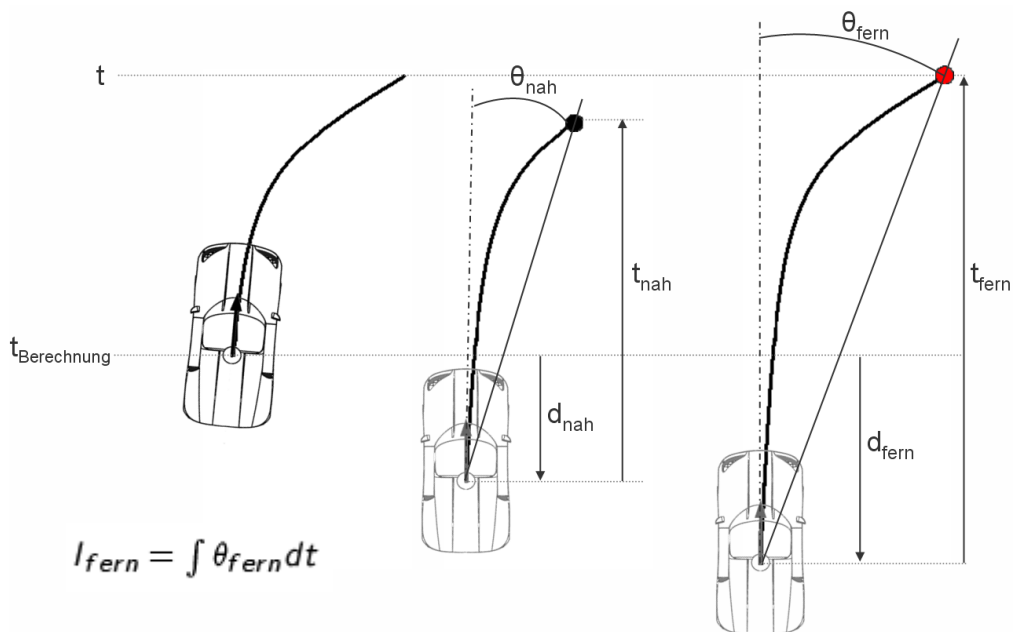


## Kennwerte des Frequenzgangs





### Kennwerte der Closed-Loop-Versuche





# Kennwerte des Lenkradwinkelsprungs

