

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN  
Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität München

# Zur Beurteilung der Querdynamik von Personenkraftwagen

Medon Decker

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. Bernd-Robert Höhn

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing
2. Univ.-Prof. Dr. rer.nat. Heiner Bubb, i. R.

Die Dissertation wurde am 02.10.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 16.02.2009 angenommen.



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik der TU München in enger Zusammenarbeit mit der Abteilung Objektivierung Fahrdynamik der BMW AG.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Heißing, der mir als Leiter des Lehrstuhls für Fahrzeugtechnik der TU München die Möglichkeit zu diesem spannenden Forschungsthema gewährte und als mein Doktorvater durch wertvolle Anregungen und Hinweise zum Gelingen dieser Arbeit beitrug.

Herrn Prof. Dr.-Ing. rer.nat. Heiner Bubb danke ich sehr herzlich für die Übernahme des zweiten Gutachtens und Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd-Robert Höhn für den Vorsitz des Prüfungsausschusses.

Entscheidend für den erfolgreichen Abschluss der Arbeit war die Unterstützung durch die Abteilung Objektivierung Fahrdynamik der BMW AG. Mein herzlichster Dank gilt daher an erster Stelle Herrn Dr.-Ing. Erich Sagan für die Ermöglichung des Forschungsprojekts und seine fortwährende Unterstützung. Außerdem möchte ich allen Kollegen für die überaus konstruktive Zusammenarbeit, Diskussionsbereitschaft und die Teilnahme an den Versuchen danken, insbesondere Dr.-Ing. Peter Fritz für die zahlreichen Diskussionen und konstruktive Kritik zur methodischen Herangehensweise.

Auch meinen Kollegen am Lehrstuhl möchte ich sehr für die gute Zusammenarbeit während meiner Lehrtätigkeiten danken, besonders Frau Weigand für ihre Hilfe in allen organisatorischen Fragen und Herrn Dr.-Ing. Josef Fink für seine fachliche Unterstützung.

Mein größter Dank gilt meinen Eltern, welche mir stets auf meinem Weg zur Seite standen und mir dies alles ermöglichten.

München, im Oktober 2008



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Vorangegangene Untersuchungen . . . . .	2
1.3	Stand der Objektivierung der Querdynamik . . . . .	18
1.4	Menschliche Wahrnehmung . . . . .	21
1.5	Schlussfolgerungen und Versuchsprogramm . . . . .	26
<b>2</b>	<b>Objektive Messverfahren und Kenngrößen</b>	<b>29</b>
2.1	Vergleich von Open-Loop-Manövern in der Simulation . . . . .	30
2.1.1	Erweitertes Einspurmodell . . . . .	30
2.1.2	Datenerzeugung und -auswertung . . . . .	31
2.2	Durchführung der Manöver im Realfahrzeug und Datenauswertung . . . . .	36
2.2.1	Sinuslenken mit steigender Frequenz zur Ermittlung des Frequenzgangs	36
2.2.2	Sinuslenken mit konstanter Frequenz (Weavetest) . . . . .	37
2.2.3	Lenkwinkelrampe . . . . .	40
2.3	Einfluss der Manöverparameter auf objektive Kennwerte . . . . .	42
2.3.1	Querbeschleunigungsamplitude . . . . .	42
2.3.2	Fahrgeschwindigkeit . . . . .	44
2.3.3	Lenkfrequenz . . . . .	46
2.4	Festlegung der Manöverparameter . . . . .	46
<b>3</b>	<b>Probandenversuche</b>	<b>47</b>
3.1	Versuchsfahrzeug . . . . .	47
3.2	Versuchsdurchführung . . . . .	50
3.3	Versuchsergebnisse Doppelspurwechsel . . . . .	52
3.3.1	Direkte Darstellung der Bewertungen . . . . .	53
3.3.2	Hauptkomponentenanalyse der Bewertungen . . . . .	54
3.3.3	Subjektiv-Subjektiv-Korrelationen der Bewertungen . . . . .	56
3.3.4	Objektiv-Subjektiv-Korrelationen der Bewertungen zu Open-Loop-Kenn- werten . . . . .	58
3.3.5	Open-Loop-Kennwerte der einzelnen Bewertungskriterien . . . . .	63

3.3.6	Auswahl Open-Loop-Kennwerte . . . . .	66
3.3.7	Auswertung der Fahrer-Fahrzeug-Kennwerte . . . . .	68
3.3.8	Korrelationen aus multipler Regression . . . . .	71
3.3.9	Zusammenfassung der Ergebnisse des Doppelspurwechsels . . . . .	73
3.4	Versuchsergebnisse Anlenken auf der Geraden . . . . .	75
3.4.1	Korrelationsanalysen der Bewertungen und der Open-Loop-Kennwerte	76
3.4.2	Open-Loop-Kennwerte der einzelnen Bewertungskriterien . . . . .	77
3.5	Ergebnisdiskussion . . . . .	82
3.5.1	Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Versuchsabschnitten . . . . .	82
3.5.2	Datenauswertung . . . . .	84
3.5.3	Wichtung der fahrdynamischen Größen nach ihrer Bedeutung . . . . .	84
3.5.4	Beurteilung der Arbeitsergebnisse im Hinblick auf die Weiterentwick- lung der Methode Objektivierung . . . . .	87
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>91</b>
<b>5</b>	<b>Anhang</b>	<b>97</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>101</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>103</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>107</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>109</b>

# Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes

## Lateinische Buchstaben

a	$\frac{m}{s^2}$	Beschleunigung
f	Hz	Frequenz
t	s	Zeit
r		Korrelationskoeffizient
$M_H$	Nm	Lenkmoment
$\ddot{y}$	$\frac{m}{s^2}$	Querbeschleunigung
v	$\frac{km}{h}$	Fahrgeschwindigkeit

## Griechische Buchstaben

$\dot{\psi}$	$\frac{^\circ}{s}$	Gierrate
$\delta_H$	$^\circ$	Lenkradwinkel
$\varphi$	$^\circ$	Wankwinkel

## Indizes

x	Längsrichtung
y	Querrichtung
z	Vertikalrichtung
(o)	quasi-objektive Beurteilung der Wahrnehmung
(s)	subjektive Beurteilung des Gefallens
stat	Stationärwert

## Kennwerte des Frequenzgangs

$TF(v/u)_{stat}$	stationäre Verstärkung
$TF(v/u)_U$	Resonanzverstärkung
$TF(v/u)_{\varphi_{1,0}}$	Phase bei 1,0 Hz Anregungsfrequenz
$TF(v/u)_{f_{\varphi_{-45^\circ}}}$	Anregungsfrequenz bei $-45^\circ$ Phasenabfall
$TF(v/u)_{f_{-3dB}}$	Anregungsfrequenz bei -3 dB Amplitudenabfall
$TF(v/u)_{T_{eq}}$	äquivalente Verzögerungszeit, $\frac{1}{2\pi(f_{\varphi_{-45^\circ}})}$

(Eingangsgröße  $u$ , Ausgangsgröße  $v$ )

## Kennwerte aus Hysteresekurven

$H(b/a)_x$	Achsenabschnitt Abszisse
$H(b/a)_y$	Achsenabschnitt Ordinate
$H(b/a)_{y/x}$	Verhältnis der Achsenabschnitte
$H(b/a)_{\Delta y}$	Hysteresenhöhe bei 80% der Eingangsamplitude
$H(\partial b/\partial a)_{max}$	Maximum des Gradienten
$H(\partial b/\partial a)_{min}$	Minimum des Gradienten
$H(\partial b/\partial a)_{\frac{max}{min}}$	Verhältnis von Maximum zu Minimum des Gradienten
$H(\overline{\partial b/\partial a})$	Mittelwert des Gradienten

(Eingangsgröße  $a$ , Ausgangsgröße  $b$ )

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die Erforschung der Fahreigenschaften von Personenkraftwagen kann auf eine lange Tradition zurückblicken. Bereits 1940 wurde das Einspurmodell nach RIEKERT und SCHUNCK [RS40] veröffentlicht, welches auch heute noch eine wichtige Rolle in Theorie und Praxis spielt.

Mit Beginn der Massenmotorisierung und der damit einhergegangenen Zahl an Verkehrsunfällen wurde die Erforschung der Fahrdynamik zur Erreichung einer bestmöglichen aktiven Sicherheit forciert. Entsprechende Programme wurden vorwiegend in den 70er-Jahren ins Leben gerufen. Bekannt ist aus dieser Zeit das ESV-Programm, welches in den USA initiiert wurde.

Trotz intensiver Forschungsarbeit entscheiden bis heute keine objektive Kenngrößen der Fahrdynamik über die Serienfreigabe oder Zulassungsfähigkeit eines Fahrzeugs<sup>1</sup>, sondern ausschließlich das Subjektivurteil erfahrener Versuchsingenieure des jeweiligen Automobilherstellers. Dabei umfasst die Beurteilung nicht nur sicherheitskritische Fahrsituationen, sondern vor allem die Ausprägung des Fahrzeugcharakters im Bereich niedriger Querberechnungen, wie sie im Fahralltag auftreten. Dies lässt die Vermutung zu, dass die Objektivierung der Fahrzeugquerdynamik noch nicht als erprobtes und zuverlässiges Hilfsmittel zur Fahrdynamikbewertung etabliert werden konnte.

Gleichzeitig ist der Wunsch nach einer solchen Bewertungsmethode durch die Möglichkeiten der Simulation sehr groß: Gerne würde man die Fahrzeugentwicklung immer weiter ins Virtuelle verlagern, um Zeit und Kosten zu sparen. Die Entwicklung und Abstimmung der Fahrdynamik ist jedoch bis heute nur sehr unvollständig in der Simulation durchführbar, da zu den meisten subjektiven Beurteilungskriterien keine aussagekräftigen objektiven Kenngrößen bekannt sind.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, eine Bewertung und wenn möglich Erweiterung der Methode *Objektivierung der Querdynamik* durchzuführen. Dabei sollen Fragen der Fahrstabilität im Grenzbereich außen vor bleiben.

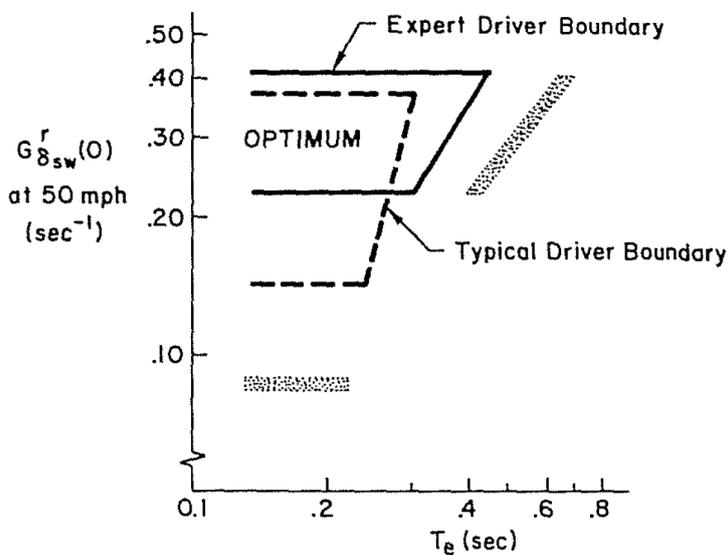
---

<sup>1</sup> In den USA wird daran gearbeitet, zulassungsrelevante Prüfverfahren für die Fahrdynamik einzuführen. Hierbei stehen die Probleme des Überschlagens und des Schleuderns bei extremen Fahrsituationen im Vordergrund.

## 1.2 Vorangegangene Untersuchungen

### Weir, DiMarco: „Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data” [WD78]

Die Veröffentlichung fasst die Untersuchungen und Ergebnisse mehrerer Teilstudien zusammen, welche im Rahmen des *Experimental Savety Vehicle*-Programms durchgeführt wurden. Die in der Veröffentlichung ausgewerteten Fahrversuche sind teils unabhängig voneinander durchgeführt worden, die daraus gewonnenen Daten werden von den Autoren zusammengeführt und nach einem einheitlichen Schema analysiert.



**Bild 1.1:** Diagramm zur Beurteilung der Querdy-namik nach WEIR und DIMARCO [WD78]

Für die Analyse der Fahrzeugeigenschaften leiten die Autoren aus dem Einspurmodell das allgemeine Gierübertragungsverhalten her. Aus den gemessenen Fahrzeugreaktionen der Varianten werden anschließend die Konstanten des Übertragungsgliedes im Sinne des geringsten Fehlers ermittelt. Besondere Aussagekraft wird danach der stationären Gierverstärkung und der äquivalenten Verzögerungszeit zugemessen.

Während die stationäre Gierverstärkung sich direkt aus dem Verstärkungsfaktor des Übertragungsgliedes ergibt, wird die äquivalente Verzögerungszeit durch eine Reduzierung des Übertragungsgliedes auf  $PT_1$ -Verhalten berechnet. Die Verzögerungszeit eines  $PT_1$ -Gliedes ist reziprok zu derjenigen Frequenz, bei der die Phase den Wert von  $-45^\circ$  erreicht:  $T_{eq} = \frac{1}{2\pi f_{-45^\circ}}$ . Je kleiner die Verzögerungszeit, desto flacher ist der Phasenabfall, und desto schneller reagiert das Fahrzeug auf Lenkwinkeleingaben mit einer Gierreaktion.

Besonders eine Teilstudie mit einem Datensatz von 37 Fahrzeugvarianten, dargestellt durch Modifikationen an einem Fahrzeug, wird detailliert betrachtet. Hier kommen als Probanden ein Expertenfahrer sowie 16 Normalfahrer zum Einsatz. Die gefahrenen Manöver umfassen Spurwechsel, Geradeauslauf bei Seitenwind und Ausweichmanöver. Die Subjektivbewertung zu den Varianten findet in Form einer allgemeinen Gefal-lensbewertung der Probanden statt.

Sehr bekannt ist die Veröffentlichung von WEIR und DIMARCO durch die enthaltene Darstellung eines Zielgebiets für die beiden Kennwerte in einem Diagramm (Bild 1.1). Diese Darstellung, welche zwei skalare Kennwerte des stationären und instationären Verhaltens gegenüberstellt, ist in vielen nachfolgenden Arbeiten aufgegriffen worden. Aus heutiger Sicht kann angemerkt werden, dass die angegebenen Grenzwerte extrem weit gespreizt sind, so dass sich die meisten aktuellen Serienfahrzeuge innerhalb dieser Grenzwerte befinden.

## **Kudritzki: „Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens“ [Kud89]**

KUDRITZKI untersucht in seiner Arbeit die Auswirkungen einer Hinterachslenkung auf die subjektive Bewertung der Querdynamik. Er benutzt als Basis einen Serien-Pkw, der durch seine Hinterachskinematik besonders leicht zu einem allradgelenkten Fahrzeug umgebaut werden kann.

Insgesamt 8 verschiedene Hinterachs-Lenkstrategien werden im Doppelspurwechsel von 4 Probanden beurteilt. Ein Rückversuch auf einem Landstraßenabschnitt soll die Vergleichbarkeit des Doppelspurwechsels mit normalen Fahrsituationen beurteilen helfen. Hierbei kamen jedoch lediglich 4 Varianten und 2 Probanden zum Einsatz. Die hohen Korrelationen zwischen den Subjektivnoten aus dem Doppelspurwechsel zu den Noten aus der Landstraßenfahrt lassen die Schlussfolgerung zu, dass der Doppelspurwechsel als repräsentatives Manöver für die Landstraßenfahrt herangezogen werden kann.

Im Fahrversuch gemessene Kennwerte der Fahrzeugvarianten werden in der Veröffentlichung nicht dargestellt, lediglich Simulationsergebnisse der verschiedenen Ansteuerstrategien der Hinterachslenkung. Für die Auswertung der Subjektivbewertungen werden einzig die während der Beurteilungsfahrten gemessenen Closed-Loop Fahrdynamikdaten verwendet.

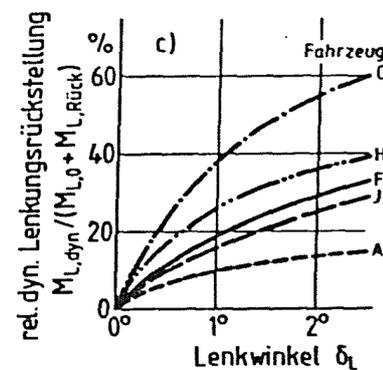
Gegenüber der thematisch ähnlichen Veröffentlichung von REDLICH (s.u.) werden somit keine Aussagen auf Grund objektiver Fahrzeugparameter gemacht. Eher allgemein formuliert der Autor, dass für eine optimale Querdynamik möglichst geringe Fahrzeugreaktionen auf Lenkeingaben vorteilhaft seien. Als Kennwert wird beispielsweise das Gierbeschleunigungsmaximum über den gesamten Fahrtstrecke einer Variante genannt.

Analog zur Untersuchung von REDLICH muss bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden, dass die Fahrzeugreaktion und insbesondere die stationäre Gierverstärkung direkt abhängig von der Ansteuerungsstrategie der Hinterachslenkung ist. Ein stabilisierendes Mitlenken der Hinterachse geht somit stets mit einer indirekteren Gesamtlenkübersetzung einher.

## Deppermann: „Fahrversuche und Berechnungen zum Geradeauslauf von Personenkraftwagen“ [Dep89]

Die Arbeit von DEPPERMAN gliedert sich in einen Versuchs- und einen Theorieteil. Im Versuchsteil werden auf einem größtenteils geraden Autobahnabschnitt von 20 km Länge insgesamt 9 unterschiedliche Versuchsfahrzeuge von 12 Probanden gefahren und beurteilt. Zusätzlich zu den Closed-Loop Messdaten aus den Beurteilungsfahrten werden Open-Loop Messdaten aus dem Manöver Sinuslenken erzeugt, sowohl im Stand als auch bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Die daraus resultierenden Hysteresekurven dienen zur Ableitung skalarer Kennwerte.

Im Theorieteil werden die gemachten Beobachtungen und Ergebnisse einer intensiven modellbasierten Betrachtung (sowohl Fahrer- als auch Fahrzeugmodell) unterzogen. Neben einigen empirisch begründeten Empfehlungen zur Optimierung des Geradeauslaufs wird als objektive Kenngröße aus den Fahrversuchen die „relative Lenkrückstellung“ (s. Bild 1.2) definiert, welche nach Ansicht des Autors ein Maß für das Mittengefühl (*center point feeling*) darstellt.

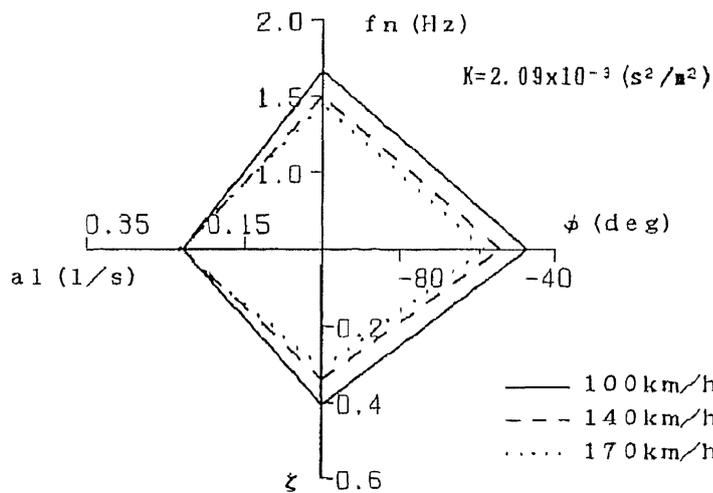


**Bild 1.2:** Dynamische Lenkrückstellung nach DEPPERMAN [Dep89]

## Mimuro, Ohsaki, Yasunaga, Satoh: „Four Parameter Evaluation Method of Lateral Transient Response“ [MOYS90]

Die Veröffentlichung der Autoren MIMURO, OHSAKI, YASUNAGA und SATOH beschreibt ein Bewertungsverfahren, bei dem aus dem Übertragungsverhalten eines Fahrzeugs vier Kennwerte generiert werden. Drei davon werden aus dem Lenkwinkel-Gieraten-Frequenzgang abgeleitet, nämlich die stationäre Gierverstärkung, die Resonanzfrequenz und die Resonanzüberhöhung. Als vierter Parameter wird aus dem Lenkwinkel-Querbeschleunigung-Frequenzgang der Phasenabfall bei 1 Hz Anregungsfrequenz ermittelt.

Die Messdaten werden mit dem Manöver „Dreiecks-Lenkimpuls“ gewonnen. Als Randbedingung wird eine maximale Querbeschleunigung von 0,4 g angestrebt. Zur Darstellung der vier Kennwerte wählen die Autoren ein Diagramm mit vier Achsen, jeder Kennwert wird auf einer Achse abgetragen. Durch die Verbindung der Achsenabschnitte ergibt sich ein Rhombus, siehe Bild 1.3.



**Bild 1.3:** Vier-Kennwerte-Diagramm nach MIMURO, OHSAKI, YASUNAGA und SATOH [MOYS90]

Die Ausrichtung der Achsen wird dabei so gewählt, dass ein größerer Achsenabschnitt gleichbedeutend mit einem „besseren“ Kennwert ist, wobei „besser“ im einzelnen bedeutet: Eine höhere Gierverstärkung, eine höhere Resonanzfrequenz, eine höhere Dämpfung (also niedrigere Resonanzüberhöhung) sowie eine geringere Querbeschleunigungsphase. Je größer die von den vier Achsenabschnitten aufgespannte Fläche ist, desto größer sei nach Meinung der Autoren

das Handling-Leistungspotential eines Fahrzeugs. Die Form des Rhombus, gleichbedeutend mit der Balance der vier Kennwerte, gebe eine Information zum Charakter des Fahrzeugs.

Optimalbereiche der vier Kennwerte werden von den Autoren nicht angegeben, da – ausgehend von einer bestimmten Fahrzeugkonfiguration – die Verbesserung eines Kennwerts häufig mit der Verschlechterung anderer Kennwerte einhergehe. Eine Darstellung von Subjektivbewertungen zusammen mit dem Kennwertdiagramm wird nicht präsentiert.

## Dibbern: „Ermittlung eines Kennwertes für den ISO-Fahrspurwechsel in Versuch und Simulation“ [Dib92]

Ziel der Untersuchungen von DIBBERN ist die Klärung der Frage, wie gut sich der Doppelspurwechsel zur Objektivierung der Querdynamik einsetzen lässt, und darüber hinaus, wie die im Realversuch gemachten Beobachtungen und Ergebnisse mit einem Simulationsmodell für Fahrzeug und Fahrer im Virtuellen nachvollzogen werden können. Die Realversuche werden mit einem einzelnen Fahrzeug durchgeführt, an welchem durch Variation der Beladung und Bereifung 9 Varianten dargestellt werden. Insgesamt 15 Probanden geben ihre Subjektivbeurteilungen ab.

Ähnlich zur Veröffentlichung von KUDRITZKI (s.o.) werden auch hier ausschließlich Closed-Loop Kennwerte aus den Beurteilungsfahrten zur Generierung von Kennwerten benutzt. Fahrzeugkennwerte aus Open-Loop Versuchen werden nicht auf Korrelationen mit Subjektivbewertungen untersucht.

Der vom Autor vorgeschlagene *KD-Wert* ( $KD = \Delta\delta_{max,2} + 2.5\tau_{0(\delta,a_y)}$ ) als gut korrelierendes Maß der Subjektivwertung errechnet sich aus den Lenkwinkel- und Querbeschleunigungs-

verlaufen im Doppelspurwechsel, genauer aus der Differenz  $\Delta\delta_{max,2}$  der Lenkwinkelmaxima (Links- zu Rechtsausschlag) sowie einer Verzugszeit  $\tau_{0(\delta,a_y)}$  zwischen Lenkwinkel und Querbeschleunigung. Auf diese Weise findet indirekt ein vom Fahrzeug maßgeblich bestimmter Faktor Eingang, da der zweite Wert  $\tau_{0(\delta,a_y)}$  direkt vom Übertragungsverhalten der Querbeschleunigung zum Lenkwinkel abhängig ist.

### **Fuchs: „Beitrag zum Verhalten von Fahrer und Fahrzeug bei Kurvenfahrt“ [Fuc93]**

Diese Untersuchung umfasst drei verschiedene Serienfahrzeuge. Als Fahraufgabe wird 8 Probanden die Aufgabe gestellt, zwei kurvige Landstraßenabschnitte zu befahren.

Als objektive Kennwerte werden Daten aus den Manövern stationäre Kreisfahrt, Lenkwinkelsprung, Lastwechsel, Beschleunigen im Kreis sowie Microsinus ausgewertet, wobei insbesondere das Manöver Microsinus eingehend auf Unterschiede zwischen den Fahrzeugen untersucht wird.

Auf Grund der recht geringen Anzahl an Fahrzeugen und Probanden ist diese Arbeit mehr als experimentelle Grundlagenuntersuchung zu werten und weniger als Reihenuntersuchung zur Ableitung von Zielwerten oder Gesetzmäßigkeiten. Dementsprechend werden vom Autor auch lediglich qualitative Zusammenhänge und Auslegungsempfehlungen gegeben. Diese lauten:

- Für das Befahren der kurvigen Landstraße wird eine direkte Lenkübersetzung von den Probanden zwar als wünschenswert angegeben, gleichzeitig jedoch nicht zuverlässig erkannt.
- Eine schnelle Gierreaktion auf Lenkeingaben wird als positiv bewertet, wobei ein zu starkes Überschwingen die Gierreaktion als zu schnell erscheinen lassen kann.
- Ein rascher Anstieg der Querbeschleunigung mit geringem Überschwingen wird sehr gut beurteilt.

### **Redlich: „Objektive und subjektive Beurteilung aktiver Vierradlenkstrategien“ [Red94]**

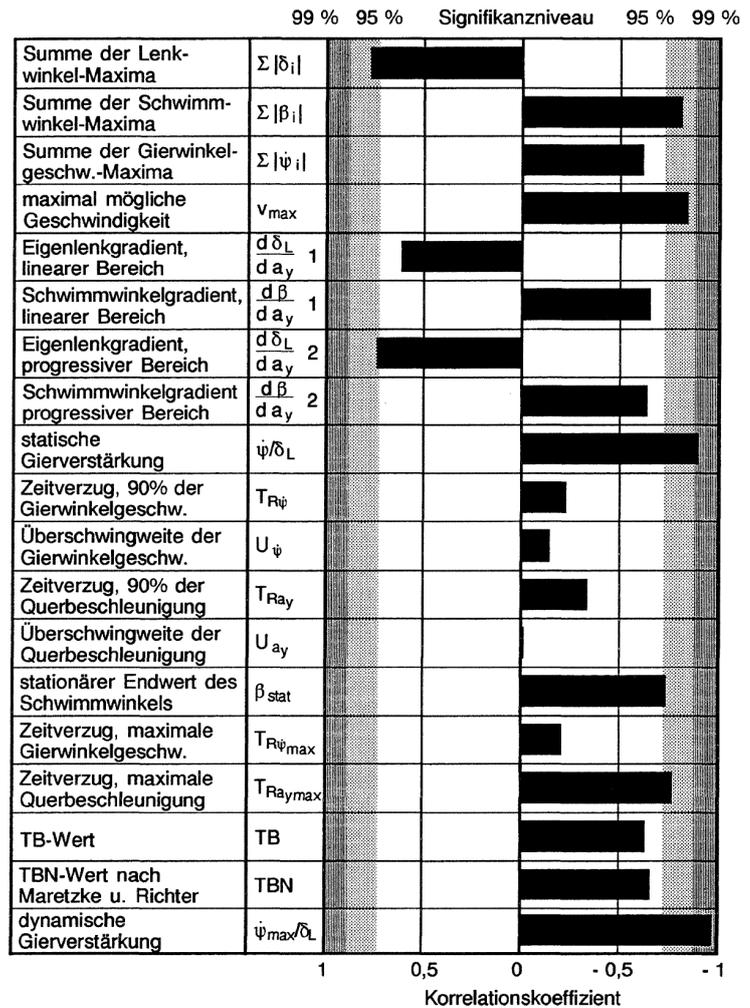
Der Autor untersucht in seiner Arbeit mit einem Experimentalfahrzeug die Auswirkungen verschiedener Hinterachsenlenkstrategien. Insgesamt 6 Varianten wurden von 14 Probanden gefahren und beurteilt. Objektive Daten werden separat mit den Manövern stationäre Kreisfahrt, Lenkwinkelsprung und Sinuslenken ermittelt. Zusätzlich werden die Messdaten aus

dem Doppelspurwechsel ausgewertet. Das verwendete Experimentalfahrzeug verfügt über eine elektromechanisch gesteuerte Hinterachslenkung, so dass ein weites Spektrum an querdynamischen Ausprägungen durch die Varianten abgedeckt werden kann. Allerdings ist wegen des konventionellen Vorderachsenlenkgetriebes mit fester Übersetzung keine unabhängige Gestaltung von Zeitverhalten und stationärer Verstärkung möglich, so dass unterschiedliche Hinterachslenkübersetzungen zu unterschiedlichen Gierverstärkungen führen.

Bei der Interpretation der Ergebnisse stützt sich REDLICH hauptsächlich auf die in Bild 1.4 dargestellten Korrelationen, wobei in diesem Diagramm nur eine Teilmenge sämtlicher Objektivkennwerte dargestellt wird. Die Subjektivurteile stammen aus einer allgemeinen Beurteilungsfahrt ohne Vorgaben, nicht aus dem ebenfalls gefahrenen und bewerteten Doppelspurwechsel.

Der Autor geht von einem Haupteinfluss des Schwimmwinkels sowie der Gierverstärkung auf das Subjektivurteil aus. Seiner Ansicht nach wirken sich ein niedriger Schwimmwinkel sowie eine nicht zu hohe Gierverstärkung positiv auf die Subjektivbeurteilung aus, was durch die entsprechenden Korrelationskoeffizienten belegt wird. Durch die nicht änderbare Vorderachslenkübersetzung sind beide Größen allerdings stark voneinander abhängig, so dass eine niedrigere Gierverstärkung gleichzeitig in einem reduzierten Schwimmwinkel resultiert.

Ergänzend kann angemerkt werden, dass auch andere Objektivkennwerte der Untersuchung starke Korrelationen zur Gierverstärkung oder zum Schwimmwinkel aufweisen. Beispielsweise zeigt die stationäre Gierverstärkung eine mit  $r = -0.905$  recht hohe Korrelation zur Lenkfrequenz bei  $-45^\circ$  Querbeschleunigungsphase. Auch dieser Kennwert dürfte somit eine starke Korrelation zum Subjektivurteil aufgewiesen haben.



**Bild 1.4:** Subjektiv-Objektiv-Korrelationen aus der Untersuchung von REDLICH [Red94]

## **Hisaoka, Yamamoto, Fujinami: „A Study on Desirable Steering Responses and Steering Torque for Driver’s Feeling” [HYF96]**

Die Autoren berichten in ihrer Veröffentlichung von Versuchen mit einem vollständig elektronisch gesteuerten Experimentalfahrzeug. Sowohl Vorderachs- als auch Hinterachslenkung werden über elektrische Aktuatoren angesteuert, das Lenkrad ist mechanisch entkoppelt und das Lenkmoment wird über einen weiteren elektrischen Steller erzeugt.

Durch die vollkommene mechanische Entkoppelung von Lenkwinkel, Lenkmoment, Vorderachslenkungswinkel und Hinterrad-Lenkungswinkel ist es möglich, das Fahrzeugverhalten in einem weiten Bereich zu verschieben.

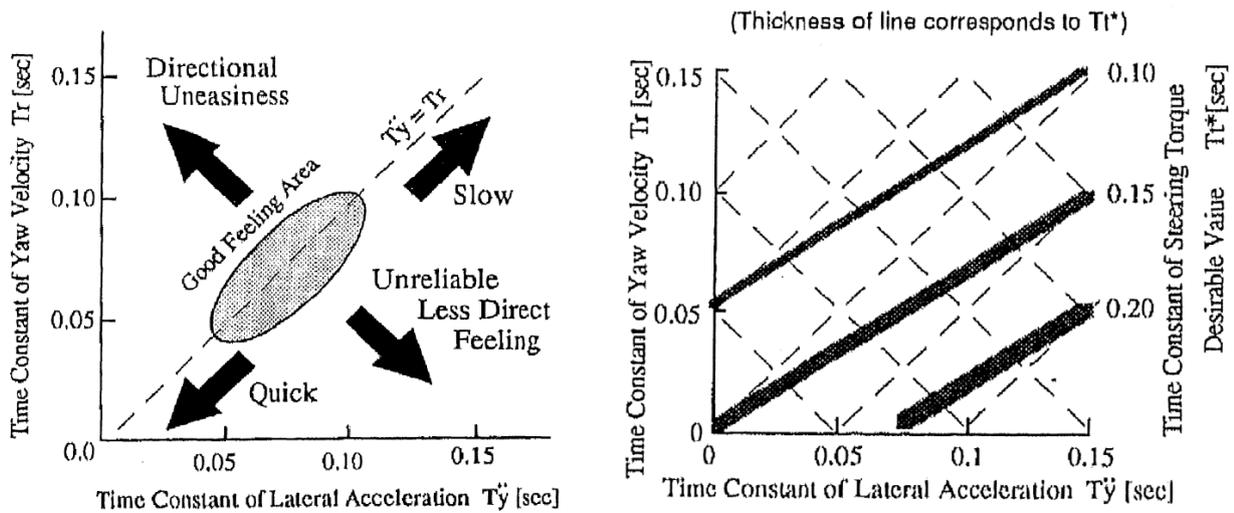
Bei den durchgeführten Versuchen erfolgt die Ansteuerung der Aktuatoren so, dass ein  $PT_1$ -Übertragungsverhalten der Gierrate und Querschleunigung sowie ein  $DT_1$ -Glieder für das Lenkmoment vorgegeben werden. Obwohl konventionelle Fahrzeuge nach der Theorie des Einspurmodells ein  $PDT_2$ -Verhalten zeigen, scheint den Autoren die Reduzierung von  $PDT_2$ - auf  $PT_1$ -Verhalten zulässig, da als Fahrmanöver ein relativ niederfrequenter (0,3 Hz) Spurwechsel durchgeführt wird. Der Spurwechsel soll ein typisches Fahrmanöver auf mehrspurigen Schnellstraßen simulieren, bei dem auf 100 m Fahrstrecke ein Spurversatz von 3,5 m realisiert wird.

Innerhalb des für die Beurteilung relevanten Fahrdynamikbereichs ist es den Autoren somit möglich, eine Fahrdynamiksimulation im Realfahrzeug („in-drive-Simulation“) durchzuführen. Allerdings wird als Funktionsnachweis der Fahrdynamikregelung lediglich ein Zeitschrieb aus einem langsamen Spurwechsel präsentiert, Messungen aus Standardmanövern mit Open-Loop Kennwerten werden nicht dargestellt.

Im ersten Versuchsteil variieren die Autoren die Zeitkonstanten der Gierrate und Querschleunigungsreaktion auf Lenkwinkleingaben, wobei die stationäre Gierverstärkung und die Zeitkonstante des Lenkmomentaufbaus konstant gehalten werden. Durch Spurwechselversuche kann darauf hin ein Zielgebiet im Kennfeld der Parameter definiert werden, in welchem die Subjektivwertung am besten ausfällt (s. Bild 1.5 links).

In einem folgenden Versuchsabschnitt wird den Probanden die Möglichkeit gegeben, individuell die von ihnen bevorzugte Vorhaltezeit des Lenkmoments einzustellen. Durch Mittelung der Ergebnisse entsteht auf diese Weise ein Kennfeld (Bild 1.5 rechts), welches die Isolinien der optimalen Lenkmomentvoreilung über den Zeitkonstanten der Gierrate und Querschleunigung darstellt.

Aus methodischer Sicht kann festgestellt werden, dass die hier realisierte Trennung der drei primären Querdynamikgrößen Gierrate, Querschleunigung und Lenkmoment völlig neue Möglichkeiten für Grundlagenuntersuchungen bietet. Allerdings kann vermutet werden, dass die Durchführung eines relativ niederdynamischen Manövers nicht zuletzt darum gewählt wird, weil die Systemdynamik der Steer-by-Wire-Komponenten den höherdynamischen



**Bild 1.5:** Kennwerte optimaler Fahrzeugreaktion auf Lenkeingaben (links), Kennwerte optimaler Lenkmomentvoreilung (rechts) [HYF96]

Bereich (beispielsweise Slalom oder ISO-Spurwechsel) nicht mehr verzerrungsfrei abdecken kann.

Zum angegebenen Optimalgebiet der Gier- und Querschleunigungsverzögerung kann angemerkt werden, dass aus gleich großen Zeitkonstanten für diese beiden Größen ein stark reduzierter (dynamischer) Schwimmwinkel nahe Null resultiert. Dies deckt sich prinzipiell mit Erfahrungen, die an anderer Stelle (beispielsweise in [WDW92]) mit Hinterachslenkungen gemacht werden.

Offen bleiben muss eine Bewertung der von den Autoren geäußerten Schlussfolgerung, dass bei einer Verzögerungszeit unter 0,05 s (s. Bild 1.5 Mitte) die Fahrzeugreaktion für den Fahrer zu schnell erfolge. Die in diesem Bereich festgestellte Verschlechterung der Subjektivbewertung könnte auf einen sehr dynamischen Vorsteueranteil der Lenkungsregelungen zurückzuführen sein, welche ab einer gewissen Schwelle die natürliche Reaktionsträgheit des Grundfahrzeugs überwinden muss. Andere Veröffentlichungen, beispielsweise [WD78] oder [Sta97], geben an, dass schnelleres Fahrzeugverhalten tendenziell stets positive Auswirkungen auf die Subjektivbewertung habe, es also auch keine Untergrenze für die Reaktionszeit gebe.

## Riedel, Arbinger: „Subjektive und objektive Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw“ [RA97]

Die Veröffentlichung von RIEDEL und ARBINGER stellt das Ergebnis einer sehr umfangreichen Untersuchung dar, an welcher 40 Probanden insgesamt 6 an einem Fahrzeug dargestellte

Varianten sowohl im Doppelspurwechsel als auch bei Landstraßenfahrt beurteilen. Die Fahrzeugvarianten werden durch unterschiedliche Bereifungen und Beladungszustände realisiert.

Neben Normalfahrern nehmen auch Expertenfahrer an den Beurteilungsfahrten teil. Als Besonderheit der Untersuchung kann gewertet werden, dass der Fragebogen speziell im Hinblick auf die beteiligten Normalfahrer hin entwickelt und ausgerichtet wurde. Dies resultiert in teils ungewöhnlich formulierten Bewertungskriterien, beispielsweise „*Das Fahrzeug lag sicher auf der Fahrbahn*“. Das Ziel dabei ist es, in der Begriffswelt von Nicht-Experten zu bleiben.

Um die Aussagen der Probanden zu verifizieren, werden umfangreiche statistische Analysen der Subjektivurteile durchgeführt, ferner wird der Fragebogen in einem eigenen Projektabschnitt mit erheblichem Aufwand entworfen. Die Objektivdaten werden durch Open-Loop Versuche gewonnen, wobei die Kennwerte der stationären Kreisfahrt und des Lenkwinkelsprungs mit den Subjektivurteilen korreliert werden.

In einem Anschlussprojekt [RA00] wird die vorhandene Versuchsdatenbank weiteren Analysen unterzogen. Die Hauptergebnisse werden qualitativ folgendermaßen formuliert:

*Es war eine sehr große Zahl von objektiven Kenngrößen definiert und hypothesenfrei auf den Zusammenhang mit den subjektiven Äußerungen der Fahrer untersucht worden. Herausgearbeitet wurde, daß von allen untersuchten objektiven Kennwerten die Größen*

- *Zeitverzug zwischen Lenkradwinkel und Giergeschwindigkeit,*
- *Zeitverzug zwischen Lenkradwinkel und Querbesehleunigung,*
- *Schwimmwinkel, Schwimmwinkelgeschwindigkeit sowie*
- *Wankgeschwindigkeit*

*den stärksten Zusammenhang mit den Subjektivurteilen der Fahrer – insbesondere der professionellen Versuchsfahrer – aufwiesen. [RA00]*

### **Chen, Crolla: „Subjective and objective Measures of vehicle handling” [CC98]**

Die Untersuchung von CHEN und CROLLA wird mit einem einzelnen Fahrzeug durchgeführt, an welchem durch Variation der Reifen, Dämpfer, Stabilisatoren und Spur über Radhub insgesamt 16 Varianten dargestellt werden.

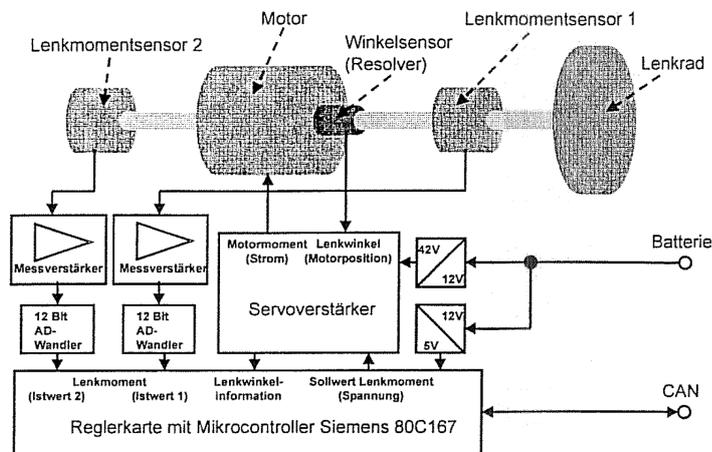
Die Objektivdaten werden in den Manövern stationäre Kreisfahrt, Lenkwinkelsprung und Impulsenken gewonnen. Die Subjektivbewertung erfolgt durch 8 professionelle Versuchsfahrer auf einem Testgelände, wobei als einzige Vorgabe hinsichtlich der zu fahrenden Manöver gilt, dass die Beurteilung lediglich bis zu mittleren Querbesehleunigungen stattfinden solle.

Die Autoren sehen bewusst davon ab, den Fahrern konkrete Fahraufgaben zu geben und das Fahrprogramm genauer zu definieren. So liegt die Streuung der Subjektivurteile erwartungsgemäß hoch.

Dennoch können einige Objektivkennwerte identifiziert werden, deren Signifikanzniveau ausreichend hoch liegt, um ihnen eine Bedeutung für die Subjektivbewertung zuzuschreiben. Dabei stellen die Autoren fest, dass 6 dieser 7 Kennwerte das transiente Fahrzeugverhalten kennzeichnen und aus den Fahrversuchen zum Frequenzgang und Sprungantwort stammen. Lediglich der Schwimmwinkelgradient bei 0,4 g Querschleunigung erreicht als einziger Stationärkennwert ein ähnlich hohes Signifikanzniveau.

## Buschardt: „Synthetische Lenkmomente“ [Bus03]

Bereits ein Jahr vor BARTHENHEIER (s.u.) veröffentlicht BUSCHARDT seine Untersuchungsergebnisse zum Thema Lenkmomentgestaltung. Dabei verwendet er ein im Aufbau sehr ähnliches Versuchsfahrzeug (s. Bild 1.6), bei dem der hydraulischen Servolenkung eine Lenkmomentaktuatorik hinzugefügt wird. Somit ist es möglich, innerhalb gewisser dynamischer Grenzen eine beliebige Lenkmomentcharakteristik zu gestalten.



**Bild 1.6:** Lenkmomentaktuator des Versuchsfahrzeugs von BUSCHARDT [Bus03]

Fahrbahn auftreten. Bewertet werden hierbei vier verschiedene Lenkmomentcharakteristiken in Relation zur Standardlenkung: Eine momentenfreie Lenkung, eine federzentrierte Lenkung sowie gierraten- bzw. querschleunigungsabhängige Lenkmomente. Zusätzliche Varianten entstehen durch Kombinationen sowie die Beeinflussung der Lenkungsreibung in Abhängigkeit des Fahrbahnreibwerts.

Die Ergebnisse zeigen, dass die momentenfreie Lenkung erwartungsgemäß am schlechtesten abschneidet. Bereits die federzentrierte Lenkung erzielt in vielen Versuchsabschnitten

In der Zielsetzung der Arbeit unterscheidet sich BUSCHARDT von der Arbeit BARTHENHEIERS. Neben der Gefallensbewertung untersucht BUSCHARDT die Fahrerbeanspruchung und die objektiv messbare Fahrleistung, um die Qualität der Informationsübermittlung der synthetischen Lenkmomente zu bewerten.

Als Parcours durchfahren die Probanden verschiedene Spurwechsel und Slalomabschnitte, auf denen teilweise Reibwertsprünge der

eine ähnliche gute Bewertung wie die Referenzlenkung. Die gierraten- und quereschleunigungsabhängigen Lenkmomentcharakteristiken werden oftmals etwas besser als die Referenzlenkung bewertet.

## Henze: „Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe eines Fahrermodells“ [Hen04]

In der Arbeit von HENZE werden die Untersuchungen nicht im Versuchsfahrzeug, sondern im Fahrsimulator der Daimler AG durchgeführt, welcher zum Zeitpunkt der Durchführung der Untersuchung zu den leistungsfähigsten seiner Art gezählt werden kann.

Insgesamt 20 professionelle Fahrzeugbeurteiler verschiedener Fahrzeughersteller geben zu 7 dargestellten Fahrzeugvarianten ihre Subjektivurteile ab. Diese unterscheiden sich durch verschiedene querdynamische Übertragungscharakteristika des Simulationsmodells, beispielsweise eine veränderte Resonanzüberhöhung. Der Parcours umfasst verschiedene Manöver wie Landstraßenfahrt und Slalom.

Als Erweiterung des klassischen Korrelationsansatzes, der direkten Regression der Subjektivbewertungen zu objektiven Fahrzeugparametern, wird ein Fahrermodell entwickelt. Durch die Parametrierung dieses Fahrermodells mit den im Probandenversuch gemessenen Lenkwinkelverläufen und den Fahrzeugmodellparametern können zusätzliche Objektivkennwerte gewonnen werden, beispielsweise die Vorausschauzeit des Fahrermodells. Diese zusätzlichen Kennwerte

			Subjektivnoten								
			Landstrasse	Gesamtnote 1 (aus rel. Bew.)	Gesamtnote 1 (aus abs. Bew.)	Eigenlenkverhalten	Einlenkverhalten	Spurhaltung/-slab.	Anspruchverh. Mittell.	Lenkgetuehl Mittell.	Lenkgetuehl Prop.
Fahrzeug-Kennparameter	[1]	Peak-Response-Time Giergeschwindigkeit [s]	-0.36	-0.37	-0.22	0.33	-0.36	-0.22	-0.33	-0.52	-0.39
	[2]	Gierüberhöhung [%]	0.66	0.35	0.40	0.02	0.53	0.12	0.56	0.66	0.30
	[3]	Gierüberhöhung (log.) [dB]	0.66	0.35	0.40	0.02	0.53	0.12	0.57	0.67	0.32
	[4]	Stat. Schwimmwinkel [°]	-0.77	-0.87	-0.75	-0.79	-0.78	-0.74	-0.87	-0.81	-0.97
	[5]	Schwimmwinkel/Quereschleunigungsgradient [°/(m/s²)]	-0.69	-0.89	-0.73	-0.69	-0.74	-0.77	-0.85	-0.78	-0.95
	[6]	TB-Wert [s°]	-0.78	-0.85	-0.68	-0.35	-0.79	-0.67	-0.86	-0.91	-0.76
	[7]	Aequivalente Verzögerungszeit Querbesch. [s]	-0.85	-0.83	-0.72	-0.31	-0.79	-0.70	-0.87	-0.91	-0.55
	[8]	Aequivalente Frequenz Querbesch. [Hz]	0.82	0.83	0.70	0.26	0.78	0.69	0.85	0.91	0.63

Bild 1.7: Korrelationen der Fahrzeugmodellkennwerte zu den Subjektivnoten im Simulatorversuch nach HENZE [Hen04]

zeigen gegenüber den direkt aus dem Fahrzeugverhalten abgeleiteten Kennwerten teils noch höhere Korrelationen zu den Subjektivurteilen.

Als beste Objektivparameter mit den höchsten Korrelationen zur Subjektivbeurteilung werden zwei Kennwerte des Fahrermodells genannt, der Verstärkungsfaktor sowie die Vorhaltezeit. Da das verwendete Fahrermodell auf den Querversatz zur Solltrajektorie regelt, kann aus dem Lenkwinkel-Querb beschleunigungs-Frequenzgang der Fahrzeugvarianten die objektivierte Subjektivnote berechnet werden. Somit wird bei dieser Untersuchung die Querb beschleunigung als ausschlaggebende Fahrdynamikgröße für die Subjektivbewertung ermittelt, wobei ein flacherer Phasenabfall besser bewertet wird. Dies bestätigt auch die direkte Korrelation der Fahrzeugkennwerte mit den Subjektivnoten ohne den Zwischenschritt des Fahrermodells (s. Bild 1.7).

Generell ist bei Simulatorversuchen die Verlagerung des Versuchs vom Realfahrzeug in die Simulorkabine differenziert zu bewerten. Dem großen Pluspunkt der Reproduzierbarkeit und freien Gestaltungsmöglichkeit der Varianten steht eine nicht genau zu quantifizierende Verfälschung des fahrdynamischen Eindrucks gegenüber, welche eine Festlegung auf bestimmte Objektivkennwerte erschwert.

Eine Betrachtung des Lenkmoments in der Ergebnisanalyse fand nicht statt, wobei sich die untersuchten Varianten den Kennwerten nach hierbei durchaus in gewissem Umfang unterschieden.

### **Barthenheier: „Potenzial einer fahrertyp- und fahrsituationsabhängigen Lenkradmomentgestaltung“ [Bar04]**

Die Veröffentlichung von BARTHENHEIER beschreibt eine umfangreiche Untersuchung zum Thema Lenkmoment. Die Fragestellung der Untersuchung ist, ob verschiedene Beurteilergruppen unterschiedliche Vorlieben bezüglich der Lenkmomentausprägung haben. Insgesamt 197 Probanden nehmen an der Studie teil, wobei auf eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Kriterien „Alter“, „Geschlecht“ und „jährliche Fahrleistung“ geachtet wird. Generell wird versucht, anspruchsvolle „Normalfahrer“ in die Untersuchung aufzunehmen. Voruntersuchungen werden auch mit Beurteilungsexperten durchgeführt.

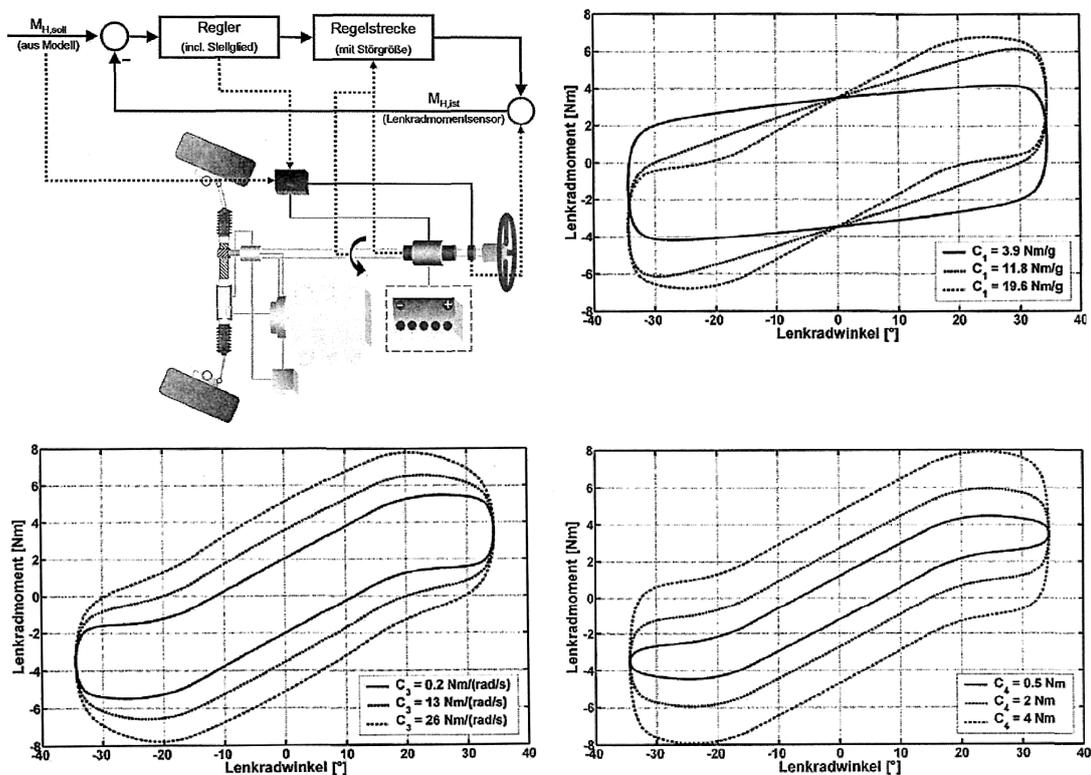
Das Versuchsfahrzeug ist ein Serien-Pkw der Oberklasse mit konventioneller, hydraulischer Servolenkung. Diese wurde zusätzlich mit einem System zur freien Lenkmomentregelung ausgestattet, so dass es innerhalb der Grenzen des Normalfahrbereichs möglich ist, beliebige Lenkmomentcharakteristiken aufzuschalten (s. Bild 1.8 oben links). Dieses Zusatzsystem beinhaltet einen Elektromotor, welcher direkt die Lenksäule antreibt, sowie zwei zusätzliche Momentensensoren. Die verschiedenen Lenkmomentcharakteristiken werden in einem Lenkungsmodell erzeugt, welches über drei Haupt-Parameter eingestellt wird: Rückstellmo-

ment, Dämpfung und Reibung (s. Bild 1.8). Als Vorlage dienen dabei die Messdaten von 22 Serienfahrzeugen verschiedener Hersteller und Fahrzeugklassen.

Der Versuchsparcours umfasst die Abschnitte „Stadt“, „Landstraße“ und „Autobahn“, wobei die Wahl der Geschwindigkeit und maximalen Querbeschleunigung einer alltäglichen Fahrt entsprechen soll.

Die umfangreichen statistischen Auswertungen der Subjektivbewertungen zeigen, dass es zwischen den verschiedenen Teilgruppen der Beurteiler (weiblich/männlich, älter/jünger) teils signifikante Unterschiede in der Bevorzugung bestimmter Lenkmomentcharakteristiken gibt. So besteht die größte Differenz zwischen weiblichen und männlichen Beurteilern bei dem Kriterium „Fahrspaß“ auf dem Landstraßenabschnitt: Frauen wünschen sich ein eher niedriges Lenkmoment, Männer entgegengesetzt ein hohes Lenkmoment. Im Abschnitt „Stadt“ hingegen gibt es größere Unterschiede der Bewertungen zwischen den Gruppen „<33 Jahre / >45 Jahre“, wobei sich die jüngeren Fahrer eine höhere Dämpfung wünschen, die älteren hingegen eine niedrigere.

Bei vielen anderen Kriterien können zwischen den Teilgruppen Übereinstimmungen gefunden werden. Dennoch zeigt die Untersuchung, dass zumindest bezüglich der Lenkmomentgestaltung kein allgemeines Optimum zu existieren scheint.

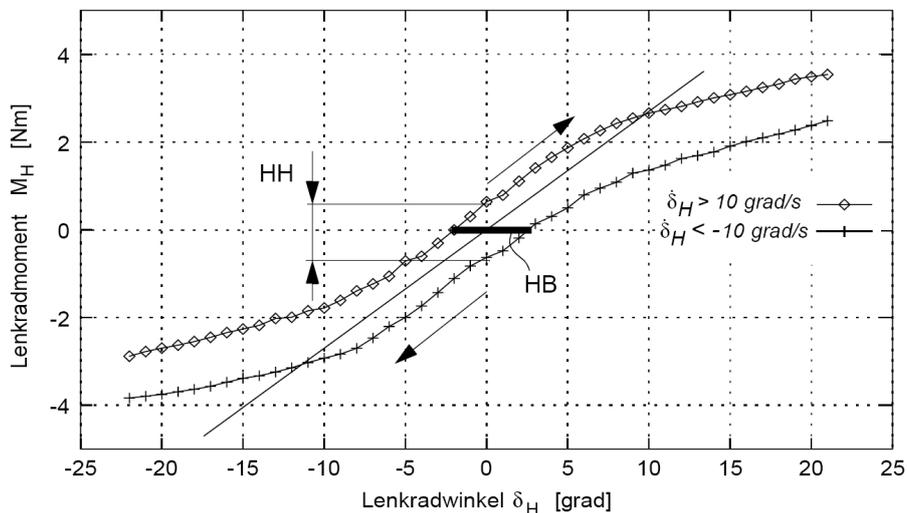


**Bild 1.8:** Lenksystem und Lenkhysterese in Abhängigkeit der drei Parameter Rückstellmoment, Dämpfung und Reibung [Bar04]

## Dettki: „Methoden zur objektiven Bewertung des Geradeauslaufs von Personenkraftwagen“ [Det05]

In seiner Arbeit untersucht DETTKI verschiedene Teilaspekte der Querdynamik, welche den Geradeauslauf beeinflussen. Dazu gehören neben dem Mittengefühl ohne externe Störungen auch Seitenwindeinfluss, Fahrbahnquerneigung und Spurrinnen. Als Prüfstrecke wird ein 12km langer Abschnitt einer Bundesstraße befahren. Die Subjektivurteile zu den verschiedenen untersuchten Fahrzeugen werden von Experten abgegeben.

Für die Bewertung des Mittengefühls können Kennwerte aus dem *Weavetest* (s. Bild 1.9) generiert werden, welche eine hohe Aussagekraft bezüglich des Subjektivurteils aufweisen. Zur Auswertung kommen dabei die Hysteresen der Größen Lenkwinkel-Lenkmoment und Lenkwinkel-Gierrate sowie ihre Gradienten und Krümmungen. Zu den einzelnen Kennwerten werden außerdem Erfahrungswerte für gut und mäßig beurteilte Fahrzeuge angegeben.

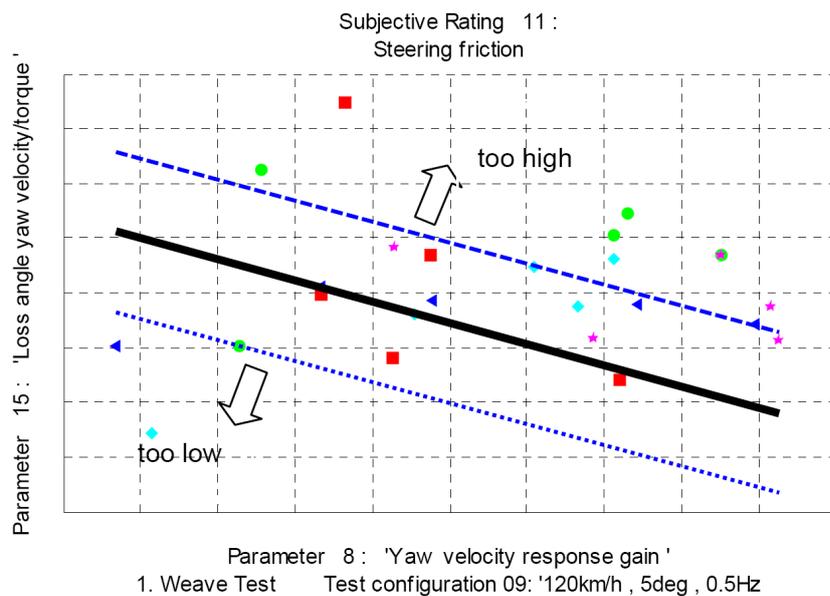


**Bild 1.9:** Auswertung einer Lenkungshysterese nach DETTKI [Det05]

## Harrer: „Characterisation of Steering Feel“ [Har07]

Die Veröffentlichung von HARRER ist eine klassische Objektivierungsarbeit, bei der insgesamt 25 Fahrzeuge aus 5 unterschiedlichen Segmenten (z.B. Roadster, Limousine) in einem umfangreichen Versuchsprogramm objektiv vermessen und subjektiv bewertet werden.

Die objektiven Messungen werden mit Hilfe einer Lenkmaschine durchgeführt, um eine möglichst hohe Wiederholgenauigkeit zu erreichen. Die insgesamt 26 Subjektivwertungen pro Fahrzeug werden nach einem zweistufigen Bewertungsschema vergeben. Die erste Bewertungsstufe ist eine absolute Note nach Bewertungsindizes der 10er-Skala. Bei einer Bewertung schlechter als 8 wird eine Tendenz abgefragt, warum das Fahrzeug in diesem Kriteri-



**Bild 1.10:** Ergebnis einer Regressionsanalyse aus der Arbeit von HARRER/[Har07]

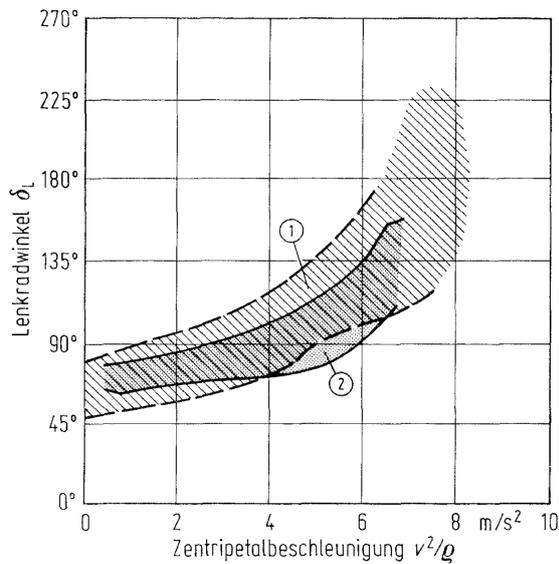
um schlechter bewertet worden ist. Beispielsweise kann beim Kriterium „Lenkwinkelbedarf“ angegeben werden, ob dieser als „zu groß“ oder „zu klein“ empfunden wird.

Ziel der Arbeit ist, für jedes der fünf Fahrzeugsegmente objektive Zielkennwerte anzugeben. Daher werden die objektiven und subjektiven Daten einer intensiven statistischen Analyse unterzogen, welche die Validität der Ergebnisse sicherstellen soll. Bild 1.10 zeigt ein Ergebnis der multiplen Regressionsanalysen für das Beurteilungskriterium „Lenkungsreibung“. Die beiden Achsen sind die Koordinaten zweier Objektivparameter, die Markierungen stellen die vermessenen Fahrzeuge dar. Die dicke schwarze Linie kennzeichnet das berechnete Optimum der Subjektivwertung mit einem  $BI \geq 8$ , zusätzlich sind die Tendenzen („too high“, „too low“) angegeben.

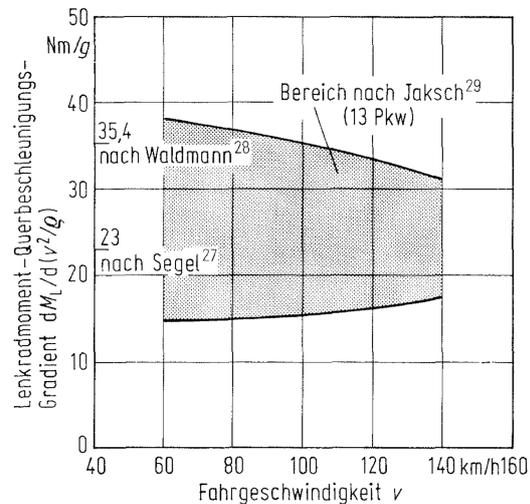
Der Weavetest (s. Abschnitt 2.2.2) stellt sich als das Manöver heraus, dessen Kennwerte die besten Korrelationen zu subjektiven Urteilen ermöglichen. Die übrigen Manöver „Lenkwinkelsprung“, „Frequenzgang“, „Sinuslenken mit einer Periode“, „Anlenken aus der Mitte“ und „Geradeausfahrt“ erzielen ebenfalls teils signifikante Korrelationen, wobei die objektiven Kennwerte dieser Tests untereinander teilweise hoch korreliert sind. Die Kennwerte aus dem Fahrmanöver „stationäre Kreisfahrt“ hingegen erzielen keine signifikanten Korrelationen.

## Mitschke, Wallentowitz: „Dynamik der Straßenfahrzeuge“ [MW04]

Die Veröffentlichung von MITSCHKE und WALLENTOWITZ befasst sich nicht hauptsächlich mit der Objektivierung der Fahrdynamik, vielmehr geben die Autoren an einigen Stellen zusammenfassend Erfahrungswerte aus der Literatur und eigenen Forschungen wieder.



**Bild 1.11:** Lenkwinkel-Bereich von gut bewerteten Fahrzeugen aus verschiedenen Untersuchungen (40 m-Kreis) [MW04]



**Bild 1.12:** Lenkmomentgradienten von gut bewerteten Fahrzeugen aus verschiedenen Untersuchungen [MW04]

### Stationäre Querdynamik

Danach gilt für die stationäre Querdynamik (Kreisfahrt), dass Fahrzeuge dann als gut bewertet werden, wenn Sie untersteuernd sind, also bei konstantem Bahnradius mit zunehmender Querbeschleunigung einen größer werdenden Lenkwinkelbedarf entwickeln [MW04, S. 572]. Der bei gut beurteilten Serienfahrzeugen messbare Bereich weist allerdings eine sehr große Streuung auf (s. Bild 1.11), so dass aus dem Manöver „Kreisfahrt“ keine allzu spezifischen Auslegungsempfehlungen abgeleitet werden können.

Beim Schwimmwinkel geben die Autoren folgende Einschätzungen wieder: Generell solle dieser möglichst klein sein, sowohl absolut, als auch im Verlauf über der Querbeschleunigung. Gleichzeitig wird darauf hingewiesen, dass sich der Schwimmwinkel direkt nur bei hinterachs-gelenkten Fahrzeugen frei beeinflussen lässt, ansonsten lediglich (in engen Grenzen) über die Seitenkraftsteifigkeit der Hinterachse [MW04, S. 575].

Für das Lenkmoment wurde wie beim Lenkwinkelbedarf ein breites Streuband (s. Bild 1.12) gefunden, genauer für den Lenkmoment-Querbeschleunigungsgradienten. Die Obergrenze sei durch die physische Belastung des Fahrers definierbar, eine untere Grenze ergebe sich aus der Kontrollierbarkeit (Zentrierung) bei hohen Fahrgeschwindigkeiten [MW04, S. 576].

### Instationäre Querdynamik

Für den Bereich der instationären Querdynamik werden die Ergebnisse aus Forschungen folgendermaßen zusammengefasst: Die im Manöver Lenkwinkelsprung ermittelbaren Ansprechzeiten der Gier- und Querschleunigungsreaktion sollten möglichst gering sein, wobei unklar ist, ob ein extrem schnelles Ansprechen für den Fahrer wiederum ungünstiger sein könnte [MW04, S. 601].

Ein bekannter Kennwert aus dem Lenkwinkelsprung ist der *TB-Wert*, welcher das Produkt aus Gieransprechzeit und stationärem Schwimmwinkel ist. Dieser Kennwert habe einen nachgewiesenen Einfluss auf die subjektive Beurteilung. Über die Höhe des Überschingers nach dem Lenkwinkelsprung existieren widersprüchliche Meinungen.

Aus dem Frequenzgang eines Fahrzeugs ergebe sich folgendes: Für schnelles Fahren auf kurvenreicher Strecke (Landstraße) werde eine hohe Dämpfung gewünscht, was jedoch in Widerspruch zur Forderung nach einer möglichst kurzen Ansprechzeit stehe. Des Weiteren solle der Querschleunigungs-Amplitudengang nicht zu früh abfallen, die Überhöhung des Giergeschwindigkeitsfrequenzgangs solle nicht zu hoch sein, der Phasenwinkel zwischen Lenkeingabe und Fahrzeugreaktion sollte generell klein sein [MW04, S. 610].

## 1.3 Stand der Objektivierung der Querdynamik

### Charakteristische Kennwerte der Querdynamik

Die Fahrzeugquerdynamik kann mittels einer Reihe verschiedener Manöver charakterisiert werden. Grundsätzlich kann dabei zwischen Manövern im offenen oder geschlossenen Regelkreis unterschieden werden, auch als Open-Loop bzw. Closed-Loop bezeichnet.

#### Open-Loop

Die gebräuchlichsten Manöver im Open-Loop sind die stationäre Kreisfahrt, der Lenkwinkelsprung sowie Sinuslenken bei konstanter oder wechselnder Frequenz. Seltener verwendet werden die Manöver Dreieckslenkimpuls, stochastisches Lenken, Lenkwinkelrampe und Sinuslenken mit einer Periode. Bild 1.13 zeigt eine Übersicht der beschriebenen Fahrmanöver.

Die Auswertung der Manöver erfolgt entweder im Zeitbereich (Lenkwinkelsprung), im Frequenzbereich (Sinuslenken bei wechselnder Frequenz) oder im Phasendiagramm (Sinuslenken mit konstanter Frequenz, Weavetest). Als Bezugsgröße wird meist der Lenkwinkel verwendet, dieser gilt als primäre Stellgröße des Fahrers. Das Lenkmoment wird meist eher der Fahrzeugreaktion zugeordnet, weniger als Lenkeingabe des Fahrers betrachtet.

Die *stationäre Kreisfahrt* scheint für die subjektive Bewertung des Fahrverhaltens eher geringe Bedeutung zu haben. Dies wird dadurch deutlich, dass die im Markt befindlichen

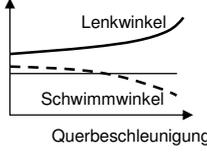
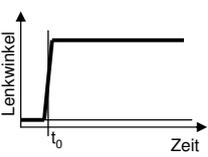
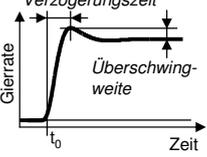
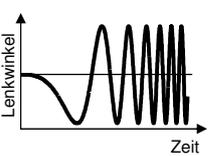
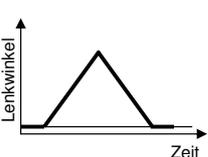
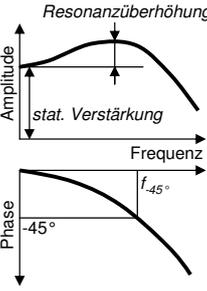
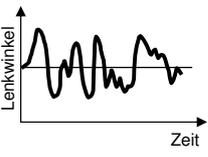
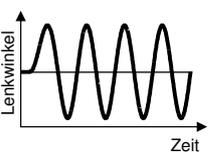
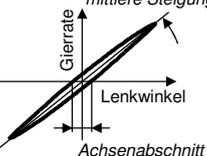
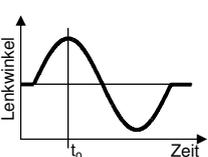
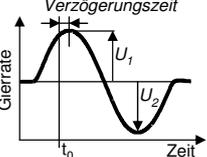
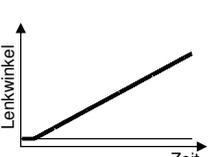
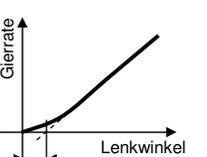
Fahrmanöver	Lenkwinkleingabe	Auswertung	Kennwerte	Literaturquellen
(quasi-) stationäre Kreisfahrt	konstanter Lenkwinkel		Verlauf fahrdynamischer Größen über der Querbeschleunigung	[WD78], [Dib92], [Fuc93], [Red94], [RA97], [CC98], [Hen04], [Har07]
Lenkwinkelsprung			Verzögerungszeiten, Überschwingweite, stat. Verstärkungsfaktor	[Kud89], [Dib92], [Fuc93], [Red94], [RA97], [CC98], [Hen04], [Har07]
Sinuslenken mit steigender Frequenz		numerische Berechnung des Übertragungsverhaltens, z.B. <i>Lenkwinkel-Gierrate</i>	stat. Verstärkungsfaktor, Resonanzüberhöhung, Frequenz bei $-45^\circ$ Phase (→ äquivalente Verzögerungszeit)	[WD78] (nur Kennwerte), [Dib92], [Red94], [Hen04], [Har07]
Dreieckslenkimpuls		Darstellung im Bodediagramm		[MOYS90], [Dib92], [CC98]
stochastisches Lenken				[Dib92], [RA97]
Sinuslenken mit konstanter Frequenz (Weavetest, Microsinus)			mittlere Steigung, Achsenabschnitte, max./min. Gradient	[Dep89], [Fuc93], [Det05], [Har07]
Sinuslenken mit einer Periode			Verzögerungszeiten, Amplitudenverhältnisse $U_2/U_1$	[Kud89], [Dib92], [Har07]
Lenkwinkelrampe			Achsenabschnitte, Maxima der Gradienten, z.B. $\frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \delta_H}$ , $\frac{\partial \dot{j}}{\partial \delta_H}$	[Har07]

Bild 1.13: Open-Loop-Manöver und Diagramme zur Charakterisierung der Querdynamik

Fahrzeuge eine große Bandbreite an Lenkwinkeln und Lenkmomenten über der Querbeschleunigung zeigen (s. Bild 1.11). Lediglich der Schwimmwinkel scheint eine gewisse Bedeutung zu haben, er solle möglichst klein bleiben.

Den eindeutig größeren Einfluss auf die subjektive Bewertung hat das *instationäre Fahrverhalten*. Durch Auswertungen im Zeit- und Frequenzbereich lassen sich zwei hauptsächliche Kenngrößen definieren: Die Ansprechzeit (Phasenabfall) und die Überschwingweite (Resonanzüberhöhung). Sämtliche Kennwerte, welche sich aus diesen Grundgrößen ableiten, sind stark miteinander verknüpft und überlappen sich in ihrer Aussage.

Es ließen sich bisher keine quantifizierte Auslegungsempfehlungen erarbeiten, lediglich Tendenzen: Die Schnelligkeit der Fahrzeugreaktion ist besonders in kritischen Fahrsituationen wie Ausweichen (Doppelspurwechsel) wichtig, das Fahrzeug sollte schnellstmöglich auf Fahrereingaben reagieren. Aus dieser Forderung folgt, dass die Ansprechzeiten aus dem Lenkwinkelsprung und somit die Phasenverzögerungen im Frequenzgang möglichst klein sein sollten, was Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung im Bezug auf den Lenkwinkel betrifft. Unklar ist, ob es auch eine untere Grenze gibt, das Fahrzeug also nicht zu schnell auf Fahrereingaben reagieren darf.

Die Überschwingweite bzw. Resonanzüberhöhung hat anscheinend keinen eindeutigen Einfluss auf das subjektive Empfinden, es wird eine Obergrenze vermutet, die jedoch nicht quantifiziert werden konnte.

Typisch für den Alltagsbetrieb ohne „Sonderereignisse“ sind relativ niedrige Querbeschleunigungen und niedrige Lenkfrequenzen. Als charakterisierendes Fahrmanöver für diesen niederdynamischen Bereich wird der Weavetest verwendet, also sinusförmiges Lenken mit niedriger Frequenz (z.B. 0,2 Hz) und kleiner Querbeschleunigungsamplitude (z.B. 0,2 g). Aus diesem Manöver lassen sich in Phasendiagrammen die Verhältnisse der fahrdynamischen Größen zueinander darstellen, beispielsweise die Hysteresekurve Lenkwinkel-Lenkmoment. Kennwerte hieraus werden meist aus Ausgleichsgeraden (also linearisiert) oder als Achsenabschnitte definiert.

### **Closed-Loop**

Ein bekanntes Manöver zur Querdynamik-Beurteilung ist der doppelte Fahrspurwechsel nach [ISO99], bei dem eine mit Pylonen abgesteckte Sollfahrspur eingehalten werden soll. Im Gegensatz zu den Manövern des Open-Loop muss der Fahrer hier regelnd den Ist-Kurs des Fahrzeugs dem Soll-Kurs nachführen.

Der Fahrer hat durch seine Fahrstrategie im Closed-Loop einen entscheidenden Einfluss auf die Versuchsergebnisse. Kennwerte, wie beispielsweise die Durchfahrtzeit oder der *KD-Wert* (S. 5, [Dib92]), sind also stets Fahrer-Fahrzeug-Kennwerte, nie jedoch reine Fahrzeug-Kennwerte.

Um dennoch die Ergebnisse aus Closed-Loop-Manövern in Probandenversuchen vergleichbar zu machen, wurden verschiedene Verfahren erprobt. Ein Beispiel hierfür ist die fahrerindividuelle Ermittlung der höchstmöglichen Durchfahrtgeschwindigkeit [NKS01]. Einen Schritt weiter geht beispielsweise HENZE (S. 12). Ausgehend von im Closed-Loop gemessenen Daten wird ein Fahrermodell parametrisiert. Diese Parametersätze stellen dann ebenfalls Kennwerte dar, welche zum subjektiven Urteil korrelieren.

Auslegungsempfehlungen sind aus Closed-Loop-Kennwerten prinzipiell schwieriger abzuleiten als aus Open-Loop-Kennwerten, da die unbekannte Regelstrategie des Fahrers sich nicht direkt in konstruktive Fahrzeugparameter übersetzen lässt.

## 1.4 Menschliche Wahrnehmung

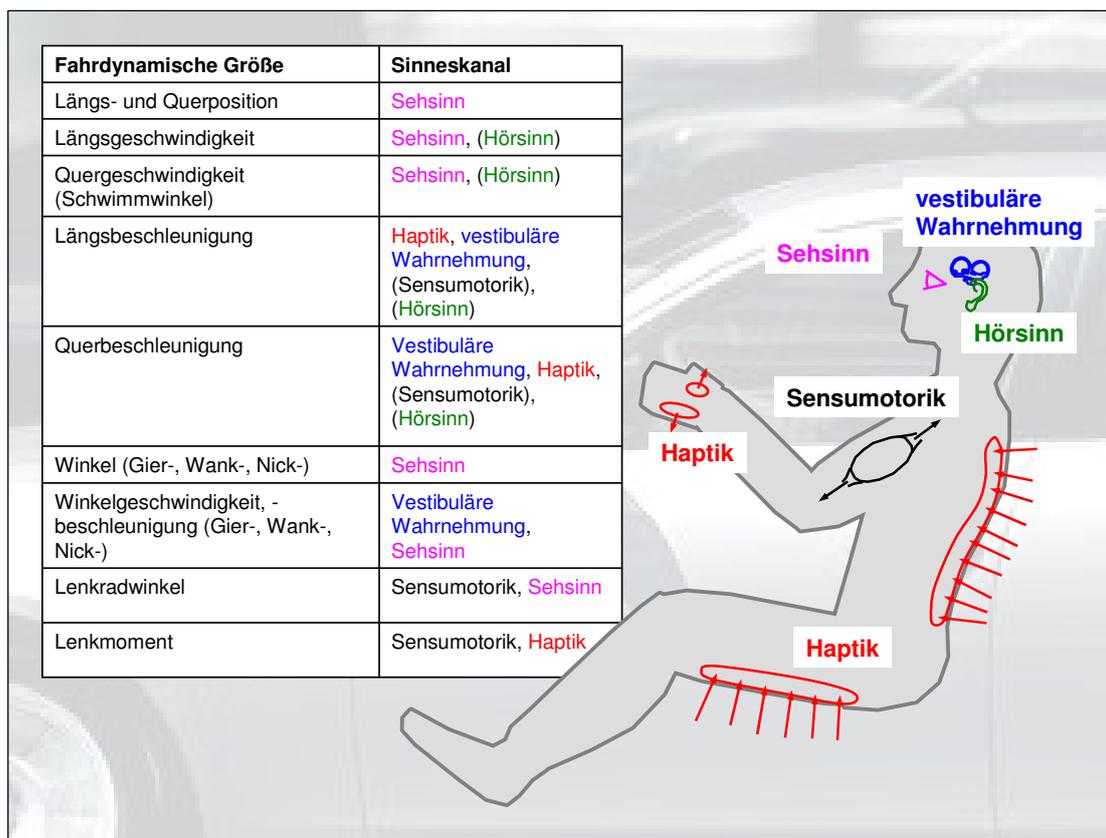
Die Objektivierung der Fahrdynamik versucht, die subjektive Bewertung der Fahrdynamik durch objektive Größen und mathematische Regeln nachzuvollziehen. Wie die Erfahrungen aus der Literatur zeigen, müssen bei der Entwicklung der Methode *Objektivierung* jedoch einige Eigenheiten der menschlichen Wahrnehmung berücksichtigt werden. Ziel der folgenden Ausführungen ist es, ein Bewusstsein dafür zu schaffen, dass die menschliche Wahrnehmung der Fahrdynamik sehr vielschichtig ist. Dies bedeutet letztendlich, dass auch die *Gefallensbewertung* der Fahrdynamik, welche zwangsläufig auf der *Wahrnehmung* basiert, von diesen Eigenheiten beeinflusst wird.

### Varianz

Die menschliche Wahrnehmung weist keine absolut konstanten Faktoren auf. Vielmehr unterscheiden sich die Wahrnehmungen einer gleichen physikalischen Größe oder Größenänderung

- von Mensch zu Mensch,
- in Abhängigkeit der körperlichen und geistigen Verfassung (Müdigkeit, Konzentrationsfähigkeit, Ablenkungsgrad), und
- in Abhängigkeit der Wahrnehmungsdauer (Adaption).

Trotz einiger identifizierter Grundprinzipien der menschlichen Wahrnehmung (beispielsweise die Gesetze von FECHNER und WEBER) unterscheiden sich auch die einzelnen Sinneskanäle in ihren Eigenheiten.



*Bild 1.14: Die menschliche Wahrnehmung der einzelnen fahrdynamischen Größen*

## Verknüpfte Wahrnehmung und Bezugsgrößen

Bei Messungen der Fahrdynamik liefern die einzelnen Sensoren den zeitlichen Verlauf jeweils einer einzigen physikalischen Größe, beispielsweise der Gierrate. Die menschliche Wahrnehmung der Querdynamik hingegen ist von Redundanzen gekennzeichnet. Beispielsweise wird die Gierrate gleichzeitig über den Sehsinn und über das Vestibularorgan<sup>2</sup> wahrgenommen. Auch die weiteren fahrdynamischen Größen, welche sich physikalisch eindeutig definieren lassen, werden meist mehrfach wahrgenommen, wie in Bild 1.14 dargestellt.

Zusätzlich zur Redundanz und der oben beschriebenen Varianz muss berücksichtigt werden, dass der Mensch das Fortschreiten der Zeit nicht immer gleich wahrnimmt. Es kann also nicht vorausgesetzt werden, dass die Zeit die einzige Bezugsgröße der menschlichen Wahrnehmung ist. Vielmehr kann angenommen werden, dass beim Verarbeiten von Sinnesindrücken auch die Verhältnisse der Reize aus verschiedenen Sinneskanälen zueinander als Bezugsgrößen dienen.

<sup>2</sup> Das Vestibularorgan und das Maculaorgan bilden den Gleichgewichtssinn des Menschen. Die beiden Organe befinden sich im Innenohr und nehmen Drehbeschleunigungen (Vestibularorgan) bzw. translatorische Beschleunigungen (Maculaorgan) wahr.

## Bewegungsmuster

Folgendes Beispiel soll die vorangegangenen Überlegungen zu den Besonderheiten der menschlichen Wahrnehmung im Vergleich zur Messtechnik oder Simulation verdeutlichen. Zur Vereinfachung soll die Umwelt bei dieser Betrachtung noch nicht berücksichtigt werden.

*Der Fahrer lenkt auf einer sehr großen, unbegrenzten Fläche aus Geradeausfahrt in eine Kreisbahn, wobei keine Strecke vorgegeben ist (z.B. ausgetrockneter Salzsee). Während dieses Anlenkvorgangs könnte sich der folgende Ablauf an Sinneseindrücken ergeben:*

- *Aufbau einer Spannung im Oberkörper, um über die Arme und Hände ein Lenkmoment aufzubringen; die Hände umgreifen den Lenkradkranz etwas fester.*
- *Das Lenkmoment wird über die Spannung im Muskelapparat des Hand-Arm-Systems sowie haptisch über die Handflächen spürbar.*
- *nach Überwindung der Lenkungsreibung ergibt sich ein Lenkwinkel, hierdurch ändert sich*
  - *die Lage der Arme,*
  - *der optisch wahrnehmbare Winkel des Lenkrads.*
- *die Kursänderung des Fahrzeugs setzt ein, hierdurch ergibt sich*
  - *die optische Wahrnehmung von Gierrate, Wankwinkel und Kursverlauf,*
  - *die vestibuläre Wahrnehmung von Gierrate, Wankwinkel und Quereschleunigung,*
  - *die sensumotorische und haptische Wahrnehmung der Quereschleunigung über den Sitzkontakt und die Anspannung im gesamten Körper zum Ausgleich der Fliehkraft („Verspreizung“),*
  - *die akustische Wahrnehmung, da bei höheren Quereschleunigungen zusätzlich Änderungen im Reifenabrollgeräusch auftreten können.*

In den messbaren physikalischen Größen stellt sich dieser Anlenkvorgang in einem rampenförmigen Anstieg aus Null dar, lässt man die Akustik außer Betracht. Der Zusammenhang und das Zusammenwirken der einzelnen physikalischen Größen zum wahrgenommenen *Bewegungsmuster* gehen hierbei verloren und können vom Ingenieur nicht ohne weiteres aus dem Ablesen der Zeitverläufe nachempfunden werden.

## Schnittstellenverschiebung

Ein weiteres Phänomen der menschlichen Wahrnehmung ist die *Schnittstellenverschiebung*. Zur Verdeutlichung soll ein Beispiel aus [Spi03] wiedergegeben werden:

*In einem Experiment werden einer Versuchsperson die Augen verbunden. Dafür bekommt sie einen Taststab in die Hand, beispielsweise einen Zahnbürstentstiel. Dann muss die Person mit der Spitze des Stabs Oberflächen „betasten“, beispielsweise eine gekachelte Wand mit Fugen, eine Glasscheibe oder einen Teppich.*

*Auch, wenn die Person die betasteten Gegenstände noch nie gesehen hat, kann sie bereits aus den Informationen, den ihr Tastsinn über das Hilfsmittel Taststab aufnimmt, recht genaue Angaben zur Oberflächenbeschaffenheit der untersuchten Gegenstände machen. Mehr noch, man kann bei diesem Experiment sagen, dass sich die Wahrnehmungsgrenze der Person von der Haut ihrer Finger in die Spitze des Taststabs verschoben hat: die Oberflächen werden nicht direkt mit den Fingern betastet, zwischengelagert ist noch das Werkzeug des Taststabs. An der Haut kommen nur noch stark veränderte taktile Informationen an, welche beim direkten Ertasten der Gegenstände mit den Fingern ganz anders geartet wären.*

Nach SPIEGEL gäbe es weitere Beispiele, welche die Idee der Schnittstellenverschiebung verdeutlichen. Eines stammt aus dem Motorradsport, wo exzellente Fahrer davon berichten, dass sie *spüren*, wie der Reifen auf der Straße haftet (oder vielmehr, wie stark er bereits in Gleitreibung übergegangen ist). Es würde sich hier um eine Schnittstellenverschiebung von den physikalischen Kontakten des Fahrers mit seinem Motorrad (Hände, Gesäß, Füße, Oberschenkel) hin zum Reifenlatsch handeln.

Sinn dieser Ausführungen soll nicht sein, die eventuelle Existenz eines Phänomens „Schnittstellenverschiebung“ genauer zu erörtern oder theoretisch zu beweisen. Es handelt sich jedoch um eine interessante Hilfsvorstellung, welche bei der Analyse der menschlichen Wahrnehmung im Bezug auf die Fahrdynamik Denkanstöße liefert.

Festzustellen ist jedenfalls, dass es dem Menschen möglich ist, wie im oben geschilderten Experiment mit dem Tastinstrument stark kodierte Reize in Informationen zu übersetzen, welche ihm die Beurteilung des eigentlichen Objekts ermöglichen. Es kann angenommen werden, dass dabei der Erfahrungsschatz des Menschen eine wichtige Rolle spielt, und dass der Mensch in bisher unbekanntem Situationen weniger Erfolg mit der Reizdekodierung hat. Ebenfalls ist anzunehmen, dass bei der Reizdekodierung nicht nur ein einzelner Sinn des Menschen beteiligt ist. Im oben dargestellten Versuch könnte der Hörsinn eine zusätzliche Informationsquelle darstellen, welcher über das Geräusch der reibenden Stabspitze weitere Hilfsinformationen zu Dekodierung des komplexen Reizmusters liefert.

Der Wert des erwähnten Erfahrungsschatzes liegt darin begründet, dass der Mensch in vielfältiger Weise von Modellvorstellungen seiner Umwelt Gebrauch macht. Dies findet beispielsweise Ausdruck in „was-wäre-wenn“-Überlegungen: Der Denker muss eine Modellvorstellung davon haben, was bei den verschiedenen Handlungsoptionen passieren würde. Modellvorstel-

lungen sind somit Resultate aus Überlegungen, die man über zuvor gemachte Beobachtungen angestellt hat. Ein Mensch, der noch nie mit einem Gegenstand in der Hand einen weiteren Gegenstand berührt und „untersucht“ hat, wird im obigen Beispiel des Taststabs sicherlich Probleme bei der Interpretation der empfangenen Reizmuster haben.

Das Stichwort *Reizmuster* schlägt nun die Brücke zu den vorigen Abschnitten: Das Bewegungsmuster eines Fahrzeugs auf eine Lenkeingabe stellt ein komplexes Reizmuster dar, welches vom Fahrer dekodiert wird. Ob beim Wahrnehmen der Fahrzeugbewegungen auch bereits von einer Schnittstellenverschiebung gesprochen werden kann, dürfte von der Erfahrung des Fahrers abhängen: Je ausgiebiger er bereits bewusst die Reaktionen von Fahrzeugen auf seine Lenkeingaben beobachtet und gefühlt hat, desto ausgefeilter dürfte seine Modellvorstellung der Fahrdynamik sein. Eine sehr einfache Modellierung wäre, dass sich auf eine Lenkeingabe hin ein Wankwinkel einstellt. Besonders ausgefeilte Modelle im Kopf des erfahrenen Fahrers stützen sich nicht nur auf solche direkten Beobachtungen, sondern werden durch Detailwissen – beispielsweise über die Dämpfungseigenschaften – unterstützt.

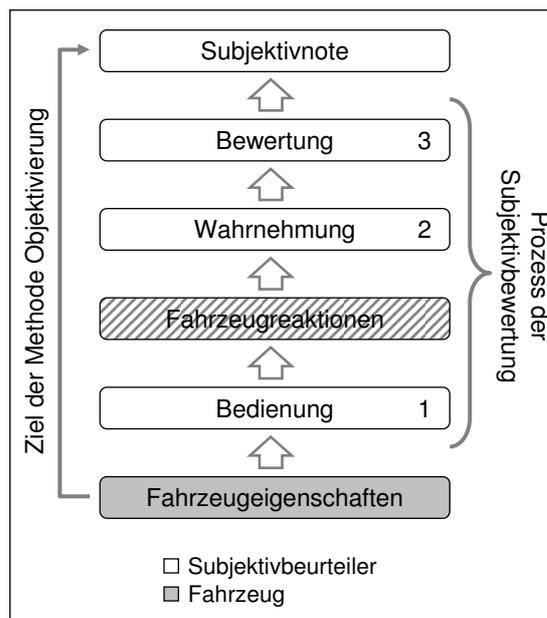
Die Wirkung dieser internen Modellbildung findet beispielsweise darin Ausdruck, dass der Fahrer auf niedrigen Reibwerten bei abfallendem Lenkmoment durch seine Modellvorstellung intuitiv „spürt“, dass die Seitenführungskraft der Vorderachse erschöpft ist. Dies könnte als Schnittstellenverschiebung bezeichnet werden.

## 1.5 Schlussfolgerungen und Versuchsprogramm

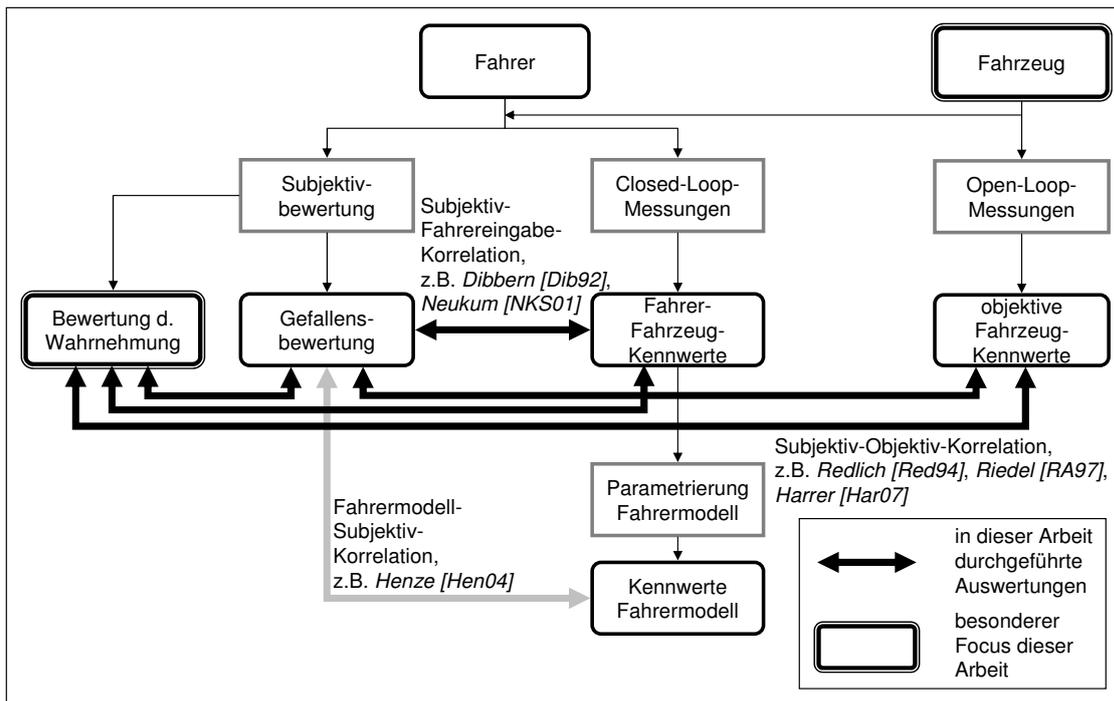
Das Ziel der Objektivierung der Fahrdynamik ist die Herstellung des Zusammenhangs zwischen Fahrzeugeigenschaften und der daraus resultierenden Subjektivbewertung. Wie in Bild 1.15 dargestellt ist, lässt sich der Prozess der Subjektivbewertung in mehrere Zwischenschritte aufteilen: Die Bedienung des Fahrzeugs (1), die Wahrnehmung der Fahrzeugbewegungen (2) sowie die eigentliche Bewertung (3).

Der Literatur können unterschiedliche Ansätze zur Objektivierung entnommen werden (s Bild 1.16). Meist wird versucht, eine direkte Verbindung zwischen den *Fahrzeugreaktionen* und der Subjektivnote herzustellen, ohne methodisch auf die Zwischenschritte 1-3 einzugehen. Neuere Arbeiten wie die von DIBBERN [Dib92] und NEUKUM [NKS01] beziehen die Bedienung des Fahrzeugs in den Objektivierungsprozess mit ein, indem sie die Lenkeingaben während eines standardisierten Fahrmanövers (Doppelspurwechsel) auswerten. BARTHENHEIER [Bar04] und HARRER [Har07] betrachten explizit die Bewertungsebene, indem sie persönliche Präferenzen der Beurteiler bzw. fahrzeugklassenabhängige Beurteilungsmaßstäbe herausarbeiten.

Die mittlere Ebene im Prozess der Subjektivbewertung, nämlich die Wahrnehmung der Fahrzeugreaktionen auf Lenkeingaben, wurde bisher kaum im Realfahrzeug untersucht. Es ist unklar, wie der Fahrer – zunächst wertungsfrei – objektiv unterschiedliche fahrdynamische Ausprägungen subjektiv wahrnimmt. Kernfrage der vorliegenden Arbeit ist somit, welche Zusammenhänge zwischen objektiv messbaren Fahrdynamikparametern, ihrer Wahrnehmung beim Fahrer und der Subjektivbewertung existieren.



**Bild 1.15:** Ebenen der Subjektivbewertung



**Bild 1.16:** Verfahren zur Objektivierung der Querdynamik

Zur Klärung dieser Frage soll ein Probandenversuch im Realfahrzeug durchgeführt werden. Hierfür wird ein geeignetes Versuchsfahrzeug konzipiert, welches die möglichst unabhängige Gestaltung der grundlegenden querdynamischen Eigenschaften ermöglichen soll:

- Verhältnis von Fahrzeugreaktion zu Lenkwinkel, Direktheit;
- Verhältnis von Gierrate und Querschleunigung zueinander, Schwimmwinkel;
- Schnelligkeit des Ansprechens der Gierrate auf Lenkeingaben;
- Lenkmoment.

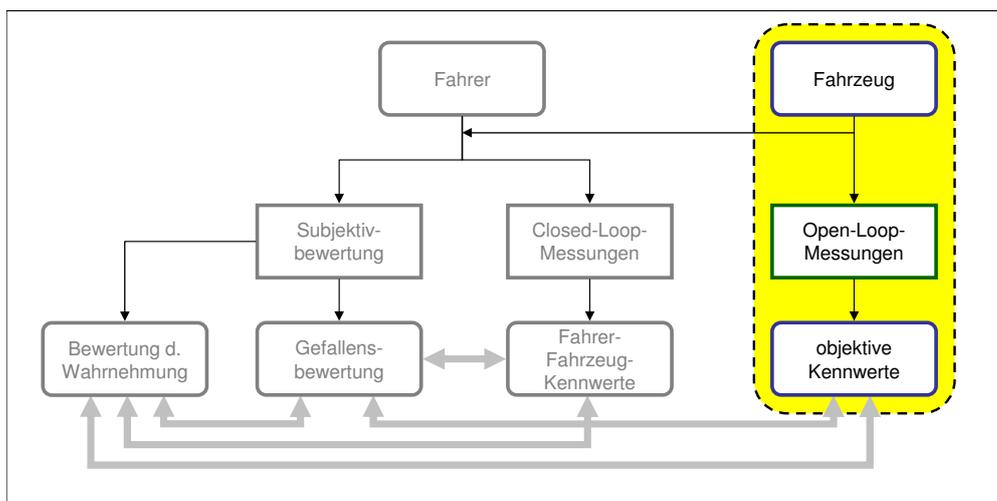


## 2 Objektive Messverfahren und Kenngrößen

In diesem Kapitel werden die in der Arbeit verwendeten objektiven Messverfahren und Kennwerte dargestellt, eine Zuordnung der Inhalte zum gesamten Methodenkomplex zeigt Bild 2.1. Zur Charakterisierung der querdynamischen Eigenschaften sind eine Reihe unterschiedlicher Fahrmanöver bekannt. Die am häufigsten verwendeten Manöver werden in Bild 1.13 aufgeführt, zusammen mit den jeweiligen Diagrammen, aus denen die skalaren Kennwerte gewonnen werden. Diese Kennwerte weisen häufig eine starke Korrelation zwischen den Manövern auf. Es ist jedoch unklar, ob eine vollständige Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen den Manövern gegeben sein könnte [RH84].

Die Auswahl der in dieser Arbeit verwendeten Manöver zur Gewinnung objektiver Kennwerte orientiert sich an folgenden Randbedingungen:

- Es soll eine möglichst geringe Anzahl unterschiedlicher Manöver ausgewählt werden,
- die Manöver sollen gut reproduzierbare Ergebnisse auch ohne Lenkmaschine ermöglichen,
- die Manöver sollen möglichst umfassend die querdynamische Eigenschaften im Proportionalbereich sichtbar machen.



*Bild 2.1: Einordnung Kapitel 2 (vgl. Bild 1.16)*

Aus der Literatur ist bekannt, dass die stationären Fahrzustände wenig Aussagekraft hinsichtlich der subjektiven Bewertung haben [MW04, Har07]. Der Fahrversuch *stationäre Kreisfahrt* wird daher in dieser Arbeit nicht durchgeführt.

Aus den einzelnen Manövern lassen sich skalare Kennwerte generieren. Diese Kennwerte geben die objektiven Fahrdynamikeigenschaften wieder, wobei zwischen den Kennwerten aus unterschiedlichen Manövern starke Korrelationen auftreten können. Die Frage, wie stark diese Zusammenhänge sind, lässt sich jedoch nicht ohne weiteres beantworten [RH84]. Deshalb sollen im nächsten Abschnitt die Ergebnisse der Manöver mit Hilfe eines Einspurmodells miteinander verglichen werden.

## 2.1 Vergleich von Open-Loop-Manövern in der Simulation

Aus den in Bild 1.13 aufgeführten Fahrmanövern lassen sich jeweils manöver-spezifische Kennwerte generieren. Zwischen den Kennwertgruppen der einzelnen Manöver gibt es Gemeinsamkeiten, also sich überlappende Aussagen. Der Grad dieser Korrelationen lässt sich jedoch nicht ohne weiteres abschätzen. Ziel der folgenden Untersuchungen mit dem Einspurmodell ist, eine Abschätzung der Zusammenhänge der objektiven Kenngrößen zwischen den Manövern zu ermöglichen.

### 2.1.1 Erweitertes Einspurmodell

Für die Parameterstudie wird ein erweitertes Einspurmodell verwendet. Um die nichtlinearen Effekte des realen Fahrzeugs qualitativ nachempfinden zu können, werden folgende Erweiterungen gegenüber dem linearen Einspurmodell implementiert:

- Reifen mit degressiver Schräglaufsteifigkeit über Schräglaufwinkel
- seitenkraftabhängige Vorspuränderung der Achsen
- Lenkkraftunterstützung mit Torsionsstab und hydraulischer Lenkkraftunterstützung
- zusätzlicher Wankfreiheitsgrad, um Effekte des Wanklenkens darzustellen

Für die Parameterstudie der verschiedenen Fahrmanöver wird die folgende Auswahl an Modellparametern nach einem Zufallsprinzip variiert:

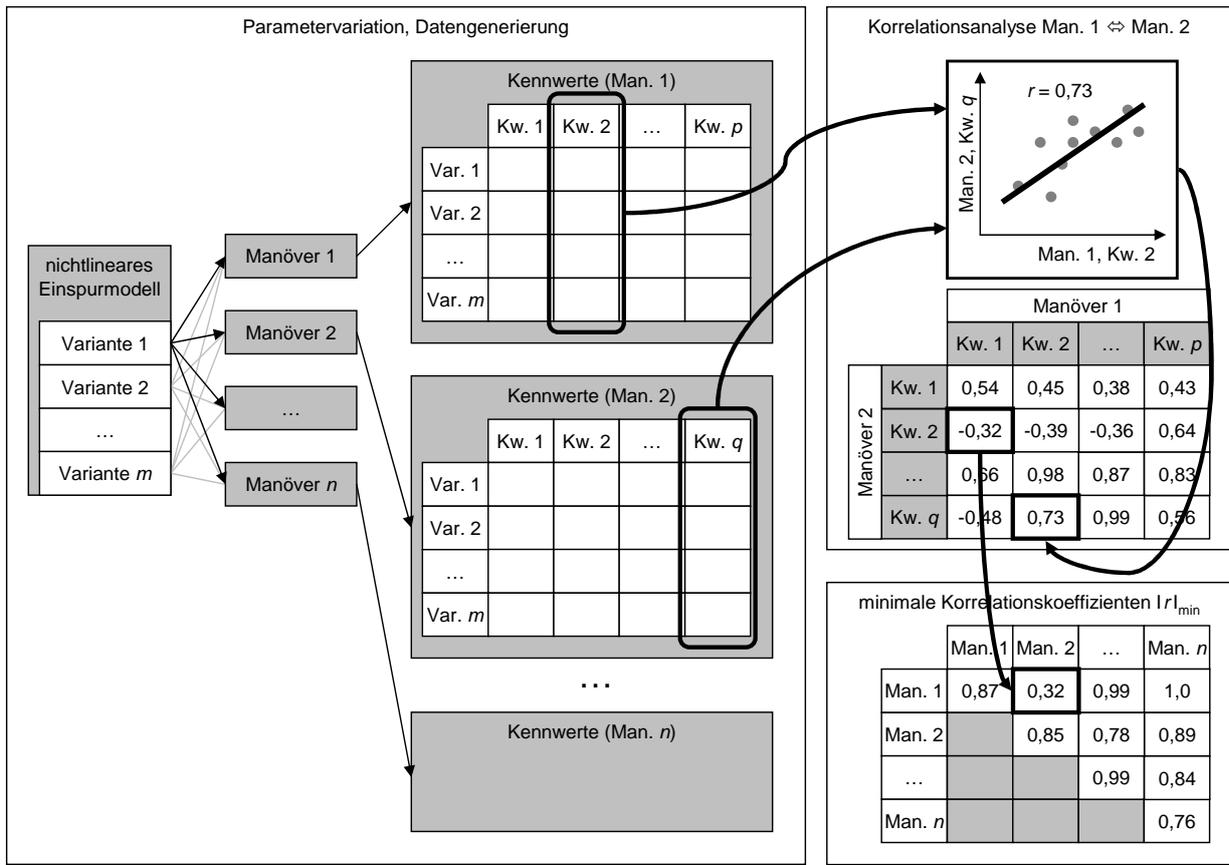
- Fahrzeugmasse
- Gierträgheitsmoment
- Schwerpunktlage
- Radstand
- Achsschräglaufsteifigkeiten
- Lenkungsreibung
- Rolllenken der Hinterachse
- Progression der Lenkungsventilkennlinie
- Kolbenfläche des Lenkgetriebes
- kinematische Vorderachslenkübersetzung
- Lenkübersetzung und Totzeit der Hinterachslenkung

### 2.1.2 Datenerzeugung und -auswertung

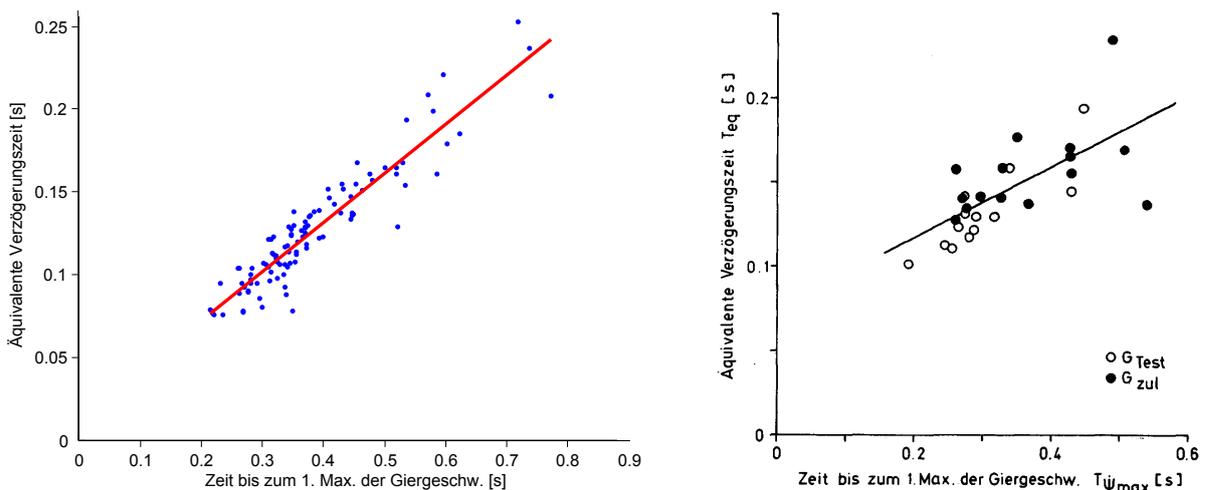
Die Vorgehensweise bei der Erzeugung der Daten und der Datenanalyse wird in Bild 2.2 dargestellt. Durch zufallsbasierte Variation der ausgewählten Parameter des Einspurmodells (s. 2.1.1) werden  $m$  Varianten generiert. Jede dieser Varianten durchläuft die Manöver 1- $n$  (Tabelle 2.1), so dass pro Manöver eine Kennwertematrix entsteht. Die Bewertung der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Manöverkennwerten erfolgt durch eine lineare Regression, aus welcher die Korrelationskoeffizienten  $r$  hervorgehen.

Bei jedem einzelnen Vergleich von zwei Manövern entsteht so eine Korrelationsmatrix der einzelnen Kennwerte. Je stärker sich die Manöver in ihren Aussagen ähneln, desto höher ist der Korrelationskoeffizient. Im Umkehrschluss gilt: Der niedrigste Korrelationskoeffizient sagt aus, in welchen Kennwerten sich die beiden Manöver am stärksten unterscheiden. Diese minimalen Korrelationskoeffizienten werden für die einzelnen Manöverpaare wiederum in der Korrelationsmatrix  $|r|_{min}$  zusammengefasst. Diese Matrix gibt Aufschluss darüber, welche Manöver das größte Differenzierungspotential haben.

Bild 2.3 zeigt die Regression eines Kennwertpaares mit Ergebnissen der Simulation: Die Fahrzeugvarianten bilden in den beiden Dimensionen der gewählten Objektivkennwerte eine Punktwolke, welche durch eine lineare Regressionsgerade angenähert wird. Je enger die Punktwolke bei der Regressionsgeraden liegt, umso besser ist der Korrelationskoeffizient, und umso ähnlicher sind die Aussagen, welche beide Kennwerte liefern. Zum Vergleich sind entsprechende Ergebnisse aus [RH84] abgebildet.



**Bild 2.2:** Vorgehensweise zur Ermittlung der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Fahrmanövern mit Hilfe der Simulation



**Bild 2.3:** Vergleich objektiver Kennwerte aus dem Lenkwinkelsprung und dem Frequenzgang (links: Parametervariation Einspurmodell, rechts: gemessene Fahrzeuge [RH84])

Manöver	Kennwerte	Randbedingungen
Sinuslenken mit steigender Frequenz und konstanter Amplitude	aus Frequenzgängen: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ stat. Verstärkungen</li> <li>○ Resonanzüberhöhungen</li> <li>○ Amplitudengang</li> <li>○ Frequenz bei -3dB Amplitudenabfall</li> <li>○ Phase bei 1,0 Hz Anregungsfrequenz</li> <li>○ Frequenz bei -45° Phase</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>v: 100 \frac{km}{h}</math></li> <li>○ <math> \ddot{y}_{stat} : 4 \frac{m}{s^2}</math></li> <li>○ <math>f: 0-2 \text{ Hz}</math></li> </ul>
Sinuslenken mit konstanter Frequenz und Amplitude	aus den Phasendiagrammen: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Achsenabschnitte</li> <li>○ minimaler, maximaler, mittlerer Gradient</li> <li>○ umschlossene Fläche der Hysteresenkurve</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>v: 100 \frac{km}{h}</math></li> <li>○ <math> \hat{y} : 4 \frac{m}{s^2}</math></li> <li>○ <math>f: 0,25 \text{ Hz}</math></li> </ul>
Sinuslenken mit einer Periode	aus den Zeitschrieben: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Wert und Zeitpunkt des 1. und 2. Extremums</li> <li>○ Verzögerungszeiten <math>t_{\psi} - t_{\delta_H}</math>, <math>t_{\ddot{y}} - t_{\delta_H}</math></li> <li>○ Verhältnisse <math>\frac{\hat{\psi}}{\delta_H}</math>, <math>\frac{\hat{\ddot{y}}}{\delta_H}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>v: 100 \frac{km}{h}</math></li> <li>○ <math> \hat{y} : 4 \frac{m}{s^2}</math></li> <li>○ <math>f: 0,5 \text{ Hz}</math></li> </ul>
Lenkwinkelsprung	aus den Zeitschrieben: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Verzögerungszeiten <math>t_{\psi} - t_{\delta_H}</math>, <math>t_{\ddot{y}} - t_{\delta_H}</math></li> <li>○ Überschwingweiten <math>\frac{\hat{\psi}}{\psi_{stat}}</math>, <math>\frac{\hat{\ddot{y}}}{\ddot{y}_{stat}}</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>v: 100 \frac{km}{h}</math></li> <li>○ <math> \ddot{y}_{stat} : 4 \frac{m}{s^2}</math></li> </ul>
Lenkwinkelrampe aus Nulllage	aus den Gradienten $\frac{\partial \psi}{\partial \delta_H}$ , $\frac{\partial \ddot{y}}{\partial \delta_H}$ : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Maximalwert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>v: 100 \frac{km}{h}</math></li> <li>○ <math>\frac{d\delta_H}{dt}: 1, 5, 30, 60 \frac{\circ}{s}</math></li> </ul>

**Tabelle 2.1:** Auf Korrelationen der Kennwerte untersuchte Manöver

In Tabelle 2.2 werden die Ergebnisse der Korrelationsanalyse dargestellt. Dabei wurden die Kennwerte der einzelnen Manöver jeweils einer der drei Kategorien *stationäre Verstärkung*, *Ansprechzeit* oder *Überschwingweite* zugeordnet und eine Aufteilung in die fahrdynamischen Größen *Gierrate* und *Querbeschleunigung* vorgenommen.

Die minimalen Korrelationskoeffizienten bei der *stationären Verstärkung* liegen bei Werten von  $|r|_{min} > 0,97$ . Diese Kennwertkategorie weist folglich nur minimale Unterschiede zwischen den verschiedenen Manövern auf, so dass die Ergebnisse aus den Manövern als austauschbar angesehen werden können.

		Gierrate zu Lenkwinkel					Querbearschleunigung zu Lenkwinkel				
		Sinuslenken mit steigender Frequenz und konstanter Amplitude	Sinuslenken mit konstanter Frequenz und Amplitude	Sinuslenken mit einer Periode	Lenkwinkelsprung	Lenkwinkelrampe aus Nullage	Sinuslenken mit steigender Frequenz und konstanter Amplitude	Sinuslenken mit konstanter Frequenz und Amplitude	Sinuslenken mit einer Periode	Lenkwinkelsprung	Lenkwinkelrampe aus Nullage
stationäre Verstärkungen	Sinuslenken mit steigender Frequenz und konstanter Ampl.	--	1,0	1,0	1,0	0,98	--	1,0	0,99	1,0	0,98
	Sinuslenken mit konstanter Frequenz und Amplitude	--	--	1,0	1,0	0,98	--	--	1,0	0,99	0,99
	Sinuslenken mit einer Periode	--	--	--	0,99	0,97	--	--	--	0,98	0,98
	Lenkwinkelsprung	--	--	--	--	0,97	--	--	--	--	0,97
	Lenkwinkelrampe aus Nullage	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Anspruchzeiten	Sinuslenken mit steigender Frequenz und konstanter Ampl.	--	0,77	0,98	0,87	0,32	--	0,81	0,99	0,82	0,44
	Sinuslenken mit konstanter Frequenz und Amplitude	--	--	0,79	0,74	0,18	--	--	0,84	0,80	0,32
	Sinuslenken mit einer Periode	--	--	--	0,89	0,26	--	--	--	0,89	0,61
	Lenkwinkelsprung	--	--	--	--	0,25	--	--	--	--	0,31
	Lenkwinkelrampe aus Nullage	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Überschwingweiten	Sinuslenken mit steigender Frequenz und konstanter Ampl.	--	n. def.	n. def.	0,97	n. def.	--	n. def.	n. def.	0,89	n. def.
	Sinuslenken mit konstanter Frequenz und Amplitude	--	--	n. def.	n. def.	n. def.	--	--	n. def.	n. def.	n. def.
	Sinuslenken mit einer Periode	--	--	--	n. def.	n. def.	--	--	--	n. def.	n. def.
	Lenkwinkelsprung	--	--	--	--	n. def.	--	--	--	--	n. def.
	Lenkwinkelrampe aus Nullage	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

**Tabelle 2.2:** Minimale Korrelationskoeffizienten zwischen den Kennwerten der verschiedenen Manöver

In der Kategorie *Anspruchzeit* hingegen zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den Manövern. Insbesondere das Manöver *Lenkwinkelrampe* zeigt lediglich schwache Korrelationen zu den anderen Manövern, was auf den Einfluss der Nichtlinearitäten zurückgeführt werden kann. Die restlichen Manöver weisen Korrelationen von  $|r|_{min} > 0,74$  auf. Dies zeigt, dass sich die ermittelbaren Anspruchzeiten zwar ähneln, jedoch nicht vollständig redundante Aussagen liefern.

In die Kennwertkategorie *Überschwingweite* lassen sich sinnvoll lediglich Kennwerte aus den Manövern *Sinuslenken mit steigender Frequenz und konstanter Amplitude* sowie *Lenkwinkelsprung* einordnen. Für die Gierrate ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit einem Korrelationskoeffizienten von  $|r|_{min} = 0,97$ , für die Querbearschleunigung fällt sie mit  $|r|_{min} = 0,89$  etwas schlechter aus.

### Gültigkeitsbereich der Korrelationsanalyse

Die Referenzquerbeschleunigung bei den simulierten Manövern Lenkwinkelsprung und Sinuslenken ist  $\left|\hat{y}\right| = 4 \frac{m}{s^2}$  (s. Tabelle 2.1), da die Fahrmanöver im Proportionalbereich untersucht werden sollen. Im Bereich sehr niedriger oder sehr hoher Querbeschleunigungen (Mittenbereich bzw. Grenzbereich) treten stark nichtlineare Effekte auf, welche zu einer Verschiebung der Verhältnisse zwischen den verglichenen Fahrmanövern führen können. Die gefundenen Korrelationen zwischen den Fahrmanövern sind also nicht als allgemeingültig zu betrachten, sondern gelten zunächst nur für den Proportionalbereich.

### Manöverauswahl

Ausgehend von den Ergebnissen der Simulationsuntersuchung und den Anforderungen an die Fahrmanöver (S. 29) werden die Fahrmanöver *Sinuslenken mit steigender Frequenz*, *Sinuslenken mit konstanter Frequenz* (Weavetest) und *Lenkwinkelrampe* ausgewählt, um die objektiven Kennwerte in dieser Arbeit zu generieren. Durch die Auswahl dieser Manöver werden die drei Kennwertkategorien *stationäre Verstärkungsfaktoren*, *Ansprechzeiten* und *Überschwingweiten* so gut abgedeckt, dass durch die Hinzunahme weiterer Manöver kein zusätzlicher Informationsgewinn zu erwarten ist.

## 2.2 Durchführung der Manöver im Realfahrzeug und Datenauswertung

Im vorangegangenen Abschnitt wurden mit Hilfe der Simulation drei Fahrmanöver bestimmt, welche im Rahmen dieser Arbeit zur Gewinnung objektiver Querdynamikkennwerte eingesetzt werden sollen. Die Durchführung dieser Manöver im Realfahrzeug sowie die Datenverarbeitung zur Kennwertgewinnung werden in den folgenden Abschnitten vorgestellt, wobei insbesondere auf die Besonderheiten bei der Durchführung der Lenkmanöver per Hand eingegangen wird.

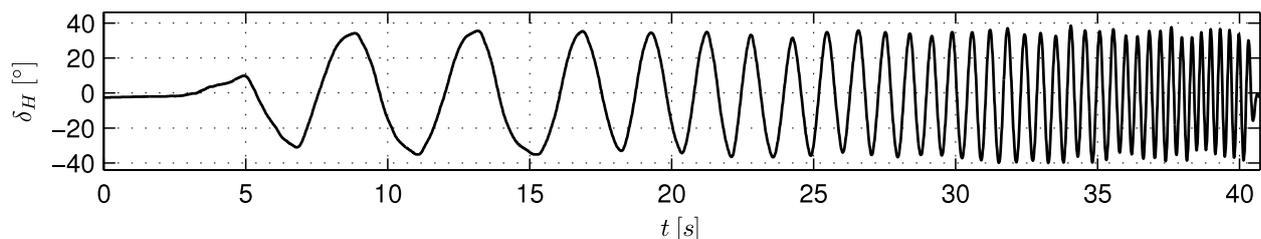
### 2.2.1 Sinuslenken mit steigender Frequenz zur Ermittlung des Frequenzgangs

Der Frequenzgang eines Übertragungsglieds gibt an, in welchem Verhältnis Ein- und Ausgangsgröße über der Anregungsfrequenz zueinander stehen (Amplitudenverhältnis), und welche Phasenverschiebung über der Frequenz auftritt. Die Darstellung des Frequenzgangs im Bereich der Fahrzeugquerdynamik erfolgt meist im Bode-Diagramm.

### Manöverbeschreibung

Bei konstanter Fahrgeschwindigkeit werden mit konstanter Lenkwinkelamplitude sinusförmige Lenkbewegungen ausgeführt. Die Amplitude muss in einem Vorversuch für die jeweilige Fahrgeschwindigkeit und gewünschte stationäre Querbeschleunigungsamplitude bestimmt werden.

In Bild 2.4 dargestellt ist der Zeitschrieb des Lenkwinkels bei einem solchen Manöver, wobei erkennbar ist, dass es durch die händische Durchführung zu leichten Schwankungen der Amplitude und Schwingform kommt. Auf die Ergebnisse in Form des Frequenzgangs haben die dargestellten Schwankungen in dieser Größenordnung jedoch so gut wie keinen Einfluss. Wichtig ist vielmehr, dass im gesamten Frequenzbereich ausreichende Lenkanregung vorhanden ist. Durch kontinuierliches, langsames Steigern der Lenkfrequenz lässt sich dieses Ziel am besten erreichen.

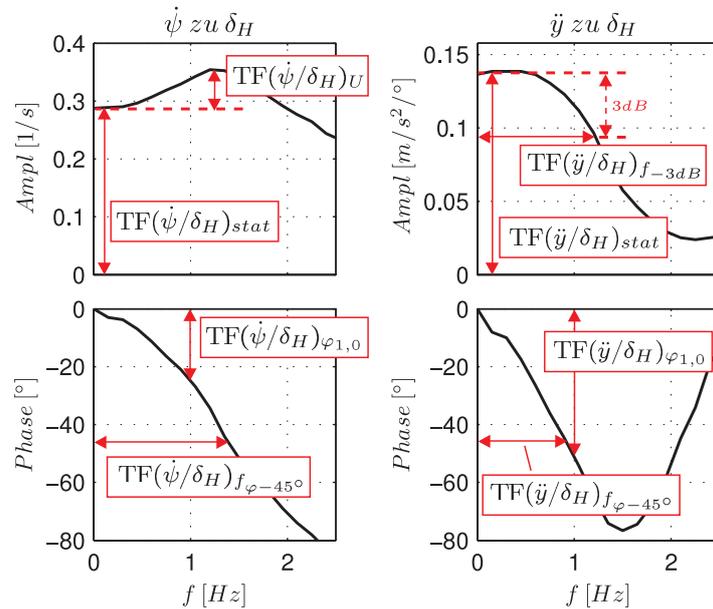


**Bild 2.4:** Zeitschrieb Sinuslenken mit steigender Frequenz

## Kennwerte

Die Berechnung erfolgt mittels Fouriertransformation von Ein- und Ausgangszeitensignalen in den Frequenzbereich. In weiteren Verarbeitungsschritten werden Kreuzleistungsspektrum und Eigenleistungsspektren berechnet, schließlich der Frequenzgang.

Aus den Verläufen von Amplituden- und Phasengang lassen sich skalare Kennwerte berechnen. Die in dieser Arbeit verwendeten Kennwerte werden am Beispiel der Frequenzgänge von Gierrate und Querbeschleunigung zu Lenkwinkel in Bild 2.5 dargestellt.

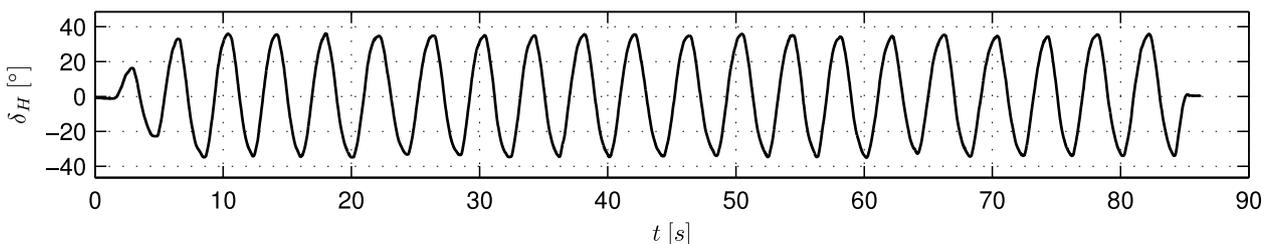


**Bild 2.5:** Kennwerte aus dem Frequenzgang

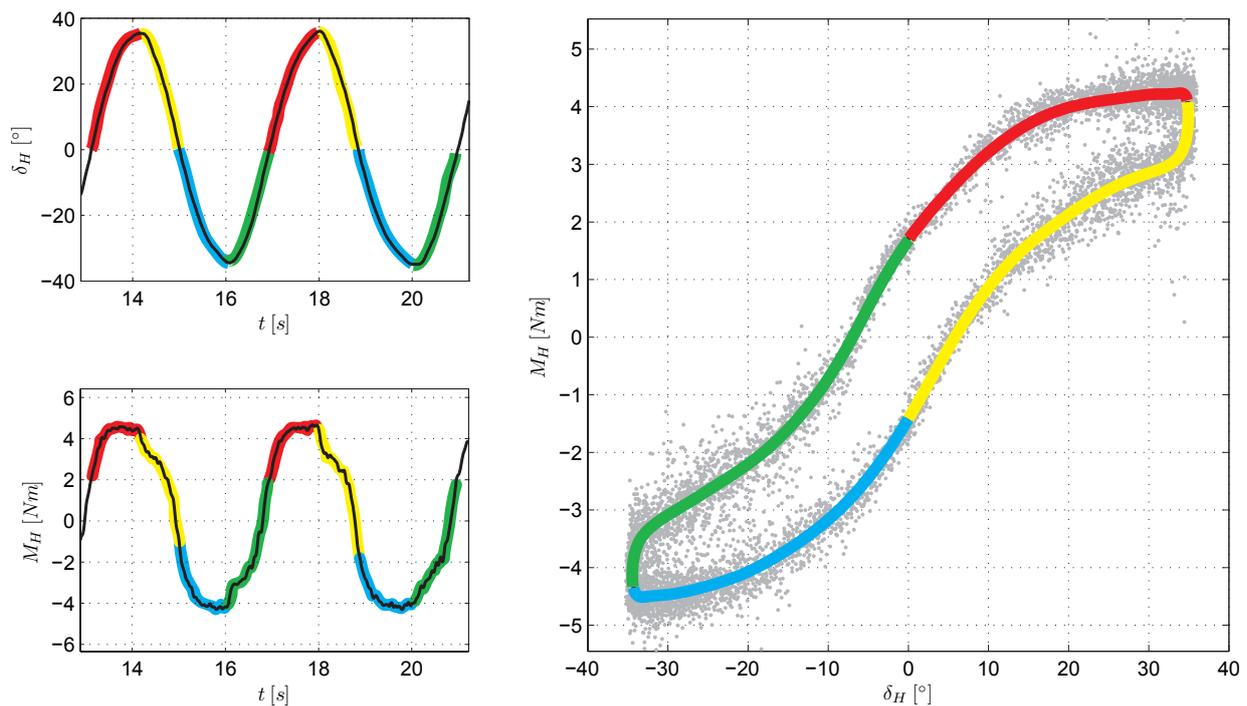
### 2.2.2 Sinuslenken mit konstanter Frequenz (Weavetest)

#### Manöverbeschreibung

Das Fahrmanöver *Sinuslenken mit konstanter Frequenz* ist auch unter der Bezeichnung *Weavetest* bekannt. Bei konstanter Fahrgeschwindigkeit wird mit konstanter Lenkwinkelamplitude und Frequenz sinusförmig gelenkt, s. Bild 2.6. Das prinzipiell gleiche Manöver *Microsinus* unterscheidet sich vom Weavetest in der Wahl der Lenkwinkelamplitude und gegebenenfalls der Lenkfrequenz.



**Bild 2.6:** Zeitschrieb Weavetest



**Bild 2.7:** Datenglättung Weavetest durch Mittelung über Periodendauer  
links: Ausschnitt Zeitdaten, rechts: Rohdaten (grau) und geglättete Daten

Analog zum Manöver *Sinuslenken mit steigender Frequenz* (s.o.) muss in einem Vorversuch die benötigte Lenkwinkelamplitude ermittelt werden, welche bei gleichen Randbedingungen mit der des obigen Manövers identisch ist.

Da die Bezeichnungen und Randbedingungen der Versuche *Weavetest* und *Microsinus* nicht einheitlich gebraucht werden, ist eine Angabe von Fahrgeschwindigkeit, Lenkfrequenz und Querbeschleunigungsamplitude sinnvoll.

## Datenverarbeitung

Die Auswertung des Weavetests erfolgt, indem jeweils zwei Signale im Phasendiagramm gegeneinander aufgetragen werden (Bild 2.7 r.). Dabei entsteht typischerweise eine geschlossene Hysteresekurve. Um skalare Kennwerte aus dem Phasendiagramm gewinnen zu können, ist eine Glättung und Mittelung der Daten notwendig. In der ISO-Norm [ISO03] und der Literatur [HPJ06, Det05] finden sich hierzu einige Vorschläge.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden mehrere Möglichkeiten entwickelt und erprobt, unter anderem das in der ISO-Norm vorgeschlagene Verfahren der Auftrennung in zwei Hysteresen-Äste mit Polynom-Approximation (s. Bild 5.1, S. 97). Ein Nachteil dieses Verfahrens ist, dass durch die Beschneidung des Wertebereichs der Abszisse eine Auftrennung der geschlossenen Hysteresekurve erfolgt. Somit gehen die Daten an den Umkehrpunk-

ten verloren, außerdem kann die Steigung in den Randbereichen der Äste falsch angenähert werden.

Um die gemittelten, geschlossenen Hysteresekurven zu erhalten, wurde daher in dieser Arbeit ein neues Verfahren entwickelt. Bei diesem werden nicht zuerst die Daten paarweise zu Punktwolken zusammengeführt und anschließend geglättet. Stattdessen nutzt es aus, dass die Zeitschriebe periodische Daten enthalten, und mittelt die Daten über der Periodendauer anstatt über Wertebereichen.

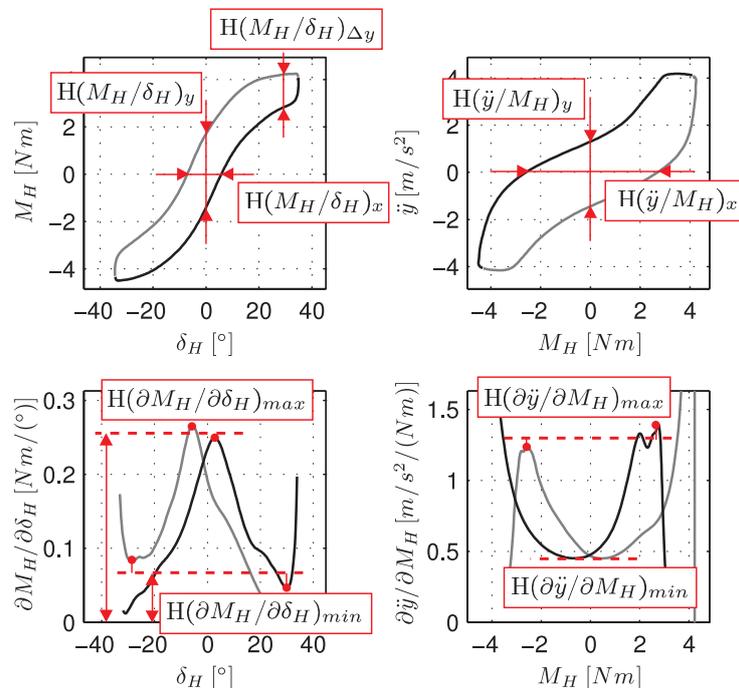
Dazu werden im ersten Schritt die Nulldurchgänge und Wendepunkte des ersten Signals ermittelt und der kontinuierliche Zeitschrieb in Viertelperioden unterteilt (Bild 2.7). Für das zweite Signal werden diese Zeitabschnitte übernommen, ungeachtet der Nulldurchgänge und Wendepunkte dieses zweiten Signals.

Die Zeitabschnitte sind bei händisch gefahrenen Messungen in der Regel ungleichmäßig lang. Daher werden im nächsten Schritt die Daten der einzelnen Viertelperioden auf eine einheitliche Zahl von Datenpunkten interpoliert, die unterschiedlich langen Zeitabschnitte also auf eine normierte Datenlänge projiziert. Anschließend können die jeweiligen Viertelperioden gemittelt werden. Auf diese Weise erhält man eine geschlossene Kurve, die auch an den Wendepunkten sehr gut den mittleren Kurvenverlauf wiedergibt.

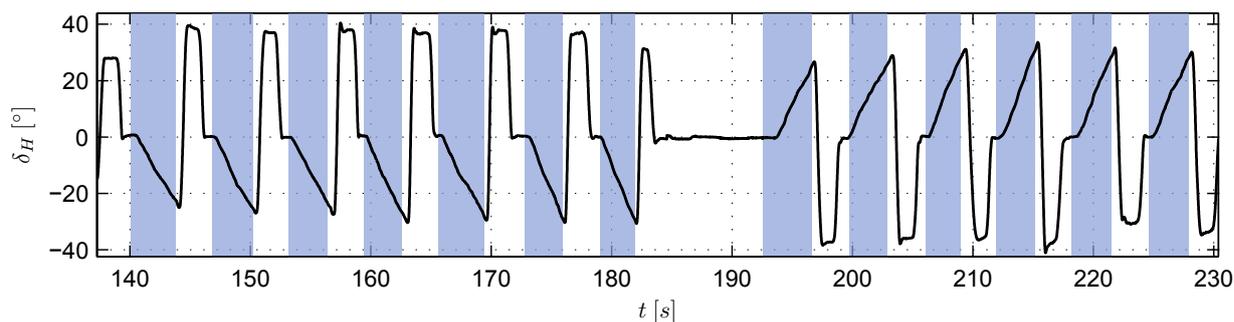
Über den Hauptästen der Hysterese kann eine sehr gute Übereinstimmung mit dem in der ISO-Norm vorgeschlagenen Verfahren der Polynomapproximation (s.o.) festgestellt werden.

## Kennwerte

Aus den Phasendiagrammen des Weavetests und den Gradienten werden in der vorliegenden Arbeit verschiedene Kennwerte berechnet. Sie werden in Bild 2.8 am Beispiel der Hysteresen  $M_H/\delta_H$  und  $\ddot{y}/M_H$  dargestellt.



**Bild 2.8:** Kennwerte aus dem Weavetest



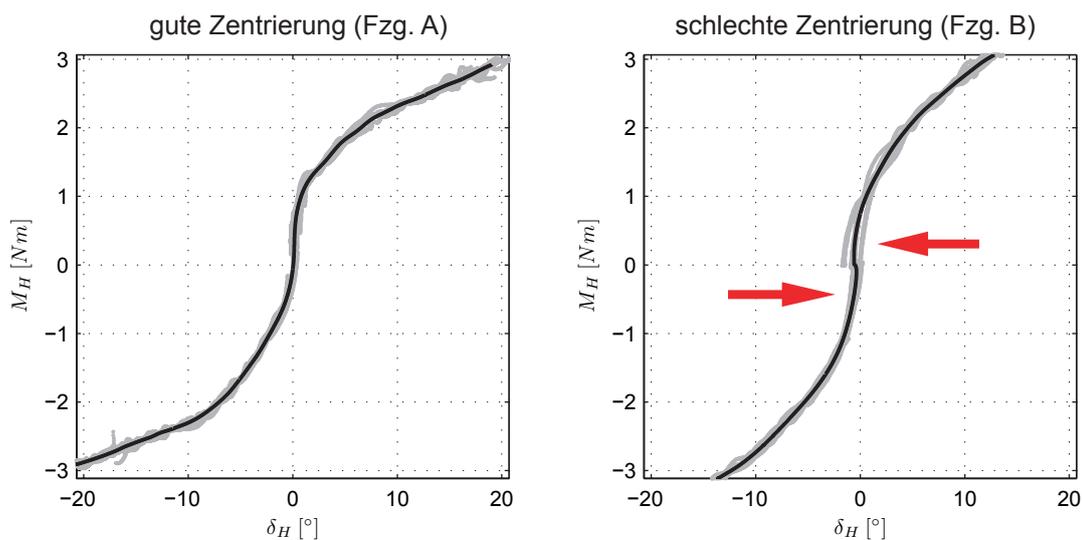
**Bild 2.9:** Zeitschrieb des Manövers Lenkwinkelrampe (schattiert: Auswertungsbereiche)

### 2.2.3 Lenkwinkelrampe

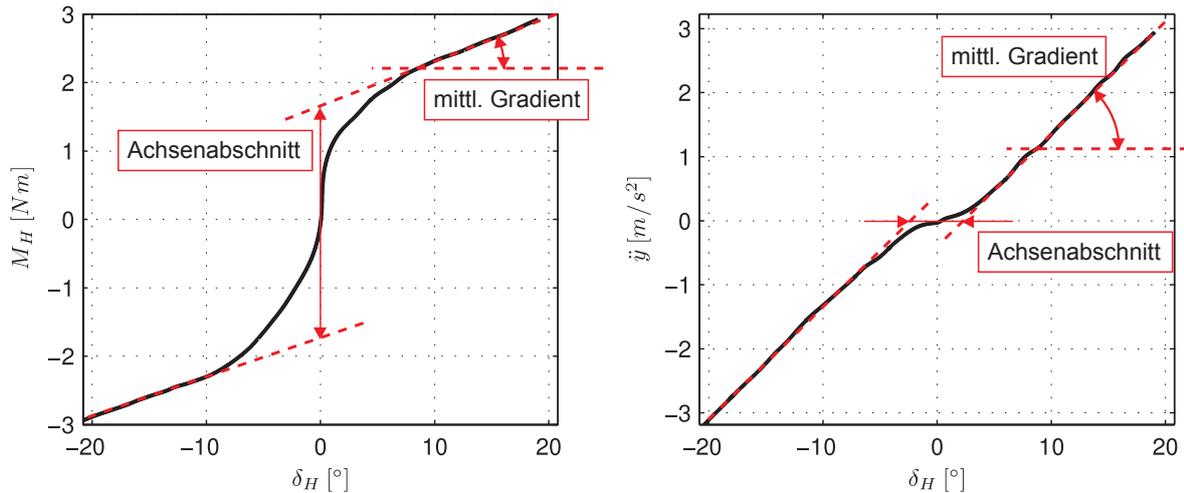
#### Manöverbeschreibung

Das Fahrmanöver *Lenkwinkelrampe* dient dazu, den Übergang von Geradeaus- in Kurvenfahrt zu charakterisieren. Das Fahrzeug befindet sich hier in einem transienten Fahrzustand, im Gegensatz zu den Manövern des Sinuslenkens, bei denen ein eingeschwungener Zustand vorliegt.

Bei händischer Durchführung des Manövers auf einer Geraden ist es sinnvoll, die einzelnen Rampen aneinanderzureihen und das Fahrzeug bei Erreichen des Fahrbahnrandes abzufangen und neu auszurichten. Dabei entsteht der in Bild 2.9 abgebildete Zeitschrieb des Lenkwinkels.



**Bild 2.10:** Rohdaten (grau) und Ergebnis der Datenverarbeitung beim Manöver Lenkwinkelrampe, Einfluss Zentrierung



**Bild 2.11:** Kennwerte aus der Lenkwinkelrampe

## Datenverarbeitung

Für die Auswertung werden die Punktwolken des Signalpaares einer Glättung unterzogen, beispielsweise durch eine Tiefpassfilterung über dem Wertebereich (Bild 2.10). Eine Schwierigkeit beim Fahren des Anlenkmanövers per Hand stellt die Zentrierung des Lenkrads bei Geradeausfahrt dar. Auf Grund der Lenkungsreibung läuft der Lenkwinkel nicht immer von selbst auf einen festen Geradeauswert zurück, so dass beispielsweise über eine optische Markierung der Geradeauslenkwinkel aktiv eingestellt werden muss. Dies wiederum kann über die Torsionsweichheit des Lenkstrangs zu minimalen Unterschieden der Geradeausfahrtwerte von Rampe zu Rampe führen, was wiederum zu Unstetigkeiten im Koordinatenursprung der Diagramme führt (Bild 2.10, Fzg. B).

## Kennwerte

Aus den geglätteten Daten der Lenkwinkelrampe lassen sich beispielsweise die Kennwerte *Achsenabschnitt* und *mittlerer Gradient off-center* ableiten (Bild 2.11). Die Ergebnisse aus den händisch gefahrenen Manövern weisen jedoch eine starke Streuung auf, wofür unter anderem das oben dargestellte Zentrierungs-Problem sowie eine hohe Sensitivität auf die Filterungsparameter verantwortlich ist.

Da sich mit vertretbarem Versuchs- und Auswertungsaufwand keine gute Wiederholgenauigkeit der Kennwerte des Fahrmanövers *Lenkwinkelrampe* erzielen lässt, wird es für die Auswertung der Probandenversuche nicht herangezogen.

## 2.3 Einfluss der Manöverparameter auf objektive Kennwerte

Nach der Auswahl der Fahrmanöver zur objektiven Beschreibung der Querdynamik wird in den folgenden Abschnitten der Einfluss der Manöverparameter auf die objektiven Kennwerte dargestellt.

### 2.3.1 Querbeschleunigungsamplitude

In Bild 2.12 dargestellt sind die Frequenzgänge und Phasendiagramme eines Fahrzeugs bei  $100 \frac{km}{h}$  und einer stationären Querbeschleunigung von  $2$  und  $4 \frac{m}{s^2}$ . Die Amplituden- und Phasengänge von Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung zum Lenkwinkel liegen eng beieinander, wobei eine leichte Verschiebung der Amplituden zwischen den beiden Größen beobachtet werden kann. Im Frequenzgang des Lenkmoments sind sehr große Abweichungen erkennbar, sowohl im Amplituden- als auch im Phasengang.

In den Phasendiagrammen des Weavetests zeigt sich, dass die Hysteresekurven für Lenkwinkel, Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung in ihrer Gestalt sehr ähnlich sind. Dies wird besonders deutlich, wenn die Amplituden in der Darstellung auf einen einheitlichen Betrag  $|1|$  normiert werden (Bild 2.12 u.): Hier verlaufen die Kurven für die unterschiedlichen Querbeschleunigungen fast deckungsgleich, lediglich das Lenkmoment zeigt einen unterschiedlichen Verlauf.

Aus den gezeigten Daten wird ersichtlich, warum der Querbeschleunigungsbereich bis ca.  $4 \frac{m}{s^2}$  auch als *Proportionalbereich* bezeichnet wird: Hier haben die primären Querdynamikgrößen Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung, bezogen auf den Lenkwinkel, eine annähernd konstante Verstärkung. Das Lenkmoment hingegen weist über der Querbeschleunigung durch die Servounterstützung einen stark degressiven Verlauf auf, so dass hier generell keine proportionale Abhängigkeit vorausgesetzt werden kann. Stattdessen zeigt sich, dass – zumindest beim gemessenen Fahrzeug mit hydraulischer Lenkkraftunterstützung – die Lenkwinkel-Lenkmoment-Hysteresekurve im gemeinsamen Lenkwinkelbereich annähernd deckungsgleich verlaufen.

Die Durchführung der Manöver mit einer Querbeschleunigungsamplitude von  $4 \frac{m}{s^2}$  scheint sinnvoll, da gegenüber  $2 \frac{m}{s^2}$  keine Informationen verloren gehen, dafür aber die Degression des Lenkmomentes deutlicher sichtbar wird.

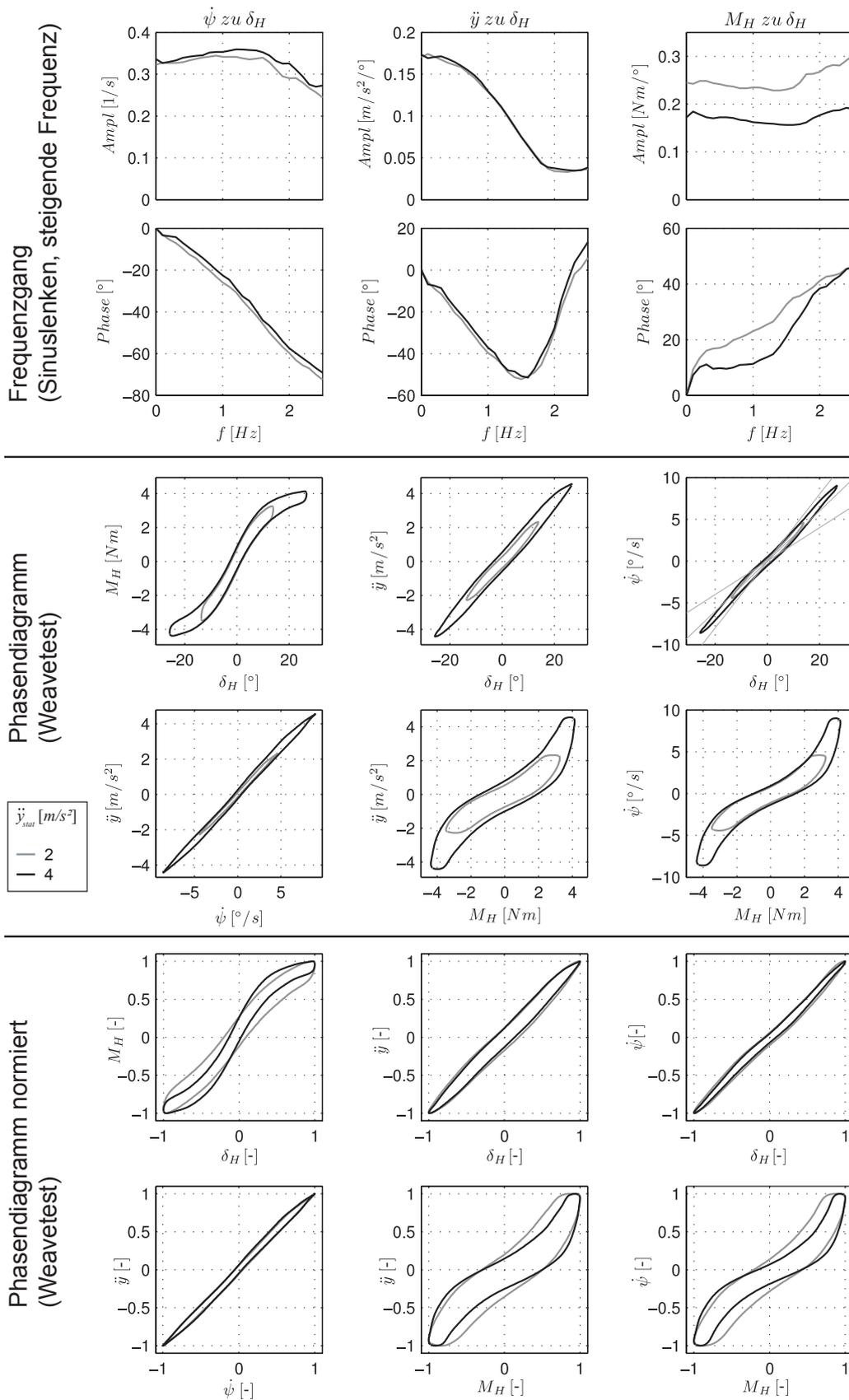


Bild 2.12: Frequenzgänge und Phasendiagramme bei  $100 \frac{km}{h}$

### 2.3.2 Fahrgeschwindigkeit

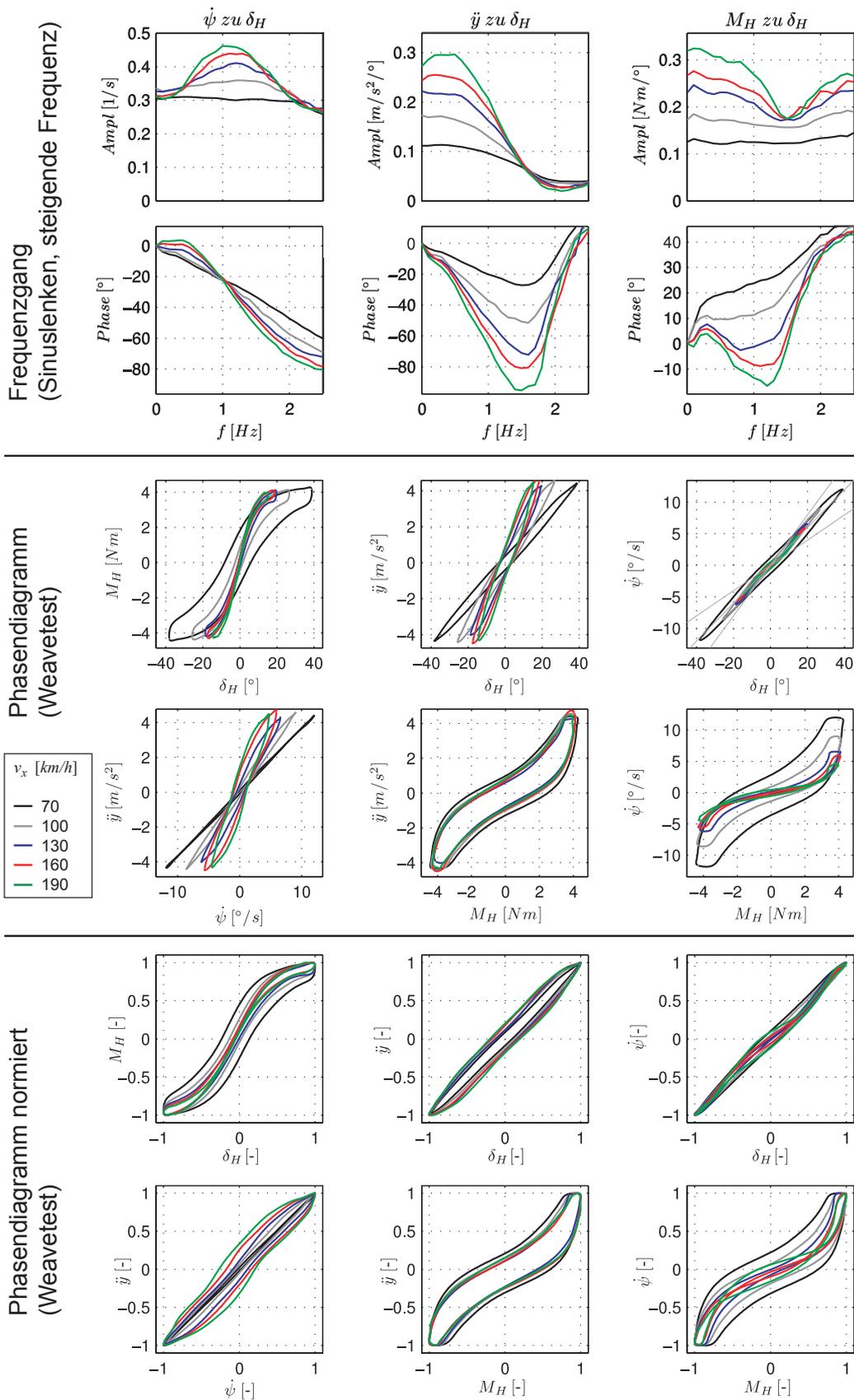
Über der Geschwindigkeit verschieben sich die Verhältnisse der querdynamischen Größen Querbeschleunigung und Gierrate, da im stationären Fall gilt:  $\ddot{y} = v \cdot \dot{\psi}$ .

In den Frequenzgängen (Bild 2.13 o.) fallen insbesondere folgende Punkte auf:

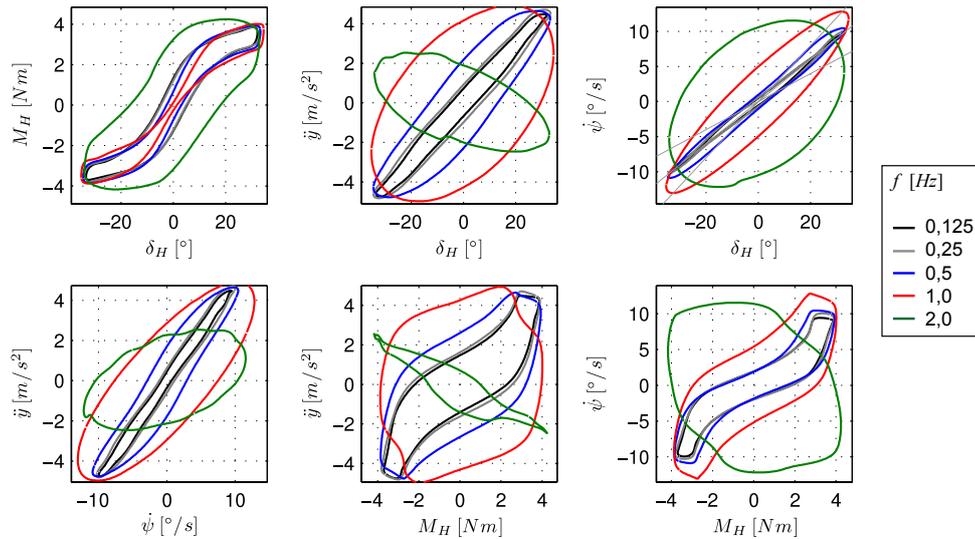
- die stationäre Verstärkung der Giergeschwindigkeit bleibt auf einem ähnlichen Niveau, während Querbeschleunigung und Lenkmoment stark ansteigen
- im Gierfrequenzgang zeigt sich mit steigender Geschwindigkeit die Entwicklung einer ausgeprägten Resonanzüberhöhung
- im Bereich der Gierresonanzfrequenz (um 1,3 Hz) bilden die Phasengänge von Querbeschleunigung und Lenkmoment über der Geschwindigkeit eine ausgeprägte Phasennacheilung

Das quasi-stationäre Fahrzeugverhalten, welches vom Weavetest bei 0,25 Hz (Bild 2.13 m./u.) charakterisiert wird, ändert sich über der Fahrgeschwindigkeit ebenfalls stark, allerdings hauptsächlich in den Verstärkungsfaktoren. Dies wurde bereits aus den Frequenzgängen deutlich. Die Gestalt der Hysteresekurven hingegen ändert sich mit der Fahrgeschwindigkeit nicht besonders stark, wie die Darstellung der betragsmäßig normierten Hysteresekurven zeigt.

Die stärksten Formänderungen zeigen die Phasendiagramme, welche die Gierrate enthalten. Nahezu deckungsgleich liegen hingegen die Hysteresekurven Lenkmoment-Querbeschleunigung ab  $100 \frac{km}{h}$  übereinander.



**Bild 2.13:** Frequenzgänge und Phasendiagramme über der Geschwindigkeit bei einer stationären Querbeschleunigung von  $4 \frac{m}{s^2}$



**Bild 2.14:** Phasendiagramme bei Lenkfrequenzen von 0,125 Hz bis 2,0 Hz ( $100 \frac{km}{h}$ ,  $4 \frac{m}{s^2}$ )

### 2.3.3 Lenkfrequenz

Der Einfluss der Lenkfrequenz auf das nichtlineare Fahrzeugverhalten wird in Bild 2.14 dargestellt. Die Phasendiagramme des Lenkwinkels, der Gierrate und der Querbeschleunigung entwickeln mit der Lenkfrequenz eine Aufweitung der Hysteresekurven, diese werden insgesamt runder und verlieren die charakteristische Nichtlinearität um die Mitte.

Die Diagramme des Lenkmoments zeigen ebenfalls eine Aufweitung der Hysteresekurven, allerdings entwickeln sie keine verrundete Ellipsenform, sondern behalten markante Ausprägungen. Diese lassen sich auf das dynamische Verhalten des hydraulischen Lenkhilfesystems zurückführen, dessen Eigendynamik sich der Fahrzeugquerdynamik überlagert.

Zur Ermittlung der Nichtlinearitäten eignen sich somit Frequenzen bis ca. 0,25 Hz. Bei höheren Lenkfrequenzen machen sich die dynamischen Effekte in einer zunehmenden Ver rundung der Hysteresekurven bemerkbar.

## 2.4 Festlegung der Manöverparameter

Ausgehend von den Beobachtungen der vorangegangenen Abschnitte werden die Manöver des Sinuslenkens mit einer stationären Querbeschleunigungsamplitude von  $4 \frac{m}{s^2}$  gefahren. Der Weavetest wird mit einer Lenkfrequenz von 0,25 Hz durchgeführt. Die Fahrgeschwindigkeit bei Durchführung der Open-Loop-Manöver soll der Fahrgeschwindigkeit bei den jeweiligen Probandenfahrten entsprechen, da durch die starke Verschiebung der Gier- und Querb beschleunigungsverstärkung eine Extrapolation der Kennwerte von einer fixen Geschwindigkeit (z.B.  $100 \frac{km}{h}$ ) zu starke Verfälschungen erwarten lässt.

## 3 Probandenversuche

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die objektiven Parameter der Querdynamik dargestellt, welche sich aus Messungen im Realfahrzeug ermitteln lassen. Zur Objektivierung des subjektiven Empfindens der Querdynamik benötigt man neben objektiven Kennwerten auch die Subjektivbewertungen unterschiedlicher Fahrzeuge oder Fahrzeugvarianten. Durch Regressionsrechnungen über den erhobenen Daten lassen sich dann zunächst die mathematisch nachweisbaren Zusammenhänge (Korrelationen) ermitteln, welche im letzten Schritt einer Plausibilitätsprüfung und Ergebnisinterpretation unterzogen werden müssen.

### 3.1 Versuchsfahrzeug

#### Vorüberlegungen

Um einen gewissen Bereich objektiver Kenngrößen abzudecken, werden in ihren Eigenschaften unterschiedliche Fahrzeuge oder Fahrzeugvarianten benötigt. Diese beiden Möglichkeiten werden folgend gegeneinander abgewägt.

#### **Mehrere unterschiedliche Fahrzeuge**

Die Benutzung mehrerer Fahrzeuge stellt die einfachere Möglichkeit zur Bereitstellung objektiver Varianz dar. Sie ermöglicht einen schnellen Wechsel zwischen den unterschiedlichen Varianten. Der grundlegende und erhebliche Nachteil dieser Option ist allerdings, dass sich sämtliche Fahrzeugeigenschaften unterscheiden, nicht nur diejenigen, welche zum Untersuchungsgegenstand zählen. So können beispielsweise unterschiedliche Sitze (Seitenhalt) oder Lenkräder (Kranzdurchmesser und -dicke) die subjektiv wahrgenommene Querdynamik beeinflussen.

#### **Ein einziges Fahrzeug mit Varianten**

Um nicht zum Untersuchungsgegenstand gehörige Einflüsse auszuschließen, ist es günstig, die objektive Varianz an einem einzigen Fahrzeug darzustellen. Die gewünschten Unterschiede im objektiven Fahrverhalten müssen in diesem Falle durch Modifikationen dieses

einen Fahrzeugs erreicht werden. Gängige Optionen sind hier unterschiedliche Beladungszustände, unterschiedliche Reifen und Fahrwerksumbauten (z.B. [Dib92], S. 5; [RA97], S. 9; [CC98], S. 10). Diese physikalischen Veränderungen bringen allerdings stets eine gewisse Umrüstdauer mit sich, was den subjektiven Vergleich verschiedener Varianten erschwert.

Durch die Einführung elektronisch steuerbarer Fahrwerkskomponenten ergeben sich für die Objektivierung neue Möglichkeiten, da Fahrzeugeigenschaften innerhalb von Sekunden durch Umparametrierung der Steuersysteme verändert werden können. Hauptsächlich kommen hier elektronisch gesteuerte Lenksysteme in Frage (z.B. Servotronic, EPS, Überlagerungslenkung oder sogar Steer-by-Wire), aber auch variable Dämpfer, aktive Stabilisatoren und alle weiteren steuerbaren Fahrwerkskomponenten (z.B. [Red94], S. 6; [Kud89], S. 3; [HYF96], S. 8; [Bar04], S. 13; [Bus03], S. 11).

## Beschreibung des Versuchsfahrzeugs

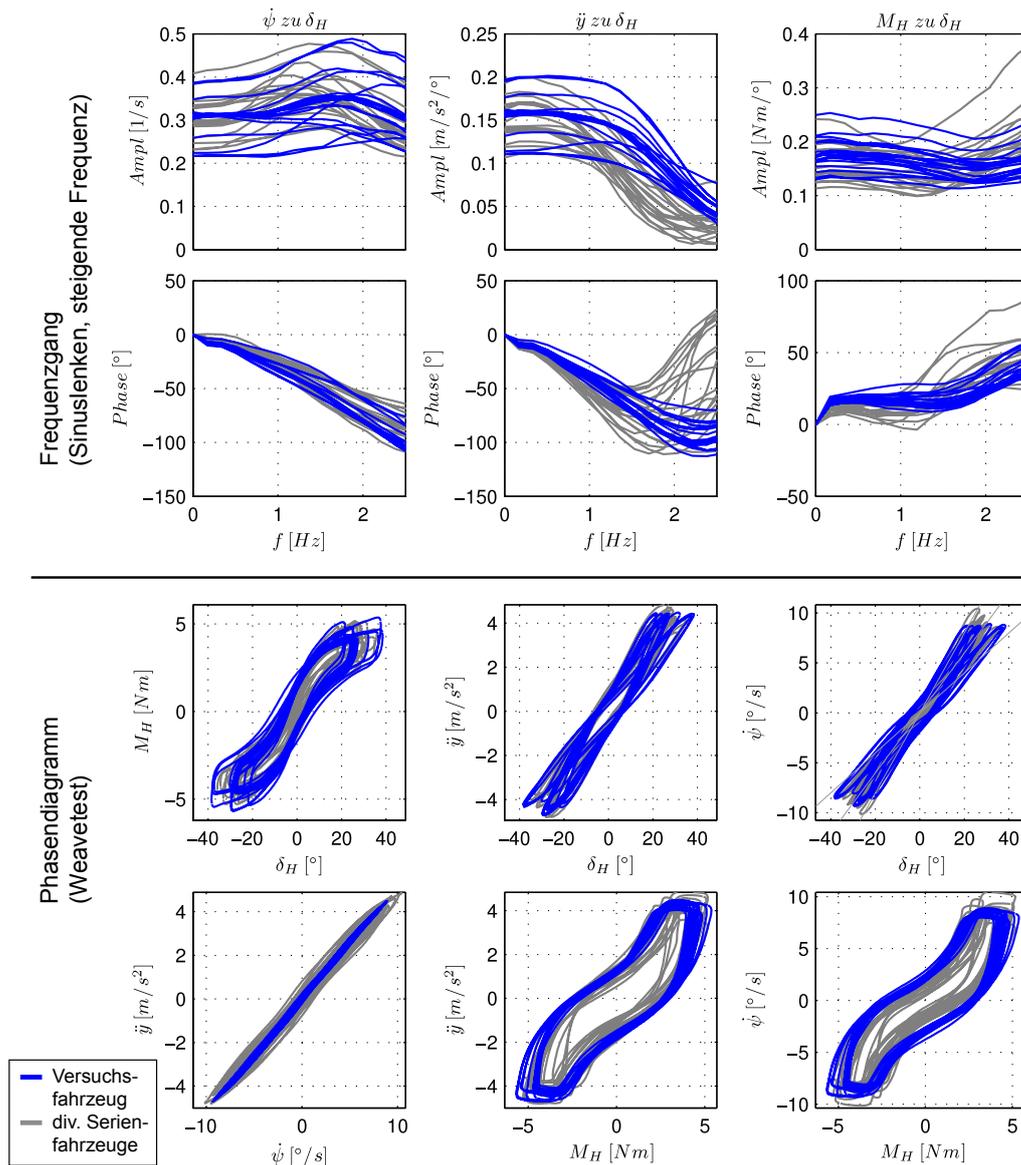
Für die Probandenversuche wird ein BMW der 5er-Reihe verwendet. Durch die für dieses Fahrzeugmodell verfügbare Überlagerungslenkung (*AFS*) können die Lenkungseigenschaften in weiten Bereichen modifiziert werden. Zusätzlich ist das Versuchsfahrzeug mit einer experimentellen, elektro-mechanischen Hinterachslenkung ausgerüstet. Die Ansteuerung der beiden Lenksysteme erfolgt über einen Echtzeit-Computer. Die beiden Lenksysteme ermöglichen eine weite Spreizung der Lenkeigenschaften. Zusätzlich erlaubt die steuerbare, hydraulische Lenkkraftunterstützung (*Servotronic*) eine Beeinflussung des Lenkmoments.

## Fahrzeugvarianten

Für die Darstellung der Fahrzeugvarianten im Probandenversuch werden vier grundlegende Einstellmöglichkeiten der Lenkungssysteme benutzt: Die Vorderachslenkübersetzung, die Hinterachslenkübersetzung, ein Verzögerungsglied sowie die Lenkkraftunterstützung.

Durch die Vorderachslenkübersetzung wird direkt die Gierverstärkung des Fahrzeugs beeinflusst. Die Hinterachslenkübersetzung hat ebenso einen Einfluss auf die Gierverstärkung, zusätzlich beeinflusst sie das dynamische Verhalten im Frequenzbereich. Im Gegensatz zu vorangegangenen Untersuchungen mit Hinterachslenkungen (z.B. REDLICH, S. 6) ist es hier jedoch möglich, durch die Überlagerungslenkung an der Vorderachse den Einfluss der Hinterachslenkübersetzung auf die Gierverstärkung zu kompensieren.

Um die Ansprechzeit des Fahrzeugs zu verändern wurde ein  $PT_1$ -Verzögerungsglied implementiert, welches den Vorderachslenkwinkel zu Lenkradwinkel bedämpft. Auf diese Weise wird die Ansprechzeit auf Lenkbewegungen größer. Durch die Definition einer Grundverzögerung kann das Fahrzeug so in Richtung schnelleres Ansprechen (höhere Eckfrequenz des  $PT_1$ -Verzögerungsglieds) oder langsamerer Ansprechen verstellt werden.



**Bild 3.1:** Bandbreite der objektiven Kenngrößen des Versuchsfahrzeugs (blau) im Vergleich mit aktuellen Serienfahrzeugen (grau) bei  $100 \frac{\text{km}}{\text{h}}$

Die Steuerung der hydraulischen Lenkkraftunterstützung schließlich lässt innerhalb gewisser Grenzen eine Beeinflussung der Lenkmomentcharakteristik zu. Im Vergleich zu den anderen beiden Lenkungssystemen sind die Gestaltungsmöglichkeiten hier jedoch geringer, da die hydraulische Lenkkraftunterstützung keinen aktiv steuerbaren Aktuator darstellt.

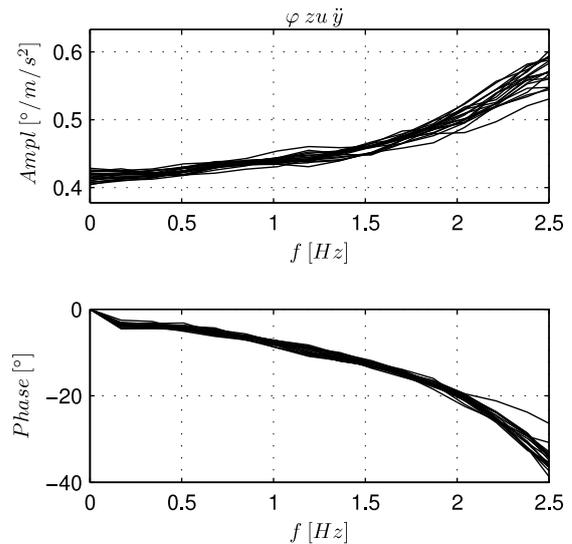
### Darstellbare Querdynamik des Versuchsfahrzeugs

In Bild 3.1 ist die Spreizung der einstellbaren Querdynamik des Versuchsfahrzeugs dargestellt. Zum Vergleich sind die Daten von 18 Serienfahrzeugen des Modelljahres 2007 eingeblendet.

### Wankverhalten des Versuchsfahrzeugs

Das Wankverhalten kann beim Versuchsfahrzeug nicht beeinflusst werden, da eine passive Federung und Dämpfung verbaut ist. Damit ist der Wankwinkel direkt abhängig von der Quereschleunigung, wie der Frequenzgang von Wankwinkel zu Quereschleunigung in Bild 3.2 zeigt.

Auf eine direkte Beeinflussung des Wankwinkels, beispielsweise über Verstelldämpfer oder aktive Stabilisatoren, wird bewusst verzichtet, um die Zahl der Versuchsvarianten nicht zu groß werden zu lassen.



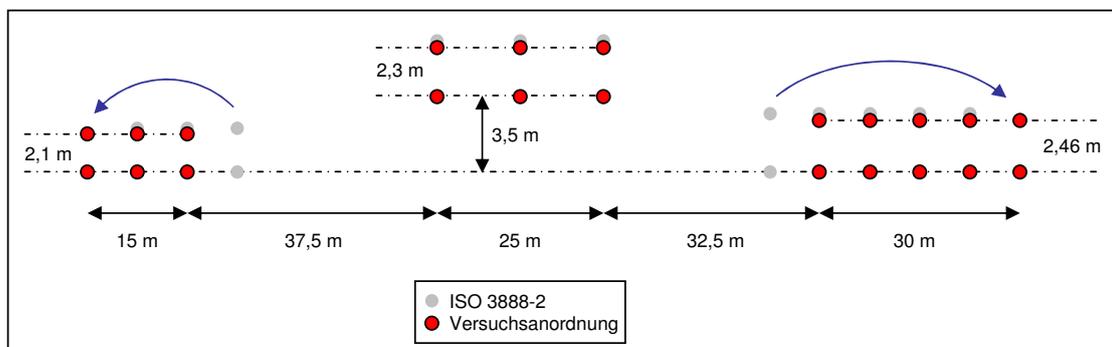
**Bild 3.2:** Abhängigkeit des Wankwinkels von der Quereschleunigung beim Versuchsfahrzeug

## 3.2 Versuchsdurchführung

### Fahrmanöver

Als Fahrmanöver werden ein *Doppelspurwechsel* sowie *Anlenken auf der Geraden* durchgeführt. Der Doppelspurwechsel ist ein klassisches Manöver zur Fahrverhaltensbeurteilung. Er gibt einen genau einzuhaltenden Sollkurs vor. Die Geschwindigkeit wird in diesem Versuchsteil auf  $100 \frac{km}{h}$  fixiert, die Gassenbreiten und -abstände werden so eingerichtet, dass im Mittel maximale Quereschleunigungen von ca.  $5 \frac{m}{s^2}$  erreicht werden (Bild 3.3).

Beim *Anlenken* auf einer zweispurigen Geraden werden zwei Geschwindigkeitsstufen von 100 und  $180 \frac{km}{h}$  vorgegeben. Als weitere Vorgabe für die Probanden wird gefordert, Quereschleunigungen von ca.  $5 \frac{m}{s^2}$  nicht zu überschreiten. Innerhalb dieses Bereichs dürfen die



**Bild 3.3:** Aufstellung des Doppelspurwechsels

Probanden Lenkmanöver ihrer Wahl durchführen, ein typischer Zeitschrieb des Lenkwinkelverlaufs ist in Bild 3.25 auf S. 75 abgebildet.

In beiden Versuchsabschnitten bleibt der Abstand zum Grenzbereich so groß, dass Stabilitätsprobleme nicht zu erwarten sind und somit die Fahrdynamik im Grenzbereich nicht für die Subjektivbewertung durch die Probanden ausschlaggebend ist.

## Versuchsvarianten

Je nach Manöver und Geschwindigkeit haben die Probanden einen unterschiedlich großen Satz an Varianten zu beurteilen, welche sich – ausgehend von einer Basisvariante – in den vier Parametern aus Abschnitt 3.1 unterscheiden. Die Basisvariante liegt dabei etwa in der Mitte der abgedeckten Objektivparameter.

## Subjektivbewertung

Die Subjektivbewertung der einzelnen Fahrzeugvarianten wird stets relativ zur Basisvariante vorgenommen, so dass der Einfluss der Versuchsbedingungen (Wetter, aktueller Reifenzustand, etc.) auf die Bewertungen als minimal angenommen werden kann. Nach dem bewussten Fahren der Basisvariante wird eine Versuchsvariante eingestellt. Dabei steht es den Probanden frei, beliebig oft zwischen der Basis und der aktuellen Variante zu wechseln. Die Reihenfolge der Versuchsvarianten wird zwischen den Probanden permutiert, um Reiheneffekte zu minimieren (s. [Hen04], S. 58). Die beiden Fahrmanöver Doppelspurwechsel und Anlenken wurden getrennt voneinander durchgeführt.

## Fragebogen

Für die beiden Fahrmanöver wird eine jeweils angepasste Version des Fragebogens verwendet. Der Fragebogen für das Manöver Doppelspurwechsel ist in Bild 3.4 dargestellt.

Für jeden Bewertungspunkt (z.B. „Seitenkraftaufbau“) werden zwei Wertungen abgefragt: Die quasi-objektive *Wahrnehmung* (z.B. „langsamer – schneller“) und die subjektive *Gefallensbewertung* („schlechter – besser“) relativ zur Basisvariante. Zusätzlich kann optional vom Probanden angegeben werden, ob er eine Fahrzeugeigenschaft als zu extrem empfindet („zu niedrig – zu hoch“).

Gegenüber der üblichen Gefallensbeurteilung in Bewertungsindizes (s. [HB02]) ermöglicht die zusätzliche Angabe der quasi-objektiven Wahrnehmung eine differenziertere Beurteilung durch den Probanden. Die Bezeichnung „quasi-objektiv“ bedeutet, dass der Beurteiler – wertungsfrei – seine Empfindung der abgefragten Größe (z.B. Seitenkraftaufbau) angeben soll. Durch die Eigenheiten der menschlichen Wahrnehmung (s. Kapitel 1.4) ist diese Wer-

		-- - 0 + ++						
<b>Lenkwinkelbedarf</b>	Wie groß sind die Lenkwinkel, die zum Durchfahren benötigt werden	niedriger	<input type="checkbox"/>	höher				
		schlechter	<input type="checkbox"/>	besser				
		zu niedrig	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	zu hoch
<b>Lenkkraft Verlauf</b>	Wie ist der Lenkkraftanstieg aus der Mitte heraus	flacher	<input type="checkbox"/>	steiler				
		schlechter	<input type="checkbox"/>	besser				
		zu flach	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	zu steil
<b>Lenkarbeit</b>	Wie anstrengend ist es, zu lenken	niedriger	<input type="checkbox"/>	höher				
		schlechter	<input type="checkbox"/>	besser				
		zu niedrig	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	zu hoch
<b>Zielgenauigkeit</b>	Wie zielgenau wirkt das Fahrzeug	---	<input type="checkbox"/>	---				
		schlechter	<input type="checkbox"/>	besser				
		zu schlecht	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	---
<b>Seitenkraftaufbau</b>	Wie schnell baut sich nach einer Lenkradeingabe die Seitenkraft auf	langsamer	<input type="checkbox"/>	schneller				
		schlechter	<input type="checkbox"/>	besser				
		zu langsam	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	zu schnell
<b>Gierverhalten</b>	Wie schnell baut sich die Gierreaktion nach einer Lenkradeingabe auf	langsamer	<input type="checkbox"/>	schneller				
		schlechter	<input type="checkbox"/>	besser				
		zu langsam	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	zu schnell
<b>Überschwinger der Gierreaktion</b>	Wie stark sind die Überschwinger der Gierbewegungen	schwächer	<input type="checkbox"/>	stärker				
		schlechter	<input type="checkbox"/>	besser				
		zu schwach	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	zu stark
<b>Wankverhalten</b>	Wie schnell baut sich nach einer Lenkradeingabe der Wankwinkel auf	langsamer	<input type="checkbox"/>	schneller				
		schlechter	<input type="checkbox"/>	besser				
		zu langsam	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	zu schnell

Bild 3.4: Fragebogen für das Manöver Doppelspurwechsel

tung allerdings nicht im klassischen Sinne „objektiv“, woraus die Einschränkung in Richtung „quasi-objektiv“ folgt.

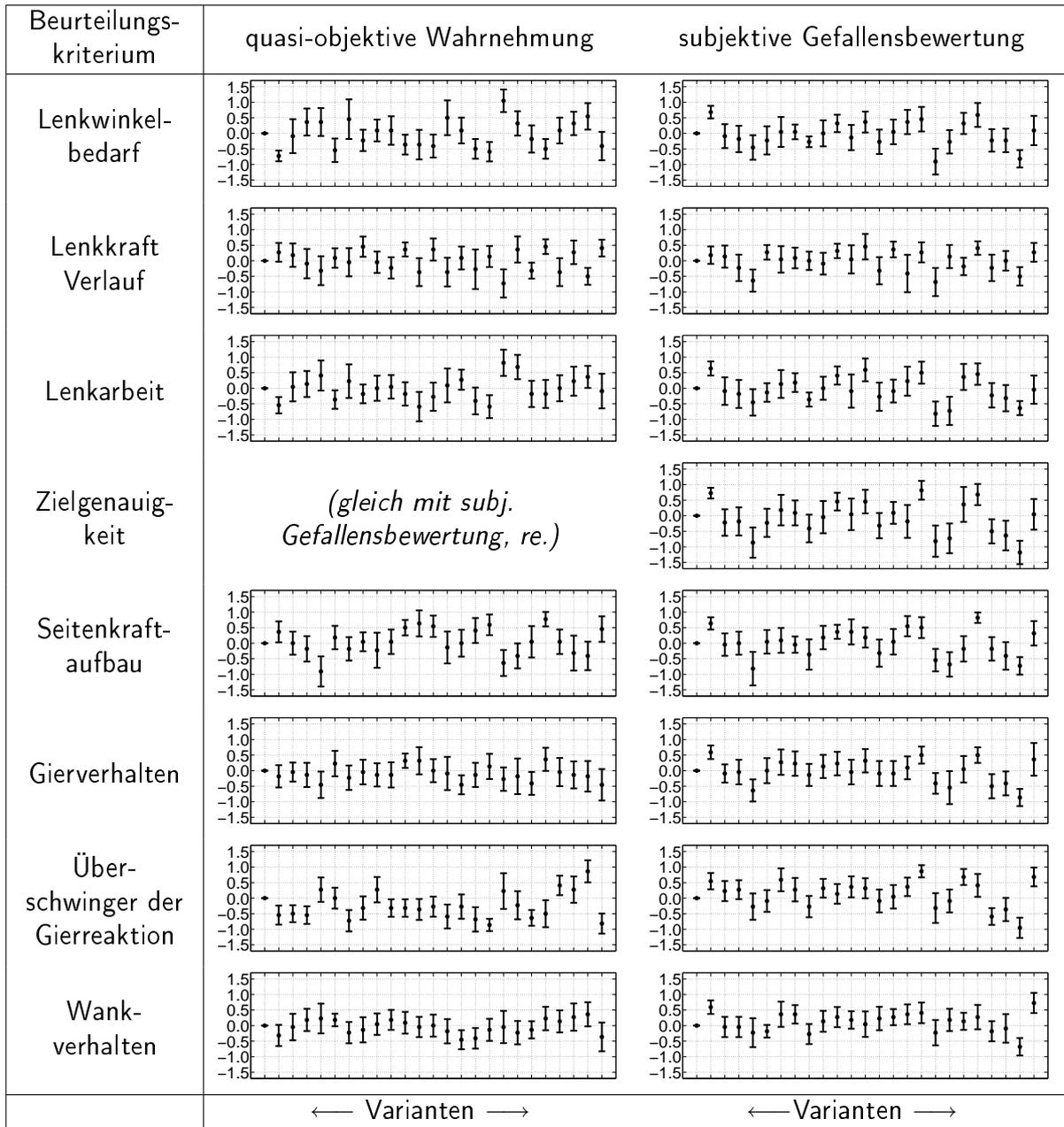
Das Beurteilungskriterium „Wankverhalten“ wird abgefragt, obwohl das Fahrzeug keine direkte Beeinflussung des Wankwinkels zulässt (S. 50). Durch die Abfrage des subjektiv empfundenen Wankwinkels zusätzlich zur empfundenen Querbeschleunigungsreaktion lassen sich Zusammenhänge zwischen beiden Subjektivgrößen herausfinden.

### 3.3 Versuchsergebnisse Doppelspurwechsel

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse aus dem Versuchsabschnitt „Doppelspurwechsel“ dargestellt. Die der Auswertung zur Verfügung stehenden Daten umfassen:

1. die subjektiven Bewertungen der Probanden zu jeder Variante in den beiden Bewertungskategorien „quasi-objektiv“ und „subjektiv“,
2. die objektiven Kennwerte der Fahrzeugvarianten aus den Open-Loop-Manövern „Sinuslenken mit steigender Frequenz“ (Frequenzgänge) und „Weavetest“ (Phasendiagramme), und
3. die während der Probandenversuche gemessenen Zeitschriebe des Doppelspurwechsels aus jedem einzelnen Versuch.



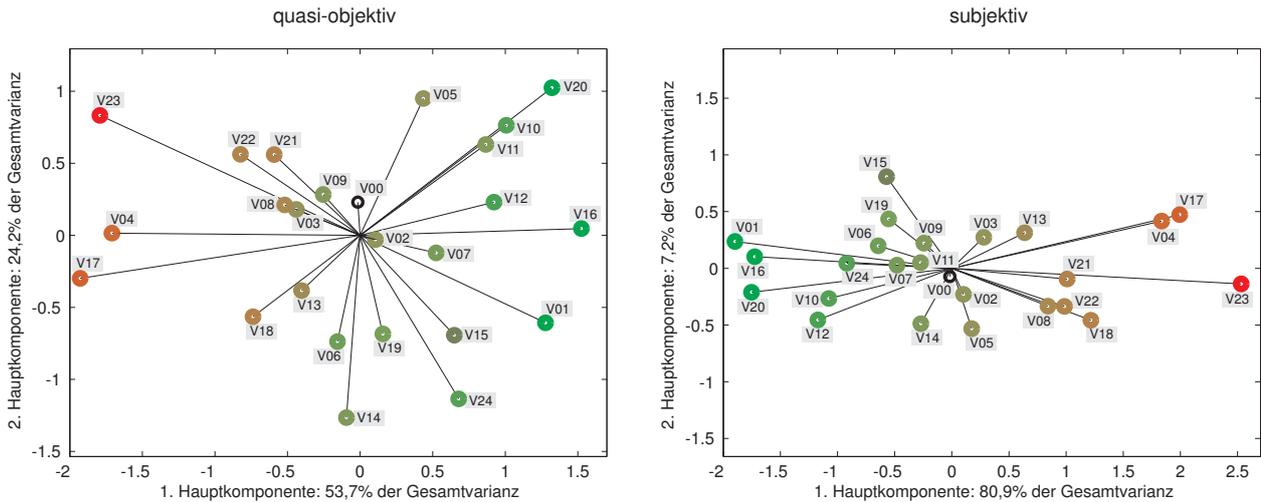


**Bild 3.6:** Mittelwerte und Standardabweichungen der Subjektivwertungen aus dem Doppelspurwechsel

### 3.3.2 Hauptkomponentenanalyse der Bewertungen

Um herauszufinden, wie die Varianten voneinander über alle Kriterien hinweg unterschieden werden, wird eine Hauptkomponentenanalyse der Bewertungen durchgeführt.

In Bild 3.7 ist das Ergebnis der Transformation der Wertungen in den Hauptkomponentenraum dargestellt. Diese zweidimensionale Projektion zeigt von den acht Dimensionen lediglich die ersten beiden Dimensionen bzw. Hauptkomponenten. Der Informations-



**Bild 3.7:** Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse für den Doppelspurwechsel mit farbig kodierter Subjektivbewertung (grün=besser, rot=schlechter)

gehalt bleibt trotzdem relativ hoch, da von den ersten beiden Hauptkomponenten bereits  $53,7\% + 24,2\% = 77,9\%$  der Gesamtvarianz aufgeklärt werden, bei den subjektiven Gefallensbewertungen sogar  $80,9\% + 7,2\% = 88,1\%$  der Gesamtvarianz. Dies sagt aus, dass die Probanden bei der Beurteilung der Varianten nicht alle acht Beurteilungskriterien unabhängig voneinander genutzt haben, vielmehr lassen sich die Urteile aus den acht Kriterien mit moderatem Informationsverlust (22,1 %) auf nur noch zwei Ersatzkriterien, nämlich die ersten beiden Hauptkomponenten, verdichten. Da die Hauptkomponenten jedoch Linearkombinationen sämtlicher acht ursprünglichen Kriterien sind, ist eine intuitive Interpretation nicht möglich. Im Fall der subjektiven Gefallensbewertung bleibt von den acht Dimensionen gar nur eine Hauptkomponente mit sehr hoher erklärter Gesamtvarianz (über 80 %) übrig. Dies bedeutet, dass die Gefallensbewertung einer Variante insgesamt eher schlecht oder eher gut war, eine Differenzierung über die einzelnen acht Bewertungskriterien findet kaum statt.

Weitere Erkenntnisse lassen sich aus der grafischen Aufbereitung der Hauptkomponentenanalyse ziehen: Die Positionierung der 24 Varianten erfolgt so, dass eine gleichmäßige Verteilung innerhalb der umschlossenen Fläche erreicht wird. Die Basisvariante  $V00$  liegt in beiden Fällen dicht beim Koordinatenursprung, wobei diese nicht explizit bewertet wurde, sondern per Definition in allen Kriterien auf den Referenzwert Null gesetzt wurde. Dies zeigt, dass die Abstimmung der Versuchsvarianten eine subjektiv wahrgenommene Bandbreite erzeugte, welche in allen Beurteilungsdimensionen bipolar ausgeprägt war.

Die farbige Kennzeichnung der einzelnen Fahrzeugvarianten gibt die subjektive Gefallensbewertung wieder (Mittelwert über alle Kriterien). Grün bedeutet besser als Referenz, Rot bedeutet schlechter. Es wird deutlich, dass bei beiden Bewertungskategorien (quasi-objektiv und subjektiv) eine klare Hauptrichtung der Gefallensbewertung existiert. Im Fall der sub-

jektiven Gefallensbewertung (Bild 3.7 rechts) ist dies zu erwarten, da die Farbcodierung hier direkt mit den Werten der Koordinaten der Hauptkomponentenachsen verknüpft ist.

Doch auch die quasi-objektive Bewertung zeigt eine eindeutige Hauptrichtung in der farblich codierten Gefallensbewertung, was bedeutet, dass zwischen den von den Probanden empfundenen fahrdynamischen Eigenschaften und der Gefallensbewertung ein monotoner Zusammenhang besteht. Je weiter die wahrgenommenen Fahrzeugeigenschaften in Richtung der ersten Hauptkomponente (Bild 3.7 links) liegen, desto besser ist die Gefallensbewertung. Ein optimaler Bereich lässt sich anhand der vorliegenden Daten nicht eingrenzen.

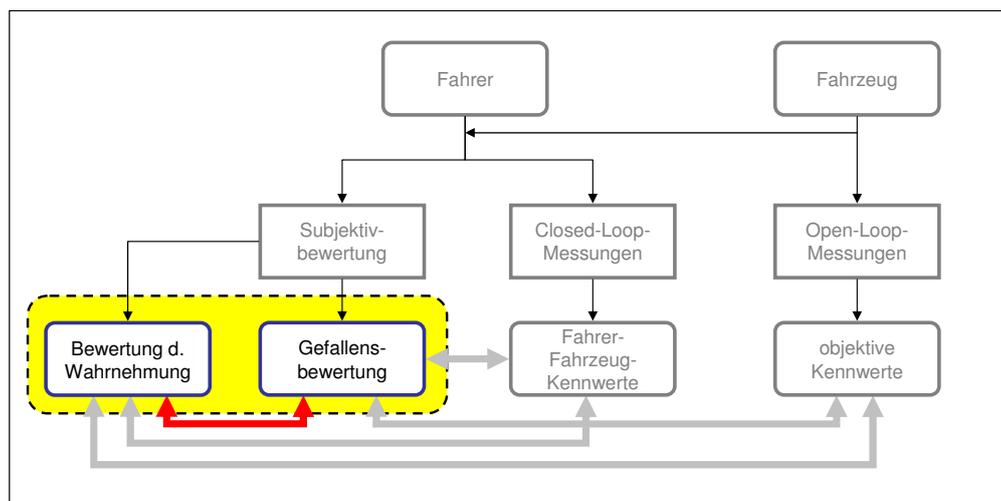
### 3.3.3 Subjektiv-Subjektiv-Korrelationen der Bewertungen

Die Hauptkomponentenanalyse zeigt, welche Verteilung die Varianten im Bewertungsraum haben. Da die Hauptkomponenten jeweils Linearkombinationen aller 8 Bewertungskriterien sind, ist eine intuitive Interpretation allerdings nicht möglich.

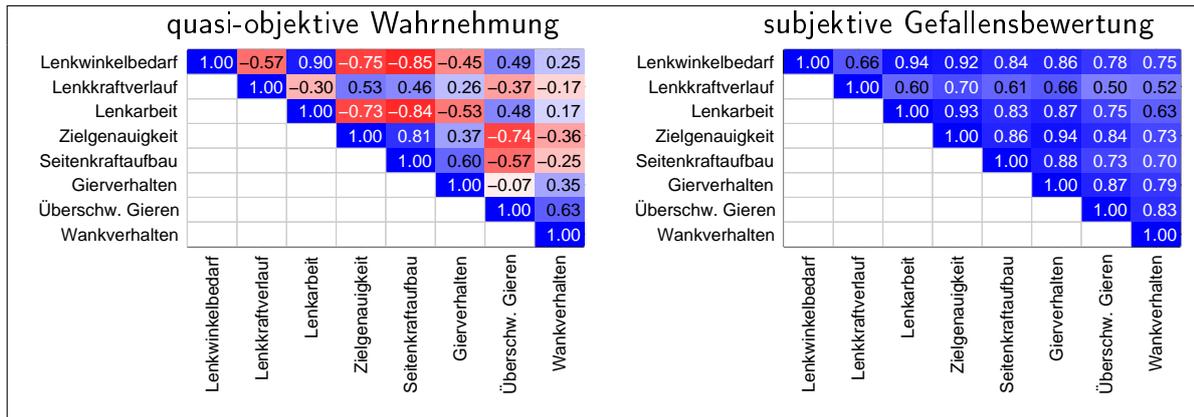
Um Aussagen zu einzelnen Bewertungskriterien zu erhalten, bietet sich die klassische Korrelationsanalyse an: Diese liefert Aussagen zum Verhältnis einzelner Wertepaare, entweder zweier Subjektivwertungen, einer Subjektivwertung mit einem Objektivkennwert, oder zweier Objektivkennwerte.

In Bild 3.9 sind die Ergebnisse der linearen Regression der Subjektivwertungen dargestellt. Die Werte der einzelnen Korrelationskoeffizienten werden als Zahlenwert und gleichzeitig farblich kodiert dargestellt, wobei Blau einem Wert von +1, Weiß einem Wert von 0 und Rot einem Wert von -1 entspricht.

Auf den ersten Blick wird ein qualitativer Unterschied zwischen den Wertungen der quasi-objektiven Wahrnehmung und der subjektiven Gefallensbewertung deutlich: Während in



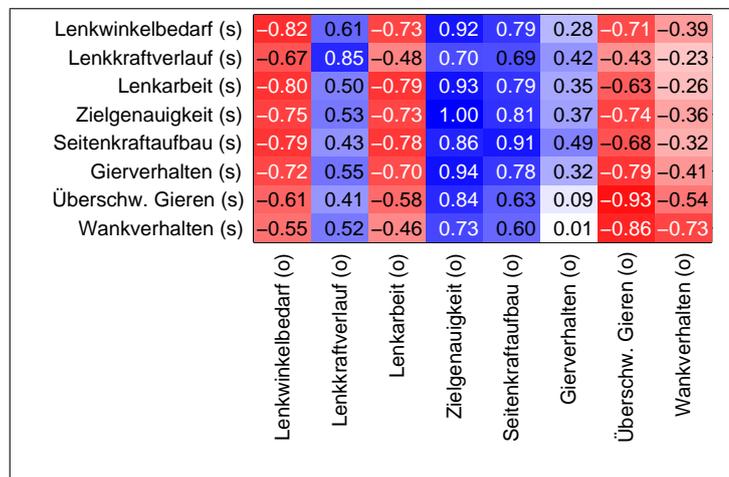
*Bild 3.8: Einordnung Abschnitt 3.3.3*



**Bild 3.9:** Korrelationen der Subjektivwertungen im Doppelspurwechsel

der Wahrnehmung gleichgerichtete (z.B. *Lenkwinkelbedarf*–*Überschwinger*) und gegensinnige (z.B. *Lenkarbeit*–*Seitenkraftaufbau*) Zusammenhänge auftreten, sind die Gefallensbewertungen stets gleichgerichtet miteinander verknüpft. Dies bedeutet, dass die einzelnen Fahrzeugvarianten im Mittel entweder eher gut oder eher schlecht in sämtlichen Kriterien beurteilt wurden. Der Fall, dass Varianten in einzelnen Kriterien durchgehend schlechter beurteilt wurden und dabei in anderen Kriterien besser, trat nicht auf. Diese Interpretation deckt sich mit dem Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse (Bild 3.7 re.).

Bild 3.10 gibt Aufschluss darüber, wie die Wahrnehmung mit der Gefallensbewertung verknüpft ist. Die Hauptdiagonale gibt die Verknüpfung von *quasi-objektiv* und *subjektiv* eines einzelnen Bewertungskriteriums an. Der Wert von 1,0 beim Kriterium *Zielgenauigkeit* entsteht dadurch, dass hier nur die subjektive Gefallensbewertung abgefragt wurde und in die quasi-objektive Bewertung übernommen wurde.



**Bild 3.10:** Korrelationen der Bewertungskategorien quasi-objektiv und subjektiv im Doppelspurwechsel

Besonders hohe Korrelationen treten bei den Kriterien *Seitenkraftaufbau* und *Überschwinger* auf. Der Korrelationskoeffizient von 0,91 beim Seitenkraftaufbau sagt aus, dass eine Variante umso besser beurteilt wurde, je schneller der wahrgenommene Seitenkraftaufbau war. Der Wert von -0,93 sagt aus, dass eine Variante umso schlechter beurteilt wurde, je größer der wahrgenommene Überschwinger war.

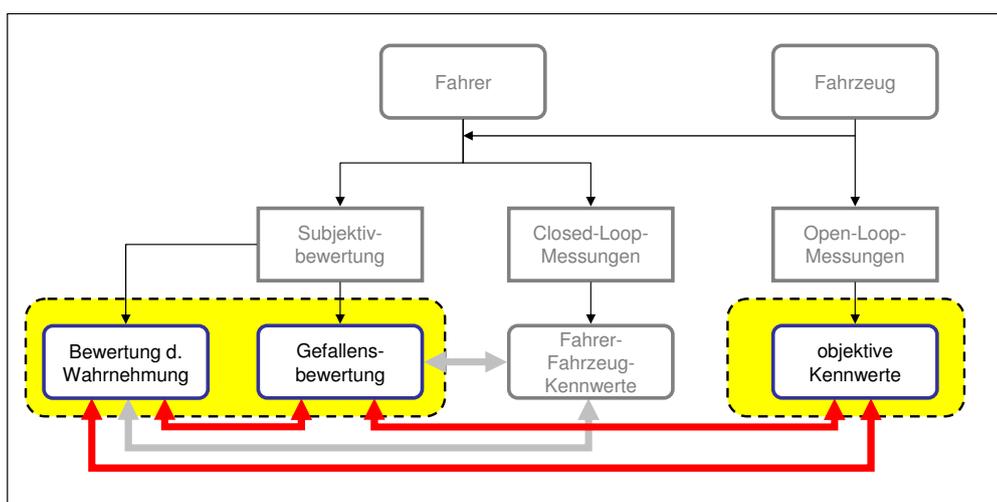
### 3.3.4 Objektiv-Subjektiv-Korrelationen der Bewertungen zu Open-Loop-Kennwerten

Nach den vorausgegangenen Betrachtungen der Zusammenhänge innerhalb der von den Probanden abgegebenen Urteile werden nachfolgend deren Korrelationen mit objektiven Kennwerten dargestellt. Die objektiven Kennwerte wurden bei den Manövern *Sinuslenken mit steigender Frequenz* (s. S. 36) und dem *Weavetest* (s. S. 37) ermittelt. Als Randbedingungen lagen jeweils eine Fahrgeschwindigkeit von  $100 \frac{km}{h}$  und eine Querbeschleunigungsamplitude von  $4 \frac{m}{s^2}$  vor.

In Bild 3.12 sind die Korrelationen der Subjektivbewertungen mit den Kennwerten des Frequenzgangs dargestellt. Die Bedeutung der Kennwertbezeichner wird Kapitel 2, Bild 2.5 erläutert.

Beim Vergleich der Korrelationsmatrizen in Bild 3.12 lässt sich feststellen, dass die Korrelationen einzelner Kennwerte (=Zeilen) mit den quasi-objektiven Wertungen sowohl gleich als auch gegensinnig sein können. Die Korrelationen mit der subjektiven Gefallensbewertung sind jedoch – für einen einzelnen Kennwert – immer entweder gleichsinnig oder gegensinnig, sieht man von einzelnen Ausnahmen mit extrem niedrigen Werten nahe Null ab.

Dieser qualitative Unterschied zwischen den beiden Bewertungskategorien *quasi-objektiv* und *subjektiv* wurde bereits in der Hauptkomponentenanalyse (Bild 3.7 re.) und der Korrelationstabelle der Subjektiv-Wertungen ersichtlich (Bild 3.9 re.): Die einzelnen Varianten werden „eindimensional“ eher besser oder eher schlechter als die Referenz beurteilt, eine differenzierte Gefallensbewertung findet nicht statt. Für die Korrelationen der subjektiven Gefallensbewertung mit objektiven Kennwerten bedeutet dies, dass ein einzelner Kennwert



*Bild 3.11: Einordnung Abschnitt 3.3.4*

	quasi-objektive Wahrnehmung								subjektive Gefallensbewertung							
TF( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (01)	-0.44	0.01	-0.48	0.06	0.35	0.51	0.18	0.32	0.04	0.14	0.14	0.06	0.17	0.04	-0.00	-0.22
TF( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>T<sub>eq</sub></sub> (04)	0.57	-0.27	0.67	-0.57	-0.57	-0.32	0.46	0.24	-0.60	-0.41	-0.65	-0.57	-0.63	-0.57	-0.44	-0.35
TF( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>f<math>\varphi</math>-45°</sub> (05)	-0.55	0.25	-0.64	0.56	0.54	0.30	-0.47	-0.27	0.59	0.38	0.63	0.56	0.61	0.56	0.45	0.35
TF( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub><math>\varphi</math>1,0</sub> (07)	-0.50	0.16	-0.63	0.44	0.50	0.33	-0.33	-0.19	0.49	0.29	0.54	0.44	0.54	0.43	0.31	0.23
TF( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>U</sub> (08)	-0.16	-0.17	-0.22	-0.19	0.07	0.12	0.27	0.16	-0.08	-0.15	-0.01	-0.19	0.00	-0.20	-0.25	-0.35
TF( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>f-3dB</sub> (09)	0.50	-0.45	0.48	-0.29	-0.34	-0.16	0.23	-0.01	-0.47	-0.44	-0.41	-0.29	-0.26	-0.21	-0.21	-0.22
TF( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (10)	-0.51	0.09	-0.53	0.14	0.42	0.53	0.09	0.28	0.11	0.22	0.21	0.14	0.25	0.13	0.08	-0.13
TF( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>T<sub>eq</sub></sub> (13)	0.58	-0.48	0.50	-0.73	-0.60	-0.02	0.86	0.57	-0.69	-0.51	-0.65	-0.73	-0.69	-0.80	-0.85	-0.83
TF( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>f<math>\varphi</math>-45°</sub> (14)	-0.57	0.48	-0.47	0.68	0.59	-0.02	-0.82	-0.56	0.66	0.49	0.60	0.68	0.65	0.76	0.81	0.81
TF( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub><math>\varphi</math>1,0</sub> (16)	-0.60	0.48	-0.52	0.74	0.61	0.05	-0.87	-0.58	0.72	0.49	0.67	0.74	0.71	0.81	0.86	0.83
TF( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>U</sub> (17)	-0.21	0.09	-0.13	0.05	0.04	-0.01	-0.27	-0.14	0.15	-0.04	0.13	0.05	0.11	0.06	0.23	0.09
TF( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>f-3dB</sub> (18)	0.12	-0.42	-0.03	-0.07	-0.17	-0.05	0.07	-0.03	-0.06	-0.18	-0.02	-0.07	-0.14	-0.20	-0.09	-0.27
TF( $M_H/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (19)	-0.57	0.68	-0.33	0.31	0.36	0.35	-0.07	0.15	0.33	0.64	0.35	0.31	0.28	0.33	0.20	0.05
TF( $M_H/\delta_H$ ) <sub><math>\varphi</math>1,0</sub> (25)	-0.53	0.17	-0.55	0.64	0.59	0.05	-0.84	-0.59	0.63	0.26	0.61	0.64	0.66	0.72	0.79	0.75
TF( $M_H/\delta_H$ ) <sub>U</sub> (26)	-0.01	0.19	0.17	0.01	0.08	-0.15	0.06	0.05	-0.01	0.18	0.00	0.01	-0.10	-0.02	0.03	-0.07
	Lenkwinkelbedarf	Lenkkraftverlauf	Lenkarbeit	Zielgenauigkeit	Seitenkraftaufbau	Gierverhalten	Überschw. Gieren	Wankverhalten	Lenkwinkelbedarf	Lenkkraftverlauf	Lenkarbeit	Zielgenauigkeit	Seitenkraftaufbau	Gierverhalten	Überschw. Gieren	Wankverhalten

**Bild 3.12:** Korrelationen der Subjektivrteile des Doppelspurwechsels mit Kennwerten des Frequenzgangs

für sämtliche Bewertungskriterien und im Mittel über die Varianten die gleiche Einflussrichtung – verbessernd oder verschlechternd – hat.

Die Aussagekraft eines objektiven Kennwerts auf die Bewertungen lässt sich an den Beträgen seiner Korrelationskoeffizienten ablesen. Es zeigt sich, dass zwischen den drei primären Fahrzeugreaktionsgrößen *Gierrate* (Kennwerte 1-9), *Querbesehleunigung* (10-18) und *Lenkmoment* (19-26) Unterschiede in den maximalen Korrelationskoeffizienten bestehen.

Der Vergleich dieser maximalen Korrelationskoeffizienten in Tabelle 3.1 zeigt, dass die Kennwerte aus Querbesehleunigung und Lenkmoment eine höhere Aussagekraft für die Subjektivbewertungen zu haben scheinen als die Kennwerte der Gierrate. Dies trifft sowohl für die quasi-objektive Wahrnehmungsbewertung zu als auch für die subjektive Gefallensbewertung. Die Probanden können also Variantenunterschiede im Querbesehleunigungs- und Lenkmomentfrequenzgang deutlicher unterscheiden als im Gierfrequenzgang, ebenso scheinen

	$ r _{max}$ quasi-objektiv	$ r _{max}$ subjektiv
Gierrate	0,67	0,65
Querbesehleunigung	0,87	0,86
Lenkmoment	0,84	0,79

**Tabelle 3.1:** Maximale Korrelationskoeffizienten der einzelnen Frequenzgänge mit der Subjektivbewertung im Doppelspurwechsel

	Lenkwinkelbedarf	Lenkkraftverlauf	Lenkarbeit	Zielgenauigkeit	Seitenkraftaufbau	Gierverhalten	Überschwinger Gieren	Wankverhalten
$ r _{max}$ quasi-objektiv	0,60 	0,68 	0,67 	0,74 	0,61 	0,53 	0,87 	0,59 
$ r _{max}$ subjektiv	0,72 	0,64 	0,67 	0,74 	0,71 	0,81 	0,86 	0,83 

**Tabelle 3.2:** Maximale Korrelationskoeffizienten der Frequenzgänge nach Kriterien im Doppelspurwechsel (Bild 3.12)

Querbeschleunigungs- und Lenkmomentkennwerte größeren Einfluss auf die Gefallensbewertung zu haben als Gierraten-Kennwerte.

Für eine bessere Gefallensbewertung sorgen demnach eine schnellere Querbeschleunigungs- und Gierreaktion (Kennwerte 4, 5, 7, 13, 14, 16) sowie ein höheres Lenkmoment (19) mit größerer Phasenvoreilung (25). Die stationären Verstärkungen von Gierrate und Querbeschleunigungen (1, 10) haben im Mittel keinen Einfluss auf die Gefallensbewertung.

Beim Vergleich der maximalen Korrelationskoeffizienten nach Bewertungskriterien (Tabelle 3.2) fällt auf, dass diese Maxima stark vom Beurteilungskriterium abhängig sind. Die Werte reichen von 0,68/0,64 (*Lenkkraftverlauf*) bis 0,87/0,86 (*Überschwinger*). Anscheinend sind die einzelnen Kriterien unterschiedlich gut differenzierbar, wobei dies jeweils für *Wahrnehmung* und *Gefallensbewertung* gleichermaßen gilt.

Eine Ausnahme dieser Regel stellt das Kriterium *Gierverhalten* dar, mit dem die Schnelligkeit der Gierreaktion des Fahrzeugs bewertet wird. Hier steht einem geringen maximalen Korrelationskoeffizienten von 0,53 bei der quasi-objektiven Wahrnehmung ein relativ hoher Wert von 0,81 bei der subjektiven Gefallensbewertung gegenüber. Interessant ist dabei, dass die hohe Korrelation von 0,81 mit dem Kennwert Nr. 16 entsteht, welcher aus dem Querbeschleunigungsfrequenzgang gewonnen wird. Genau dieser Kennwert erzielt jedoch beim Kriterium *Seitenkraftaufbau* nur einen deutlich niedrigeren Korrelationskoeffizienten von 0,71. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass die Probanden Schwierigkeiten hatten, die Größen *Querbeschleunigung* und *Gierrate* getrennt voneinander zu bewerten. Dies wurde auch während der Versuche von vielen Probanden selbst geäußert.

Die absolut höchsten Korrelationen ergaben sich für das Kriterium *Überschwinger*, sowohl quasi-objektiv als auch subjektiv. Die zugehörigen Objektivkennwerte (13, 14, 16) entstehen allerdings aus dem Phasengang von Querbeschleunigung und Lenkmoment, und nicht aus der Gierresonanzüberhöhung (Nr. 8) oder einem anderen Kennwert aus dem Gierfrequenzgang.

	$ r _{max}$ quasi-objektiv	$ r _{max}$ subjektiv
Lenkwinkel-Lenkmoment (28-36)	0,86 	0,81 
Lenkwinkel-Querbesehleunigung(37-45)	0,82 	0,81 
Lenkwinkel-Gierrate(46-54)	0,73 	0,52 
Gierrate-Querbesehleunigung(55-63)	0,80 	0,78 
Lenkmoment-Querbesehleunigung(64-72)	0,73 	0,55 
Lenkmoment-Gierrate(73-81)	0,75 	0,66 

**Tabelle 3.3:** Maximale Korrelationskoeffizienten der Subjektivbewertung im Doppelspurwechsel mit Kennwerten des Weavetests nach Signalpaaren

Dieser „Fehler“ kann als Hinweis aufgenommen werden, dass eine eindeutige und selbst-erklärende Zuordnung von subjektiven Eindrücken zu den entsprechenden ingenieurmäßig verstandenen Objektivkennwerten nicht immer gegeben sein muss.

In Bild 3.13 sind die Korrelationsmatrizen für die aus dem Weavetest ermittelten Kennwerte dargestellt. Analog zu der Analyse der Korrelationen der Kennwerte aus dem Frequenzgang werden in den Tabellen 3.3 und 3.4 die maximalen Korrelationskoeffizienten nach Fahrdynamikgröße bzw. Bewertungskriterium dargestellt.

Bei den drei Signalkombinationen mit Lenkwinkel ( $\frac{M_H}{\delta_H}$ ,  $\frac{\ddot{y}}{\delta_H}$  und  $\frac{\dot{\psi}}{\delta_H}$ ) erzielen die beiden Größen Querbesehleunigung und Lenkmoment deutlich höhere Maxima als die Gierrate. Hier besteht also ein ähnlicher Sachverhalt wie bei den Kennwerten des Frequenzgangs. Die zusätzlichen Signalkombinationen  $\frac{\ddot{y}}{\dot{\psi}}$ ,  $\frac{\ddot{y}}{M_H}$  und  $\frac{\dot{\psi}}{M_H}$  erzielen keine höheren Korrelationskoeffizienten mehr.

Beim Vergleich der maximalen Koeffizienten nach Kriterien (Tabellen 3.2 u. 3.4) fällt auf, dass in sämtlichen Kriterien die Koeffizienten aus dem Weavetest höher liegen. Ferner

	Lenkwinkelbedarf	Lenkkräfteverlauf	Lenkarbeit	Zielgenauigkeit	Seitenkraftaufbau	Gierverhalten	Überschwinger Gieren	Wankverhalten
$ r _{max}$ quasi-objektiv	0,78 	0,78 	0,77 	0,78 	0,75 	0,54 	0,87 	0,70 
$ r _{max}$ subjektiv	0,79 	0,65 	0,72 	0,78 	0,76 	0,82 	0,80 	0,81 

**Tabelle 3.4:** Maximale Korrelationskoeffizienten des Weavetests nach Kriterien im Doppelspurwechsel (Bild 3.13)

	quasi-objektive Wahrnehmung							subjektive Gefallensbewertung								
$H(M_H/\delta_H)_x$ (28)	0.34	-0.33	0.31	-0.61	-0.42	0.13	0.86	0.72	-0.59	-0.38	-0.52	-0.61	-0.54	-0.66	-0.73	-0.80
$H(M_H/\delta_H)_y$ (29)	-0.62	0.61	-0.53	0.78	0.61	0.11	-0.84	-0.57	0.77	0.66	0.71	0.78	0.71	0.81	0.80	0.80
$H(M_H/\delta_H)_{y/x}$ (30)	-0.37	0.40	-0.27	0.06	0.18	0.45	0.37	0.52	0.10	0.36	0.13	0.06	0.08	0.01	-0.16	-0.31
$H(M_H/\delta_H)_A$ (31)	-0.22	0.45	-0.10	0.52	0.29	-0.25	-0.70	-0.64	0.54	0.41	0.42	0.52	0.42	0.54	0.58	0.74
$H(M_H/\delta_H)_{\Delta y}$ (32)	-0.29	-0.01	-0.36	0.47	0.41	-0.15	-0.78	-0.63	0.45	0.08	0.41	0.47	0.47	0.55	0.69	0.70
$H(\partial M_H/\partial \delta_H)_{max}$ (33)	-0.52	0.36	-0.48	0.18	0.38	0.56	0.17	0.37	0.19	0.42	0.24	0.18	0.23	0.15	0.02	-0.17
$H(\partial M_H/\partial \delta_H)_{min}$ (34)	0.07	-0.16	0.05	-0.27	-0.27	-0.12	0.18	0.19	-0.26	-0.28	-0.27	-0.27	-0.19	-0.15	-0.14	-0.08
$H(\partial \overline{M_H}/\partial \delta_H)$ (35)	-0.52	0.47	-0.41	0.26	0.35	0.54	0.08	0.35	0.21	0.50	0.28	0.26	0.23	0.23	0.11	-0.12
$H(\partial M_H/\partial \delta_H)_{\frac{max}{min}}$ (36)	0.14	0.03	0.25	-0.18	-0.11	-0.04	0.07	-0.11	-0.10	0.02	-0.19	-0.18	-0.05	-0.22	-0.21	-0.08
$H(\ddot{y}/\delta_H)_x$ (37)	0.76	-0.36	0.78	-0.71	-0.70	-0.32	0.70	0.38	-0.71	-0.47	-0.71	-0.71	-0.77	-0.77	-0.75	-0.60
$H(\ddot{y}/\delta_H)_y$ (38)	-0.64	0.33	-0.65	0.72	0.60	0.19	-0.82	-0.52	0.70	0.42	0.68	0.72	0.74	0.79	0.81	0.70
$H(\ddot{y}/\delta_H)_{y/x}$ (39)	-0.20	0.02	-0.19	-0.23	0.14	0.33	0.52	0.53	-0.17	0.04	-0.11	-0.23	-0.09	-0.26	-0.36	-0.44
$H(\ddot{y}/\delta_H)_A$ (40)	-0.75	0.36	-0.75	0.72	0.69	0.26	-0.77	-0.44	0.70	0.45	0.71	0.72	0.76	0.80	0.82	0.67
$H(\ddot{y}/\delta_H)_{\Delta y}$ (41)	-0.61	0.29	-0.62	0.65	0.61	0.09	-0.79	-0.58	0.66	0.35	0.64	0.65	0.70	0.74	0.76	0.73
$H(\partial \ddot{y}/\partial \delta_H)_{max}$ (42)	-0.31	-0.03	-0.35	0.08	0.26	0.34	-0.00	0.08	0.04	0.06	0.08	0.08	0.18	0.14	0.14	-0.01
$H(\partial \ddot{y}/\partial \delta_H)_{min}$ (43)	-0.24	0.02	-0.29	-0.12	0.17	0.38	0.43	0.48	-0.08	0.09	0.00	-0.12	-0.02	-0.14	-0.27	-0.39
$H(\partial \ddot{y}/\partial \delta_H)$ (44)	-0.56	0.14	-0.56	0.22	0.46	0.53	-0.02	0.23	0.20	0.25	0.26	0.22	0.33	0.23	0.20	-0.04
$H(\partial \ddot{y}/\partial \delta_H)_{\frac{max}{min}}$ (45)	-0.12	-0.04	-0.11	0.22	0.12	-0.00	-0.46	-0.42	0.15	-0.02	0.09	0.22	0.23	0.33	0.46	0.41
$H(\dot{\psi}/\delta_H)_x$ (46)	0.46	-0.00	0.61	-0.19	-0.37	-0.44	-0.04	-0.13	-0.25	-0.13	-0.32	-0.19	-0.35	-0.19	-0.03	0.12
$H(\dot{\psi}/\delta_H)_y$ (47)	-0.27	-0.08	-0.47	0.15	0.21	0.34	-0.00	0.05	0.21	0.06	0.26	0.15	0.27	0.14	0.01	-0.10
$H(\dot{\psi}/\delta_H)_{y/x}$ (48)	-0.31	0.18	-0.17	0.02	0.28	0.16	0.15	0.23	0.01	0.14	0.05	0.02	0.06	0.02	0.01	-0.05
$H(\dot{\psi}/\delta_H)_A$ (49)	-0.58	0.08	-0.73	0.40	0.49	0.46	-0.26	-0.06	0.42	0.24	0.50	0.40	0.52	0.42	0.32	0.11
$H(\dot{\psi}/\delta_H)_{\Delta y}$ (50)	-0.46	0.08	-0.56	0.32	0.46	0.21	-0.32	-0.26	0.41	0.18	0.43	0.32	0.46	0.35	0.28	0.24
$H(\partial \dot{\psi}/\partial \delta_H)_{max}$ (51)	-0.31	-0.13	-0.33	0.01	0.18	0.28	0.05	0.15	-0.03	-0.02	0.04	0.01	0.09	0.04	0.11	-0.14
$H(\partial \dot{\psi}/\partial \delta_H)_{min}$ (52)	-0.15	-0.09	-0.14	-0.14	0.11	0.33	0.48	0.54	-0.15	-0.08	-0.01	-0.14	-0.11	-0.22	-0.28	-0.44
$H(\partial \dot{\psi}/\partial \delta_H)$ (53)	-0.47	0.07	-0.48	0.11	0.37	0.54	0.12	0.33	0.10	0.19	0.18	0.11	0.22	0.11	0.05	-0.19
$H(\partial \dot{\psi}/\partial \delta_H)_{\frac{max}{min}}$ (54)	-0.17	-0.05	-0.21	0.15	0.08	-0.04	-0.44	-0.40	0.11	0.05	0.04	0.15	0.20	0.27	0.41	0.29
$H(\ddot{y}/\dot{\psi})_x$ (55)	0.36	-0.41	0.20	-0.54	-0.38	0.12	0.76	0.52	-0.48	-0.38	-0.41	-0.54	-0.45	-0.62	-0.75	-0.75
$H(\ddot{y}/\dot{\psi})_y$ (56)	-0.36	0.41	-0.21	0.55	0.38	-0.10	-0.77	-0.52	0.49	0.38	0.42	0.55	0.46	0.63	0.76	0.76
$H(\ddot{y}/\dot{\psi})_{y/x}$ (57)	0.16	-0.12	0.06	-0.32	-0.21	0.07	0.48	0.36	-0.20	-0.14	-0.23	-0.32	-0.23	-0.34	-0.46	-0.43
$H(\ddot{y}/\dot{\psi})_A$ (58)	-0.31	0.36	-0.15	0.47	0.33	-0.17	-0.69	-0.49	0.42	0.30	0.35	0.47	0.39	0.56	0.68	0.71
$H(\ddot{y}/\dot{\psi})_{\Delta y}$ (59)	-0.34	0.34	-0.25	0.54	0.37	-0.13	-0.76	-0.56	0.46	0.32	0.41	0.54	0.46	0.64	0.75	0.77
$H(\partial \ddot{y}/\partial \dot{\psi})_{max}$ (60)	-0.43	0.44	-0.32	0.38	0.39	-0.01	-0.34	-0.20	0.42	0.37	0.32	0.38	0.38	0.46	0.38	0.46
$H(\partial \ddot{y}/\partial \dot{\psi})_{min}$ (61)	0.14	-0.17	0.10	-0.22	-0.05	0.08	0.30	0.18	-0.18	-0.22	-0.14	-0.22	-0.14	-0.25	-0.38	-0.21
$H(\partial \ddot{y}/\partial \dot{\psi})$ (62)	-0.46	0.33	-0.38	0.57	0.45	0.01	-0.80	-0.51	0.53	0.33	0.46	0.57	0.57	0.69	0.78	0.78
$H(\partial \ddot{y}/\partial \dot{\psi})_{\frac{max}{min}}$ (63)	-0.42	0.43	-0.31	0.38	0.36	-0.04	-0.37	-0.22	0.41	0.39	0.31	0.38	0.37	0.46	0.43	0.46
$H(\ddot{y}/M_H)_x$ (64)	-0.01	0.67	0.26	0.10	-0.02	-0.07	0.04	0.04	0.14	0.50	0.05	0.10	-0.08	0.02	-0.03	0.10
$H(\ddot{y}/M_H)_y$ (65)	-0.28	0.07	-0.26	0.27	0.10	0.18	-0.23	-0.01	0.25	-0.00	0.26	0.27	0.30	0.34	0.33	0.17
$H(\ddot{y}/M_H)_{y/x}$ (66)	0.22	-0.73	-0.06	-0.31	-0.06	-0.07	0.13	-0.03	-0.33	-0.50	-0.25	-0.31	-0.15	-0.28	-0.21	-0.23
$H(\ddot{y}/M_H)_A$ (67)	-0.03	-0.56	-0.28	-0.07	-0.01	0.18	0.01	0.06	-0.14	-0.41	-0.01	-0.07	0.07	0.01	0.01	-0.17
$H(\ddot{y}/M_H)_{\Delta y}$ (68)	0.05	-0.66	-0.25	-0.11	0.04	0.13	-0.05	-0.07	-0.18	-0.44	-0.07	-0.11	0.05	-0.04	-0.01	-0.08
$H(\partial \ddot{y}/\partial M_H)_{max}$ (69)	0.12	-0.53	-0.04	-0.12	0.00	-0.13	-0.13	-0.19	-0.05	-0.49	-0.12	-0.12	0.05	-0.08	0.04	0.15
$H(\partial \ddot{y}/\partial M_H)_{min}$ (70)	0.11	-0.63	-0.16	-0.28	-0.03	0.05	0.25	0.13	-0.27	-0.43	-0.16	-0.28	-0.10	-0.27	-0.29	-0.36
$H(\partial \ddot{y}/\partial M_H)$ (71)	0.12	-0.65	-0.10	-0.16	0.01	-0.08	-0.04	-0.17	-0.11	-0.55	-0.12	-0.16	0.03	-0.14	-0.05	0.04
$H(\partial \ddot{y}/\partial M_H)_{\frac{max}{min}}$ (72)	0.05	-0.14	0.07	0.05	0.03	-0.17	-0.32	-0.31	0.13	-0.25	-0.02	0.05	0.12	0.09	0.24	0.42
$H(\dot{\psi}/M_H)_x$ (73)	-0.26	0.75	0.03	0.45	0.25	-0.08	-0.49	-0.31	0.44	0.61	0.32	0.45	0.27	0.45	0.49	0.57
$H(\dot{\psi}/M_H)_y$ (74)	0.12	-0.29	-0.05	-0.29	-0.22	0.29	0.52	0.45	-0.27	-0.23	-0.18	-0.29	-0.20	-0.34	-0.47	-0.58
$H(\dot{\psi}/M_H)_{y/x}$ (75)	0.16	-0.54	0.05	-0.16	-0.00	-0.29	-0.13	-0.26	-0.18	-0.46	-0.15	-0.16	-0.05	-0.09	0.05	0.10
$H(\dot{\psi}/M_H)_A$ (76)	0.17	-0.60	-0.11	-0.35	-0.21	0.23	0.44	0.36	-0.36	-0.45	-0.22	-0.35	-0.20	-0.35	-0.43	-0.57
$H(\dot{\psi}/M_H)_{\Delta y}$ (77)	0.15	-0.74	-0.18	-0.27	-0.09	0.15	0.19	0.11	-0.31	-0.52	-0.19	-0.27	-0.09	-0.23	-0.23	-0.32
$H(\partial \dot{\psi}/\partial M_H)_{max}$ (78)	-0.13	-0.11	-0.20	0.15	0.22	0.20	-0.07	0.00	0.26	-0.11	0.19	0.15	0.25	0.05	0.03	0.10
$H(\partial \dot{\psi}/\partial M_H)_{min}$ (79)	0.26	-0.68	0.10	-0.45	-0.22	-0.19	0.43	0.22	-0.37	-0.66	-0.29	-0.45	-0.28	-0.44	-0.46	-0.46
$H(\partial \dot{\psi}/\partial M_H)$ (80)	0.27	-0.70	0.01	-0.38	-0.15	0.05	0.35	0.13	-0.31	-0.59	-0.29	-0.38	-0.18	-0.42	-0.42	-0.34
$H(\partial \dot{\psi}/\partial M_H)_{\frac{max}{min}}$ (81)	-0.27	0.33	-0.23	0.41	0.32	0.29	-0.31	-0.13	0.45	0.32	0.34	0.41	0.37	0.31	0.30	0.36
	Lenkwinkelbedarf	Lenkkräftverlauf	Lenkarbeit	Zielgenauigkeit	Seitenkraftaufbau	Gierverhalten	Überschw. Gieren	Wankverhalten	Lenkwinkelbedarf	Lenkkräftverlauf	Lenkarbeit	Zielgenauigkeit	Seitenkraftaufbau	Gierverhalten	Überschw. Gieren	Wankverhalten

Bild 3.13: Korrelationen der Subjektivurteile im Doppelspurwechsel mit Kennwerten des Weavetests

wiederholt sich die starke Diskrepanz im Kriterium *Gierverhalten*, dies ist anscheinend auf die abgegebenen Subjektivurteile zurückzuführen.

### 3.3.5 Open-Loop-Kennwerte der einzelnen Bewertungskriterien

Im folgenden Abschnitt werden den einzelnen quasi-objektiven Bewertungskriterien die am besten korrelierenden und damit aussagekräftigsten Objektivparameter gegenüber gestellt. Zweck dieser Ausführungen ist eine Plausibilitätsprüfung der gefundenen subjektiv-objektiv-Korrelationen.

#### Lenkwinkelbedarf

In der quasi-objektiven Wahrnehmung ergeben sich die besten Korrelationen aus dem Phasendiagramm *Lenkwinkel-Querbeschleunigung* des Weavetests. Die Kennwerte *Lenkwinkel bei Null Querbeschleunigung* (37) und *Hysteresenfläche* (40) erzielen mit 0,76 bzw. -0,75 hohe Korrelationskoeffizienten. Beide Kennwerte können als Maß für die Breite der Lenkwinkel-Querbeschleunigungs-Hysterese verstanden werden. Je breiter die Hysterese, desto träger baut das Fahrzeug Querbeschleunigung und somit Querversatz auf. Um den Doppelspurwechsel zu absolvieren, muss bei breiterer Hysterese also mehr Lenkwinkel aufgebracht werden, die gefundenen Korrelationen sind somit sachlich begründet.

Die stationären Kenngrößen wie beispielsweise die *Gierverstärkung* (1) und die *Querbeschleunigungsverstärkung* (10) haben deutlich schlechtere Korrelationskoeffizienten. Erklären lässt sich dies dadurch, dass im Fahrmanöver Doppelspurwechsel keine stationären Fahrzustände eintreten, sondern nur das dynamische Verhalten bestimmend ist.

#### Lenkkraftverlauf

Der Lenkkraftverlauf erzielt mehrere Korrelationen mit  $|r| > 0,7$ , wobei alle Kennwerte aus dem Weavetest stammen:

- Lenkmoment-Querbeschleunigungs-Hysterese, Verhältnis der Achsenabschnitte (66),
- Lenkmoment-Gierraten-Hysterese, Lenkmoment bei Null Gierrate (73),
- Lenkmoment-Gierraten-Hysterese, Gierraten-Differenz im Außenbereich (77),
- Lenkmoment-Gierraten-Hysterese, Mittelwert des Gradienten (80).

Sämtliche Kennwerte stammen somit aus Diagrammen, welche das Lenkmoment *im Verhältnis zur Fahrzeugbewegung* darstellen. Auch diese Kennwerte stellen somit einen gut begründbaren Zusammenhang zur Subjektivbewertung her. Der Lenkwinkel allein hingegen scheint keinen großen Einfluss auf die Beurteilung des Lenkkraftverlaufs zu haben.

#### Lenkarbeit

Im physikalischen Sinne ist die Lenkarbeit das Produkt aus Moment und Lenkwinkel. Allerdings scheinen die Probanden den Lenkwinkel bei der Beurteilung der Lenkarbeit überproportional gegenüber dem Moment bewertet zu haben: Dies zeigt die hohe Korrelation mit  $r = 0,90$  zwischen der quasi-objektiven Wahrnehmung von Lenkwinkelbedarf und Lenkarbeit (s. Bild 3.9).

Durch diese hohe Übereinstimmung fallen auch die Korrelationen zu objektiven Kennwerten sehr ähnlich aus, wie der Vergleich der ersten und dritten Spalte der Korrelationsmatrizen in den Bildern 3.12 und 3.13 zeigt. Die Lenkarbeit zeigt somit ebenfalls gute Korrelationen mit den Kennwerten *Lenkwinkel bei Null Querbesehleunigung* (37) und *Hysteresenfläche* (40) des Lenkwinkel-Querbesehleunigungs-Phasendiagramms.

Zusätzlich ergibt sich zum Kennwert *Lenkwinkel-Gierraten-Hysteresenfläche* (49) eine hohe Korrelation von  $r = -0,73$ .

#### Zielgenauigkeit

Dieses Kriterium ist im Vergleich zu den vorausgegangenen Kriterien deutlich abstrakter und vielschichtiger, da keine simple Definition wie beispielsweise beim Lenkwinkelbedarf möglich ist. Dies lässt erwarten, dass die direkte Korrelation zu objektiven Kennwerten nicht so deutlich ausfällt.

Dennoch finden sich Kennwerte, die gut mit der Zielgenauigkeit ( $|r| \geq 0,7$ ) korrelieren. Aus den Frequenzgängen sind dies die *äquivalente Verzögerungszeit des Querbesehleunigungsfrequenzgangs* (Kennwert 13) sowie dessen *Phasenwinkel bei 1,0 Hz* (16). Aus dem Weavetest sind es die Kennwerte *Lenkmoment bei Null Lenkwinkel* (29), die *Achsenabschnitte der Lenkwinkel-Querbesehleunigungs-Hysterese* (37 und 38) sowie die *Hysteresenfläche* (40). Da der Kennwert der Lenkwinkel-Querbesehleunigungs-Hysteresenfläche auf Grund seiner Definition negativ ist, bedeutet der positive Korrelationskoeffizient von  $r = 0,72$ , dass eine kleinere Fläche zu einer besseren Beurteilung der Zielgenauigkeit führte.

Die gefundenen Korrelationen deuten darauf hin, dass die Querbesehleunigung eine herausragende Bedeutung für die Beurteilung der Zielgenauigkeit hat. Die entsprechenden Kennwerte der Gierrate korrelieren im Vergleich deutlich schlechter.

#### Seitenkraftaufbau

Das Kriterium *Seitenkraftaufbau* zielt auf die Schnelligkeit des Querbesehleunigungsaufbaus. Dies lässt erwarten, dass die entsprechenden Kennwerte, beispielsweise die Phasenwerte aus dem Lenkwinkel-Querbesehleunigungs-Frequenzgang, die besten Korrelationen zeigen.

Tatsächlich findet sich jedoch nur ein Kennwert mit  $|r| \geq 0,7$ , und zwar der *Lenkwinkel bei Null Querb beschleunigung* aus dem Weavetest (Kennwert 37). Dieser Kennwert korreliert auch schon mit dem Lenkwinkelbedarf besonders gut (s.o.).

Die Kennwerte aus den Frequenzgängen (4-7, 13-16) erreichen lediglich Korrelationen  $r \leq 0,61$ , wobei kein klarer Vorteil zugunsten des Querb beschleunigungs- gegenüber dem Gierfrequenzgang erkennbar ist.

Entgegen der „ingenieurmäßigen Erwartung“ scheint also die Schnelligkeit der Fahrzeugreaktion nicht im Phasengang bei hohen Lenkfrequenzen, sondern bereits bei eher niedrigen Frequenzen (Weavetest) bewertet zu werden.

### Gierverhalten

Äquivalent zum vorausgegangenen Kriterium waren die Probanden beim Gierverhalten aufgefordert, die Schnelligkeit der Gierreaktion zu bewerten. Wie bereits in Abschnitt 3.3.4 beschrieben wurde, fallen sämtliche Korrelationen beim Gierverhalten deutlich schlechter aus als beim Seitenkraftaufbau. Die höchsten erreichten Korrelationen sind mit  $|r| < 0,6$  eher schlecht. Außerdem entstehen lediglich zwei dieser Kennwerte aus der Gierrate, beide sind ein Maß für die Gierverstärkung (1, 53).

Diese beiden Tatsachen (generell schlechtere Korrelationen als Querb beschleunigungskennwerte, keine Bevorzugung von Gierratenkennwerten) lassen vermuten, dass die Gierrate eine deutlich geringere Bedeutung bei der *Wahrnehmung* der Querdynamik hat. Die Fahrer konnten also die Gierrate deutlich schlechter quantifizieren als die Querb beschleunigung.

### Überschwinger Gieren

Dieses Kriterium erzielt die besten Korrelationen zu objektiven Kennwerten überhaupt. Interessant ist dabei, dass die guten Korrelationen nicht bei Kennwerten auftreten, welche dem ingenieurmäßigen Verständnis eines Überschwingers entsprechen, beispielsweise einer Resonanzüberhöhung aus dem Frequenzgang (Kennwert 8). Die Bewertungen des Überschwingers lassen sich also nicht in den Kennwerten des physikalisch definierten Überschwingers wieder finden.

Insgesamt acht Kennwerte (von 81) erzielen sehr gute Korrelationen mit  $r \geq 0,8$ . Davon sind drei Kennwerte aus dem Querb beschleunigungs-Phasengang (13, 14, 16), die restlichen fünf Kennwerte entstehen aus den Phasendiagrammen *Lenkwinkel-Lenkmoment*, *Lenkwinkel-Querb beschleunigung* und *Gierrate-Querb beschleunigung*.

Ein als groß wahrgenommener Überschwinger fällt demnach mit einer langsamen Querb beschleunigungsreaktion, einer geringer Lenkmoment-Voreilung sowie einem großen Gierraten-Querb beschleunigungs-Verzug zusammen. Die Gierrate allein hat scheinbar kaum Relevanz für die Wahrnehmung des Überschwingerhaltens.

## Wankverhalten

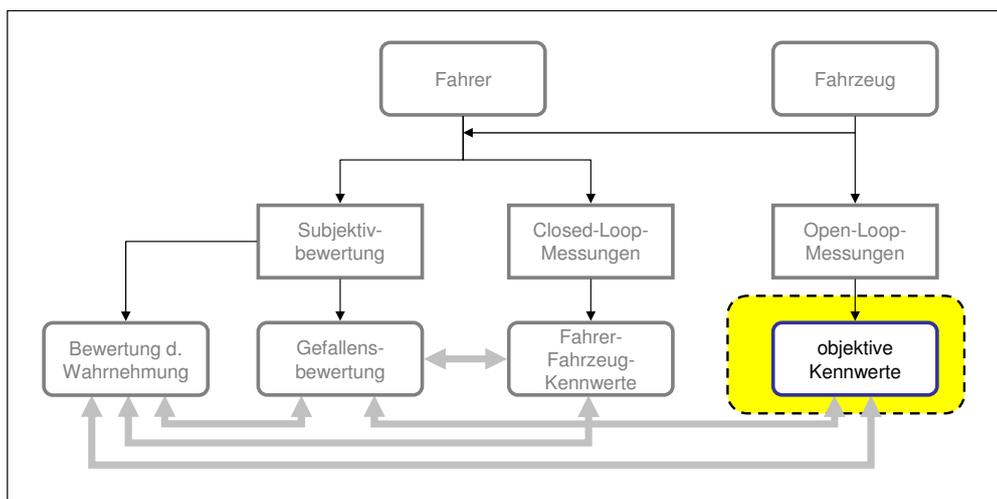
Die Schnelligkeit der Wankreaktion erzielt lediglich eine Korrelation mit  $r = 0,72$  zur Lenkwinkel-Lenkmoment-Hysterese des Weavetests. Die insgesamt relativ niedrig ausfallenden Korrelationskoeffizienten decken sich mit den Äußerungen der Probanden, welche die Beurteilung des Wankverhaltens als besonders schwierig empfanden.

Da das objektive Wankverhalten des Fahrzeugs direkt von der Querbeschleunigung abhängt (s. Bild 3.2), wäre eine gute Korrelation zu den objektiven Kennwerten der Querbeschleunigung zu erwarten. Dies ist jedoch nicht der Fall, was unter anderem darauf zurückzuführen ist, dass das fahrerisch anspruchsvolle Manöver die Wahrnehmbarkeit der Wankbewegung in den Hintergrund schiebt.

### 3.3.6 Auswahl Open-Loop-Kennwerte

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Kennwerte aufgeführt, welche eine besonders gute Korrelation zu Subjektivbewertungen zeigen. Die Frage, wie stark diese gefundenen Kennwerte untereinander korrelieren, wird mit der Korrelationsmatrix in Bild 3.15 beantwortet. Es zeigt sich, dass ein Teil der Objektivkennwerte untereinander sehr stark korrelieren. Beispielsweise weisen die Kennwerte des Lenkwinkel-Querbeschleunigungs-Frequenzgangs (14) und (16) einen Korrelationskoeffizienten von  $r = 0,98$  auf, was sie praktisch austauschbar macht. Dies wird schon in der direkten Darstellung der Kennwerte (Bild 3.16) deutlich.

Die hohen Korrelationen zwischen zwei Kennwerten können beispielsweise dadurch entstehen, dass die Kennwerte sehr ähnlich definiert sind (z.B. 13, 14, 16), oder dadurch, dass sie dieselbe Fahrzeugeigenschaft (z.B. stationäre Gier- bzw. Querbeschleunigungsverstärkung, 1, 10) in unterschiedlichen Messgrößen zeigen.



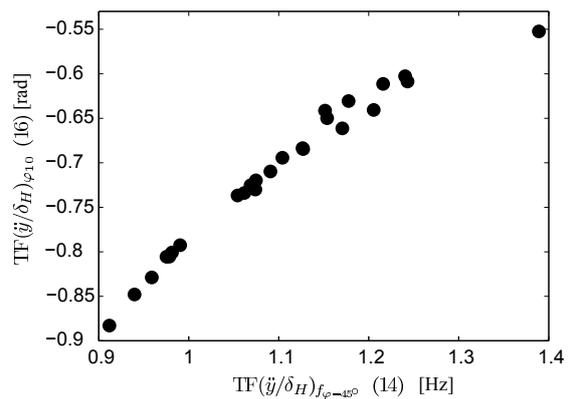
**Bild 3.14:** Einordnung Abschnitt 3.3.6

TF( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (01)	1.00	0.99	0.22	-0.24	-0.20	0.47	-0.17	-0.67	-0.25	0.86	0.77	-0.28	0.01	0.22	-0.08	0.47	0.20	-0.20	-0.24	-0.19	-0.11	0.23	-0.32	0.30	0.11	
TF( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (10)		1.00	0.12	-0.13	-0.10	0.39	-0.08	-0.60	-0.17	0.86	0.79	-0.34	0.08	0.30	-0.00	0.46	0.09	-0.09	-0.13	-0.09	-0.00	0.19	-0.22	0.25	0.03	
TF( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>r<sub>rs</sub></sub> (13)			1.00	-0.99	-0.99	0.88	-0.87	-0.78	-0.78	0.18	0.05	0.72	-0.82	-0.82	-0.85	-0.18	0.86	-0.87	-0.83	-0.86	-0.87	0.24	-0.60	0.33	0.50	
TF( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>f<sub>φ=15°</sub></sub> (14)				1.00	0.98	-0.85	0.84	0.78	0.77	-0.19	-0.06	-0.68	0.78	0.79	0.84	0.13	-0.86	0.86	0.85	0.87	0.86	-0.25	0.61	-0.37	-0.51	
TF( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>f<sub>φ=10°</sub></sub> (16)					1.00	-0.88	0.89	0.77	0.77	-0.16	-0.04	-0.76	0.86	0.84	0.87	0.25	-0.83	0.84	0.80	0.83	0.86	-0.24	0.57	-0.31	-0.47	
H(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>x</sub> (28)						1.00	-0.89	-0.90	-0.82	0.43	0.34	0.61	-0.78	-0.67	-0.80	-0.14	0.74	-0.75	-0.69	-0.76	-0.77	0.06	-0.51	0.24	0.34	
H(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>y</sub> (29)							1.00	0.81	0.61	0.00	0.06	-0.80	0.86	0.79	0.82	0.39	-0.67	0.68	0.58	0.66	0.71	-0.26	0.58	-0.38	-0.48	
H(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>A</sub> (31)								1.00	0.62	-0.50	-0.42	-0.38	0.55	0.41	0.64	-0.09	-0.65	0.65	0.62	0.62	0.58	-0.30	0.67	-0.53	-0.41	
H(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>Δy</sub> (32)									1.00	-0.43	-0.42	-0.56	0.66	0.65	0.77	0.10	-0.72	0.72	0.72	0.78	0.80	0.32	0.21	0.11	-0.05	
H(∂M <sub>H</sub> /∂δ <sub>H</sub> ) <sub>max</sub> (33)										1.00	0.91	-0.33	0.06	0.22	-0.05	0.53	0.25	-0.25	-0.31	-0.25	-0.20	-0.15	-0.10	-0.02	-0.11	
H(∂M <sub>H</sub> /∂δ <sub>H</sub> ) (35)											1.00	-0.28	0.08	0.25	-0.10	0.36	0.03	-0.03	-0.09	-0.07	-0.04	-0.36	0.15	-0.17	-0.43	
H( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>x</sub> (37)												1.00	-0.95	-0.97	-0.88	-0.76	0.47	-0.48	-0.39	-0.52	-0.64	-0.00	-0.13	-0.05	0.20	
H( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>y</sub> (38)													1.00	0.95	0.92	0.63	-0.60	0.62	0.52	0.65	0.75	-0.07	0.23	0.00	-0.26	
H( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>A</sub> (40)														1.00	0.91	0.64	-0.62	0.64	0.56	0.67	0.77	-0.04	0.21	0.02	-0.30	
H( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>Δy</sub> (41)															1.00	0.54	-0.61	0.61	0.57	0.67	0.72	0.02	0.22	-0.02	-0.16	
H( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>A</sub> (49)																1.00	0.19	-0.17	-0.27	-0.11	0.05	0.18	-0.40	0.41	0.22	
H( $\ddot{y}/\dot{\psi}$ ) <sub>x</sub> (55)																	1.00	-1.00	-0.99	-0.97	-0.94	0.24	-0.72	0.41	0.64	
H( $\ddot{y}/\dot{\psi}$ ) <sub>y</sub> (56)																		1.00	0.98	0.97	0.94	-0.25	0.72	-0.40	-0.64	
H( $\ddot{y}/\dot{\psi}$ ) <sub>A</sub> (58)																			1.00	0.96	0.91	-0.23	0.70	-0.41	-0.61	
H( $\ddot{y}/\dot{\psi}$ ) <sub>Δy</sub> (59)																				1.00	0.95	-0.15	0.61	-0.28	-0.56	
H(∂ $\ddot{y}/\partial\dot{\psi}$ ) (62)																					1.00	-0.08	0.51	-0.16	-0.49	
H( $\ddot{y}/M_H$ ) <sub>y/x</sub> (66)																						1.00	-0.69	0.80	0.69	
H( $\dot{\psi}/M_H$ ) <sub>x</sub> (73)																							1.00	-0.89	-0.84	
H( $\dot{\psi}/M_H$ ) <sub>Δy</sub> (77)																								1.00	0.71	
H(∂ $\dot{\psi}/\partial M_H$ ) (80)																										1.00

**Bild 3.15:** Korrelation der gefundenen Objektivkennwerte untereinander

Um die redundanten Objektivkennwerte aus der Auswahl zu entfernen wird ein zweistufiges Auswahlverfahren angewendet. Objektivkennwerte, welche im paarweisen Vergleich mit  $|r| > 0,9$  korrelieren, werden jeweils auf ihre Korrelationen zu den Subjektivbewertungen hin untersucht. Derjenige Kennwert mit den besseren Korrelationen zu Subjektivbewertungen wird übernommen.

Beim Beispiel der Kennwerte (14) und (16) erzielt Kennwert 16 durchweg bessere Korrelationen zu den Subjektivbewertungen (Bild 3.12) und wird deshalb übernommen.



**Bild 3.16:** Verhältnis der Kennwerte (14) und (16) in den Varianten des Doppelspurwechsels

Folgende Zusatzkriterien werden für die Auswahl der Kennwerte berücksichtigt:

- erzielt ein Kennwert die beste Einzelkorrelation zu einer Subjektivwertung, wird er übernommen;
- bei annähernd gleich guten Korrelationen zum Subjektivurteil wird derjenige Kennwert übernommen, dessen Signalpaar (z.B.  $\dot{\psi}/\delta_H$ ) noch nicht in der Kennwertauswahl vertreten ist;
- erzielen beide Kennwerte bei jeweils anderen Subjektivurteilen gute Korrelationen, werden beide Kennwerte übernommen.

Die so getroffene Kennwertauswahl wird in Bild 3.17 dargestellt.

	quasi-objektive Wahrnehmung								subjektive Gefallensbewertung							
TF( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (10)	-0.51	0.09	-0.53	0.14	0.42	0.53	0.09	0.28	0.11	0.22	0.21	0.14	0.25	0.13	0.08	-0.13
TF( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub><math>\varphi_{1,o}</math></sub> (16)	-0.60	0.48	-0.52	0.74	0.61	0.05	-0.87	-0.58	0.72	0.49	0.67	0.74	0.71	0.81	0.86	0.83
H( $M_H/\delta_H$ ) <sub>x</sub> (28)	0.34	-0.33	0.31	-0.61	-0.42	0.13	0.86	0.72	-0.59	-0.38	-0.52	-0.61	-0.54	-0.66	-0.73	-0.80
H( $M_H/\delta_H$ ) <sub>y</sub> (29)	-0.62	0.61	-0.53	0.78	0.61	0.11	-0.84	-0.57	0.77	0.66	0.71	0.78	0.71	0.81	0.80	0.80
H( $\partial M_H/\partial \delta_H$ ) <sub>max</sub> (33)	-0.52	0.36	-0.48	0.18	0.38	0.56	0.17	0.37	0.19	0.42	0.24	0.18	0.23	0.15	0.02	-0.17
H( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>A</sub> (40)	-0.75	0.36	-0.75	0.72	0.69	0.26	-0.77	-0.44	0.70	0.45	0.71	0.72	0.76	0.80	0.82	0.67
H( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>A</sub> (49)	-0.58	0.08	-0.73	0.40	0.49	0.46	-0.26	-0.06	0.42	0.24	0.50	0.40	0.52	0.42	0.32	0.11
H( $\partial \ddot{y}/\partial \dot{\psi}$ ) (62)	-0.46	0.33	-0.38	0.57	0.45	0.01	-0.80	-0.51	0.53	0.33	0.46	0.57	0.57	0.69	0.78	0.78
H( $\ddot{y}/M_H$ ) <sub>y/z</sub> (66)	0.22	-0.73	-0.06	-0.31	-0.06	-0.07	0.13	-0.03	-0.33	-0.50	-0.25	-0.31	-0.15	-0.28	-0.21	-0.23
H( $\dot{\psi}/M_H$ ) <sub>x</sub> (73)	-0.26	0.75	0.03	0.45	0.25	-0.08	-0.49	-0.31	0.44	0.61	0.32	0.45	0.27	0.45	0.49	0.57
	Lenkwinkelbedarf	Lenkkraftverlauf	Lenkarbeit	Zielgenauigkeit	Seitenkraftaufbau	Gierverhalten	Überschw. Gieren	Wankverhalten	Lenkwinkelbedarf	Lenkkraftverlauf	Lenkarbeit	Zielgenauigkeit	Seitenkraftaufbau	Gierverhalten	Überschw. Gieren	Wankverhalten

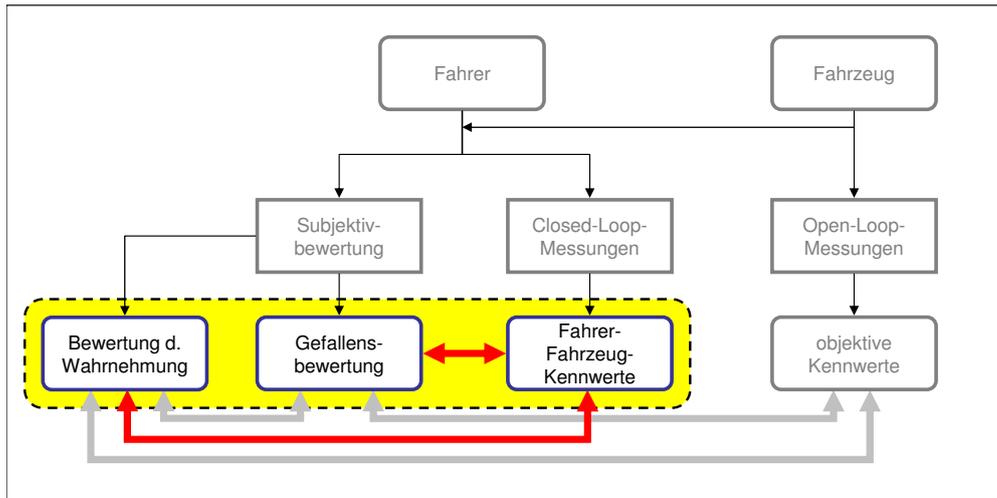
**Bild 3.17:** Korrelationen der Subjektivurteile im Doppelspurwechsel mit ausgewählten Open-Loop-Kennwerten

### 3.3.7 Auswertung der Fahrer-Fahrzeug-Kennwerte

Während der Probandenversuche wurden die Closed-Loop-Messdaten aufgenommen. Ziel der folgenden Auswertung ist die Beantwortung der Frage, ob die hieraus ermittelbaren Fahrer-Fahrzeug-Kennwerte (siehe S. 20) bessere Korrelationen zum Subjektivurteil bieten als die reinen Fahrzeug-Kennwerte aus den gesondert durchgeführten Open-Loop-Manövern.

In Bild 3.19 ist der Zeitschrieb des Lenkwinkels bei einem Doppelspurwechsel dargestellt. Die Verläufe der anderen Signale wie Gierrate und Querbeschleunigung sehen qualitativ gleich aus.

Um diese Daten einer Auswertung zuzuführen, werden die charakteristischen Punkte *a-g* definiert. Zu jedem dieser Punkte lassen sich der Zeitpunkt sowie der Betrag des jeweiligen

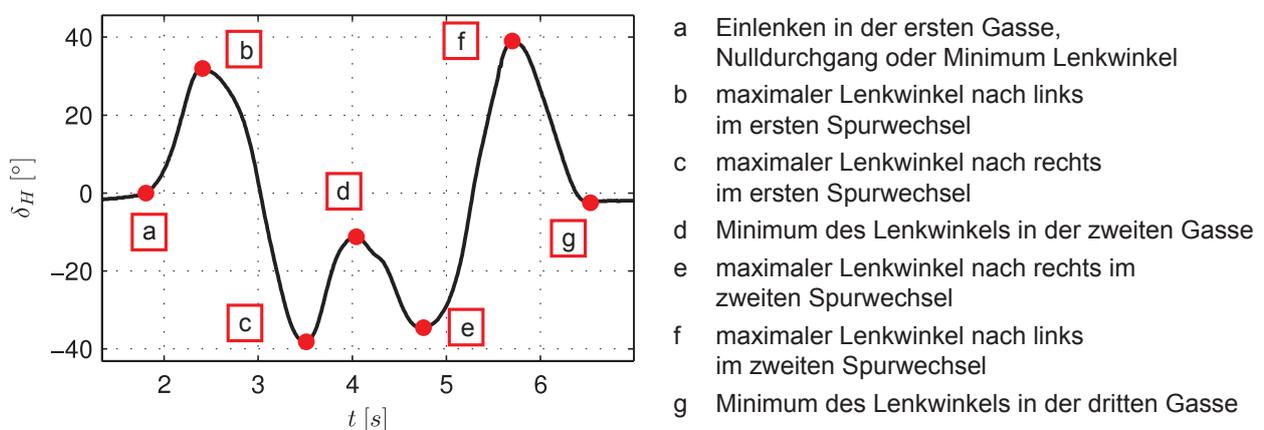


**Bild 3.18:** Einordnung Abschnitt 3.3.7

Signals aus den Messdaten ermitteln. Zusätzlich werden diese einzelnen Kennwerte zueinander in Beziehung gesetzt, beispielsweise durch Integralbildung und die Berechnung von Zeitverzügen zwischen verschiedenen Signalen.

Auf diese Weise wird zu jeder Variante, jedem Fahrer und jedem einzelnen Durchlauf ein Satz an Kennwerten generiert. Für die folgenden Auswertungen werden diese Kennwerte pro Fahrer und Variante arithmetisch gemittelt, um Streuungen zwischen den einzelnen Spurwechsel-Versuchen auszugleichen. Anschließend werden die Kennwerte einer Korrelationsanalyse wie in den vorigen Abschnitten unterzogen.

In Tabelle 3.5 werden die maximalen Korrelationskoeffizienten der Fahrer-Fahrzeug-Kennwerte mit den Subjektivbewertungen aufgeführt. Im Vergleich mit den Maximalwerten der Open-Loop-Kennwerte (Tabellen 3.2, 3.4) zeigt sich, dass die Fahrer-Fahrzeug-Kennwerte in



**Bild 3.19:** Charakteristische Punkte des Manövers Doppelspurwechsel im Zeitschrieb

Beurteilungskriterium	$ r _{max}$ quasi-objektiv	$ r _{max}$ subjektiv	Kennwertbeschreibungen
Lenkwinkelbedarf	0,90  (FF3)	0,86  (FF5)	FF1 Unsymmetrie $\frac{\dot{\psi}_f}{\dot{\psi}_e}$
Lenkkraftverlauf	0,68  (FF7)	0,59  (FF1)	FF2 Zeitverzug zw. $\delta_H$ und $\ddot{y}$ in $c$
Lenkarbeit	0,92  (FF3)	0,84  (FF5)	FF3 $\delta_H$ in $c$
Zielgenauigkeit	0,80  (FF5)	0,80  (FF5)	FF4 $\dot{\psi}$ in $c$
Seitenkraftaufbau	0,83  (FF3)	0,82  (FF5)	FF5 mittlerer Gradient $\delta_H$ zwischen $b$ und $c$
Gierverhalten	0,52  (FF6)	0,80  (FF4)	FF6 Integral $\delta_H^2$ von $a$ bis $g$
Überschwinger Gieren	0,88  (FF2)	0,85  (FF2)	FF7 Integral $M_H^2$ von $a$ bis $g$
Wankverhalten	0,61  (FF4)	0,89  (FF4)	

**Tabelle 3.5:** Maximale Korrelationskoeffizienten (Betrag) zwischen Fahrer-Fahrzeug-Kennwerten und der subjektiven Bewertung

vielen Kriterien bessere Korrelationen zum Subjektivurteil erzielen als einzelne Open-Loop-Kennwerte.

Besonders gut korrelierende Fahrer-Fahrzeug-Kennwert sind dabei das Lenkwinkelmaximum in Punkt  $c$  (FF3) sowie der mittlere Gradient des Lenkwinkels zwischen  $b$  und  $c$  (FF5): Je kleiner die Lenkwinkelamplituden, desto besser die subjektive Gefallensbewertung.

In Bild 3.20 werden die Korrelationen der Fahrer-Fahrzeug-Kennwerte zu den ausgewählten Open-Loop-Kennwerten aus Bild 3.17 gezeigt. Bei allen Fahrer-Fahrzeug-Kennwerten mit Ausnahme des Kennwerts FF1 liegen sehr hohe Korrelationen zu einem oder mehreren Open-Loop-Kennwerten vor. Die aus den Messdaten der Probandenversuche berechneten Fahrer-Fahrzeug-Kennwerte haben also gleichermaßen hohe Korrelationen zu den Subjektivbewertungen als auch zu aussagekräftigen Open-Loop-Kennwerten.

$TF(\ddot{y}/\delta_H)_{stat}$ (10)	-0.02	0.15	0.52	-0.22	0.24	-0.55	-0.27
$TF(\ddot{y}/\delta_H)_{\varphi_{1,0}}$ (16)	-0.48	-0.96	0.66	0.93	0.79	-0.56	0.08
$H(M_H/\delta_H)_x$ (28)	0.38	0.91	-0.43	-0.91	-0.66	0.29	-0.05
$H(M_H/\delta_H)_y$ (29)	-0.54	-0.91	0.67	0.88	0.80	-0.55	0.20
$H(\partial M_H/\partial \delta_H)_{max}$ (33)	-0.16	0.19	0.49	-0.25	0.20	-0.53	0.06
$H(\ddot{y}/\delta_H)_A$ (40)	-0.43	-0.85	0.87	0.76	0.90	-0.82	-0.19
$H(\dot{\psi}/\delta_H)_A$ (49)	-0.15	-0.32	0.74	0.21	0.61	-0.77	-0.39
$H(\partial \ddot{y}/\partial \dot{\psi})$ (62)	-0.37	-0.83	0.51	0.83	0.67	-0.39	-0.01
$H(\ddot{y}/M_H)_{y/x}$ (66)	0.36	0.15	-0.02	-0.23	-0.06	0.04	-0.88
$H(\dot{\psi}/M_H)_x$ (73)	-0.44	-0.48	0.10	0.53	0.23	-0.00	0.75
	FF1	FF2	FF3	FF4	FF5	FF6	FF7

**Bild 3.20:** Korrelationen der Fahrer-Fahrzeug-Kennwerte zu den ausgewählten Open-Loop-Kennwerten

### 3.3.8 Korrelationen aus multipler Regression

Die Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Kennwerte aus dem Closed-Loop zeigt, dass diese in einigen Bewertungskriterien deutlich besser zu den abgegebenen Subjektivbewertungen korrelieren als die Open-Loop-Kennwerte. Ein Grund hierfür ist, dass beim Durchfahren der drei Gassen des Doppelspurwechsels mehrere Fahrzeugeigenschaften gleichzeitig die notwendigen Lenkeingaben beeinflussen. Während der Fahrer sämtliche Fahrzeugeigenschaften gleichzeitig wahrnimmt und bewertet, stellt ein einzelner Objektivkennwert lediglich einen Ausschnitt der gesamten Eigenschaften dar.

Der Vorteil der integrativen Bewertung mit Kennwerten aus dem Closed-Loop kann auch mit Open-Loop-Kennwerten nachvollzogen werden, wenn durch multiple Regression mehrere Open-Loop-Kennwerte gleichzeitig in die Regression zur Subjektivbewertung eingehen:

$$\text{Subjektivbewertung} = a \cdot \text{Kennwert}_1 + b \cdot \text{Kennwert}_2 + c.$$

TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (01)	0.44	0.74	0.73	0.65	0.44	0.67	0.73	0.82	0.82	0.83	0.49	0.48	0.60	0.74	0.44
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>r<sub>ev</sub></sub> (04)	0.57	0.57	0.58	0.59	0.63	0.78	0.67	0.67	0.67	0.57	0.62	0.75	0.63	0.59	
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>f<sub>e</sub>-<math>\psi^p</math></sub> (05)			0.55	0.57	0.58	0.63	0.77	0.66	0.66	0.66	0.55	0.62	0.74	0.62	0.58
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub><math>\varphi_{10}</math></sub> (07)				0.50	0.54	0.61	0.70	0.67	0.67	0.67	0.51	0.60	0.71	0.62	0.54
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>U</sub> (08)					0.16	0.51	0.52	0.65	0.63	0.66	0.22	0.24	0.58	0.58	0.16
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>f<sub>-</sub>stat</sub> (09)						0.50	0.72	0.69	0.68	0.71	0.53	0.52	0.69	0.69	0.51
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (10)							0.51	0.82	0.82	0.83	0.55	0.54	0.62	0.76	0.51
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>r<sub>ev</sub></sub> (13)								0.58	0.59	0.60	0.58	0.59	0.75	0.58	0.58
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>f<sub>e</sub>-<math>\psi^p</math></sub> (14)									0.57	0.60	0.57	0.58	0.74	0.57	0.57
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub><math>\varphi_{10}</math></sub> (16)										0.60	0.60	0.60	0.76	0.60	0.60
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>U</sub> (17)											0.21	0.26	0.57	0.53	0.21
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>f<sub>-</sub>stat</sub> (18)												0.12	0.57	0.53	0.12
TF(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>stat</sub> (19)													0.57	0.79	0.60
TF(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub><math>\varphi_{10}</math></sub> (25)														0.53	0.54
TF(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>U</sub> (26)															0.01

Korrelationskoeffizient  $r$  zwischen Subjektivbewertung *Lenkwinkelbedarf* ( $o$ ) und berechneter Subjektivbewertung

TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (01)															
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>r<sub>ev</sub></sub> (04)															
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>f<sub>e</sub>-<math>\psi^p</math></sub> (05)															
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub><math>\varphi_{10}</math></sub> (07)															
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>U</sub> (08)															
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>f<sub>-</sub>stat</sub> (09)															
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (10)															
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>r<sub>ev</sub></sub> (13)															
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>f<sub>e</sub>-<math>\psi^p</math></sub> (14)															
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub><math>\varphi_{10}</math></sub> (16)															
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>U</sub> (17)															
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>f<sub>-</sub>stat</sub> (18)															
TF(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>stat</sub> (19)															
TF(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub><math>\varphi_{10}</math></sub> (25)															
TF(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>U</sub> (26)															

berechnete Subjektivbewertung =  $a \cdot \text{Kennwert}_1 + b \cdot \text{Kennwert}_2 + c$

**Bild 3.21:** Korrelationskoeffizienten der multiplen Regressionen zweier Kennwerte des Frequenzgangs mit dem Bewertungskriterium *Lenkwinkelbedarf*

Objektivkennwerten werden für das Kriterium *Lenkwinkelbedarf* Korrelationskoeffizienten bis  $r = 0,83$  (Bild 3.21) erzielt. Damit wird zwar nicht der Korrelationskoeffizient des Fahrer-Fahrzeug-Kennwerts erreicht, gegenüber der einfachen Regression ist dies jedoch eine deutliche Steigerung.

Grundsätzlich kann sich durch die Erweiterung einer Regression um einen zusätzlichen Objektivkennwert der Korrelationskoeffizient  $r$  nur verbessern, nie verschlechtern. Denn kann der zusätzlich in die Regressionsgleichung aufgenommene Objektivkennwert keine genauere Abbildung der Subjektivbewertung ermöglichen, wird sein Koeffizient  $b$  Null. Außerdem muss bei Anwendung der multiplen Regression beachtet werden, dass auch die Hinzunahme eines

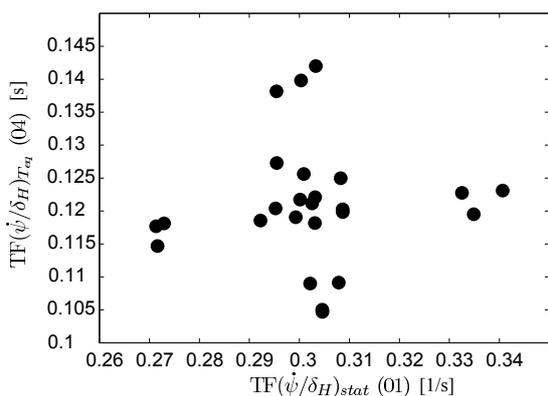
Dies wird folgend am Beispiel des Kriteriums *Lenkwinkelbedarf* (*quasi-objektiv*) und den Open-Loop-Kennwerten aus dem Frequenzgang erläutert.

Der maximale Korrelationskoeffizient mit einem einzelnen Objektivkennwert beträgt 0,60 (Tabelle 3.2). Dem gegenüber erreicht man mit einem Fahrer-Fahrzeug-Kennwert eine Korrelation von  $r = 0,90$  (Tabelle 3.5). Durch die Verwendung von zwei

	Lenkwinkel- bedarf	Lenkkraft- verlauf	Lenk- arbeit	Zielgenau- igkeit	Seitenkraft- aufbau	Gier- verhalten	Über- schwinger	Wank- verhalten
$ r _{max}$ quasi-objektiv	0,88 ██████	0,90 ██████	0,87 ██████	0,83 ██████	0,81 ██████	0,64 ██████	0,93 ██████	0,76 ██████
$ r _{max}$ subjektiv	0,83 ██████	0,85 ██████	0,86 ██████	0,83 ██████	0,83 ██████	0,88 ██████	0,89 ██████	0,89 ██████

**Tabelle 3.6:** Maximale Korrelationskoeffizienten aus multipler Regression zur Subjektivbewertung

komplett zufallsbasierten Objektivkennwerts (der somit keinerlei Aussage über das Fahrverhalten liefert) unter Umständen zu einer Steigerung des Korrelationskoeffizienten führen kann. Gleiches gilt für einen zweiten Objektivkennwert, wenn dieser mit dem ersten Objektivkennwert stark korreliert ist und somit keine zusätzliche Fahrzeugeigenschaft darstellt, sondern lediglich durch sein „Rauschen“ hilft, zufällige Abweichungen des ersten Objektivkennwerts zu kompensieren. Diese Eigenschaften der multiplen Regression äußern sich in Bild 3.21 dadurch, dass die Korrelationskoeffizienten der Hauptdiagonalen in ihrer jeweiligen Zeile und Spalte den niedrigsten Wert darstellen: Die Werte der Hauptdiagonalen entsprechen der einfachen Regression mit einem einzigen Objektivkennwert ( $Kennwert_1 = Kennwert_2$ ). Durch die Hinzunahme eines zweiten Objektivkennwerts wird stets eine Verbesserung des Korrelationskoeffizienten erreicht. Bei Verwendung der multiplen Regression muss also darauf geachtet werden, dass nur solche Objektivkennwerte miteinander kombiniert werden, welche *unterschiedliche Fahrzeugeigenschaften repräsentieren* und gleichzeitig *keine starke Korrelation untereinander* aufweisen.



**Bild 3.22:** Verhältnis der Kennwerte (1) und (4) in den Varianten des Doppelpurwechsels

Im gewählten Beispiel trifft dies auf das Kennwertepaar *stationäre Gierverstärkung* (1) und *äquivalente Verzögerungszeit* (4) zu. Während diese beiden Kennwerte jeweils nur mäßige Einzelkorrelationen mit  $|r| < 0,6$  zum Subjektivkriterium *Lenkwinkelbedarf* ( $o$ ) erzielen, steigt die Korrelation des Kennwertepaars zum Lenkwinkelbedarf auf  $r = 0,74$ . Gleichzeitig sind diese beiden Objektivkennwerte untereinander mit  $r = 0,05$  so gut wie unkorreliert (Bild 3.22).

In Tabelle 3.6 werden die Ergebnisse der multiplen Regression für sämtliche Beurteilungskriterien dargestellt.

		Lenkwinkelbedarf	Lenkkraftverlauf	Lenkarbeit	Zielgenauigkeit	Seitenkraftaufbau	Gierverhalten	Überschwinger Gieren	Wankverhalten
einzelne Fahrzeug- Kennwerte	q.-obj.	0,78	0,78	0,77	0,78	0,75	0,54	0,87	0,70
	subj.	0,79	0,65	0,72	0,78	0,76	0,82	0,86	0,83
2 Fahrzeug- Kennwerte (mult. Re- gression)	q.-obj.	0,88	0,90	0,87	0,83	0,81	0,64	0,93	0,76
	subj.	0,83	0,85	0,86	0,83	0,83	0,88	0,89	0,89
Fahrer- Fahrzeug- Kennwerte	q.-obj.	0,90	0,68	0,92	0,80	0,83	0,52	0,88	0,61
	subj.	0,86	0,59	0,84	0,80	0,82	0,80	0,85	0,89

**Tabelle 3.7:** Vergleich der maximalen Korrelationskoeffizienten zu Subjektivbewertungen

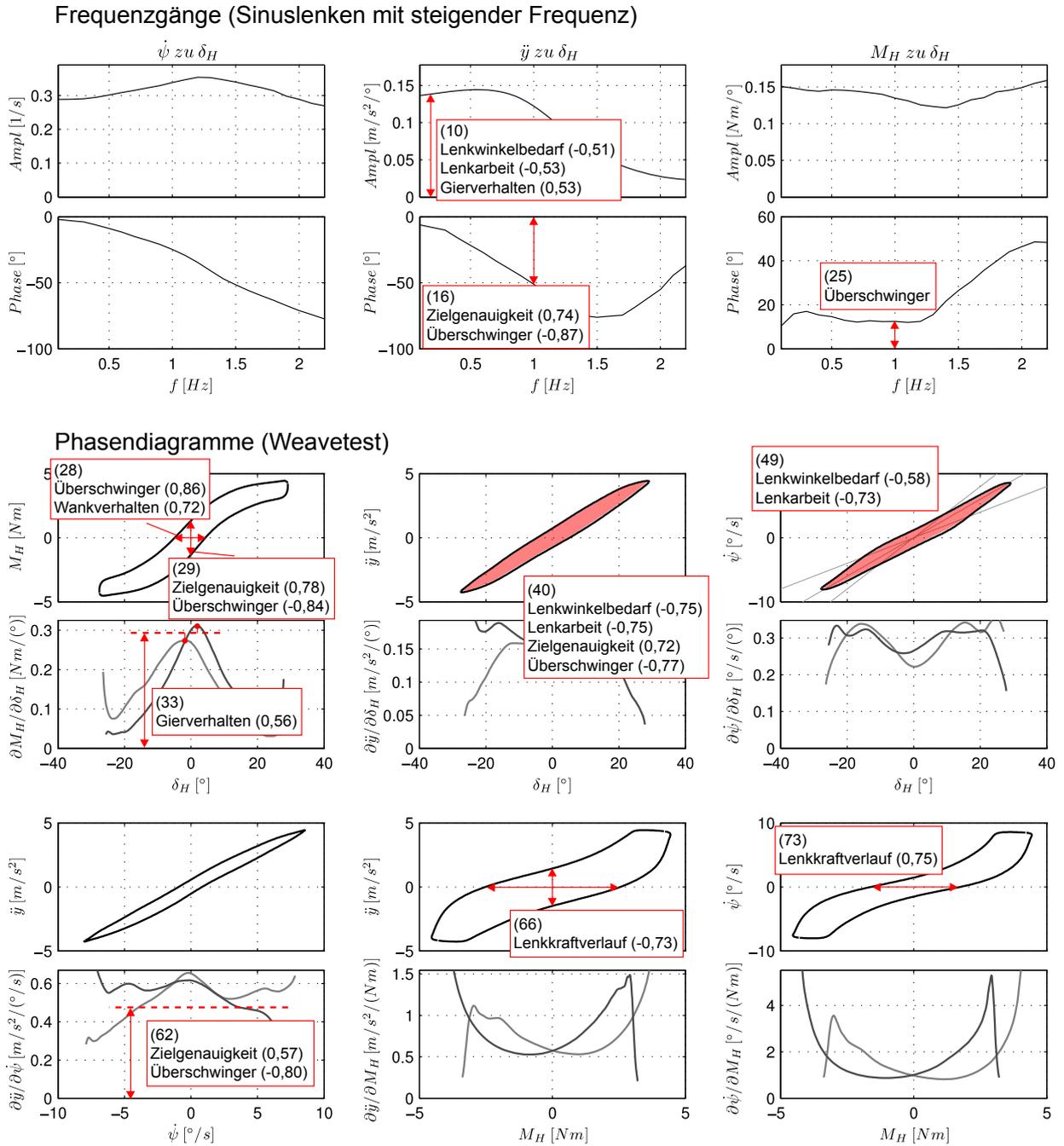
### 3.3.9 Zusammenfassung der Ergebnisse des Doppelspurwechsels

Die im Versuchsabschnitt „Doppelspurwechsel“ ermittelten Subjektivbewertungen werden verschiedenen Objektivkennwerten gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass Open-Loop-Kennwerte der *Querbeschleunigung* und des *Lenkmoments* einen größeren Zusammenhang zu den Subjektivbewertungen haben als Kennwerte der *Gierrate*.

Gegenüber Kennwerten aus dem Open-Loop zeigen die Fahrer-Fahrzeug-Kennwerte aus dem Closed-Loop teils deutliche bessere Korrelationskoeffizienten zu den Subjektivbewertungen. Erklärbar ist dies dadurch, dass die Lenkeingaben und die daraus resultierenden Fahrzeugreaktionen von mehreren Fahrzeugeigenschaften gleichzeitig beeinflusst werden, beispielsweise durch die *stationäre Verstärkung* und die *Verzögerungszeit*.

Durch multiple Regression jeweils zweier Open-Loop-Kennwerte zu einer Subjektivbewertung lassen sich die Korrelationen deutlich verbessern. Dies trifft insbesondere auf Kombinationen von Open-Loop-Kennwerten zu, welche ein Maß für die *stationäre Verstärkung* und die *Verzögerungszeit* darstellen.

Einen Vergleich der maximalen Korrelationskoeffizienten nach den drei dargestellten Auswertungsmöglichkeiten enthält Tabelle 3.7. In Bild 3.23 werden die gut zu den Beurteilungskriterien korrelierenden objektiven Kenngrößen direkt in den Kennwertdiagrammen der Frequenzgänge und der Phasendiagramme dargestellt.



**Bild 3.23:** Darstellung der gut korrelierenden Open-Loop-Kennwerte aus dem Doppelspurwechsel (s. Bild 3.17)

### 3.4 Versuchsergebnisse Anlenken auf der Geraden

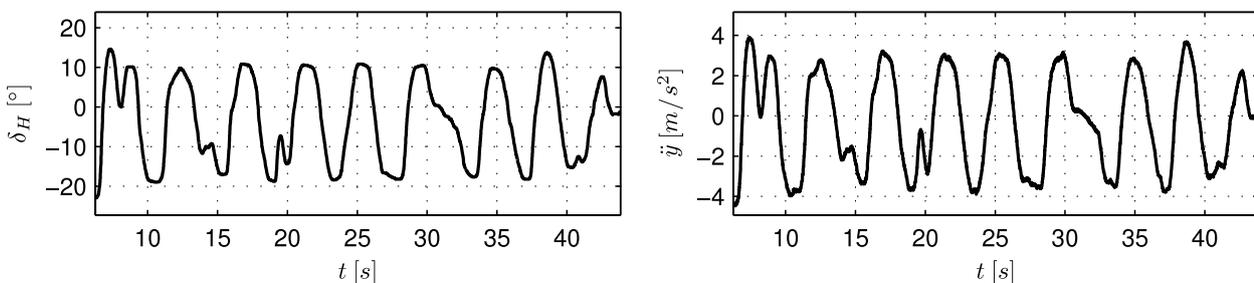
Im zweiten Versuchsabschnitt wird das Manöver „Anlenken auf der Geraden“ gefahren, bei dem der Proband beliebige Lenkmanöver bei konstanten Geschwindigkeitsstufen von 100 und 180  $\frac{km}{h}$  ausführen kann. Als Randbedingung sollen Querbeschleunigungen über 5  $\frac{m}{s^2}$  vermieden werden, um einen ausreichenden Abstand zum Grenzbereich sicherzustellen. Bild 3.25 zeigt einen typischen Zeitverlauf des Manövers, wie es von den Probanden durchgeführt wurde.

Der Fragebogen wird gegenüber dem ersten Versuchsabschnitt erweitert. Die Definitionen der einzelnen Bewertungskriterien sind Bild 3.24

zu entnehmen. Die ersten fünf Kriterien (*allg. Gefallen* – *Zielgenauigkeit*) wurden im Sinne einer Gefallensbewertung abgefragt, die nachfolgenden Kriterien sowohl *quasi-objektiv* (Wahrnehmung) als auch *subjektiv* (Gefallen).

--   -   0   +   ++		
<b>allgemeines Gefallen, Stimmungkeit</b>	spontane Bewertung des Gesamteindrucks im Sinne des Gefallens	schlechter <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> besser
<b>Linearität</b>	wie proportional zur Lenkwinkel eingabe wird die Fahrzeugreaktion empfunden	schlechter <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> besser
<b>Ansprechverhalten</b>	Fahrzeugreaktion auf minimale Lenkeingaben	schlechter <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> besser
<b>Aufziehen</b>	Selbstverstärkung beim Anlenken	schlechter <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> besser
<b>Zielgenauigkeit</b>	Wie zielgenau wirkt das Fahrzeug	schlechter <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> besser
<b>Lenkwinkelbedarf</b>		weniger <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> mehr schlechter <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> besser
<b>Überschwinger, Nachlenken</b>	Wie stark sind die Überschwinger der Gierbewegungen	schwächer <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> stärker schlechter <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> besser
<b>Lenkmoment bei niedriger Querbeschleunigung</b>		niedriger <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> höher schlechter <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> besser
<b>Lenkmoment bei höherer Querbeschleunigung</b>		niedriger <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> höher schlechter <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> besser
<b>Gierreaktion</b>	Wie schnell baut sich die Gierreaktion nach einer Lenkradeingabe auf	langsamer <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> schneller schlechter <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> besser
<b>Seitenkraftaufbau</b>	Wie schnell baut sich die Querbeschleunigung nach einer Lenkradeingabe auf	langsamer <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> schneller schlechter <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> besser
<b>Wankreaktion</b>	Wie schnell baut sich nach einer Lenkradeingabe der Wankwinkel auf	langsamer <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> schneller schlechter <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> besser

**Bild 3.24:** Fragebogen für den zweiten Versuchsabschnitt „Anlenken“



**Bild 3.25:** Zeitschrieb eines Probanden bei der Subjektivbeurteilung Anlenken auf der Geraden

### 3.4.1 Korrelationsanalysen der Bewertungen und der Open-Loop-Kennwerte

Analog zu der Ergebnisanalyse des Doppelspurwechsels wird mit den Bewertungen des Versuchsabschnitts Anlenken eine Korrelationsanalyse durchgeführt.

#### Subjektiv-Subjektiv-Korrelationen

Nicht jedes Bewertungskriterium wurde im zweiten Versuchsabschnitt in den beiden Kategorien *quasi-objektiv* und *subjektiv* abgefragt. Bei der Darstellung der Korrelationen werden daher die ersten fünf Kriterien (s. Bild 3.24) in beide Korrelationsmatrizen aufgenommen, da sie nicht eindeutig einer der beiden Kategorien zugeordnet werden können. Der Einfluss der Fahrgeschwindigkeit wird durch den Vergleich der beiden Geschwindigkeitsstufen 100 und  $180 \frac{km}{h}$  dargestellt.

Der Vergleich zwischen den beiden Geschwindigkeiten zeigt eine große Ähnlichkeit zwischen den Korrelationsmatrizen (Bild 3.26). Die Relationen der Subjektivkriterien zueinander sind also in erster Näherung unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit. Eine deutliche Abweichung von dieser Regel stellen beispielsweise die Kriterien *Linearität* und *Lenkwinkelbedarf* (*o*) dar: Einem Korrelationskoeffizient von  $r = -0,31$  bei  $100 \frac{km}{h}$  steht ein Korrelationskoeffizient von  $r = 0,70$  bei  $180 \frac{km}{h}$  gegenüber. Bei hoher Geschwindigkeit werden die Varianten demnach als linearer empfunden, wenn sie einen höheren Lenkwinkelbedarf haben.

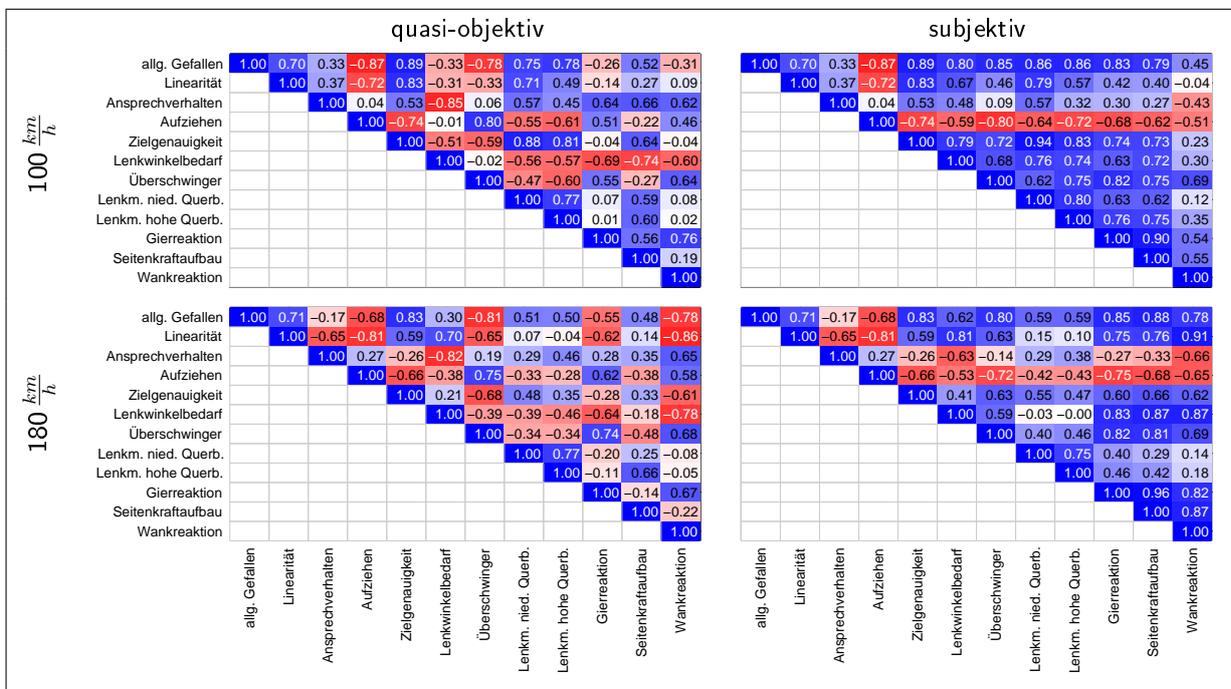


Bild 3.26: Korrelationen der Subjektivbewertungen beim Anlenken

### Objektiv-Subjektiv-Korrelationen

Die kompletten Matrizen der Objektiv-Subjektiv-Korrelationen werden für eine bessere Übersichtlichkeit im Anhang (Bilder 5.2, 5.3, 5.4) dargestellt. Die Auswahl der besonders aussagekräftigen Open-Loop-Kennwerte erfolgt analog zum Versuchsabschnitt „Doppelspurwechsel“ (s. Abschnitt 3.3.6), die Korrelationskoeffizienten dieser Kennwertauswahl zu den Subjektivbewertungen wird in Bild 3.27 gezeigt.

In Tabelle 3.8 werden die maximal erreichten Korrelationskoeffizienten für die einzelnen Bewertungskriterien, die beiden Geschwindigkeiten und die beiden Kennwertgruppen (Frequenzgang und Weavetest) ermittelt. Es zeigt sich, dass die maximalen Korrelationen

- bei  $180 \frac{km}{h}$  oft niedriger als bei  $100 \frac{km}{h}$  sind,
- bei Kennwerten aus dem Frequenzgang und dem Weavetest etwa gleich gut sind (mit leichten Vorteilen für den Weavetest),
- bei den doppelt abgefragten Kriterien (*quasi-objektiv* und *subjektiv*) jeweils etwa gleich hoch ausfallen.

Die höchsten Korrelationen werden bei den Kriterien *allgemeines Gefallen*, *Überschwinger* und *Lenkmoment bei hohen Querbeschleunigungen* erreicht.

#### 3.4.2 Open-Loop-Kennwerte der einzelnen Bewertungskriterien

In den folgenden Abschnitten werden für jedes Bewertungskriterium die am besten korrelierenden Objektivkennwerte diskutiert. Die Korrelationskoeffizienten sind aus den Matrizen (Bild 3.27) ersichtlich, die gut korrelierenden Kennwerte werden in Bild 3.28 in den Diagrammen der Frequenzgänge und den Phasendiagrammen des Weavetests dargestellt.

##### Allgemeines Gefallen

Die allgemeine Gefallensbewertung korreliert am besten mit Kennwerten des Lenkmoments. Bei  $100 \frac{km}{h}$  sind dies die stationäre Lenkwinkel-Lenkmoment-Verstärkung sowie drei Kennwerte der Lenkwinkel-Lenkmoment-Hysterese. Bei  $180 \frac{km}{h}$  werden zwei Kennwerte der Lenkmoment-Querbeschleunigungs-Hysterese gefunden. Generell wird ein höheres und fülligeres Lenkmoment bevorzugt.

Die Gestaltung der Lenkmomentcharakteristik scheint somit herausragende Bedeutung für die Bewertung der Querdynamik im niederdynamischen Bereich zu haben. Dabei verschiebt sich der Focus von der Bezugsgröße Lenkwinkel bei niedriger Geschwindigkeit hin zur Querbeschleunigung bei höherer Geschwindigkeit.

Beurteilungskriterium	100 $\frac{km}{h}$		180 $\frac{km}{h}$	
	Freq.	Weave.	Freq.	Weave.
allgemeines Gefallen	0,78	0,76	0,58	0,74
Linearität	0,57	0,71	0,52	0,68
Ansprechverhalten	0,72	0,74	0,69	0,71
Aufziehen	0,61	0,69	0,51	0,65
Zielgenauigkeit	0,75	0,71	0,58	0,72
Lenkwinkelbedarf (o)	0,75	0,76	0,74	0,73
Lenkwinkelbedarf (s)	0,77	0,80	0,80	0,74
Überschwinger (o)	0,76	0,82	0,57	0,46
Überschwinger (s)	0,82	0,79	0,56	0,56
Lenkm. nied. Querb. (o)	0,74	0,81	0,66	0,70
Lenkm. nied. Querb. (s)	0,70	0,76	0,67	0,69
Lenkm. hohe Querb. (o)	0,86	0,83	0,68	0,72
Lenkm. hohe Querb. (s)	0,84	0,79	0,66	0,72
Gierreaktion (o)	0,63	0,69	0,52	0,60
Gierreaktion (s)	0,75	0,71	0,63	0,65
Seitenkraftaufbau (o)	0,66	0,67	0,44	0,60
Seitenkraftaufbau (s)	0,73	0,71	0,61	0,67
Wankreaktion (o)	0,40	0,80	0,69	0,72
Wankreaktion (s)	0,52	0,87	0,66	0,69

*Tabelle 3.8: Maximale Korrelationskoeffizienten objektiver Kennwerte zur Subjektivbewertung beim Anlenken (s. Bilder 5.3, 5.4)*

### Linearität

Die Korrelationen zur Linearität fallen relativ schwach aus, wobei die besten Korrelationen von Kennwerten des Weavetests stammen. Eine Präferenz für ein bestimmtes Signalpaar ist nicht zu erkennen.

### Ansprechverhalten

Das Ansprechverhalten weist eine Reihe von gut korrelierenden Kennwerten auf. Alle Kennwerte setzen die Fahrzeugreaktion Gierrate bzw. Querbesehleunigung ins Verhältnis zum Lenkwinkel.

### Aufziehen

Die gut korrelierenden Kennwerte setzen sich aus den Größen Lenkwinkel, Lenkmoment und Querbesehleunigung zusammen, die Gierrate scheint also eine untergeordnete Relevanz bei diesem Kriterium zu haben. Zwei Kennwerte, welche das nichtlineare Verhalten kennzeich-

nen, erzielen mit die besten Korrelationen:  $H(\partial M_H / \partial \delta_H)_{\frac{max}{min}}$  (36) sowie  $H(\partial \ddot{y} / \partial M_H)_{min}$  (70). Eine Variante wird umso stärker aufziehend empfunden, je größer die Nichtlinearität ist.

#### **Zielgenauigkeit**

Relativ gute Korrelationen zur Zielgenauigkeit werden mit Kennwerten des Lenkmoments erreicht. Eine bessere Zielgenauigkeit geht mit einem höheren Lenkmomentverlauf einher. Rein lenkwinkelbezogene Kennwerte (Lenkwinkel-Gierrate, Lenkwinkel-Querbeschleunigung) haben für die Zielgenauigkeit weniger Aussagekraft.

#### **Lenkwinkelbedarf**

Dieses Kriterium erzielt insgesamt die meisten hohen Korrelationen im Versuchsteil „Anlenken“. Ein klarer Bezug zu den stationären Verstärkungen Lenkwinkel-Gierrate und Lenkwinkel-Querbeschleunigung existiert mit Korrelationskoeffizienten um  $r \approx -0,75$ .

#### **Überschwinger**

Die Bewertung des Überschwingverhaltens ist sehr eng mit dem Lenkmomentverlauf verknüpft. Je niedriger das Lenkmoment, desto stärker wird das Überschwingen empfunden.

#### **Lenkmoment bei niedrigen Querbeschleunigungen**

Das wahrgenommene Lenkmoment bei niedrigen Querbeschleunigungen korreliert gut mit zwei Kennwertepaaren: Lenkwinkel-Lenkmoment und Lenkwinkel-Gierrate.

#### **Lenkmoment bei hohen Querbeschleunigungen**

Bei hohen Querbeschleunigungen wird das empfundene Lenkmoment am besten durch Kennwerte ausgedrückt, welche direkt aus den Signalen Lenkwinkel und Lenkmoment gebildet werden.

#### **Gierreaktion**

Die empfundene Schnelligkeit der Gierreaktion korreliert insgesamt eher schlecht mit objektiven Kennwerten, wobei Objektivkennwerte der Verzögerungszeit überhaupt keine guten Korrelationen aufweisen.

#### **Seitenkraftaufbau**

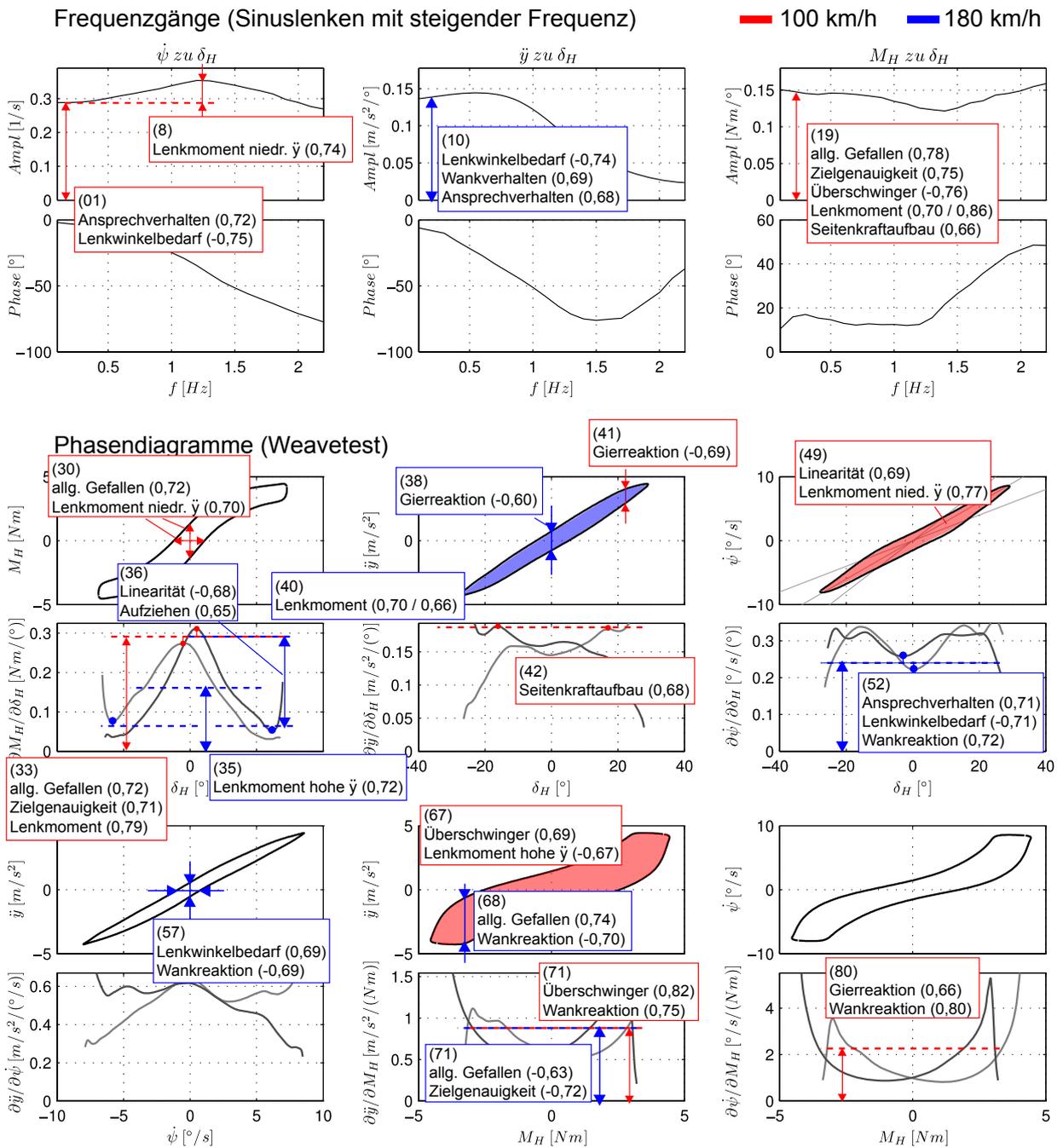
Auch der wahrgenommene Seitenkraftaufbau erzielt mit  $|r| < 0,7$  nur mäßige Korrelationen, wobei ebenfalls keine Objektivkennwerte der Verzögerungszeiten gute Korrelationen erzielen.

Wankreaktion

Die Beurteilung der Wankreaktion erzielt mehrere gute Korrelationen zu verschiedenen Signalpaaren, wobei grundsätzlich eine Variante als umso stärker wankend empfunden wird, je größer die stationäre Verstärkung der Fahrzeugreaktion ( $\dot{\psi}$ ,  $\ddot{y}$ ) auf Lenkeingaben ( $\delta_H$ ,  $M_H$ ) ist.

		quasi-objektiv							subjektiv												
100 $\frac{km}{h}$	TF( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (01)	-0.75	-0.16	0.58	0.48	0.43	0.60	0.31	0.51	0.55	0.72	-0.25	0.61	0.75	0.31	0.64	0.50	0.37	0.42	-0.14	
	TF( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>U</sub> (08)	-0.40	-0.15	0.74	0.45	0.10	0.31	0.41	0.35	0.56	0.61	-0.19	0.59	0.33	0.25	0.62	0.32	0.10	0.08	-0.31	
	TF( $M_H/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (19)	-0.47	-0.76	0.70	0.86	-0.04	0.67	-0.29	0.78	0.36	0.36	-0.61	0.75	0.72	0.82	0.70	0.84	0.75	0.74	0.53	
	H( $M_H/\delta_H$ ) <sub>y/x</sub> (30)	-0.43	-0.49	0.70	0.63	0.01	0.34	-0.08	0.72	0.58	0.42	-0.62	0.65	0.59	0.53	0.71	0.60	0.48	0.33	0.16	
	H( $\partial M_H/\partial \delta_H$ ) <sub>max</sub> (33)	-0.61	-0.55	0.74	0.79	0.19	0.66	-0.03	0.76	0.47	0.51	-0.57	0.71	0.70	0.61	0.76	0.75	0.57	0.57	0.20	
	H( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub><math>\Delta y</math></sub> (41)	0.37	-0.20	0.07	-0.03	-0.69	-0.43	-0.29	0.22	0.29	-0.35	-0.27	0.08	0.20	0.21	0.16	0.18	-0.04	0.00	0.19	
	H( $\partial \ddot{y}/\partial \delta_H$ ) <sub>max</sub> (42)	-0.43	-0.20	0.28	0.19	0.23	0.68	-0.18	0.36	0.19	0.39	-0.08	0.44	0.60	0.35	0.39	0.29	0.53	0.71	0.36	
	H( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>A</sub> (49)	-0.42	-0.30	0.77	0.51	0.03	0.27	0.35	0.49	0.69	0.48	-0.41	0.63	0.42	0.38	0.68	0.43	0.15	0.12	-0.30	
	H( $\ddot{y}/M_H$ ) <sub>A</sub> (67)	0.21	0.69	-0.41	-0.67	0.11	-0.58	0.48	-0.58	0.04	-0.07	0.44	-0.46	-0.43	-0.69	-0.42	-0.65	-0.68	-0.71	-0.69	
	H( $\partial \ddot{y}/\partial M_H$ ) <sub>min</sub> (70)	-0.12	0.65	-0.34	-0.50	0.39	-0.07	0.50	-0.59	-0.17	0.22	0.70	-0.33	-0.13	-0.54	-0.35	-0.48	-0.46	-0.31	-0.49	
180 $\frac{km}{h}$	H( $\partial \ddot{y}/\partial M_H$ ) (71)	-0.04	0.82	-0.40	-0.57	0.48	-0.30	0.75	-0.62	-0.07	0.10	0.56	-0.47	-0.40	-0.79	-0.41	-0.62	-0.67	-0.62	-0.87	
	H( $\partial \dot{\psi}/\partial M_H$ ) (80)	-0.23	0.62	-0.15	-0.32	0.66	0.05	0.80	-0.50	-0.07	0.37	0.50	-0.24	-0.42	-0.60	-0.27	-0.51	-0.46	-0.46	-0.84	
	TF( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (10)	-0.74	0.19	0.32	0.38	0.41	0.33	0.69	-0.30	-0.52	0.68	-0.01	-0.09	-0.80	-0.19	0.29	0.34	-0.42	-0.51	-0.66	
	H( $\partial M_H/\partial \delta_H$ ) (35)	-0.65	-0.15	0.65	0.72	0.13	0.60	0.26	0.25	-0.06	0.60	-0.40	0.29	-0.44	0.15	0.67	0.72	0.03	-0.05	-0.21	
	H( $\partial M_H/\partial \delta_H$ ) <sub>max</sub> (36)	-0.12	0.45	-0.38	-0.34	0.36	-0.21	0.49	-0.58	-0.68	0.22	0.65	-0.50	-0.42	-0.41	-0.47	-0.41	-0.47	-0.48	-0.56	
	H( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>y</sub> (38)	0.36	-0.46	0.50	0.36	-0.60	-0.03	-0.52	0.47	0.22	-0.25	-0.25	0.44	0.46	0.45	0.51	0.40	0.61	0.55	0.45	
	H( $\ddot{y}/\delta_H$ ) <sub>A</sub> (40)	-0.21	-0.33	0.70	0.66	-0.29	0.27	-0.01	0.26	-0.20	0.31	-0.20	0.33	-0.12	0.34	0.69	0.66	0.30	0.20	-0.05	
	H( $\partial \dot{\psi}/\partial \delta_H$ ) <sub>min</sub> (52)	-0.71	0.15	0.11	0.18	0.40	0.21	0.72	-0.31	-0.51	0.71	0.17	-0.32	-0.68	-0.12	0.05	0.08	-0.44	-0.51	-0.69	
	H( $\ddot{y}/\psi$ ) <sub>y/x</sub> (57)	0.69	-0.20	-0.11	-0.15	-0.43	0.00	-0.69	0.32	0.56	-0.56	-0.38	0.36	0.58	0.18	-0.04	-0.02	0.50	0.52	0.69	
	H( $\ddot{y}/M_H$ ) <sub><math>\Delta y</math></sub> (68)	0.34	-0.58	0.30	0.34	-0.51	0.33	-0.70	0.74	0.63	-0.20	-0.40	0.31	0.59	0.63	0.33	0.35	0.65	0.67	0.68	
H( $\partial \ddot{y}/\partial M_H$ ) (71)	0.01	0.32	-0.43	-0.34	0.16	-0.19	0.41	-0.63	-0.38	0.05	0.37	-0.72	-0.31	-0.27	-0.53	-0.42	-0.43	-0.49	-0.43		
		Lenkwinkelbedarf	Überschwinger	Lenkn. nied. Querb.	Lenkn. hohe Querb.	Gierreaktion	Seitenkraftaufbau	Wankreaktion	allg. Gefallen	Linearität	Anspruchverhalten	Aufziehen	Zielgenauigkeit	Lenkwinkelbedarf	Überschwinger	Lenkn. nied. Querb.	Lenkn. hohe Querb.	Gierreaktion	Seitenkraftaufbau	Wankreaktion	

Bild 3.27: Korrelationen der Subjektivrteile beim Anlenken auf der Geraden mit ausgewählten Open-Loop-Kennwerten



**Bild 3.28:** Darstellung der gut korrelierenden Open-Loop-Kennwerte des Versuchsschnitts Anlenken auf der Geraden (s. Bild 3.27)  
(rot:  $100 \frac{km}{h}$ , blau:  $180 \frac{km}{h}$ )

## 3.5 Ergebnisdiskussion

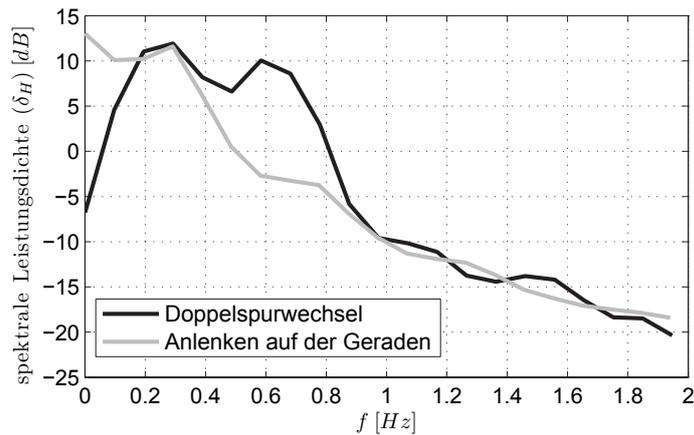
### 3.5.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Versuchsabschnitten

Die beiden Versuchsabschnitte *Doppelspurwechsel* und *Anlenken auf der Geraden* bieten dem Probanden unterschiedliche Randbedingungen zur Beurteilung der Fahrzeugvarianten. Während der *Doppelspurwechsel* durch den vorgegebenen Sollkurs eine fahrerisch anspruchsvolle Aufgabe darstellt, hat der Proband beim *Anlenken auf der Geraden* die Möglichkeit, sich ganz auf die fahrdynamischen Eigenschaften zu konzentrieren.

Tabelle 3.9 stellt die gut korrelierenden objektiven Kennwertepaare aus den beiden Versuchsabschnitten gegenüber. Als Basis für diese Auswertung werden die kompletten Korrelationsmatrizen (Bilder 5.2, 5.3, 5.4) herangezogen. Kennwertepaare, welche in beiden Versuchsabschnitten im gleichen Beurteilungskriterium gute Korrelationen erzielen, sind durch Fettdruck hervorgehoben. Beurteilungskriterien, welche nicht in beiden Versuchsabschnitten abgefragt wurden, werden in der Tabelle nicht aufgeführt.

Beurteilungskriterium	Doppelspurwechsel		Anlenken (100 $\frac{km}{h}$ )		Anlenken (180 $\frac{km}{h}$ )	
	Kennw. Frequenzgang	Kennw. Weavetest	Kennw. Frequenzgang	Kennw. Weavetest	Kennw. Frequenzgang	Kennw. Weavetest
Lenkwinkelbedarf	–	<b><math>\mathbf{H}(\ddot{y}/\delta_H)</math></b>	$TF(\dot{\psi}/\delta_H)_{stat}$ , $TF(\ddot{y}/\delta_H)_{stat}$	<b><math>\mathbf{H}(\ddot{y}/\delta_H)</math>,</b> $H(\overline{\partial\dot{\psi}/\partial\delta_H})$	$TF(\dot{\psi}/\delta_H)_{stat}$ , $TF(\ddot{y}/\delta_H)_{stat}$	<b><math>\mathbf{H}(\overline{\partial\ddot{y}/\partial\delta_H})</math>,</b> $H(\dot{\psi}/\delta_H)$
Lenkmoment bei niedriger Querbeschleunigung	<i>nicht abgefragt</i>	<i>nicht abgefragt</i>	$TF(\dot{\psi}/\delta_H)_U$ , $TF(M_H/\delta_H)_{stat}$	$H(M_H/\delta_H)$ , $H(\dot{\psi}/\delta_H)$	$TF(M_H/\delta_H)_{stat}$	$H(\ddot{y}/\delta_H)$ , $H(M_H/\delta_H)$
Lennkraftverlauf, Lenkmoment bei hoher Querbeschleunigung	<b><math>TF(M_H/\delta_H)_{stat}</math></b>	$H(\ddot{y}/M_H)$ , $H(\dot{\psi}/M_H)$	<b><math>TF(M_H/\delta_H)_{stat}</math></b>	$H(M_H/\delta_H)$	<b><math>TF(M_H/\delta_H)_{stat}</math></b>	$H(\ddot{y}/\delta_H)$ , $H(\overline{\partial M_H/\partial\delta_H})$
Zielgenauigkeit	$TF(\ddot{y}/\delta_H)$	$H(\ddot{y}/\delta_H)$ , <b><math>\mathbf{H}(M_H/\delta_H)</math></b>	$TF(M_H/\delta_H)_{stat}$	<b><math>\mathbf{H}(M_H/\delta_H)</math></b>	–	–
Seitenkraftaufbau	–	$H(\ddot{y}/\delta_H)$	$TF(M_H/\delta_H)_{stat}$	$H(M_H/\delta_H)$	–	–
Gierverhalten	–	–	–	$H(\ddot{y}/\delta_H)$	–	–
Überschwinger	$TF(\ddot{y}/\delta_H)$ , <b><math>TF(M_H/\delta_H)</math></b>	<b><math>\mathbf{H}(M_H/\delta_H)</math>,</b> $H(\ddot{y}/\delta_H)$ , $H(\ddot{y}/\dot{\psi})$	<b><math>TF(M_H/\delta_H)</math></b>	<b><math>\mathbf{H}(M_H/\delta_H)</math>,</b> $H(\overline{\partial\ddot{y}/\partial M_H})$	–	–
Wankverhalten	–	$H(M_H/\delta_H)$	–	$H(\overline{\partial\ddot{y}/\partial M_H})$ , $H(\overline{\partial\dot{\psi}/\partial M_H})$	$TF(\ddot{y}/\delta_H)_{stat}$	$H(\ddot{y}/\dot{\psi})$ , $H(\dot{\psi}/\delta_H)$ , $H(\ddot{y}/M_H)$

**Tabelle 3.9:** Gegenüberstellung gut korrelierender Objektivkennwerte für die Fahrmanöver *Doppelspurwechsel* und *Anlenken*



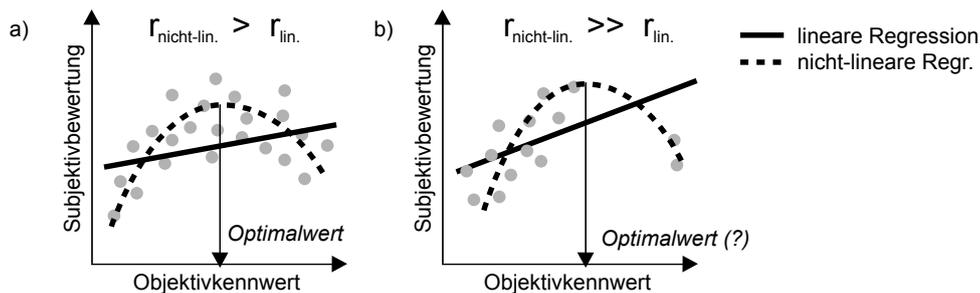
**Bild 3.29:** Vergleich der Frequenzanteile des Lenkwinkels bei den Fahrmanövern *Doppelspurwechsel* und *Anlenken auf der Geraden*

Übereinstimmungen zwischen den Versuchsabschnitten im Bezug auf gut korrelierende Kennwertepaare bestehen in den Beurteilungskriterien *Lenkwinkelbedarf*, *Lenkkraftverlauf* / *Lenkmoment*, *Zielgenauigkeit* und *Überschwinger*. Diese Verknüpfungen aus Beurteilungskriterien und Objektivkennwerten können also als unabhängig von der Fahrsituation betrachtet werden.

Viele der gut korrelierenden Kennwerte im Versuchsabschnitt *Anlenken auf der Geraden* stellen quasi-stationäre Verstärkungsfaktoren dar, z.B.  $TF(\dot{\psi}/\delta_H)_{stat}$  und  $H(\overline{\partial\dot{\psi}/\partial\delta_H})$ . Im *Doppelspurwechsel* spielen diese stationären Verstärkungsfaktoren hingegen eine untergeordnete Rolle.

Die Darstellung der spektralen Leistungsdichte des Lenkwinkels in Bild 3.29 zeigt, wie sich die Frequenzinhalte der Lenkeingaben der beiden Manövern *Anlenken* und *Doppelspurwechsel* unterscheiden. Im Bereich  $f < 0,2$  Hz gibt es beim *Doppelspurwechsel* kaum Lenkeingaben, da bei diesem Manöver keine quasi-stationären Fahrzustände vorliegen. Diese quasi-stationären Fahrzustände machen beim *Anlenken auf der Geraden* hingegen den größten Frequenzanteil aus. Dafür zeigt der *Doppelspurwechsel* im Bereich  $0,5 < f < 1$  Hz eine deutlich größere spektrale Leistungsdichte als das *Anlenken auf der Geraden*.

Die unterschiedlichen Frequenzspektren liefern somit einen Hinweis darauf, warum beim *Anlenken* besonders die Kennwerte der stationären Verstärkungsfaktoren gute Korrelationen erzielen, dynamische Kennwerte dafür beim *Doppelspurwechsel* besser zum Subjektivurteil korrelieren: Je nach Gewichtung der Lenkfrequenzen sind eher die quasi-stationären Kennwerte (*Anlenken*) oder die dynamischen Kennwerte (*Doppelspurwechsel*) für die Subjektivbeurteilung bestimmend.



**Bild 3.30:** Mögliche Ergebnisse der nichtlinearen Regression bei unterschiedlichen Datenverteilungen

### 3.5.2 Datenauswertung

Die Analyse der Korrelationen zwischen subjektiven Bewertungen und objektiven Kennwerten wird ausschließlich in ihrer einfachsten Form, der linearen Regression, durchgeführt. Dies kann zur Frage veranlassen, warum keine komplexeren Auswertungsverfahren angewendet werden.

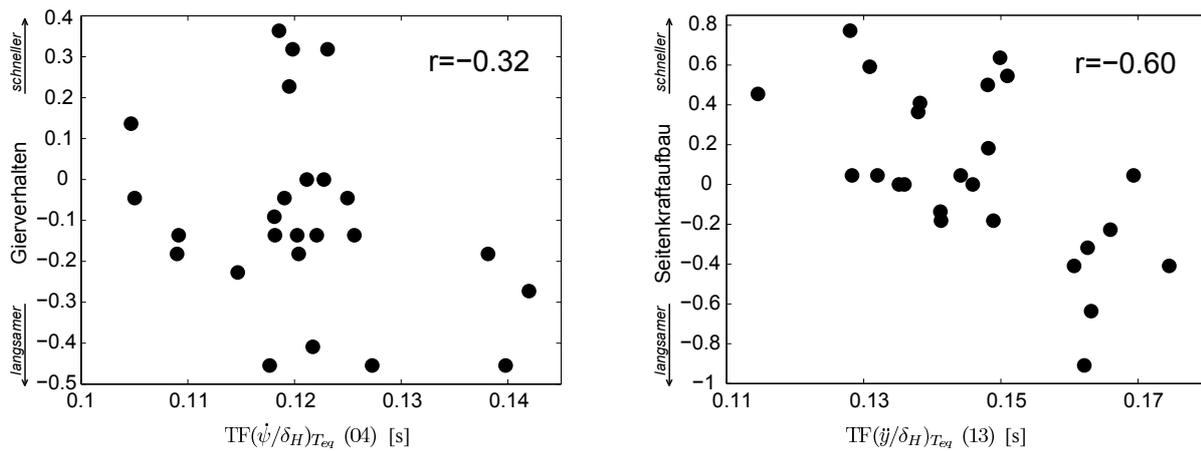
Der Einsatz der nichtlinearen Regression ist dann sinnvoll, wenn stark nichtlineare Zusammenhänge zwischen den zu vergleichenden Größen zu erwarten sind. Dies ist besonders dann der Fall, wenn zwischen einem Objektivkennwert und einer Subjektivbewertung ein ausgeprägter Optimalpunkt erkennbar ist (Bild 3.30 a). Gleichzeitig besteht allerdings die Gefahr, dass bei stark ungleichmäßig verteilten Kennwerten (Bild 3.30 b) ein sehr guter Korrelationskoeffizient erreicht wird, auch wenn der so gefundene mathematische Zusammenhang zwischen Objektivkennwert und Subjektivbewertung aus technischer Sicht fraglich ist. Auf diese Weise entstandene Optimalwerte sind gleichermaßen anzuzweifeln.

Die in der vorliegenden Arbeit ausgewerteten Datenmengen sind auf eindeutig erkennbare nichtlineare Zusammenhänge (Bild 3.30 a) untersucht worden. Da jedoch keine derartigen Relationen auftreten, erscheint der Einsatz nichtlinearer Regressionsansätze nicht sinnvoll.

### 3.5.3 Wichtung der fahrdynamischen Größen nach ihrer Bedeutung

Als primäre Größen der Querdynamik können *Lenkwinkel*, *Gierrate*, *Querbeschleunigung* und *Lenkmoment* betrachtet werden, sowie die Ableitungen dieser Größen. Der *Schwimmwinkel* ist durch das Übertragungsverhalten von Gierrate und Querbeschleunigung im Proportionalbereich eindeutig bestimmbar und somit redundant.

Sehr häufig werden in theoretischen Betrachtungen der Querdynamik lediglich der *Lenkwinkel* als Fahrereingabe und die *Gierrate* als Fahrzeugreaktion betrachtet, ein Beispiel hierfür ist das Diagramm nach WEIR und DiMARCO (s. Bild 1.1). Auch in vielen neueren Veröffentlichungen kann diese Ausblendung der anderen Fahrdynamikgrößen beobachtet werden. Dabei liegen in der Literatur bereits einige Hinweise vor, dass die Querbeschleuni-



**Bild 3.31:** Vergleich der Subjektiv-Objektiv-Korrelationen der Schnelligkeit der Fahrzeugreaktion für Gierrate und Querbeschleunigung (Versuchsabschnitt Doppelspurwechsel)

gung für den Fahrer eine ebenso wichtige Regelgröße ist [Fuc93, Red94, Hen04]. Auch in der vorliegenden Untersuchung zeigt sich, dass die Querbeschleunigung gegenüber der Gierrate als mindestens gleich wichtig anzusehen ist (Tabelle 3.9). Besonders im Versuchsabschnitt *Doppelspurwechsel* weisen die dynamischen Kennwerte der Querbeschleunigung eine generell höhere Korrelation zur Subjektivbewertung auf (s. auch Bild 5.2).

Die Auswertung der Verzögerungszeiten ergibt, dass die der Querbeschleunigung beim Doppelspurwechsel deutlich besser von den Probanden aufgelöst werden kann als die Verzögerungszeit der Gierrate (Bild 3.31). Somit hat die Querbeschleunigung sowohl bei der *quasi-objektiven Wahrnehmung* als auch bei der *subjektiven Gefallensbewertung* größere Aussagekraft als die Gierrate.

Im Versuchsabschnitt *Anlenken auf der Geraden* hingegen haben die Objektivkennwerte der Verzögerungszeiten eine untergeordnete Aussagekraft für die Subjektivbewertungen. Hier lässt sich kein Vorteil zugunsten der Querbeschleunigung erkennen (s. Bilder 5.3, 5.4).

Die unterschiedlichen Gewichtungen der beiden Größen in Abhängigkeit von der Fahr-situation lässt sich wie folgt begründen: Im Doppelspurwechsel muss der Fahrer einem eng begrenzten Sollkurs folgen. Je schneller das Fahrzeug auf Lenkeingaben in der Querbeschleunigung reagiert, desto besser gelingt dem Fahrer die Regelung des *Querversatzes*, denn letztlich bestimmt dieser, ob ein fehlerfreies Durchfahren der Gassen gelingt. Durch die Möglichkeit, beim Versuchsfahrzeug mittels der beiden Lenksysteme die Übertragungsfunktionen der Größen Gierrate und Querbeschleunigung (und damit Querversatz) stark zu entkoppeln, kann die Bedeutung der Querbeschleunigung direkt sichtbar gemacht werden. Besteht diese Möglichkeit nicht, wie es bei den meisten konventionell gelenkten Fahrzeugen der Fall ist, kann davon ausgegangen werden, dass sich bei gleicher Versuchsdurchführung die Gewichtungen der beiden Größen angleichen.

Im Versuchsabschnitt *Anlenken auf der Geraden* wird dem Fahrer keine anspruchsvolle Regeltätigkeit abverlangt. Stattdessen dirigiert er das Fahrzeug bei deutlich niedrigeren Lenkfrequenzen (Bild 3.29) mit großem Vorsteuerungsanteil und kleinem Regelungsanteil. Da es hier weder auf ein besonders schnelles Ansprechen des Fahrzeugs, noch auf einen schnell zu realisierenden Querversatz ankommt, sind die Kennwerte der Verzögerungszeit weniger bedeutsam für die subjektive Beurteilung.

Für den Schwimmwinkel als ableitbare Größe aus Gierrate und Querbeschleunigung gilt somit: In anspruchsvollen Fahrsituationen (z.B. Doppelspurwechsel) sollte dieser eine möglichst geringe Nacheilung zur Lenkeingabe aufweisen, dies resultiert zwangsläufig aus der Forderung nach einem schnellen Ansprechen der Querbeschleunigung. Gleichzeitig ergibt sich hieraus, dass auch der Betrag des stationären Schwimmwinkels klein bleibt.

Das Lenkmoment zeigt in beiden Versuchsabschnitten eine starke Verknüpfung zu den Subjektivbewertungen (Tabelle 3.9). Ein höheres Lenkmoment wurde von den Probanden in allen Fahrsituationen sowohl gut aufgelöst (quasi-objektiv) als auch gewünscht (subjektive Gefallensbewertung). Im Hinblick auf andere Forschungsergebnisse [Bar04] muss allerdings davon ausgegangen werden, dass sich der Zusammenhang *höheres Lenkmoment = bessere Beurteilung* nicht verallgemeinern lässt (siehe S. 13). Letztlich gibt es auch aus ergonomischer Sicht Obergrenzen für das Lenkmoment, welche sich beispielsweise durch die Ermüdung des Fahrers bei längerer Fahrt durch zu hohe Lenkmomente begründen.

Dennoch muss angenommen werden, dass das Lenkmoment für den Fahrer von größter Wichtigkeit ist, weil es *Stellgröße* und zugleich *Informationsgröße* über den Fahrzustand ist. Zwar wird in vielen theoretischen Betrachtungen der Lenktätigkeit des Fahrers davon ausgegangen, dass dieser einen Lenkwinkel vorgebe. Doch ohne eine Änderung im Lenkmoment, welche das Lenkrad aus seiner bisherigen Position bewegt, lässt sich keine Lenkwinkeländerung hervorrufen. Man kann also präziser formulieren: Ziel der Lenkvorgabe des Fahrers ist eine Kursänderung des Fahrzeugs. Da hierzu eine *Lenkwinkeländerung* notwendig ist, muss der Fahrer das *Lenkmoment* ändern. Die Lenktätigkeit läuft somit auf zwei Ebenen: Das Fahrzeug reagiert auf den Lenkwinkel, und dieser muss vom Fahrer über das Lenkmoment eingeregelt werden. In diesem Sinne ist das Lenkmoment eine *Stellgröße*.

Den Charakter einer *Informationsgröße* hat das Lenkmoment, weil es bei konventionellen Lenksystemen direkt abhängig von den Seitenkräften ist, welche von der (gelenkten) Vorderachse abgestützt werden. Diese wiederum sind eng mit der Querbeschleunigung verknüpft. Die Verknüpfung zwischen Querbeschleunigung und Lenkmoment zeigt sich in den Phasendiagrammen des Weavetests bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten (Bild 2.13, S. 45).

Für den Fahrer ist das Lenkmoment somit eine zusätzliche Informationsgröße über die Querbeschleunigung. Durch die verknüpfte Wahrnehmung beider Größen (S. 22) ist der Fahrer in der Lage, die Querbeschleunigung besonders präzise wahrzunehmen. Dies kann auch als

Grund angenommen werden, warum im Doppelspurwechsel die Querbeschleunigung deutlich besser aufgelöst werden kann als die Gierrate.

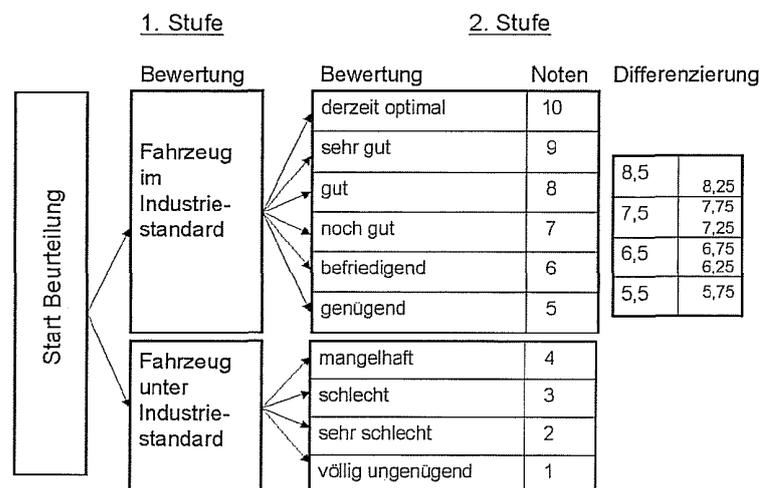
Die Überlegungen zu einer Wichtung der fahrdynamischen Größen lassen sich wie folgt zusammenfassen: In fahrerisch anspruchsvollen Situationen mit hohem Regelanteil wirkt sich ein schnelles Ansprechen der Querbeschleunigung besonders positiv auf die Subjektivbewertung aus. In weniger anspruchsvollen Fahrsituationen mit hohem Vorsteuerungsanteil verlieren Verzögerungszeiten gegenüber den stationären Verstärkungsfaktoren an Gewichtung, wobei die Unterschiede zwischen Gierrate und Querbeschleunigung verschwinden. Das Lenkmoment nimmt durch den kombinierten Charakter einer Stell- und Informationsgröße eine Sonderstellung ein. Von den Probanden (alle männlich) wurde generell ein höheres Lenkmoment bevorzugt, was in Einklang mit den Ergebnissen vorangegangener Untersuchungen steht [Bar04].

### 3.5.4 Beurteilung der Arbeitsergebnisse im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Methode Objektivierung

Ziel der Objektivierung ist das Schließen der Lücke zwischen verbal formulierten Beurteilungskriterien und mess- bzw. simulierbaren physikalischen Größen. Als maximale Zielerreichung kann gewertet werden, dass aus fahrdynamischen Größen wie Lenkwinkel und -moment, Gierrate, Querbeschleunigung und Wankwinkel die subjektive *Gefallens*bewertungen in der etablierten 10er-Notenskala (Bild 3.32) berechenbar ist.

Seit Beginn der Forschungsarbeiten zu diesem Thema wird die Erfahrung gemacht, dass die Erreichung dieses Maximalziels schwieriger ist, als die scheinbar einfache Aufgabenstellung vermuten lässt: Schließlich sind sämtliche Größen, welche dem Menschen durch seine Sinnesorgane zugänglich sind, auch durch Messtechnik erfassbar.

Um eine Beurteilung der vorliegenden Arbeitsergebnisse im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Methode *Objektivierung der Querdynamik* zu geben, müssen die größten Herausforderungen der Entwicklung identifiziert werden.



**Bild 3.32:** Notenskala zur Subjektivbewertung fahrdynamischer Eigenschaften [HB02]

#### Kriterien der Subjektivbeurteilung

Einen Überblick über die vielfältigen Beurteilungskriterien der Fahrdynamik geben HEISSING und BRANDL [HB02]. Beispielsweise wird als Entwicklungsziel für das Beurteilungskriterium *Spurwechselverhalten* angegeben:

*Das Fahrzeug sollte präzise und ohne Phasenverzug den vorgegebenen Lenkwinkeln folgen. Hektische Überreaktionen (Ausbrechen) oder Trägheit mit großen erforderlichen Lenkkorrekturen sind unerwünscht.* [HB02, S. 97]

Dieses Entwicklungsziel beinhaltet bereits Hinweise, an welchen physikalischen Effekten das Kriterium zu bemessen ist: Die Phasengänge der Fahrzeugreaktion auf Lenkwinkelaufgaben sollten möglichst flach verlaufen („ohne Phasenverzug“), große Lenkwinkelamplituden sind nicht erwünscht. Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit decken sich mit dem verbal formulierten Entwicklungsziel: Varianten mit kleinen Lenkwinkelmaxima (S. 68) und schnellem Ansprechen der Querbeschleunigung (S. 59) wurden im Versuchsabschnitt Doppelspurwechsel am besten beurteilt.

Keine physikalisch präzise definierbaren Kenngrößen enthält hingegen das Entwicklungsziel für das Beurteilungskriterium *Zielgenauigkeit*:

*Das Fahrzeug soll dem vorgegebenen Kurs störungsfrei folgen, der Bedarf an Lenkkorrekturen sollte gering sein. Bei guter Zielgenauigkeit empfindet man den Fahrtverlauf als rund und flüssig. Witterungsbedingte Störeinflüsse wie Seitenwind sollten mühelos ausregelbar sein.* [HB02, S. 83]

Anhand dieser Beschreibung hat der Experte des *Fahrversuchs* zwar eine ziemlich genaue Vorstellung davon, wie er ein Fahrzeug im Kriterium *Zielgenauigkeit* zu beurteilen hat. Offen bleibt hingegen, an welchen mess- oder simulierbaren Größen diese subjektiven Empfindungen („... empfindet man den Fahrtverlauf als rund und flüssig.“) festzumachen sind.

#### Quantifizierbarkeit

Ferner bleibt in beiden genannten Beurteilungskriterien die Quantifizierung oder Definition eines Optimalpunkts offen, da nur generelle Trends formuliert werden („je mehr/weniger, desto besser/schlechter“). Es bleibt also offen, bei welchem Phasenwinkel von Lenkwinkel zu Querbeschleunigung beispielsweise im Beurteilungskriterium *Spurwechselverhalten* die Grenze zwischen Bewertungsnote 7 und Bewertungsnote 8 zu ziehen ist.

Neuere Forschungsergebnisse beweisen, dass diese Optimalwerte sowohl vom Fahrzeugsegment [Har07] als auch von der Zielgruppe [Bar04] abhängen. Dies bedeutet einerseits, dass nur wenig Aussicht darauf besteht, in allen Beurteilungskriterien allgemeingültige Zielwerte definieren zu können, und andererseits, dass auch nach der Definition gut korrelierender Objektivkennwerte die Festlegung der *Zielwerte* kontinuierlich dem fortschreitenden Entwicklungsstandard angepasst werden muss.

Für viele bekannte Kennwerte ist kein identifizierter Optimalwert bekannt, die Subjektivbewertung weist also einen monotonen Verlauf über diesem Kennwert auf. Besteht eine direkte Abhängigkeit der Entwicklungs- und Produktionskosten zu diesem Kennwert, stellt sich aus betriebswirtschaftlicher Sicht automatisch folgende Frage: Werden Entwicklungsschritte vom Fahrer noch auflösbar sein, und werden sich zusätzliche Entwicklungsaufwände und somit -kosten in einer subjektiv wahrnehmbaren Verbesserung der Fahrdynamik bezahlt machen? Aus dieser Fragestellung ergibt sich direkt die nächste Frage nach *Wahrnehmungsschwellen*, welche im besten Fall zu einer eindeutigen Entscheidung bezüglich der Wirtschaftlichkeit führen sollen.

Aus technischer Sicht muss diese legitime Frage folgendermaßen beantwortet werden: Solange ein (streng) monotoner Zusammenhang zwischen einem Kennwert und einem Beurteilungskriterium existiert, muss eine Verbesserung der Subjektivbewertung – ausgehend von einem Referenzwert – möglich sein. Ob daraus entstehende Kosten zu rechtfertigen sind, muss an Hand quantifizierter Verhältnisse von Objektivkennwert zu Subjektivbewertung (z.B. [Har07]) entschieden werden, was voraussetzt, dass die Auswirkungen des Kennwerts zu *sämtlichen* relevanten Beurteilungskriterien bekannt sein müssen.

### **Beitrag der vorliegenden Arbeit zur Methodenentwicklung**

Als Herausforderungen bei der Entwicklung der Methode Objektivierung wurden in den vorangegangenen Abschnitten zwei Punkte definiert:

- die Überführung von lediglich „weich“ formulierbaren, subjektiv erlebten Fahrdynamikphänomenen in „harte“ physikalische Definitionen, und
- die Quantifizierung der Beziehung zwischen Kennwerten und der korrespondierenden Subjektivbewertung.

Die vorliegende Arbeit leistet dazu folgenden Beitrag:

Die Darstellung der Beziehungen zwischen der explizit abgefragten *quasi-objektiven Wahrnehmung* von Fahrdynamikexperten (Bild 1.15, Ebene 2) zu objektiv messbaren Kennwerten ermöglicht eine Abschätzung, welche Abweichungen zwischen den ingenieurmäßig verstandenen und den im Fahrzeug erlebten Phänomenen (z.B. „Überschwinger“) auftreten können. Die Berücksichtigung der vorliegenden Ergebnisse kann somit helfen, Fehlinterpretationen bei der Übersetzung weiterer subjektiver Beurteilungskriterien [HB02] in möglichst aussagefähige Objektivkennwerte zu vermeiden.

Gleichzeitig ergeben sich aus der Höhe der Korrelationen Anhaltspunkte zur Quantifizierung der Auswirkung objektiv messbarer Veränderungen auf die Subjektivbewertung. Die Aufteilung der Probandenversuche in verschiedene Fahrsituationen ermöglicht eine weitere Konkretisierung der Aussagen vom Allgemeinen ins Spezielle.



# 4 Zusammenfassung und Ausblick

## Zielsetzung der Arbeit

Als *Objektivierung* versteht man im Bereich der Fahrdynamik eine Methodik, die subjektiv empfundenen Eindrücke beim Fahren in objektiv fassbare Kennwerte zu überführen. Einer der Gründe hierfür ist der Wunsch, die Fahrdynamikentwicklung immer stärker ins Virtuelle, also die Computersimulation, zu verlagern.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist, die Objektivierbarkeit des querdynamischen Übertragungsverhaltens bis in den mittleren Querschleunigungsbereich voranzutreiben. Die Fahrdynamik im Grenzbereich wird dabei explizit von der Untersuchung ausgeschlossen.

## Versuchskonzept

Mit einem einzelnen Versuchsfahrzeug werden verschiedene querdynamische Eigenschaftsausprägungen im Probandenversuch mit Fahrdynamikexperten hinsichtlich ihrer Wahrnehmung und Gefallensbewertung untersucht. Während hinter der Bewertung der *Wahrnehmung* die Frage steht, ob eine fahrdynamische Größe als stärker oder schwächer erlebt wird, zielt die *Gefallensbewertung* auf die klassische Subjektivbewertung im Sinne von besser oder schlechter.

Die Bewertungen werden stets im Bezug auf eine Referenzvariante angegeben. Die Variation der Fahreigenschaften erfolgt über die Parametrierung von Vorderachs- und Hinterachslenksystem, wodurch die grundlegenden Eigenschaften *Direktheit*, *zeitliche Verzögerung*, *Phasendifferenz Gieren-Querschleunigung* sowie das *Lenkmoment* selektiv beeinflusst werden können. Gegenüber vorausgegangenen Untersuchungen im Realfahrzeug wird somit eine bisher nicht erreichte Unabhängigkeit der verschiedenen fahrdynamischen Größen realisiert. Auf eine Beeinflussung des Wankverhaltens wird auf Grund der komplexen Zusammenhänge mit den vier genannten grundlegenden Eigenschaften verzichtet.

Die gefahrenen Manöver sind ein mit Pylonen abgesteckter *Doppelspurwechsel* sowie *Anlenken* auf einer mehrspurigen Geraden eines Versuchsgeländes. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Probanden zu maximieren, werden die Fahrgeschwindigkeiten fest vorgegeben. Die Verschiedenheit der beiden Manöver erlaubt den Vergleich zwischen einer anspruchsvollen Fahraufgabe (Doppelspurwechsel) und einer entspannten, komfortorientierten Fahrsituation (Anlenken). Übertragen auf reale Fahraufgaben repräsentiert der Doppelspurwechsel

beispielsweise „sportliche“ Fahrweise auf kurvigen Landstraßen oder Ausweichmanöver, während das Anlenken beispielsweise für das Fahren auf gut ausgebauten Bundesstraßen ( $100 \frac{km}{h}$ ) bzw. schnelle Autobahnfahrt ( $180 \frac{km}{h}$ ) steht.

### Objektive Kennwerte

In einer Voruntersuchung werden mit Hilfe eines nichtlinearen, erweiterten Einspurmodells die bekannten Open-Loop-Manöver verglichen. Die aus ihnen ableitbaren skalaren Kennwerte werden für eine große Anzahl zufällig variiertes Einspurmodell-Parametersätze berechnet, mit der so generierten Datensammlung wird eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Als Ergebnis der virtuellen Voruntersuchung werden drei Fahrmanöver identifiziert, welche die größten Abweichungen untereinander zeigten und somit als essentielle Auswahl definiert werden können:

1. Sinuslenken mit steigender Frequenz und konstanter Lenkwinkelamplitude zur Ermittlung des Frequenzgangs,
2. Sinuslenken mit konstanter Frequenz und konstanter Lenkwinkelamplitude (Weavetest) zur Ermittlung der Phasendiagramme,
3. quasi-stationäres Anlenken aus Geradeausfahrt zur Ermittlung des Übergangverhaltens.

Anschließend werden diese drei Fahrmanöver auf ihre Durchführbarkeit ohne Lenkmaschine hin untersucht. Dahinter steht die Forderung nach einer möglichst einfachen und uneingeschränkten Anwendbarkeit der Messmethoden, denn beim Einsatz einer Lenkmaschine

- ist die Ausrüstung des Fahrzeugs mit der Lenkmaschine relativ aufwendig und steht so im Widerspruch zu sich ständig verdichtenden Entwicklungsabläufen in der Automobilindustrie, und
- für das Fahren mit Lenkmaschine ist aus Sicherheitsgründen eine sehr große Fahrdynamikfläche erforderlich.

Die beiden Manöver des Sinuslenkens werden mit einer stationären Querbeschleunigungsamplitude von  $4 \frac{m}{s^2}$  durchgeführt. Es zeigt sich, dass sie gut für eine händische Durchführung geeignet sind. Dabei muss zur Auswertung des Weavetests eine neuartige Routine zur Datenfilterung entwickelt werden, um unvermeidliche Schwankungen im Lenkwinkelverlauf – bedingt durch die händische Durchführung – auszugleichen.

Das quasi-stationäre Anlenken hingegen weist bei händischer Durchführung eine schlechte Wiederholgenauigkeit auf. Die so ermittelten Kennwerte weisen folglich starke Schwankungen auf, so dass auf eine Auswertung im Rahmen des Probandenversuchs verzichtet wird.

---

## Ergebnisse aus dem Doppelspurwechsel

Die Auswertung der Versuchsergebnisse aus dem Doppelspurwechsel ergibt grundlegende Unterschiede zwischen den Bewertungen in den Kategorien *quasi-objektiv* (Wahrnehmung) und *subjektiv* (Gefallen). Während die *Wahrnehmung* der fahrdynamischen Eigenschaften differenziert auf die acht Bewertungspunkte erfolgt, stellt sich die *Gefallensbewertung* eher eindimensional dar: Eine Variante wird über alle Bewertungspunkte hinweg eher gut oder eher schlecht beurteilt. Der Fall, dass Varianten in gewissen Bewertungspunkten besser und dafür in anderen Punkten schlechter beurteilt werden, tritt – im Mittel über alle Probanden – nicht auf. Dies lässt den Schluss zu, dass für eine gute Bewertung sämtliche fahrdynamischen Eigenschaften aufeinander abgestimmt sein müssen.

Die Korrelationen von Gierrate, Querbeschleunigung und Lenkmoment zur jeweiligen quasi-objektiven *Wahrnehmung* im Doppelspurwechsel ergeben, dass Unterschiede in der Gierreaktion zwischen den Varianten von den Probanden am schlechtesten unterschieden werden. Dies äußert sich in deutlich niedrigeren Korrelationskoeffizienten zu objektiven Kennwerten als sie bei Querbeschleunigung und Lenkmoment gefunden werden. Eine Erklärung hierfür ist, dass das Manöver Doppelspurwechsel stark vom Querbeschleunigungsaufbau beeinflusst wird, welcher durch die Hinterachslenkung gegenüber konventionell gelenkten Fahrzeugen eine deutlich größere Spreizung aufweist.

Insgesamt zeigen sich bei den Einzelkorrelationen objektiver Kennwerte zur *Wahrnehmung* sachlich gut nachvollziehbare Zusammenhänge. Beispielsweise wird das Kriterium *Lenkwinkelbedarf* am besten durch Kennwerte der Lenkwinkel-Querbeschleunigungs-Hysterese ausgedrückt, der *Lenkkraftverlauf* durch Lenkmoment-Querbeschleunigungs- bzw. -Gierraten-Hysterese, das *Gierverhalten* durch Kennwerte der Gierverstärkung. Es fällt auf, dass Kennwerte des *Weavetests* besser korrelieren als Kennwerte des *Frequenzgangs*, stationäre Verstärkungsfaktoren spielen eine untergeordnete Rolle.

Die bei den Probandenläufen mitgemessenen Closed-Loop-Daten werden ebenfalls auf Korrelationen zum subjektiven Urteil hin untersucht. Zwei daraus berechnete Fahrer-Fahrzeug-Kennwerte erzielen in einigen Bewertungskriterien deutlich höhere Korrelationen zur Subjektivbewertung als die einzelnen Open-Loop-Kennwerte. Diese Fahrer-Fahrzeug-Kennwerte quantifizieren die Lenkwinkelamplituden zwischen der ersten und zweiten Gasse des Doppelspurwechsels und beschreiben besonders gut den subjektiv wahrgenommenen Lenkwinkelbedarf.

Durch die Regression von jeweils zwei statt einem einzelnen Open-Loop-Kennwert zu den subjektiven Beurteilungen können einige Korrelationskoeffizienten deutlich angehoben werden. Die Kombination der stationären Verstärkung (Direktheit) mit der zeitlichen Verzögerung erzielt beispielsweise eine deutlich bessere Korrelation als die jeweiligen Kennwerte allein.

Es zeigt sich somit, dass die mitgemessenen Fahrereingaben durchaus eine höhere Aussagekraft bezüglich der Subjektivurteile haben können als einzelne Open-Loop-Kennwerte. Verknüpft man allerdings auf sinnvolle Weise Open-Loop-Kennwerte, können damit ähnlich hohe Korrelationen erzielt werden wie mit Closed-Loop-Kennwerten.

### Ergebnisse aus dem Anlenken

Analog zum Doppelspurwechsel werden die Ergebnisse des Anlenkens bei 100 und 180  $\frac{km}{h}$  ausgewertet. Es zeigt sich, dass die Korrelationen objektiver Kennwerte zur Wahrnehmung ein ähnliches Niveau aufweisen wie im ersten Versuchsabschnitt. Allerdings gibt es eine Verschiebung hin zu Kennwerten, welche stationäre Verstärkungen ausdrücken. Kennwerte, welche ein Maß für die Schnelligkeit der Fahrzeugreaktion sind, erzielen nur geringe Korrelationen zur quasi-objektiven Wahrnehmung.

Kennwerte, welche das Verhältnis von Lenkwinkel und Lenkmoment beschreiben, erzielen im Versuchsabschnitt Anlenken die meisten hohen Korrelationen. Gegenüber dem Doppelspurwechsel, der Kennwerte der Fahrzeugbewegung (Gieren und Querbewegung) stärker gewichtet, scheinen hier hauptsächlich die Lenkungeigenschaften im engeren Sinne über die subjektive Wahrnehmung zu entscheiden.

### Ausblick

Das querdynamische Verhalten wird von einer großen Zahl konstruktiver Parameter bestimmt. Entsprechend vielfältig sind die beobachtbaren Effekte. Der Einfluss dieser Effekte auf die einzelnen subjektiven Bewertungskriterien wiederum ist ebenso facettenreich und zusätzlich abhängig von Geschmacksfragen, beispielsweise einer angestrebten markenspezifischen Ausprägung, der Erwartungshaltung an eine Fahrzeugklasse und nicht zuletzt von persönlichen Präferenzen der Beurteiler [Bar04]. Auf Grund dieser Sachlage kann es nicht verwundern, dass den bisherigen Bemühungen zur Schaffung allgemeingültiger Objektivkennwerte bisher nicht der erhoffte Erfolg beschieden war.

Gibt man die Erwartungshaltung an die Objektivierung zur Schaffung *allgemeingültiger Gefallenskennwerte* auf, stellt sich die Situation hingegen sehr aussichtsreich dar. Wie im durchgeführten Probandenversuch gezeigt wird, ist die Ermittlung objektiver Kennwerte mit hoher Korrelation zur *Wahrnehmung der Querdynamik* ohne größeren Aufwand möglich. Die gefundenen Zusammenhänge zwischen der Wahrnehmung einzelner fahrdynamischer Größen und ihrer tatsächlichen objektiven Ausprägung ermöglichen eine Abschätzung, auf welche Weise sich grundlegende Fahrzeugeigenschaften wie Direktheit, Zeitverzögerungen, Phasenverhältnisse und Lenkmomentgestaltungen auf das Empfinden auswirken. Dabei ist insbesondere die anscheinend sehr große Bedeutung des Lenkmoments hervorzuheben: Die oft festzustellende Trennung der Querdynamik in einen rein lenkwinkelbezogenen Teil einerseits und das

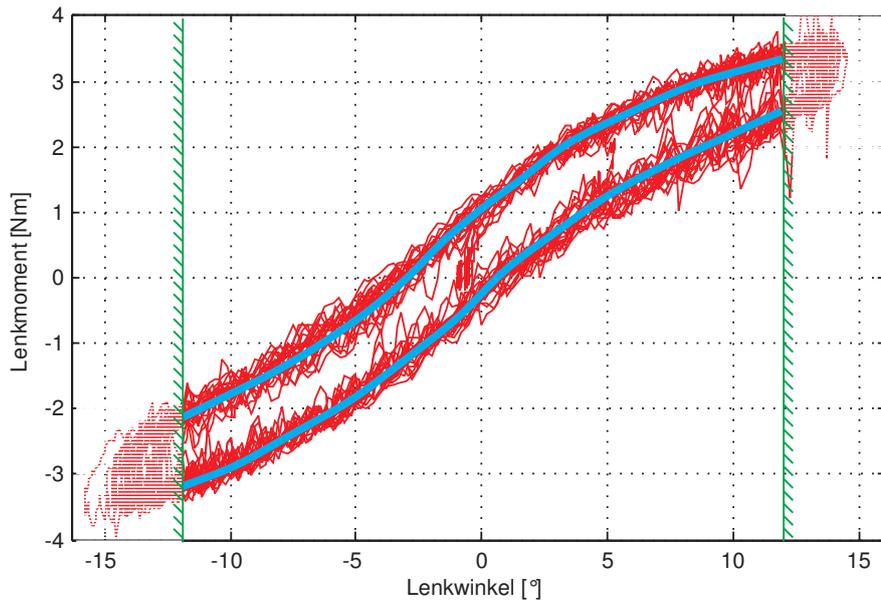
---

so genannte „Lenkgefühl“ andererseits scheint nicht mehr zielführend. Zu eng sind die vier primären fahrdynamischen Größen Lenkwinkel und -moment, Gierrate und Querschleunigung miteinander verknüpft, als dass eine Trennung in isoliert zu betrachtende Kennwerte sinnvoll erscheint.

Allerdings folgt hieraus, dass die Komplexität der Thematik nicht reduzierbar ist. Für die Erarbeitung, Interpretation und Anwendung von Ergebnissen der objektiven Querdynamik ist Expertenwissen gefragt. Kann dieses Expertenwissen gleichermaßen im Fahrversuch wie im Bereich der Simulation etabliert werden, stehen deutliche Effizienzsteigerungen in der Fahrdynamikentwicklung in Aussicht.



# 5 Anhang



*Bild 5.1: Datenglättung Weavetest nach ISO13674-1 [ISO03]*

Doppelspurwechsel, 100 km/h

	quasi-objektive Wahrnehmung						subjektive Gefallensbewertung									
	Lenkwinkelbedarf	Lenkkräftenauf	Lenkarbeit	Zielgenauigkeit	Seitenkräftenaufbau	Gierverhalten	Überschw. Gieren	Wankverhalten	Lenkwinkelbedarf	Lenkkräftenauf	Lenkarbeit	Zielgenauigkeit	Seitenkräftenaufbau	Gierverhalten	Überschw. Gieren	Wankverhalten
$TF(\dot{\psi}/\delta_H)_{stat}$ (01)	-0.44	0.01	-0.48	0.06	0.35	0.51	0.18	0.32	0.04	0.14	0.14	0.06	0.17	0.04	-0.00	-0.22
$TF(\dot{\psi}/\delta_H)_{r_{eq}}$ (04)	0.57	-0.27	0.67	-0.57	-0.57	-0.32	0.46	0.24	-0.60	-0.41	-0.65	-0.57	-0.63	-0.57	-0.44	-0.35
$TF(\dot{\psi}/\delta_H)_{f_{\sigma-SP}}$ (05)	-0.55	0.25	-0.64	0.56	0.54	0.30	-0.47	-0.27	0.59	0.38	0.63	0.56	0.61	0.56	0.45	0.33
$TF(\dot{\psi}/\delta_H)_{f_{\sigma-3\sigma}}$ (07)	-0.50	0.16	-0.63	0.44	0.50	0.33	-0.33	-0.19	0.49	0.29	0.54	0.44	0.54	0.43	0.31	0.23
$TF(\dot{\psi}/\delta_H)_{f_{\sigma-1\sigma}}$ (08)	-0.16	-0.17	-0.22	-0.19	0.07	0.12	0.27	0.16	-0.08	-0.15	-0.01	-0.19	0.00	-0.20	-0.25	-0.35
$TF(\dot{\psi}/\delta_H)_{f_{\sigma-2\sigma}}$ (09)	0.50	-0.45	0.48	-0.29	-0.34	-0.16	0.23	-0.01	-0.47	-0.44	-0.41	-0.29	-0.26	-0.21	-0.21	-0.22
$TF(\dot{y}/\delta_H)_{stat}$ (10)	-0.51	0.09	-0.53	0.14	0.42	0.53	0.09	0.28	0.11	0.22	0.21	0.14	0.25	0.13	0.08	-0.13
$TF(\dot{y}/\delta_H)_{r_{eq}}$ (13)	0.58	-0.48	0.50	-0.73	-0.60	-0.02	0.86	0.57	-0.69	-0.51	-0.65	-0.73	-0.69	-0.80	-0.85	-0.83
$TF(\dot{y}/\delta_H)_{f_{\sigma-SP}}$ (14)	-0.57	0.48	-0.47	0.68	0.59	-0.02	-0.82	-0.56	0.66	0.49	0.60	0.68	0.65	0.76	0.81	0.81
$TF(\dot{y}/\delta_H)_{f_{\sigma-3\sigma}}$ (16)	-0.60	0.48	-0.52	0.74	0.61	0.05	-0.87	-0.58	0.72	0.49	0.67	0.74	0.71	0.81	0.86	0.83
$TF(\dot{y}/\delta_H)_{f_{\sigma-1\sigma}}$ (17)	-0.21	0.09	-0.13	0.05	0.04	-0.01	-0.27	-0.14	0.15	-0.04	0.13	0.05	0.11	0.06	0.23	0.09
$TF(\dot{y}/\delta_H)_{f_{\sigma-2\sigma}}$ (18)	0.12	-0.42	-0.03	-0.07	-0.17	-0.05	0.07	-0.03	-0.06	-0.18	-0.02	-0.07	-0.14	-0.20	-0.09	-0.27
$TF(M_H/\delta_H)_{stat}$ (19)	-0.57	0.68	-0.33	0.31	0.36	0.35	-0.07	0.15	0.33	0.64	0.35	0.31	0.28	0.33	0.20	0.05
$TF(M_H/\delta_H)_{f_{\sigma-3\sigma}}$ (25)	-0.53	0.17	-0.55	0.64	0.59	0.05	-0.84	-0.59	0.63	0.26	0.61	0.64	0.66	0.72	0.79	0.75
$TF(M_H/\delta_H)_{f_{\sigma-1\sigma}}$ (26)	-0.01	0.19	0.17	0.01	0.08	-0.15	0.06	0.05	-0.01	0.18	0.00	0.01	-0.10	-0.02	0.03	-0.07
$H(M_H/\delta_H)_x$ (28)	0.34	-0.33	0.31	-0.61	-0.42	0.13	0.86	0.72	-0.59	-0.38	-0.52	-0.61	-0.54	-0.66	-0.73	-0.80
$H(M_H/\delta_H)_y$ (29)	-0.62	0.61	-0.53	0.78	0.61	0.11	-0.84	-0.57	0.77	0.66	0.71	0.78	0.71	0.81	0.80	0.80
$H(M_H/\delta_H)_{y/x}$ (30)	-0.37	0.40	-0.27	0.06	0.18	0.45	0.37	0.52	0.10	0.36	0.13	0.06	0.08	0.01	-0.16	-0.31
$H(M_H/\delta_H)_A$ (31)	-0.22	0.45	-0.10	0.52	0.29	-0.25	-0.70	-0.64	0.54	0.41	0.42	0.52	0.42	0.54	0.58	0.74
$H(M_H/\delta_H)_{\Delta y}$ (32)	-0.29	-0.01	-0.36	0.47	0.41	-0.15	-0.78	-0.63	0.45	0.08	0.41	0.47	0.47	0.55	0.69	0.70
$H(\partial M_H/\partial \delta_H)_{max}$ (33)	-0.52	0.36	-0.48	0.18	0.38	0.56	0.17	0.37	0.19	0.42	0.24	0.18	0.23	0.15	0.02	-0.17
$H(\partial M_H/\partial \delta_H)_{min}$ (34)	0.07	-0.16	0.05	-0.27	-0.27	-0.12	0.18	0.19	-0.26	-0.28	-0.27	-0.27	-0.19	-0.15	-0.14	-0.08
$H(\partial M_H/\partial \delta_H)_{\Delta y}$ (35)	-0.52	0.47	-0.41	0.26	0.35	0.54	0.08	0.35	0.21	0.50	0.28	0.26	0.23	0.23	0.11	-0.12
$H(\partial M_H/\partial \delta_H)_{\Delta y}^{max}$ (36)	0.14	0.03	0.25	-0.18	-0.11	-0.04	0.07	-0.11	-0.10	0.02	-0.19	-0.18	-0.05	-0.22	-0.21	-0.08
$H(\dot{y}/\delta_H)_x$ (37)	0.76	-0.36	0.78	-0.71	-0.70	-0.32	0.70	0.38	-0.71	-0.47	-0.71	-0.71	-0.77	-0.77	-0.75	-0.60
$H(\dot{y}/\delta_H)_y$ (38)	-0.64	0.33	-0.65	0.72	0.60	0.19	-0.82	-0.52	0.70	0.42	0.68	0.72	0.74	0.79	0.81	0.70
$H(\dot{y}/\delta_H)_{y/x}$ (39)	-0.20	0.02	-0.19	-0.23	0.14	0.33	0.52	0.53	-0.17	0.04	-0.11	-0.23	-0.09	-0.26	-0.36	-0.44
$H(\dot{y}/\delta_H)_A$ (40)	-0.75	0.36	-0.75	0.72	0.69	0.26	-0.77	-0.44	0.70	0.45	0.71	0.72	0.76	0.80	0.82	0.67
$H(\dot{y}/\delta_H)_{\Delta y}$ (41)	-0.61	0.29	-0.62	0.65	0.61	0.09	-0.79	-0.58	0.66	0.35	0.64	0.65	0.70	0.74	0.76	0.73
$H(\partial \dot{y}/\partial \delta_H)_{max}$ (42)	-0.31	-0.03	-0.35	0.08	0.26	0.34	-0.00	0.08	0.04	0.06	0.08	0.08	0.18	0.14	0.14	-0.01
$H(\partial \dot{y}/\partial \delta_H)_{min}$ (43)	-0.24	0.02	-0.29	-0.12	0.17	0.38	0.43	0.48	-0.08	0.09	0.00	-0.12	-0.02	-0.14	-0.27	-0.39
$H(\partial \dot{y}/\partial \delta_H)_{\Delta y}$ (44)	-0.56	0.14	-0.56	0.22	0.46	0.53	-0.02	0.23	0.20	0.25	0.26	0.22	0.33	0.23	0.20	-0.04
$H(\partial \dot{y}/\partial \delta_H)_{\Delta y}^{max}$ (45)	-0.12	-0.04	-0.11	0.22	0.12	-0.00	-0.46	-0.42	0.15	-0.02	0.09	0.22	0.23	0.33	0.46	0.41
$H(\dot{\psi}/\delta_H)_x$ (46)	0.46	-0.00	0.61	-0.19	-0.37	-0.44	-0.04	-0.13	-0.25	-0.13	-0.32	-0.19	-0.35	-0.19	0.03	0.12
$H(\dot{\psi}/\delta_H)_y$ (47)	-0.27	-0.08	-0.47	0.15	0.21	0.34	-0.00	0.05	0.21	0.06	0.26	0.15	0.27	0.14	0.01	-0.10
$H(\dot{\psi}/\delta_H)_{y/x}$ (48)	-0.31	0.18	-0.17	0.02	0.28	0.16	0.15	0.23	0.01	0.14	0.05	0.02	0.06	0.02	0.01	-0.05
$H(\dot{\psi}/\delta_H)_A$ (49)	-0.58	0.08	-0.73	0.40	0.49	0.46	-0.26	-0.06	0.42	0.24	0.50	0.40	0.52	0.42	0.32	0.11
$H(\dot{\psi}/\delta_H)_{\Delta y}$ (50)	-0.46	0.08	-0.56	0.32	0.46	0.21	-0.32	-0.26	0.41	0.18	0.43	0.32	0.46	0.35	0.28	0.24
$H(\partial \dot{\psi}/\partial \delta_H)_{max}$ (51)	-0.31	-0.13	-0.33	0.01	0.18	0.28	0.05	0.15	-0.03	-0.02	0.04	0.01	0.09	0.04	0.11	-0.14
$H(\partial \dot{\psi}/\partial \delta_H)_{min}$ (52)	-0.15	-0.09	-0.14	-0.14	0.11	0.33	0.48	0.54	-0.15	-0.08	-0.01	-0.14	-0.11	-0.22	-0.28	-0.44
$H(\partial \dot{\psi}/\partial \delta_H)_{\Delta y}$ (53)	-0.47	0.07	-0.48	0.11	0.37	0.54	0.12	0.33	0.10	0.19	0.18	0.11	0.22	0.11	0.05	-0.19
$H(\partial \dot{\psi}/\partial \delta_H)_{\Delta y}^{max}$ (54)	-0.17	-0.05	-0.21	0.15	0.08	-0.04	-0.44	-0.40	0.11	0.05	0.04	0.15	0.20	0.27	0.41	0.29
$H(\dot{y}/\dot{\psi})_x$ (55)	0.36	-0.41	0.20	-0.54	-0.38	0.12	0.76	0.52	-0.48	-0.38	-0.41	-0.54	-0.45	-0.62	-0.75	-0.75
$H(\dot{y}/\dot{\psi})_y$ (56)	-0.36	0.41	-0.21	0.55	0.38	-0.10	-0.77	-0.52	0.49	0.38	0.42	0.55	0.46	0.63	0.76	0.76
$H(\dot{y}/\dot{\psi})_{y/x}$ (57)	0.16	-0.12	0.06	-0.32	-0.21	0.07	0.48	0.36	-0.20	-0.14	-0.23	-0.32	-0.23	-0.34	-0.46	-0.43
$H(\dot{y}/\dot{\psi})_A$ (58)	-0.31	0.36	-0.15	0.47	0.33	-0.17	-0.69	-0.49	0.42	0.30	0.35	0.47	0.39	0.56	0.68	0.71
$H(\dot{y}/\dot{\psi})_{\Delta y}$ (59)	-0.34	0.34	-0.25	0.54	0.37	-0.13	-0.76	-0.56	0.46	0.32	0.41	0.54	0.46	0.64	0.75	0.77
$H(\partial \dot{y}/\partial \dot{\psi})_{max}$ (60)	-0.43	0.44	-0.32	0.38	0.39	-0.01	-0.34	-0.20	0.42	0.37	0.32	0.38	0.38	0.46	0.38	0.46
$H(\partial \dot{y}/\partial \dot{\psi})_{min}$ (61)	0.14	-0.17	0.10	-0.22	-0.05	0.08	0.30	0.18	-0.18	-0.22	-0.14	-0.22	-0.14	-0.25	-0.38	-0.21
$H(\partial \dot{y}/\partial \dot{\psi})_{\Delta y}$ (62)	-0.46	0.33	-0.38	0.57	0.45	0.01	-0.80	-0.51	0.53	0.33	0.46	0.57	0.57	0.69	0.78	0.78
$H(\partial \dot{y}/\partial \dot{\psi})_{\Delta y}^{max}$ (63)	-0.42	0.43	-0.31	0.38	0.36	-0.04	-0.37	-0.22	0.41	0.39	0.31	0.38	0.37	0.46	0.43	0.46
$H(\dot{y}/M_H)_x$ (64)	-0.01	0.67	0.26	0.10	-0.02	-0.07	0.04	0.04	0.14	0.50	0.05	0.10	-0.08	0.02	-0.03	0.10
$H(\dot{y}/M_H)_y$ (65)	-0.28	0.07	-0.26	0.27	0.10	0.18	-0.23	-0.01	0.25	-0.00	0.26	0.27	0.30	0.34	0.33	0.17
$H(\dot{y}/M_H)_{y/x}$ (66)	0.22	-0.73	-0.06	-0.31	-0.06	-0.07	0.13	-0.03	-0.33	-0.50	-0.25	-0.31	-0.15	-0.28	-0.21	-0.23
$H(\dot{y}/M_H)_A$ (67)	-0.03	-0.56	-0.28	-0.07	-0.01	0.18	0.01	0.06	-0.14	-0.41	-0.01	-0.07	0.07	0.01	0.01	-0.17
$H(\dot{y}/M_H)_{\Delta y}$ (68)	0.05	-0.66	-0.25	-0.11	0.04	0.13	-0.05	-0.07	-0.18	-0.44	-0.07	-0.11	0.05	-0.04	-0.01	-0.08
$H(\partial \dot{y}/\partial M_H)_{max}$ (69)	0.12	-0.53	-0.04	-0.12	0.00	-0.13	-0.13	-0.19	-0.05	-0.49	-0.12	-0.12	0.05	-0.08	0.04	0.15
$H(\partial \dot{y}/\partial M_H)_{min}$ (70)	0.11	-0.63	-0.16	-0.28	-0.03	0.05	0.25	0.13	-0.27	-0.43	-0.16	-0.28	-0.10	-0.27	-0.29	-0.36
$H(\partial \dot{y}/\partial M_H)_{\Delta y}$ (71)	0.12	-0.65	-0.10	-0.16	0.01	-0.08	-0.04	-0.17	-0.11	-0.55	-0.12	-0.16	0.03	-0.14	-0.05	0.04
$H(\partial \dot{y}/\partial M_H)_{\Delta y}^{max}$ (72)	0.05	-0.14	0.07	0.05	0.03	-0.17	-0.32	-0.31	0.13	-0.25	-0.02	0.05	0.12	0.09	0.24	0.42
$H(\dot{\psi}/M_H)_x$ (73)	-0.26	0.75	0.03	0.45	0.25	-0.08	-0.49	-0.31	0.44	0.61	0.32	0.45	0.27	0.45	0.49	0.57
$H(\dot{\psi}/M_H)_y$ (74)	0.12	-0.29	-0.05	-0.29	-0.22	0.29	0.52	0.45	-0.27	-0.23	-0.18	-0.29				

Anlenken auf der Geraden, 100 km/h

	quasi-objektive Wahrnehmung						subjektive Gefallensbewertung												
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (01)	-0.75	-0.16	0.58	0.48	0.43	0.60	0.31	0.51	0.55	0.72	-0.25	0.61	0.75	0.31	0.64	0.50	0.37	0.42	-0.14
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>T<sub>eq</sub></sub> (04)	0.08	0.29	-0.52	-0.39	0.17	-0.03	-0.25	-0.30	-0.40	-0.24	0.31	-0.41	-0.05	-0.29	-0.38	-0.26	-0.08	0.04	0.22
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>T<sub>eq</sub></sub> (05)	-0.07	-0.27	0.53	0.36	-0.19	0.01	0.24	0.28	0.42	0.23	-0.30	0.40	0.04	0.27	0.39	0.24	0.05	-0.06	-0.23
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>ε<sub>1D</sub></sub> (07)	-0.12	-0.24	0.57	0.36	-0.09	0.13	0.26	0.25	0.38	0.31	-0.23	0.41	0.07	0.25	0.40	0.21	0.03	-0.03	-0.22
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>L</sub> (08)	-0.40	-0.15	0.74	0.45	0.10	0.31	0.41	0.35	0.56	0.61	-0.19	0.59	0.33	0.25	0.62	0.32	0.10	0.08	-0.31
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (10)	-0.74	-0.17	0.57	0.49	0.40	0.58	0.29	0.53	0.56	0.69	-0.26	0.60	0.76	0.33	0.65	0.51	0.38	0.43	-0.13
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>T<sub>eq</sub></sub> (13)	-0.31	0.18	-0.02	-0.10	0.63	0.42	0.28	-0.23	-0.19	0.39	-0.29	-0.02	-0.17	-0.17	-0.16	-0.29	0.03	-0.01	-0.19
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>T<sub>eq</sub></sub> (14)	0.32	-0.13	-0.02	0.05	-0.62	-0.44	-0.30	0.18	0.16	-0.42	-0.24	-0.02	0.15	0.13	0.12	0.25	-0.06	-0.01	0.19
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>ε<sub>1D</sub></sub> (16)	0.28	-0.21	0.11	0.12	-0.62	-0.38	-0.24	0.24	0.23	-0.35	-0.30	0.07	0.17	0.21	0.20	0.29	-0.04	0.01	0.15
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>L</sub> (17)	-0.25	-0.15	0.70	0.29	-0.09	0.19	0.16	0.27	0.56	0.33	-0.18	0.53	0.34	0.27	0.58	0.24	0.04	0.07	-0.10
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (18)	0.15	-0.02	-0.51	-0.04	0.11	-0.04	-0.14	-0.10	-0.47	-0.18	0.06	-0.35	-0.14	-0.10	-0.43	-0.00	0.05	0.04	0.15
TF( $\psi/\delta_H$ ) <sub>T<sub>eq</sub></sub> (19)	-0.47	-0.76	0.70	0.86	-0.04	0.67	-0.29	0.78	0.36	0.36	-0.61	0.75	0.72	0.82	0.70	0.84	0.75	0.74	0.53
TF(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>stat</sub> (25)	0.22	0.04	0.01	-0.04	-0.45	-0.40	-0.03	0.13	0.29	-0.28	-0.16	0.00	0.13	-0.02	0.15	0.15	-0.15	-0.08	-0.08
TF(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>ε<sub>1D</sub></sub> (26)	0.35	0.06	-0.32	-0.21	-0.40	-0.28	-0.39	0.07	0.07	-0.43	-0.12	-0.11	0.17	-0.05	-0.08	0.09	0.03	0.20	0.30
	Lenkwinkelbedarf	Überschwinger	Lenkm. nied. Querb.	Lenkm. hohe Querb.	Gierreaktion	Seitenkraftaufbau	Wankreaktion	allg. Gefallen	Linearität	Anspruchverhalten	Aufziehen	Zielgenauigkeit	Lenkwinkelbedarf	Überschwinger	Lenkm. nied. Querb.	Lenkm. hohe Querb.	Gierreaktion	Seitenkraftaufbau	Wankreaktion
H(ΔM <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>x</sub> (28)	-0.32	0.12	0.06	0.04	0.52	0.31	0.27	-0.08	-0.05	0.50	0.16	0.08	-0.03	-0.12	-0.03	-0.12	0.08	-0.05	-0.18
H(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>y</sub> (29)	0.07	-0.41	0.35	0.32	-0.53	-0.11	-0.31	0.50	0.39	-0.26	-0.52	0.30	0.38	0.44	0.45	0.47	0.20	0.24	0.27
H(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>y/x</sub> (30)	-0.43	-0.49	0.70	0.63	0.01	0.34	-0.08	0.72	0.58	0.42	-0.62	0.65	0.59	0.53	0.71	0.60	0.48	0.33	0.16
H(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>A</sub> (31)	0.46	-0.37	-0.03	0.12	-0.62	-0.26	-0.52	0.16	-0.15	-0.62	-0.30	-0.09	-0.11	0.27	-0.01	0.19	0.05	0.09	0.45
H(M <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>Δy</sub> (32)	-0.02	-0.64	0.28	0.55	-0.26	0.43	-0.51	0.44	-0.12	-0.11	-0.36	0.32	0.37	0.63	0.28	0.57	0.51	0.62	0.70
H(ΔM <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>max</sub> (33)	-0.61	-0.55	0.74	0.79	0.19	0.66	-0.03	0.76	0.47	0.51	-0.57	0.71	0.70	0.61	0.76	0.75	0.57	0.57	0.20
H(ΔM <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>min</sub> (34)	-0.06	-0.15	0.19	-0.05	0.03	0.13	-0.24	0.11	-0.10	-0.16	0.01	-0.07	0.20	0.15	0.13	-0.01	-0.11	0.06	0.20
H(ΔM <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>max</sub> (35)	-0.49	-0.73	0.65	0.82	0.02	0.68	-0.26	0.74	0.30	0.40	-0.56	0.69	0.68	0.78	0.65	0.78	0.71	0.70	0.49
H(ΔM <sub>H</sub> /δ <sub>H</sub> ) <sub>min</sub> (36)	-0.05	-0.57	0.25	0.29	-0.13	0.28	-0.38	0.38	0.01	-0.28	-0.39	0.19	0.23	0.54	0.21	0.30	0.32	0.39	0.43
H( $\psi/\delta_H$ ) <sub>x</sub> (37)	0.28	0.39	-0.51	-0.49	0.21	-0.14	0.00	-0.55	-0.52	-0.07	0.51	-0.44	-0.52	-0.46	-0.58	-0.58	-0.22	-0.29	-0.03
H( $\psi/\delta_H$ ) <sub>y</sub> (38)	0.15	-0.38	0.20	0.26	-0.49	-0.17	-0.22	0.32	0.20	-0.35	-0.42	0.12	0.14	0.35	0.25	0.35	0.07	0.11	0.16
H( $\psi/\delta_H$ ) <sub>y/x</sub> (39)	-0.76	-0.04	0.58	0.44	0.48	0.57	0.39	0.42	0.58	0.74	-0.18	0.59	0.69	0.22	0.62	0.44	0.29	0.34	-0.23
H( $\psi/\delta_H$ ) <sub>A</sub> (40)	-0.10	-0.24	0.36	0.28	-0.34	-0.12	-0.01	0.43	0.55	-0.02	-0.42	0.33	0.47	0.31	0.47	0.43	0.07	0.13	-0.03
H( $\psi/\delta_H$ ) <sub>Δy</sub> (41)	0.37	-0.20	0.07	-0.03	-0.69	-0.43	-0.29	0.22	0.29	-0.35	-0.27	0.08	0.20	0.21	0.16	0.18	-0.04	0.00	0.19
H(Δ $\psi/\delta_H$ ) <sub>max</sub> (42)	-0.43	-0.20	0.28	0.19	0.23	0.68	-0.18	0.36	0.19	0.39	-0.08	0.44	0.60	0.35	0.39	0.29	0.53	0.71	0.36
H(Δ $\psi/\delta_H$ ) <sub>min</sub> (43)	-0.75	-0.12	0.63	0.48	0.46	0.59	0.36	0.48	0.57	0.70	-0.23	0.60	0.74	0.27	0.65	0.47	0.27	0.35	-0.20
H(Δ $\psi/\delta_H$ ) <sub>max</sub> (44)	-0.73	-0.21	0.54	0.49	0.36	0.61	0.24	0.53	0.52	0.68	-0.25	0.61	0.79	0.38	0.63	0.54	0.42	0.50	-0.07
H(Δ $\psi/\delta_H$ ) <sub>min</sub> (45)	-0.11	-0.17	-0.01	-0.02	0.02	0.47	-0.39	0.17	-0.08	0.08	0.03	0.20	0.31	0.26	0.11	0.10	0.47	0.64	0.52
H( $\psi/\delta_H$ ) <sub>x</sub> (46)	0.53	0.30	-0.81	-0.61	-0.21	-0.45	-0.40	-0.47	-0.58	-0.58	0.38	-0.63	-0.36	-0.37	-0.68	-0.44	-0.18	-0.14	0.30
H( $\psi/\delta_H$ ) <sub>y</sub> (47)	-0.18	-0.37	0.61	0.43	-0.03	0.21	0.20	0.30	0.31	0.25	-0.32	0.39	0.05	0.34	0.41	0.24	0.07	-0.01	-0.16
H( $\psi/\delta_H$ ) <sub>y/x</sub> (48)	-0.68	0.13	0.35	0.32	0.49	0.47	0.38	0.32	0.50	0.64	-0.10	0.46	0.62	0.04	0.49	0.38	0.25	0.33	-0.25
H( $\psi/\delta_H$ ) <sub>A</sub> (49)	-0.42	-0.30	0.77	0.51	0.03	0.27	0.35	0.49	0.69	0.48	-0.41	0.63	0.42	0.38	0.68	0.43	0.15	0.12	-0.30
H( $\psi/\delta_H$ ) <sub>Δy</sub> (50)	0.20	-0.15	0.42	0.09	-0.45	-0.27	0.02	0.25	0.52	0.01	-0.30	0.30	0.16	0.17	0.36	0.12	-0.11	-0.15	-0.10
H(Δ $\psi/\delta_H$ ) <sub>max</sub> (51)	-0.44	-0.08	0.17	0.15	0.16	0.49	-0.05	0.29	0.24	0.49	-0.03	0.38	0.55	0.23	0.34	0.27	0.48	0.57	0.20
H(Δ $\psi/\delta_H$ ) <sub>min</sub> (52)	-0.61	0.22	0.35	0.16	0.53	0.38	0.49	0.23	0.56	0.67	-0.04	0.42	0.54	-0.06	0.42	0.19	0.11	0.15	-0.40
H(Δ $\psi/\delta_H$ ) <sub>max</sub> (53)	-0.75	-0.20	0.57	0.50	0.43	0.65	0.29	0.52	0.52	0.74	-0.23	0.63	0.76	0.36	0.63	0.52	0.42	0.48	-0.11
H(Δ $\psi/\delta_H$ ) <sub>min</sub> (54)	0.00	-0.30	-0.09	0.06	-0.26	0.24	-0.47	0.15	-0.21	-0.01	-0.01	0.09	0.18	0.34	0.04	0.17	0.45	0.53	0.58
H( $\psi/\psi$ ) <sub>x</sub> (55)	-0.29	0.06	0.35	0.15	0.43	0.33	0.43	-0.03	0.12	0.55	0.10	0.24	-0.11	-0.06	0.14	-0.10	-0.02	-0.13	-0.35
H( $\psi/\psi$ ) <sub>y</sub> (56)	0.30	-0.06	-0.36	-0.16	-0.43	-0.33	-0.43	0.03	-0.12	-0.55	-0.10	-0.25	0.11	0.06	-0.15	0.09	0.02	0.12	0.35
H( $\psi/\psi$ ) <sub>y/x</sub> (57)	-0.27	-0.47	0.57	0.52	0.01	0.31	-0.02	0.31	0.12	0.33	-0.27	0.36	0.09	0.43	0.38	0.32	0.18	0.08	0.10
H( $\psi/\psi$ ) <sub>A</sub> (58)	0.34	0.04	-0.37	-0.22	-0.45	-0.45	-0.37	-0.03	-0.07	-0.54	-0.06	-0.28	0.07	-0.05	-0.17	0.03	-0.09	-0.01	0.26
H( $\psi/\psi$ ) <sub>Δy</sub> (59)	0.37	0.04	-0.44	-0.27	-0.45	-0.42	-0.42	-0.07	-0.18	-0.50	0.04	-0.32	0.10	-0.05	-0.24	-0.01	-0.07	0.02	0.34
H(Δ $\psi/\psi$ ) <sub>max</sub> (60)	0.14	-0.24	0.19	0.16	-0.37	-0.17	-0.38	0.11	-0.08	-0.18	-0.10	-0.04	0.14	0.19	0.15	0.20	-0.14	-0.08	0.34
H(Δ $\psi/\psi$ ) <sub>min</sub> (61)	-0.19	0.36	0.16	-0.01	0.34	-0.10	0.54	-0.11	0.21	0.31	0.17	0.08	-0.14	-0.32	0.08	-0.14	-0.18	-0.36	-0.56
H(Δ $\psi/\psi$ ) <sub>max</sub> (62)	0.12	-0.29	-0.20	0.02	-0.41	-0.03	-0.50	0.18	-0.14	-0.43	-0.18	-0.08	0.13	0.30	-0.01	0.21	0.30	0.41	0.49
H(Δ $\psi/\psi$ ) <sub>min</sub> (63)	0.17	-0.31	0.08	0.12	-0.40	-0.09	-0.48	0.12	-0.14	-0.25	-0.13	-0.06	0.15	0.26	0.08	0.20	-0.04	0.07	0.46
H( $\psi/M_H$ ) <sub>x</sub> (64)	0.11	-0.53	0.46	0.42	-0.48	-0.05	-0.53	0.63	0.36	-0.09	-0.64	0.42	0.36	0.48	0.50	0.47	0.41	0.24	0.52
H( $\psi/M_H$ ) <sub>y</sub> (65)	0.39	-0.11	-0.20	-0.11	-0.28	-0.50	-0.07	-0.15	-0.18	-0.34	-0.14	-0.32	-0.56	-0.08	-0.32	-0.22	-0.24	-0.48	-0.10
H( $\psi/M_H$ ) <sub>y/x</sub> (66)	-0.33	0.41	-0.18	-0.20	0.50	0.36	0.41	-0.32	-0.12	0.29	0.51	-0.07	0.11	-0.27	-0.13	-0.17	-0.11	0.15	-0.29
H( $\psi/M_H$ ) <sub>A</sub> (67)	0.21	0.69	-0.41	-0.67	0.11	-0.58	0.48	-0.58	0.04	-0.07	0.44	-0.46	-0.43	-0.69	-0.42	-0.65	-0.68	-0.71	-0.69
H( $\psi/M_H$ ) <sub>Δy</sub> (68)	0.08	-0.54	0.07	0.31	-0.18	0.38	-0.41	0.16	-0.27	-0.11	-0.15	0.16	0.11	0.50	-0.01	0.27	0.38	0.47	0.58
H(Δ $\psi/M_H$ ) <sub>max</sub> (69)	-0.18	0.15	-0.18	0.04	0.36	0.11	0.27	-0.24	-0.51	-0.05	0.27	-0.39	-0.35	-0.23	-0.22	-0.11	-0.21	-0.17	-0.26
H(Δ $\psi/M_H$ ) <sub>min</sub> (70)	-0.12	0.65	-0.34	-0.50	0.39	-0.07	0.50	-0.59	-0.17	0.22	0.70	-0.33	-0.13	-0.54	-0.35	-0.48	-0.46	-0.31	-0.49
H(Δ $\psi/M_H$ ) <sub>max</sub> (71)	-0.04	0.32	-0.40	-0.57	0.48	-0.30	0.75	-0.62	-0.07	0.10	0.56	-0.47	-0.40	-0.79	-0.41	-0.62	-0.67	-	

Anlenken auf der Geraden, 180 km/h

	quasi-objektive Wahrnehmung						subjektive Gefallensbewertung												
	Lenkwinkelbedarf	Überschwinger	Lenkm. nied. Querb.	Lenkm. hohe Querb.	Gierreaktion	Seitenkraftaufbau	Wankreaktion	allg. Gefallen	Linearität	Ansprechverhalten	Aufziehen	Zielgenauigkeit	Lenkwinkelbedarf	Überschwinger	Lenkm. nied. Querb.	Lenkm. hohe Querb.	Gierreaktion	Seitenkraftaufbau	Wankreaktion
TF( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (01)	-0.71	0.20	0.30	0.39	0.37	0.38	0.65	-0.27	-0.45	0.69	-0.08	-0.10	-0.75	-0.19	0.28	0.37	-0.36	-0.46	-0.61
TF( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>r<sub>tr</sub></sub> (04)	-0.12	0.50	-0.20	-0.09	0.52	-0.17	0.17	-0.26	0.02	-0.21	-0.00	-0.01	-0.21	-0.56	-0.20	-0.08	-0.35	-0.32	-0.10
TF( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>r<sub>tr</sub>-sp</sub> (05)	0.12	-0.50	0.20	0.08	-0.52	0.15	-0.17	0.26	-0.02	0.19	0.02	0.01	0.21	0.56	0.20	0.06	0.34	0.31	0.10
TF( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>r<sub>tr</sub>LD</sub> (07)	-0.02	-0.37	0.44	0.26	-0.43	0.10	-0.07	0.33	0.01	0.29	-0.11	0.05	0.14	0.44	0.42	0.22	0.38	0.28	0.01
TF( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>U</sub> (08)	-0.22	-0.25	0.43	0.32	-0.23	0.15	0.16	0.20	-0.09	0.43	-0.16	0.00	-0.08	0.30	0.41	0.28	0.22	0.10	-0.19
TF( $\dot{y}/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (10)	-0.74	0.19	0.32	0.38	0.41	0.33	0.69	-0.30	-0.52	0.68	-0.01	-0.09	-0.80	-0.19	0.29	0.34	-0.42	-0.51	-0.66
TF( $\dot{y}/\delta_H$ ) <sub>r<sub>tr</sub></sub> (13)	-0.15	0.35	-0.53	-0.20	0.46	0.22	0.19	-0.22	0.01	0.15	0.10	-0.32	-0.20	-0.33	-0.52	-0.20	-0.32	-0.24	-0.13
TF( $\dot{y}/\delta_H$ ) <sub>r<sub>tr</sub>-sp</sub> (14)	0.15	-0.34	0.51	0.18	-0.44	-0.22	-0.18	0.20	-0.03	-0.15	-0.07	0.32	0.19	0.32	0.50	0.18	0.30	0.23	0.11
TF( $\dot{y}/\delta_H$ ) <sub>r<sub>tr</sub>LD</sub> (16)	0.11	-0.25	0.59	0.21	-0.39	-0.23	-0.17	0.19	-0.02	-0.17	-0.08	0.32	0.13	0.23	0.57	0.20	0.25	0.17	0.10
TF( $\dot{y}/\delta_H$ ) <sub>U</sub> (17)	-0.18	-0.14	0.42	0.31	-0.28	0.09	0.19	0.12	-0.18	0.48	-0.13	-0.03	-0.06	0.19	0.40	0.30	0.26	0.12	-0.24
TF( $\dot{y}/\delta_H$ ) <sub>r<sub>tr</sub>LD</sub> (18)	-0.16	-0.35	0.50	0.43	-0.36	0.33	0.04	0.30	-0.02	0.43	-0.25	0.08	-0.01	0.41	0.49	0.42	0.34	0.23	-0.08
TF( $\dot{y}/\delta_H$ ) <sub>stat</sub> (19)	-0.68	0.02	0.66	0.68	0.23	0.44	0.33	0.08	-0.21	0.52	-0.24	0.26	-0.55	-0.04	0.67	0.66	-0.13	-0.21	-0.30
TF( $\dot{y}/\delta_H$ ) <sub>r<sub>tr</sub>LD</sub> (25)	0.08	-0.16	0.44	0.19	-0.24	-0.24	-0.11	0.11	-0.13	-0.16	0.01	0.35	0.08	0.11	0.43	0.20	0.18	0.13	0.05
TF( $\dot{y}/\delta_H$ ) <sub>U</sub> (26)	0.01	-0.57	0.36	0.40	-0.43	0.31	-0.19	0.58	0.19	0.28	-0.51	0.58	0.33	0.55	0.45	0.52	0.63	0.61	0.19
TF( $\dot{y}/\delta_H$ ) <sub>r<sub>tr</sub>LD</sub> (27)	-0.01	-0.39	0.45	0.24	-0.28	-0.09	-0.09	0.21	-0.11	-0.10	-0.01	0.36	0.08	0.36	0.43	0.23	0.18	0.16	0.04
H( $M_H/\delta_H$ ) <sub>x</sub> (28)	-0.37	0.29	-0.29	-0.16	0.42	0.18	0.43	-0.32	-0.08	0.33	0.02	-0.39	-0.42	-0.26	-0.30	-0.20	-0.43	-0.44	-0.35
H( $M_H/\delta_H$ ) <sub>y</sub> (29)	0.14	-0.35	0.54	0.36	-0.38	-0.02	-0.30	0.37	0.02	-0.09	-0.18	0.53	0.22	0.32	0.56	0.40	0.43	0.39	0.23
H( $M_H/\delta_H$ ) <sub>y/x</sub> (30)	-0.58	-0.08	0.48	0.39	0.18	0.40	0.40	0.03	-0.15	0.58	-0.34	0.19	-0.56	0.08	0.48	0.38	-0.12	-0.23	-0.35
H( $M_H/\delta_H$ ) <sub>A</sub> (31)	0.43	-0.45	0.33	0.11	-0.50	-0.20	-0.55	0.48	0.25	-0.41	-0.12	0.50	0.54	0.42	0.34	0.14	0.53	0.53	0.49
H( $M_H/\delta_H$ ) <sub>Δy</sub> (32)	-0.07	-0.42	0.68	0.59	-0.33	0.16	-0.28	0.59	0.09	0.07	-0.21	0.53	0.20	0.40	0.68	0.58	0.49	0.42	0.24
H( $\partial M_H/\partial \delta_H$ ) <sub>max</sub> (33)	-0.61	-0.08	0.47	0.41	0.17	0.43	0.44	-0.02	-0.20	0.61	-0.31	0.13	-0.60	0.08	0.46	0.40	-0.16	-0.28	-0.40
H( $\partial M_H/\partial \delta_H$ ) <sub>min</sub> (34)	0.07	0.34	-0.05	0.06	0.21	-0.05	0.04	-0.37	-0.18	-0.31	0.24	-0.31	-0.24	-0.33	-0.14	-0.01	-0.32	-0.35	-0.07
H( $\partial M_H/\partial \delta_H$ ) <sub>max</sub> (35)	-0.65	-0.15	0.65	0.72	0.13	0.60	0.26	0.25	-0.06	0.60	-0.40	0.29	-0.44	0.15	0.67	0.72	0.03	-0.05	-0.21
H( $\partial M_H/\partial \delta_H$ ) <sub>min</sub> (36)	-0.12	0.45	-0.38	-0.34	0.36	-0.21	0.49	-0.58	-0.68	0.22	0.65	-0.50	-0.42	-0.41	-0.47	-0.41	-0.47	-0.48	-0.56
H( $\dot{y}/\delta_H$ ) <sub>x</sub> (37)	0.04	0.46	-0.63	-0.54	0.45	-0.22	0.13	-0.32	0.05	-0.22	0.30	-0.31	-0.01	-0.47	-0.61	-0.54	-0.42	-0.28	-0.08
H( $\dot{y}/\delta_H$ ) <sub>y</sub> (38)	0.36	-0.46	0.50	0.36	-0.60	-0.03	-0.52	0.47	0.22	-0.25	-0.25	0.44	0.46	0.45	0.51	0.40	0.61	0.55	0.45
H( $\dot{y}/\delta_H$ ) <sub>y/x</sub> (39)	-0.59	0.05	0.13	0.21	0.27	0.32	0.60	-0.24	-0.39	0.68	-0.04	-0.21	-0.64	-0.02	0.09	0.16	-0.30	-0.41	-0.57
H( $\dot{y}/\delta_H$ ) <sub>A</sub> (40)	-0.21	-0.33	0.70	0.66	-0.29	0.27	-0.01	0.26	-0.20	0.31	-0.20	0.33	-0.12	0.34	0.69	0.66	0.30	0.20	-0.05
H( $\dot{y}/\delta_H$ ) <sub>Δy</sub> (41)	0.14	-0.55	0.59	0.44	-0.56	0.12	-0.33	0.45	0.04	0.04	-0.19	0.38	0.26	0.56	0.59	0.45	0.53	0.46	0.25
H( $\partial \dot{y}/\partial \delta_H$ ) <sub>max</sub> (42)	-0.58	-0.04	0.63	0.59	0.18	0.26	0.33	0.05	-0.11	0.29	-0.29	0.26	-0.43	-0.01	0.63	0.57	-0.14	-0.21	-0.28
H( $\partial \dot{y}/\partial \delta_H$ ) <sub>min</sub> (43)	-0.56	0.06	0.27	0.30	0.21	0.24	0.56	-0.16	-0.33	0.67	-0.16	-0.10	-0.56	-0.04	0.24	0.27	-0.18	-0.32	-0.53
H( $\partial \dot{y}/\partial \delta_H$ ) <sub>max</sub> (44)	-0.73	0.16	0.45	0.53	0.31	0.38	0.60	-0.19	-0.44	0.67	-0.12	-0.00	-0.71	-0.17	0.43	0.50	-0.28	-0.39	-0.57
H( $\partial \dot{y}/\partial \delta_H$ ) <sub>min</sub> (45)	-0.41	-0.03	0.56	0.51	0.13	0.14	0.15	0.11	0.00	0.04	-0.24	0.32	-0.24	-0.03	0.58	0.50	-0.09	-0.11	-0.10
H( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>x</sub> (46)	-0.14	0.46	-0.14	-0.12	0.44	-0.25	0.24	-0.40	-0.20	-0.24	0.20	-0.02	-0.28	-0.54	-0.14	-0.12	-0.45	-0.40	-0.20
H( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>y</sub> (47)	0.11	-0.47	0.20	0.15	-0.43	0.21	-0.20	0.38	0.15	0.26	-0.19	0.04	0.24	0.55	0.19	0.13	0.44	0.37	0.15
H( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>y/x</sub> (48)	0.15	-0.20	0.19	0.26	-0.48	0.33	-0.08	0.12	0.12	0.20	-0.41	-0.06	0.14	0.25	0.23	0.35	0.41	0.28	0.07
H( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>A</sub> (49)	0.01	-0.47	0.35	0.31	-0.44	0.23	-0.13	0.39	0.04	0.32	-0.16	0.08	0.18	0.54	0.34	0.29	0.45	0.37	0.08
H( $\dot{\psi}/\delta_H$ ) <sub>Δy</sub> (50)	0.16	-0.43	0.16	0.00	-0.48	0.07	-0.08	0.11	-0.07	0.17	-0.04	-0.07	0.10	0.49	0.13	-0.02	0.27	0.18	0.01
H( $\partial \dot{\psi}/\partial \delta_H$ ) <sub>max</sub> (51)	-0.62	0.31	0.43	0.44	0.41	0.21	0.47	-0.21	-0.35	0.41	-0.07	0.09	-0.64	-0.35	0.43	0.43	-0.34	-0.41	-0.44
H( $\partial \dot{\psi}/\partial \delta_H$ ) <sub>min</sub> (52)	-0.71	0.15	0.11	0.18	0.40	0.21	0.72	-0.31	-0.51	0.71	0.17	-0.32	-0.68	-0.12	0.05	0.08	-0.44	-0.51	-0.69
H( $\partial \dot{\psi}/\partial \delta_H$ ) <sub>max</sub> (53)	-0.70	0.27	0.32	0.38	0.36	0.33	0.65	-0.30	-0.47	0.68	-0.06	-0.12	-0.74	-0.26	0.31	0.36	-0.36	-0.47	-0.62
H( $\partial \dot{\psi}/\partial \delta_H$ ) <sub>min</sub> (54)	0.38	0.02	0.08	0.04	-0.18	-0.07	-0.42	0.14	0.26	-0.47	-0.17	0.33	0.31	-0.07	0.13	0.13	0.23	0.26	0.41
H( $\dot{y}/\psi$ ) <sub>x</sub> (55)	-0.26	-0.11	-0.03	0.01	0.04	0.20	0.25	0.02	-0.13	0.47	0.07	-0.26	-0.17	0.18	-0.07	-0.05	-0.08	-0.26	0.04
H( $\dot{y}/\psi$ ) <sub>y</sub> (56)	0.05	0.21	0.08	0.04	0.12	-0.23	-0.04	-0.15	-0.07	-0.35	0.07	0.17	-0.03	-0.29	0.09	0.07	-0.13	-0.11	0.04
H( $\dot{y}/\psi$ ) <sub>y/x</sub> (57)	0.69	-0.20	-0.11	-0.15	-0.43	0.00	-0.69	0.32	0.56	-0.56	-0.38	0.36	0.58	0.18	-0.04	-0.02	0.50	0.52	0.69
H( $\dot{y}/\psi$ ) <sub>A</sub> (58)	0.20	0.03	0.07	0.05	-0.02	-0.15	-0.25	0.01	0.04	-0.43	0.04	0.27	0.13	-0.10	0.09	0.09	0.02	0.07	0.23
H( $\dot{\psi}/\psi$ ) <sub>Δy</sub> (59)	-0.05	-0.16	0.48	0.54	-0.04	0.09	-0.27	0.42	0.16	-0.20	-0.21	0.55	0.18	0.09	0.51	0.57	0.27	0.30	0.28
H( $\partial \dot{\psi}/\partial \psi$ ) <sub>max</sub> (60)	0.64	-0.20	-0.07	-0.07	-0.44	0.04	-0.61	0.24	0.45	-0.52	-0.36	0.33	0.51	0.17	0.00	0.06	0.46	0.47	0.60
H( $\partial \dot{\psi}/\partial \psi$ ) <sub>min</sub> (61)	-0.47	-0.08	0.34	0.40	0.08	0.20	0.23	0.24	-0.21	0.64	0.10	-0.03	-0.15	0.13	0.33	0.32	0.08	0.06	-0.26
H( $\partial \dot{\psi}/\partial \psi$ ) <sub>max</sub> (62)	0.31	-0.23	0.27	0.31	-0.27	0.10	-0.51	0.41	0.37	-0.40	-0.38	0.56	0.39	0.17	0.33	0.41	0.44	0.46	0.52
H( $\partial \dot{\psi}/\partial \psi$ ) <sub>min</sub> (63)	0.60	-0.10	-0.15	-0.17	-0.33	-0.05	-0.50	0.08	0.37	-0.59	-0.27	0.26	0.40	0.06	-0.10	-0.05	0.29	0.30	0.50
H( $\dot{y}/M_H$ ) <sub>x</sub> (64)	-0.37	-0.02	0.32	0.15	0.31	0.18	0.14	0.21	-0.02	0.17	-0.18	0.56	-0.27	-0.03	0.37	0.19	-0.10	-0.06	-0.11
H( $\dot{y}/M_H$ ) <sub>y</sub> (65)	0.30	-0.37	0.19	0.20	-0.47	0.19	-0.50	0.38	0.58	-0.31	-0.35	-0.02	0.42	0.40	0.20	0.19	0.39	0.35	0.53
H( $\dot{y}/M_H$ ) <sub>y/x</sub> (66)	0.11	0.35	-0.50	-0.33	0.10	-0.35	0.29	-0.55	-0.48	0.10	0.48	-0.55	-0.10	-0.32	-0.54	-0.36	-0.24	-0.25	-0.35
H( $\dot{y}/M_H$ ) <sub>A</sub> (67)	0.41	0.16	-0.54	-0.39	-0.14	-0.18	-0.06	-0.40	-0.08	-0.23	0.29	-0.59	0.16	-0.11	-0.57	-0.41	-0.11	-0.08	0.02
H( $\dot{y}/M_H$ ) <sub>Δy</sub> (68)	0.34	-0.58	0.30	0.34	-0.51	0.33	-0.70	0.74	0.63	-0.20	-0.40	0.31	0.59	0.63	0.33	0.35	0.65	0.67	0.68
H( $\partial \dot{y}/\partial M_H$ ) <sub>max</sub> (69)	-0.30	0.26	0.17	0.24	0.23	-0.10	0.40	-0.28	-0.45	0.15	0.35	-0.37	-0.36	-0.23	0.05	0.11	-0.29	-0.38</	

# Stichwortverzeichnis

- Überschwinger, 65
- Bode-Diagramm, 36
- Closed-Loop, 20, 21
- Doppelspurwechsel, 50, 69
- Fahrer-Fahrzeug-Kennwert, 20, 68
- Fahrermodell, 21
- Frequenzgang, 36
- Gefallensbewertung, 51
- Gierverhalten, 65
- Gierverstärkung, 63
- Hauptkomponentenanalyse, 54
- Hinterachslenkung, 48
- Hysteresekurve, 38
- KD-Wert, 20
- Lenkarbeit, 64
- Lenkfrequenz, 46
- Lenkkraftverlauf, 63
- Lenkwinkelbedarf, 63
- Lenkwinkelrampe, 40
- Maculaorgan, 22
- Microsinus, 37
- multiple Regression, 71
- nichtlineare Regression, 84
- Open-Loop, 18, 21
- Phasenverschiebung, 36
- Polynom-Approximation, 38
- Proportionalbereich, 42
- quasi-objektive Wahrnehmung, 51
- Querbeschleunigungsamplitude, 42
- Seitenkraftaufbau, 64
- Standardabweichung, 53
- TB-Wert, 18
- Vestibularorgan, 22
- Weavetest, 37
- Zielgenauigkeit, 64



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Diagramm zur Beurteilung der Querdynamik nach WEIR und DIMARCO . . .	2
1.2	Dynamische Lenkrückstellung nach DEPPERMAN . . . . .	4
1.3	Vier-Kennwerte-Diagramm nach MIMURO, OHSAKI, YASUNAGA und SATOH	5
1.4	Subjektiv-Objektiv-Korrelationen aus der Untersuchung von REDLICH . . . .	7
1.5	Kennwerte nach HISAOKA ET AL . . . . .	9
1.6	Lenkmomentaktuator des Versuchsfahrzeugs von BUSCHARDT . . . . .	11
1.7	Subjektiv-Objektiv-Korrelationen aus der Untersuchung von HENZE . . . . .	12
1.8	Lenksystemaufbau und Lenkhysterese aus BARTHENHEIER . . . . .	14
1.9	Auswertung einer Lenkungshysterese nach DETTKI . . . . .	15
1.10	Ergebnis einer Regressionsanalyse aus der Arbeit von HARRER . . . . .	16
1.11	Lenkwinkelbereiche aus Kreisfahrt . . . . .	17
1.12	Lenkmomentgradienten verschiedener Fahrzeuge . . . . .	17
1.13	Open-Loop-Manöver und Diagramme zur Charakterisierung der Querdynamik	19
1.14	Die menschliche Wahrnehmung der einzelnen fahrdynamischen Größen . . . .	22
1.15	Ebenen der Subjektivbewertung . . . . .	26
1.16	Verfahren zur Objektivierung der Querdynamik . . . . .	27
2.1	Einordnung Kapitel 2 (vgl. Bild 1.16) . . . . .	29
2.2	Vorgehensweise zur Ermittlung der Zusammenhänge zwischen den verschie- denen Fahrmanövern mit Hilfe der Simulation . . . . .	32
2.3	Vergleich objektiver Kennwerte aus dem Lenkwinkelsprung und dem Fre- quenzgang . . . . .	32
2.4	Zeitschrieb Sinuslenken mit steigender Frequenz . . . . .	36
2.5	Kennwerte aus dem Frequenzgang . . . . .	37
2.6	Zeitschrieb Weavetest . . . . .	37
2.7	Datenglättung Weavetest durch Mittelung über Periodendauer . . . . .	38
2.8	Kennwerte aus dem Weavetest . . . . .	39
2.9	Zeitschrieb des Manövers Lenkwinkelrampe . . . . .	40
2.10	Rohdaten und Ergebnis der Datenverarbeitung beim Manöver Lenkwinkelrampe	40
2.11	Kennwerte aus der Lenkwinkelrampe . . . . .	41
2.12	Einfluss der Querbeschleunigung auf Frequenzgänge und Phasendiagramme .	43

---

2.13	Einfluss der Geschwindigkeit auf Frequenzgänge und Phasendiagramme . . . .	45
2.14	Phasendiagramme bei Lenkfrequenzen von 0,125 Hz bis 2,0 Hz . . . . .	46
3.1	Bandbreite der Frequenzgänge des Versuchsfahrzeugs im Vergleich mit aktuellen Serienfahrzeugen . . . . .	49
3.2	Abhängigkeit des Wankwinkels von der Querbeschleunigung beim Versuchsfahrzeug . . . . .	50
3.3	Aufstellung des Doppelspurwechsels . . . . .	50
3.4	Fragebogen für das Manöver Doppelspurwechsel . . . . .	52
3.5	Einordnung der Abschnitte 3.3.1 und 3.3.2 . . . . .	53
3.6	Mittelwerte und Standardabweichungen der Subjektivwertungen aus dem Doppelspurwechsel . . . . .	54
3.7	Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse für den Doppelspurwechsel mit farbiger kodierter Subjektivbewertung . . . . .	55
3.8	Einordnung Abschnitt 3.3.3 . . . . .	56
3.9	Korrelationen der Subjektivwertungen im Doppelspurwechsel . . . . .	57
3.10	Korrelationen der Bewertungskategorien <i>quasi-objektiv</i> und <i>subjektiv</i> im Doppelspurwechsel . . . . .	57
3.11	Einordnung Abschnitt 3.3.4 . . . . .	58
3.12	Korrelationen der Subjektivurteile des Doppelspurwechsels mit Kennwerten des Frequenzgangs . . . . .	59
3.13	Korrelationen der Subjektivurteile im Doppelspurwechsel mit Kennwerten des Weavetests . . . . .	62
3.14	Einordnung Abschnitt 3.3.6 . . . . .	66
3.15	Korrelation der gefundenen Objektivkennwerte untereinander . . . . .	67
3.16	Verhältnis der Kennwerte (14) und (16) in den Varianten des Doppelspurwechsels . . . . .	67
3.17	Korrelationen der Subjektivurteile im Doppelspurwechsel mit ausgewählten Open-Loop-Kennwerten . . . . .	68
3.18	Einordnung Abschnitt 3.3.7 . . . . .	69
3.19	Charakteristische Punkte des Manövers Doppelspurwechsel im Zeitschrieb . .	69
3.20	Korrelationen der Fahrer-Fahrzeug-Kennwerte zu den ausgewählten Open-Loop-Kennwerten . . . . .	70
3.21	Korrelationskoeffizienten der multiplen Regressionen zweier Kennwerte des Frequenzgangs mit dem Bewertungskriterium Lenkwinkelbedarf . . . . .	71
3.22	Verhältnis der Kennwerte (1) und (4) in den Varianten des Doppelspurwechsels	72
3.23	Darstellung der gut korrelierenden Open-Loop-Kennwerte aus dem Doppelspurwechsel . . . . .	74

---

3.24	Fragebogen für den zweiten Versuchsabschnitt „Anlenken“ . . . . .	75
3.25	Zeitschrieb eines Probanden bei der Subjektivbeurteilung <i>Anlenken auf der Geraden</i> . . . . .	75
3.26	Korrelationen der Subjektivbewertungen beim Anlenken . . . . .	76
3.27	Korrelationen der Subjektivurteile beim Anlenken auf der Geraden mit ausgewählten Open-Loop-Kennwerten . . . . .	80
3.28	Darstellung der gut korrelierenden Open-Loop-Kennwerte des Versuchsabschnitts <i>Anlenken auf der Geraden</i> . . . . .	81
3.29	Vergleich der Frequenzanteile des Lenkwinkels bei den Fahrmanövern Doppelspurwechsel und Anlenken . . . . .	83
3.30	Mögliche Ergebnisse der nichtlinearen Regression bei unterschiedlichen Datenverteilungen . . . . .	84
3.31	Vergleich der Subjektiv-Objektiv-Korrelationen der Schnelligkeit der Fahrzeugreaktion für Gierrate und Querbeschleunigung . . . . .	85
3.32	Notenskala zur Subjektivbewertung fahrdynamischer Eigenschaften . . . . .	87
5.1	Datenglättung Weavetest nach ISO13674-1 . . . . .	97
5.2	Objektiv-Subjektiv-Korrelationen des Versuchsabschnitts <i>Doppelspurwechsel</i> . . . . .	98
5.3	Objektiv-Subjektiv-Korrelationen des Versuchsabschnitts <i>Anlenken auf der Geraden (100 <math>\frac{km}{h}</math>)</i> . . . . .	99
5.4	Objektiv-Subjektiv-Korrelationen des Versuchsabschnitts <i>Anlenken auf der Geraden (180 <math>\frac{km}{h}</math>)</i> . . . . .	100



# Tabellenverzeichnis

2.1	Auf Korrelationen der Kennwerte untersuchte Manöver . . . . .	33
2.2	Minimale Korrelationskoeffizienten zwischen den Kennwerten der verschiedenen Manöver . . . . .	34
3.1	Maximale Korrelationskoeffizienten der einzelnen Frequenzgänge mit der Subjektivbewertung im Doppelspurwechsel . . . . .	59
3.2	Maximale Korrelationskoeffizienten der Frequenzgänge nach Kriterien im Doppelspurwechsel . . . . .	60
3.3	Maximale Korrelationskoeffizienten der Subjektivbewertung im Doppelspurwechsel mit Kennwerten des Weavetests nach Signalpaaren . . . . .	61
3.4	Maximale Korrelationskoeffizienten des Weavetests nach Kriterien im Doppelspurwechsel . . . . .	61
3.5	Maximale Korrelationskoeffizienten (Betrag) zwischen Fahrer-Fahrzeug-Kennwerten und der subjektiven Bewertung . . . . .	70
3.6	Maximale Korrelationskoeffizienten aus multipler Regression zur Subjektivbewertung . . . . .	72
3.7	Vergleich der maximalen Korrelationskoeffizienten zu Subjektivbewertungen . . . . .	73
3.8	Maximale Korrelationskoeffizienten objektiver Kennwerte zur Subjektivbewertung beim Anlenken . . . . .	78
3.9	Gegenüberstellung gut korrelierender Objektivkennwerte für die Fahrmanöver Doppelspurwechsel und Anlenken . . . . .	82



# Literaturverzeichnis

- [Bar04] BARTHENHEIER, Thomas: Potenzial einer fahrertyp- und fahrsituationsabhängigen Lenkradmomentgestaltung. In: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 584*. VDI, 2004
- [Bus03] BUSCHARDT, Boris: Synthetische Lenkmomente (ZMMS Spektrum Band 16). In: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 22, Nr. 12*. VDI, 2003
- [CC98] CHEN, D. C. ; CROLLA, D. A.: Subjective and objective Measures of vehicle handling: Drivers & Experiments. In: *Vehicle System Dynamics Supplement 28* (1998), S. 576–597
- [Dep89] DEPPERMAN, Karl-Heinz: Fahrversuche und Berechnungen zum Geradeauslauf von Personenkraftwagen. In: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 133*. VDI, 1989
- [Det05] DETTKI, Frank: *Methoden zur objektiven Bewertung des Geradeauslaufs von Personenkraftwagen*, Institut A für Mechanik der Universität Stuttgart, Diss., 2005
- [Dib92] DIBBERN, Klaus: Ermittlung eines Kennwertes für den ISO-Fahrspurwechsel in Versuch und Simulation. In: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 164*. VDI, 1992
- [Fuc93] FUCHS, Johann: Beitrag zum Verhalten von Fahrer und Fahrzeug bei Kurvenfahrt. In: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 184*. VDI, 1993
- [Har07] HARRER, Manfred: *Characterisation of Steering Feel*. University of Bath, Department of Mechanical Engineering, 2007
- [HB02] HEISSING, Bernd ; BRANDL, Hans-Jürgen: *Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens*. Vogel, 2002
- [Hen04] HENZE, Roman: *Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe eines Fahrermodells*, Institut für Fahrzeugtechnik Braunschweig, Diss., 2004

- [HPJ06] HARRER, Manfred ; PFEFFER, Peter E. ; JOHNSTON, D. N.: Steering Feel - Objektive Assessment of Passenger Cars, Analysis of Steering Feel and Vehicle Handling. In: *FISITA 2006*, 2006
- [HYF96] HISAOKA, Yuji ; YAMAMOTO, Masaki ; FUJINAMI, Hiroaki: A Study on Desirable Steering Responses and Steering Torque for Driver's Feeling. In: *AVEC'96*, 1996
- [ISO99] *ISO 3888-1 - Passenger Cars - Test Track for a severe Lane-Change-Manoeuvre - Part 1: Double Lane Change*. 1999
- [ISO03] *ISO 13674-1, Road Vehicles - Test method for the quantification of on-centre handling - Part 1: Weave test*. 2003
- [Kud89] KUDRITZKI, Detlef: Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens. In: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 132*. VDI, 1989
- [MOYS90] MIMURO, Tetsushi ; OHSAKI, Masayoshi ; YASUNAGA, Hiromichi ; SATOH, Kohji: Four Parameter Evaluation Method of Lateral Transient Response. In: *SAE Technical Paper 901734* (1990)
- [MW04] MITSCHKE, Manfred ; WALLENTOWITZ, Henning: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer, 2004
- [NKS01] NEUKUM ; KRÜGER ; SCHULLER: Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften? In: *VDA-Berichte Nr. 1613*. VDI, 2001
- [RA97] RIEDEL, A ; ARBINGER, R: Subjektive und objektive Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw. In: *FAT Schriftenreihe 139* (1997)
- [RA00] RIEDEL, A ; ARBINGER, R: Ergänzende Auswertungen zur subjektiven und objektiven Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw. In: *FAT Schriftenreihe 161* (2000)
- [Red94] REDLICH, Peter: *Objektive und subjektive Beurteilung aktiver Vierradlenkstrategien*. Shaker, 1994
- [RH84] ROMPE, K ; HEISSING, B: *Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen*. TÜV Rheinland, 1984
- [RS40] RIEKERT, P. ; SCHUNCK, T. E.: Zur Fahrmechanik des gummibereiften Kraftfahrzeuges. In: *Ingenieur Archiv* Bd. 11. 1940, S. 210 ff
- [Spi03] SPIEGEL, Bernt: *Die obere Hälfte des Motorrads*. Motorbuch Verlag, 2003

- [Sta97] STAMER, Norbert: Ermittlung optimaler PKW-Querdynamik und ihre Realisierung durch Allradlenkung. In: *Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 302*. VDI, 1997
- [WD78] WEIR, H D. ; DIMARCO, R J.: Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data. In: *SAE Technical Paper 780010* (1978)
- [WDW92] WALLENTOWITZ, Henning ; DONGES, Edmund ; WIMBERGER, Josef: Die Aktive Hinterachs-Kinematik (AHK) des BMW 850 Ci, 850 Csi. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 94 (1992), S. 618–628