

Potenzial einer fahrertyp- und fahrsituationsabhängigen Lenkradmomentgestaltung

Dem Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
eingereichte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Thomas Barthenheier
aus Mainz

Berichterstatter:	Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Kurt Landau
Tag der Einreichung:	27.01.2004
Tag der mündlichen Prüfung:	25.05.2004

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Fahrzeugtechnik (*fzd*) der Technischen Universität Darmstadt.

In dieser Zeit wurde ich von zwei Professoren des Fachgebiets Fahrzeugtechnik wissenschaftlich betreut. Herrn em. Professor Dr.-Ing. Bert Breuer, Leiter des Fachgebiets bis September 2001, verdanke ich die Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter an einem hervorragend geführten Fachgebiet. In den knapp zwei Jahren bis zu seiner Emeritierung hat er mir nicht nur fachliches Wissen vermittelt, sondern viele positive Erfahrungen haben meinen Lebensweg mit geprägt.

Als sein Nachfolger trat ab Januar 2002 Herr Professor Dr. rer. nat. Hermann Winner das Amt des Fachgebietsleiters an. Er führte die Arbeit seines Vorgängers in hervorragender Weise fort und gab mir fachlich viele neue Impulse. Die Zusammenarbeit habe ich als äußerst angenehm empfunden und bedanke mich für die zahlreichen Anregungen, auch über die wissenschaftliche Arbeit hinaus.

In besonderem Maße schätzte ich das entgegengebrachte Vertrauen beider Professoren und die gewährten Freiräume während meiner wissenschaftlichen Untersuchungen.

Herrn Professor Dr.-Ing. Kurt Landau, Leiter des Fachgebiets Arbeitswissenschaft, gilt mein Dank für die freundliche Übernahme des Korreferats. Durch den engen Kontakt der beiden Fachgebiete und die gute Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern erhielt ich kompetente Unterstützung.

In besonderer Weise hat die hervorragende Atmosphäre am Fachgebiet Fahrzeugtechnik das Gelingen der Arbeit beeinflusst. Die Menschlichkeit und die hervorragende Fachkenntnis der Kollegen, sowie der Beschäftigten in Werkstätten und Sekretariat trugen hierzu bei. Ohne alle diese Menschen wären zahlreiche Arbeiten im vorgegeben zeitlichen Rahmen nicht möglich gewesen. Deshalb möchte ich mich an dieser Stelle bei allen Mitarbeitern recht herzlich für die große Hilfe und die schöne Zeit, die ich mit ihnen verbringen durfte, bedanken. Auch sollen die hochmotivierten studentischen Hilfskräfte und Studien- und Diplomarbeiter erwähnt werden, mit denen ich zusammenarbeiten durfte und die zum Gelingen der Arbeit wesentlich beigetragen haben.

Ebenfalls möchte ich Herrn Andreas Neuenkirch vom Fachbereich Mathematik der TU Darmstadt für seine wertvolle Unterstützung bei der statistischen Auswertung danken.

Der DaimlerChrysler AG danke ich für die finanzielle und fachliche Förderung meines Forschungsprojekts. Die Zusammenarbeit mit Herrn Moser und den Mitarbeitern seines Teams war menschlich äußerst angenehm. Dies kam auch bei der hervorragenden Unterstützung bei Aufbau und Inbetriebnahme des Versuchsträgers sowie den gewährten Freiheiten bei der Durchführung des Projekts zum Ausdruck.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir diesen Lebensweg erst ermöglichten und mich bis zum Ende meiner Promotionszeit einmalig unterstützten.

Meiner Freundin Annetrin danke ich ebenfalls für ihre große Unterstützung und in besonderer Weise für die großen Freiräume und ihr Verständnis während der Erstellung der Arbeit.

Auf Grund der großen und äußerst wertvollen Unterstützung, die ich durch Diplom- und Studienarbeiter und studentische Hilfskräfte erfahren habe, möchte ich mich bei diesen Personen noch einmal namentlich bedanken:

Henri Barbier
Alexander Behr
Eva Bender
Boris Cajan
Reimar Claes
Dirk Frohmüller
Stefan Gahle
Siegfried Gerhard
Werner Grote
Nino Kramm
Till Lenius
Satya Makkapati
Thomas Mützel
Markus Pauligk
Axel Pethe
Danijel Pušić
Nicolas Raithel
Maxime Rolland
Witold Rusin
Otmar Schreiner
Andreas Vogel
Karsten Volland
Johannes Weber-Monecke
Marcus Weinreuter
Alexander Wesp
Patrick Wieber

Vielen Dank !

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	VII
Formelzeichen und Indizes.....	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Stand der Forschung	3
1.2.1 Bedeutung des Lenkradmoments für den Fahrzeugführer.....	3
1.2.2 Das Lenkgefühl.....	15
1.2.3 Synthetische Lenkradmomente.....	20
1.3 Fazit	22
1.4 Hypothesenbildung.....	23
2 Methodik	25
2.1 Lenkradmomentmodellierung.....	27
2.1.1 Messtechnik	27
2.1.2 Messreihen	30
2.1.3 Aufbau Lenkradmomentmodell.....	31
2.1.4 Parameteridentifikation.....	37
2.1.5 Qualitätsbeurteilung.....	43
2.1.6 Abschließendes Lenkradmomentmodell.....	47
2.2 Versuchskonzept.....	48
2.2.1 Versuchsfahrzeug.....	48
2.2.2 Versuchsplan / Anzahl der Lenkradmomentvarianten.....	51
2.2.3 Datenerhebung	52
2.2.4 Versuchsstrecken	53
2.2.5 Lenkradmomentvarianten	55
2.2.6 Versuchspersonenkollektiv	56
2.3 Auswertung.....	59
2.3.1 Datenaufbereitung.....	59
2.3.2 Statistik	59
2.3.3 Ergebnisdarstellung.....	60
2.4 Fazit	63
3 Ergebnisse	64
3.1 Fahrsituationsspezifische Lenkradmomentbeurteilung	64
3.1.1 Objektive Messdaten.....	64
3.1.2 Subjektivbeurteilungen	70
3.1.3 Fazit.....	80

3.2	Fahrertypspezifische Lenkradmomentbeurteilung	81
3.2.1	Beurteilung in Abhängigkeit des Fahreralters	82
3.2.2	Beurteilung in Abhängigkeit des Geschlechts der Fahrer.....	95
3.2.3	Kennwertbildung zur Differenzierung der Teilkollektive	108
3.2.4	Fazit.....	112
4	Diskussion	113
4.1	Beurteilung der Methodik.....	113
4.1.1	Lenkradmomentmodellierung.....	113
4.1.2	Versuchskonzept.....	114
4.2	Beurteilung der Ergebnisse.....	115
4.2.1	Übertragbarkeit	115
4.2.2	Relevanz.....	120
5	Zusammenfassung und Ausblick	121
6	Anhang	123
6.1	Parameteridentifikation.....	123
6.2	Vorversuche	126
6.3	Korrelationskoeffizienten	127
7	Literatur.....	131

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
DMS	Dehnungsmessstreifen
EHPS	Electro-Hydraulic-Power-Steering
EPS	Electro-Power-Steering
ESP	Elektronisches Stabilitäts Programm
HMI	Human-Machine-Interface
JSAE	Society of Automotive Engineers of Japan
Kfz	Kraftfahrzeug
RMS	Root Mean Square
SAE	Society of Automotive Engineers
SbW	Steer-by-Wire
VDA	Verband der Autoindustrie
VDI	Verein deutscher Ingenieure

Formelzeichen und Indizes

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a_Y	[m/s ²]	Querbeschleunigung im Fahrzeugschwerpunkt
C		Gewichtungparameter des Lenkradmomentmodells
$C_1, C_{Rück}$	[Ns]	Gewichtungparameter des Rückstellmomentanteils
C_2, C_{Cut}	[Ns]	Gewichtungparameter der Sättigungshöhe des Rückstellmomentanteils
$C_3, C_{Dämpf}$	[Ns/rad]	Gewichtungparameter des Dämpfungsmomentanteils
C_4, C_{Reib}	[Nm]	Gewichtungparameter des Reibmomentanteils
$C_5, C_{Träg}$	[Ns ² /rad]	Gewichtungparameter des Trägheitsmomentanteils
cut	[Ns]	Sättigungshöhe des Rückstellmoments
D	[kg/m ² s]	Dämpfungskonstante
EG	[s ² rad/m]	Eigenlenkgradient
$F_{Y,max}$	[N]	Maximal mögliche Seitenführungskraft
F_Z	[N]	Gewichtskraft / Summe aller Radlasten
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
$Grad$	[s/°]	Gradient der tanh-Funktion des Reibmomentanteils
h^0	[-]	Beobachtete Häufigkeit
h^e	[-]	Erwartete Häufigkeit
i_s	[-]	Gesamtübersetzung der Lenkung
j	[-]	Anzahl der Lenkradmomentvarianten
k	[-]	Nummer der Lenkradmomentvariante ($k = 1 \dots 9$)
l	[m]	Radstand
l_R	[m]	Abstand des Fahrzeugschwerpunkts zur Hinterachse in Fahrzeug x-Richtung

Symbol	Einheit	Bezeichnung
m	[kg]	Masse
M	[Nm]	Moment
M_H	[Nm]	Lenkradmoment
M'_H	[Nm]	Lenkradmoment ohne Berücksichtigung einer Nichtlinearität
$M_{H, \text{cut}}$	[Nm]	Sättigungsniveau des Rückstellmomentanteils
$M_{H, \text{Dämpf}}$	[Nm]	Dämpfungsmomentanteil des Lenkradmoments
$M_{H, \text{Reib}}$	[Nm]	Reibmomentanteil des Lenkradmoments
$M_{H, \text{Rück}}$	[Nm]	Rückstellmomentanteil des Lenkradmoments
$M_{H, \text{Träg}}$	[Nm]	Trägheitsmomentanteil des Lenkradmoments
n	[-]	Anzahl der Paarvergleiche
P_k	[-]	Punkte pro Lenkradmomentvariante in einem Paarvergleich
$P_{k, \text{max}}$	[-]	Maximal mögliche Punkte pro Lenkradmomentvariante in einem Paarvergleich
r	[-]	Korrelationskoeffizient
r_τ	[m]	Gesamtnachlaufstrecke
R	[Nm]	Reibkonstante
rS_k	[-]	Relatives Subjektivurteil pro Variante
SS	[s ² /kg]	Steering-Work-Sensitivity
v	[m/s]	Fahrzeuggeschwindigkeit
V		Anzahl der Vergleichsfahrten
V_j		Anzahl der Vergleichsfahrten bei einer Anzahl von j Lenkradmomentvarianten
x, y, z	[m]	Längs-, Quer- und Vertikalrichtung
$\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$	[m/s]	Längs-, Quer- und Vertikalgeschwindigkeit
$\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$	[m/s ²]	Längs-, Quer- und Vertikalbeschleunigung
$\ddot{\ddot{x}}, \ddot{\ddot{y}}, \ddot{\ddot{z}}$	[m/s ³]	Längs-, Quer- und Vertikalruck

Symbol	Einheit	Bezeichnung
α	[-]	Signifikanzniveau
δ_H	[°]	Lenkradwinkel
$\dot{\delta}_H$	[°/s]	Lenkradwinkelgeschwindigkeit
$\ddot{\delta}_H$	[°/s ²]	Lenkradwinkelbeschleunigung
μ	[-]	Kraftschlussbeiwert
ρ	[m]	Krümmungsradius
Θ	[kgm ²]	Trägheit
σ	[-]	Standardabweichung
ψ	[°]	Gierwinkel
$\dot{\psi}$	[°/s]	Gierwinkelgeschwindigkeit, Gierrate
$\ddot{\psi}$	[°/s ²]	Gierwinkelbeschleunigung, Gierbeschleunigung
$\dddot{\psi}$	[°/s ³]	Gierruck

1 Einleitung

1.1 Motivation

In den letzten Jahren hat sich die auf dem Markt verfügbare Anzahl an Fahrzeugmodellvarianten enorm erhöht ([283]). Hintergrund dieser Entwicklung ist das Streben der Fahrzeughersteller ihren Marktanteil durch Diversifikation ihrer Produktpalette zu erhöhen. Ziel ist es hierbei, die Bedürfnisse einzelner identifizierter Kundengruppen an ein Automobil bestmöglich zu erfüllen. Die so genannten Nischenmodelle gewinnen daher zunehmend an Bedeutung. Von 1994 bis 2002 vergrößerten die deutschen Automobilhersteller ihre Modellpalette um knapp 25% (vergl. [280], [281], [282]).

Die Kunden- oder Zielgruppen der unterschiedlichen Fahrzeugmodelle werden unter Marketinggesichtspunkten häufig durch demografische Merkmale wie z.B. das Alter oder das Geschlecht beschrieben (z.B. [93], [113], [274]).

Die Produktindividualisierung findet jedoch nicht nur Ausdruck in Fahrzeugvarianten und Modellvarianten mit unterschiedlichem Design. Der Fahrer besitzt auch zunehmend die Möglichkeit, sein Fahrzeug an seine aktuellen Bedürfnisse anzupassen. Dies umfasst mittlerweile selbstverständliche Dinge wie die Anpassung der ergonomischen Gegebenheiten durch Veränderung von Sitz- und Lenkradposition sowie die Einstellung des Innenraumklimas. Weiterhin wird dem Fahrer vermehrt die Möglichkeit gegeben, das Fahrverhalten und den Fahrkomfort durch Veränderungen der Charakteristik des Übertragungsverhaltens von Elementen im Fahrwerk oder im Antriebsstrang zu verändern. Hierbei besitzt der Fahrer meist die Möglichkeit zwischen verschiedenen vordefinierten Modi zu wählen, um das jeweils für ihn bestpassende Fahrgefühl zu verwirklichen. Als Charakterisierung dieser Einstellungen finden meist die Begriffe „Sport“ und „Komfort“ oder analoge Begrifflichkeiten Verwendung (z.B. [8], [24], [25], [178]).

Der Charakter der Längsdynamik eines Fahrzeugs kann z.B. durch ein verändertes Übertragungsverhalten des Getriebes (Schaltprogramm) angepasst werden. Eine Anpassung des Charakters von Quer- und Längsdynamik wird durch ein verändertes Übertragungsverhalten des Fahrwerks verwirklicht. Hierbei kommen mechatronische Systeme zum Einsatz, die die Kennlinien von Aufbaufedern, Wankfedern oder Schwingungsdämpfern verändern (z.B. [26], [52], [132], [308]). Auch die Lenksysteme haben sich im Zuge dieses Technologiewandels stark verändert. Die rein mechanische Lenkung findet in Serienfahrzeugen nur noch in Ausnahmefällen Anwendung. Auch die hydraulischen Lenkkraftunterstützungen werden derzeit insbesondere in Fahrzeugen mit geringen Radlasten, und somit auch niedrigen abzustützenden Spurstangenkräften durch Systeme mit elektromechanischer Lenkkraftunterstützung ersetzt. In den nächsten Jahren wird sich laut einer Prognose der ZF Lenksysteme GmbH (**Bild 1–1**) dieser Trend fortsetzen und sich der Marktanteil der elektromechanischen Lenkkraftunterstützungen bei gleichzeitiger Abnahme

der hydraulischen Systeme weiter vergrößern [148]. Auch andere Hersteller prognostizieren qualitativ ähnliche Entwicklungen [251].

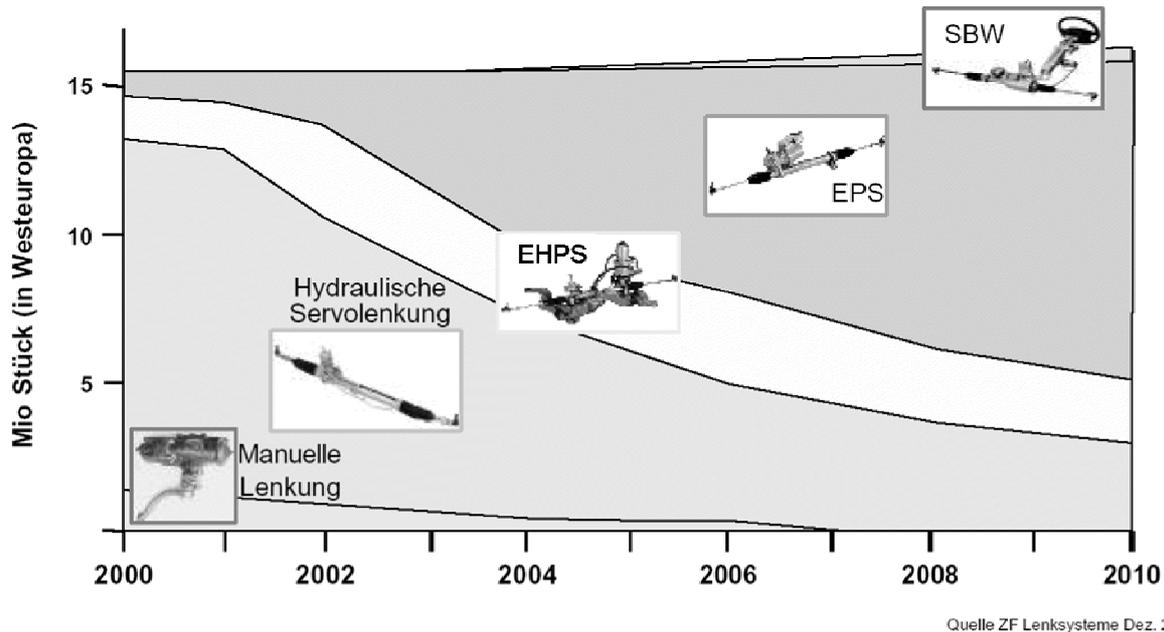


Bild 1–1: Prognose der Verteilung der Stückzahlen der Lenksystemvarianten in Westeuropa (aus [288], verändert).

Durch den Einzug der Mechatronik in die Fahrzeuglenkung besteht neben vielen anderen Vorteilen (Assistenzfunktionen, Energieverbrauch, Packaging, Wartung, ...) nun auch die Möglichkeit, auf einfache Weise das Lenkgefühl eines Fahrzeuges individuell anzupassen. Bereits elektrohydraulische Systeme (EHPS) bieten die Möglichkeit durch einfache Veränderung des Volumenstroms die Lenkkraftunterstützung zu variieren. Durch den Einsatz von elektromechanischen Systemen (EPS) lässt sich das Lenkradmoment nun in einem sehr weiten Bereich gezielt gestalten. Denkt man an den kombinierten Einsatz von Systemen zur Lenkwinkel- und Lenkmomentüberlagerung oder an energetisch vollständig entkoppelte Steer-by-Wire-Systeme (SbW), so ergibt sich ein äußerst breites Feld von Möglichkeiten zur Gestaltung eines „Lenkgefühls“.

Durch die bereits in Serie oder teilweise in Serienentwicklung befindlichen Systeme (EPS, Lenkwinkelüberlagerung, Lenkmomentüberlagerung) wächst bei Fahrzeugherstellern und Systemlieferanten der Bedarf an Informationen über Auslegungsrichtlinien zur verbesserten und somit auch individuellen Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI), um das Potential dieser Systeme bestmöglich auszunutzen und an die Bedürfnisse einzelner Kundengruppen bestmöglich anzupassen. Hierzu ist es jedoch notwendig, sowohl die prinzipiell für ein Lenkgefühl relevanten Faktoren zu kennen, als auch Informationen darüber zu besitzen, wie die Kombinationen dieser einzelnen Faktoren von unterschiedlichen Fahrern beurteilt werden. Erst dann kann gezielt das HMI „Lenkung“ verbessert werden.

Im Hinblick auf eine Anpassung des Lenkgefühls an spezifische Kundengruppen gilt es zunächst, den Wunsch dieser Kundengruppe zu bestimmen. Es stellt sich weiterhin die Frage, ob und in welchem Ausmaß interindividuelle Unterschiede in der Beurteilung eines Lenkgefühls existieren, oder ob ein allgemeingültiges, „optimales“ Lenkgefühl durch die neu hinzugewonnenen Freiheitsgrade gestaltet werden kann. Die endgültige Freigabe und Abstimmung von Fahrzeugfunktionen bei Fahrzeugherstellern liegt oftmals in der Hand einiger weniger, sehr erfahrener Testfahrer ([107], [114]). Diese wenigen Personen können daher – ziehen sie nur ihr eigenes subjektives Empfinden als Maßstab für eine Auslegung heran – keine Aussagen über Auslegungsrichtlinien für eine interindividuelle Mensch-Maschine-Schnittstelle treffen. Daher ist in diesem Zusammenhang eine Objektivierung des „Lenkgefühls“ von großem Interesse, die dann in die Auslegung des HMI einbezogen werden könnte.

1.2 Stand der Forschung

Die vom Fahrer aufzubringenden Kräfte am Lenkrad dienen zur Beibehaltung oder Änderung des aktuell eingestellten Lenkradwinkels ([264]). In Abhängigkeit des relevanten Lenkradhalbmessers entsteht hieraus an der Nabe des Lenkrades das so genannte Lenkradmoment.

Sowohl die Entstehung und die Zusammensetzung dieses Moments als auch die sich hieraus ableitende Bedeutung des Lenkrades als Bedien- und Informationselement werden im nachfolgenden Abschnitt 1.2.1 näher erläutert. Im Anschluss daran wird in Abschnitt 1.2.2 der Begriff „Lenkgefühl“ genauer beschrieben und hierzu ausgewählte Untersuchungen aus der Literatur zu diesem Thema vorgestellt. In Abschnitt 1.2.3 schließlich werden die Potenziale einer gezielten Beeinflussung der Mensch-Maschine-Schnittstelle „Lenkung“ durch synthetische Lenkradmomente dargestellt.

1.2.1 Bedeutung des Lenkradmoments für den Fahrzeugführer

Betrachtet man zunächst eine klassische, rein mechanische Lenkanlage eines Fahrzeuges, so besteht diese aus einem Bedienelement (Lenkrad) zur Vorgabe eines Fahrzeugkurses, Stellelementen (Räder/Reifen) zur Übertragung der Kräfte zwischen Fahrzeug und Umwelt (Fahrbahn) und hierzwischen gelagerten Komponenten (Lenksäule, Getriebe, Lenkgestänge, ...) zur Übertragung des Energie- und Signalflusses zwischen Bedien- und Stellelement. Das am Lenkrad vorhandene Lenkradmoment wird also sowohl durch die an den Reifen wirkenden Kräfte als auch durch das Übertragungsverhalten der Lenkung definiert. Das Lenkrad dient dem Fahrer also nicht nur als Bedienelement zur Umsetzung seines Kurswunsches, sondern auch als Informationsquelle über den aktuellen Fahrzustand.

Entstehung des Lenkradmoments

Die das Lenkradmoment beeinflussenden, am Rad wirkenden Kräfte und Momente lassen sich entsprechend den Hauptkoordinatenrichtungen am Rad (**Bild 1–2**) in drei Gruppen aufteilen:

x: Längskräfte im Latsch

y: Querkräfte im Latsch

z: Vertikalkräfte und Momente um die Hochachse

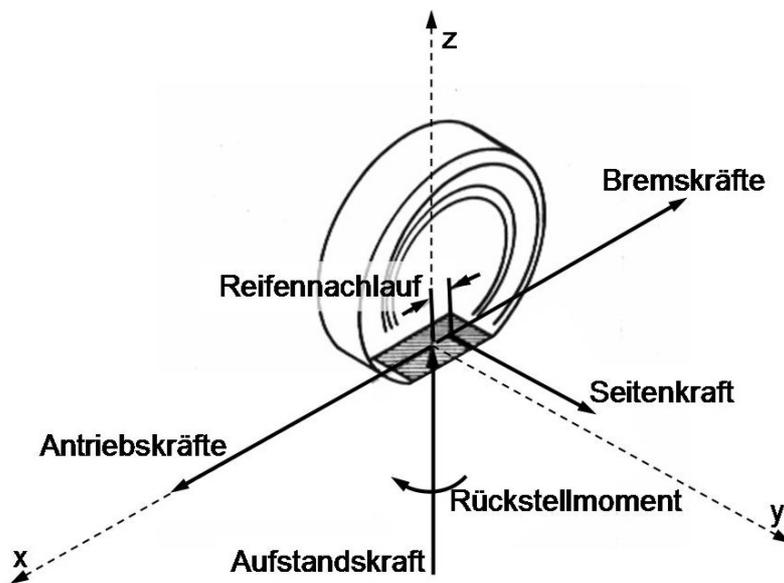


Bild 1–2: Am Rad wirkende Kräfte und Momente im Radkoordinatensystem (nach [40], modifiziert).

Den überwiegenden Anteil an der resultierenden Spurstangenkraft bei Kurvenfahrt besitzen die Querkräfte. Hierbei muss die entstehende Zentripetalkraft und das Giermoment entsprechend der Gewichtsverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse über die vier Kontaktflächen Reifen-Fahrbahn abgestützt werden. Aufgrund der Achskinematik und des Reifenverhaltens entsteht zwischen dem Angriffspunkt der Seitenkräfte an der Vorderachse und der Lenkachse ein Hebelarm, und somit ein resultierendes Moment, welches wiederum in einer Spurstangenkraft resultiert. Dieser Hebelarm wird als Nachlauf bezeichnet. Er setzt sich zusammen aus dem so genannten statischen (konstruktiven) und dynamischen (Reifen-) Nachlauf ([182], [302], [311]).

Der statische Nachlauf ergibt sich aus einer Schrägstellung der Lenkachse (**Bild 1–3**). Das Vorzeichen des Winkels ist stets derart gewählt, dass der Durchstoßpunkt der virtuell verlängerten Lenkachse durch die Fahrbahn in Fahrzeuglängskoordinaten vor dem geometrischen Radmittelpunkt liegt. Somit wird sich durch die Beziehung zwischen Schräglaufwinkel des Rades und Seitenkraft (**Bild 1–4**) ein der Größe dieses Nachlaufs

proportionales in die Geradeausstellung der Räder rückstellendes Moment ergeben. Die resultierende Seitenkraft im Latsch wirkt jedoch in der Regel nicht wie zuvor angenommen in der geometrischen Latschmitte, sondern in Längsrichtung versetzt (**Bild 1–3**). Dieser Anteil des Reifens am Gesamtnachlauf ist im Gegensatz zum konstruktiv festgelegten statischen Nachlauf (elastokinematische Effekte sollen hier unberücksichtigt bleiben) stark abhängig von der jeweiligen Fahrsituation (Seitenkräfte, Schräglaufwinkel, Radlast, Reibwert, ...). Die dynamischen Änderungen des Reifennachlaufs in Abhängigkeit des Schräglaufwinkels können der Darstellung von **Bild 1–4** entnommen werden. Auch wenn es sich hierbei um Messungen eines bestimmten Reifens handelt, so sind die Verläufe qualitativ auch auf andere Reifen übertragbar.

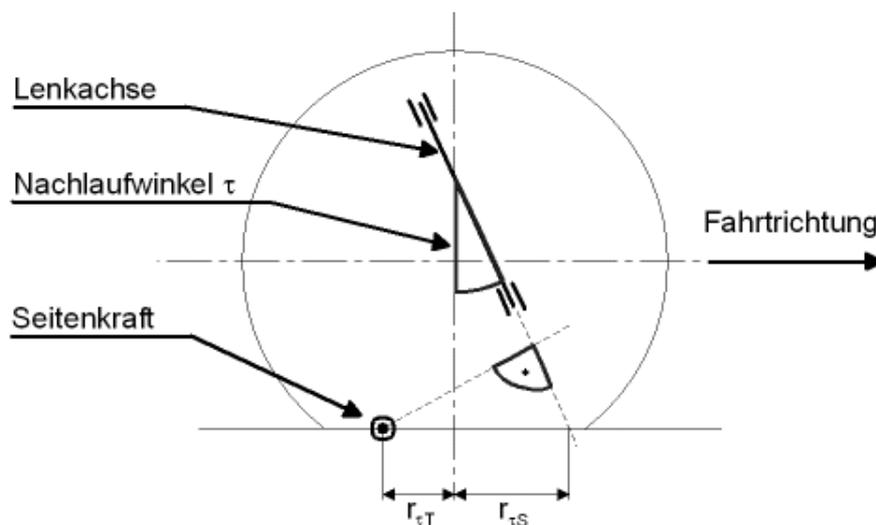


Bild 1–3: Statischer Nachlauf ($r_{\tau S}$) durch Lage der Lenkachse sowie dynamischer Nachlauf ($r_{\tau T}$) durch resultierenden Kraftangriffspunkt außerhalb der geometrischen Reifenmitte.

Dynamisch betrachtet erfolgt der Aufbau der Seitenkraft nicht gleichzeitig mit der Änderung des Lenkwinkels, sondern zeitlich verzögert. Der Aufbau der Seitenkraft ist jedoch nicht zeit-, sondern wegabhängig. Die Einlauflänge kann als Quotient von Schräglaufsteifigkeit des Reifens und seitlicher Reifenfederkonstanten beschrieben werden ([182]).

Weitere das Lenkradmoment beeinflussende Kräfte am Rad können unterschiedliche Längskräfte (Reibwert, Bremsen, Antreiben, Rollwiderstand) zwischen linkem und rechtem Rad sein. Die Differenz dieser beiden Kräfte ergibt dann über den so genannten Lenkrollhalbmesser (**Bild 1–5**) ein Moment um die Hochachse des Rades, was wiederum über die Spurstange als Kraft in das Lenksystem eingeleitet wird. Auch bei stehendem Fahrzeug können Spurstangenkräfte entstehen. Bei Lenkbewegungen im Stand muss das so genannte Bohrmoment (ein um die Hochachse gerichtetes Reibmoment des Reifens auf der Fahrbahn) überwunden werden. Weiterhin sollte bei eingeschlagenen Rädern die sich abstützende Vorderachslast über die Spreizung (**Bild 1–5**) und den Nachlaufwinkel (**Bild 1–3**) der Achse

ein in die Geradeausstellung der Räder rückstellendes Moment bewirken ([264]). Eine ungünstige Auslegung von Lenkrollradius, statischem und dynamischem Nachlauf kann in manchen Fahrsituationen jedoch auch zu einem ungewünschten negativen, aus der Geradeausstellung der Räder heraus gerichteten Moment führen.

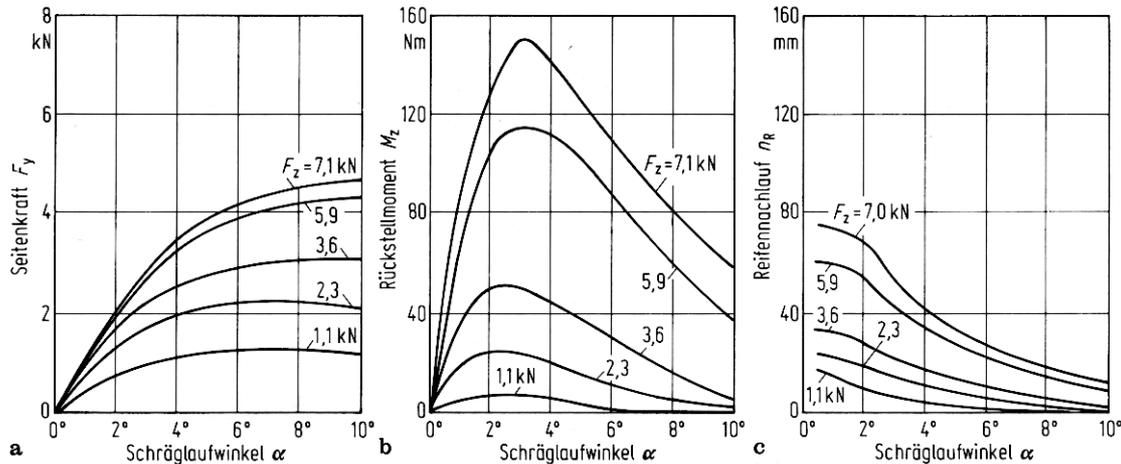


Bild 1-4: Funktionaler Zusammenhang zwischen Seitenkraft (a), Rückstellmoment (b), Reifennachlauf (c) und Schräglaufwinkel [182].

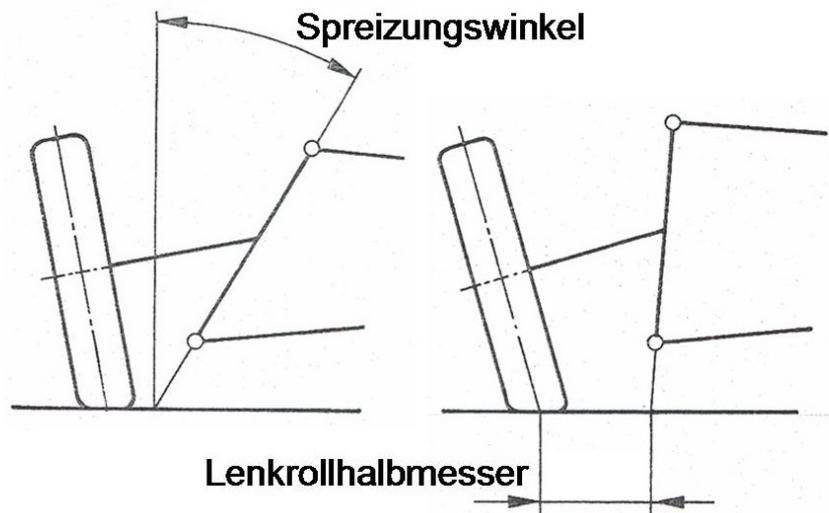


Bild 1-5: Bezeichnungen der Achsgeometrie: Spreizungswinkel und Lenkrollhalbmesser (nach [62], verändert).

Diese beschriebenen Kräfte und Momente werden über Spurstange, Lenkgestänge, Getriebe und Lenksäule an das Lenkrad und somit an den Fahrer weitergeleitet. Der Übertragungscharakter wird wesentlich durch das Lenkgetriebe bestimmt. Um die Belastung des Fahrers gering zu halten, aber auch um gesetzeskonform zu bleiben [75], wird ein, aus Fahrersicht gesehen, Untersetzungsgetriebe im Lenksystem verwendet. Das bedeutet, dass der Fahrer kleinere Kräfte/Momente, aber größere Wege/Winkel am Lenkrad stellen muss. Weiterhin existieren wie in jedem mechanischen System auch Reibungs-, Dämpfungs- und

Trägheitskräfte, die ebenfalls das Übertragungsverhalten des Lenksystems erheblich beeinflussen können.

Aufgrund gestiegener Achslasten und der Bemühungen um Komfortverbesserung und weiterer Entlastung des Fahrers haben sich Systeme zur Lenkkraftunterstützung weit verbreitet (z.B. [78], [137], [138], [139], [140], [264]). Wie bereits in Abschnitt 1.1 erwähnt, sind derzeit noch Systeme mit hydraulisch erzeugter Hilfskraft am weitesten verbreitet (z.B. [23], [91], [119], [126], [143], [193], [194], [195], [205], [211], [229], [263]). Diese Systeme verhalten sich jedoch nicht als proportionales System mit konstantem Verstärkungsfaktor. Vielmehr wird das Übertragungsverhalten für spezielle Fahrsituationen (Parken, Geradeausfahrt, Landstraßenfahrt, Hochgeschwindigkeitsfahrt) gezielt gestaltet (**Bild 1–6**). Weiterhin wird durch diese Systeme nicht nur die eigentliche Lenkkraftunterstützung beeinflusst, sondern es werden zusätzliche Reibungs-, Dämpfungs- und Trägheitscharakteristika in das System eingebracht ([72], [107], [203], [303]).

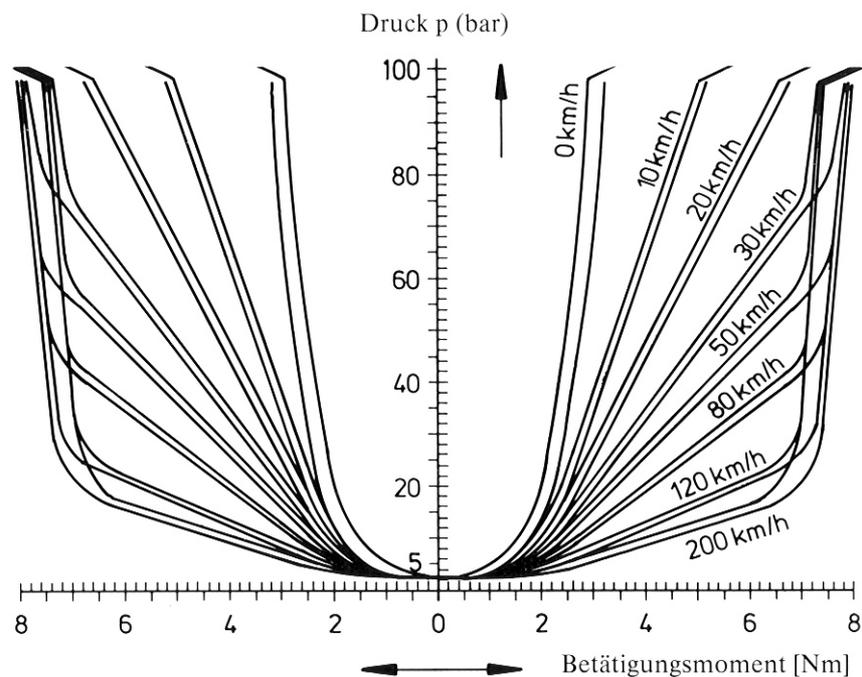


Bild 1–6: Variable Verstärkerkennlinien einer geschwindigkeitsabhängigen hydraulischen Lenkkraftunterstützung [307].

Bei Systemen mit elektrohydraulischer ([86], [129], [245]) und insbesondere mit elektromechanisch ([9], [11], [31], [37], [160], [161], [172], [198], [208], [258], [270], [297]) erzeugter Hilfskraft vereinfacht sich die Gestaltung des Lenkradmoments, da nun nicht nur das durch den Fahrer erzeugte Moment verstärkt oder abgeschwächt werden kann, sondern aktiv gewünschte Lenkradmomente (konservative und dissipative Anteile) eingestellt werden können. Bei Systemen mit der Möglichkeit einer variablen Lenkübersetzung bzw. einer Lenkwinkelüberlagerung ([1], [43], [61], [76], [85], [146], [150], [151]) oder auch bei Systemen mit vollständiger energetischer Entkopplung, so genannten Steer-by-Wire-Systemen ([22], [94],

[115], [116], [127], [145], [269], [272]), ist dies noch einfacher zu realisieren. Zusätzlich lässt sich hierbei auch das Weg/Winkel-Übertragungsverhalten nahezu beliebig gestalten. Mit zusätzlich gelenkter Hinterachse ([6], [179], [188], [196], [197], [220], [244], [252], [261], [266], [276]) lässt sich schließlich auch Phase und Amplitude von Querschleunigung und Gierbewegung anpassen.

Mensch-Maschine-Schnittstelle Lenkrad

Die bisher aus technischer Sicht beschriebenen Energieflüsse sollen im nachfolgenden Arbeitssystemmodell „Mensch-Fahrzeug-Umwelt“ mit dem Fokus „Lenkung“ um Signalflüsse ergänzt und noch einmal zusammenfassend dargestellt und diskutiert werden (**Bild 1–7**).

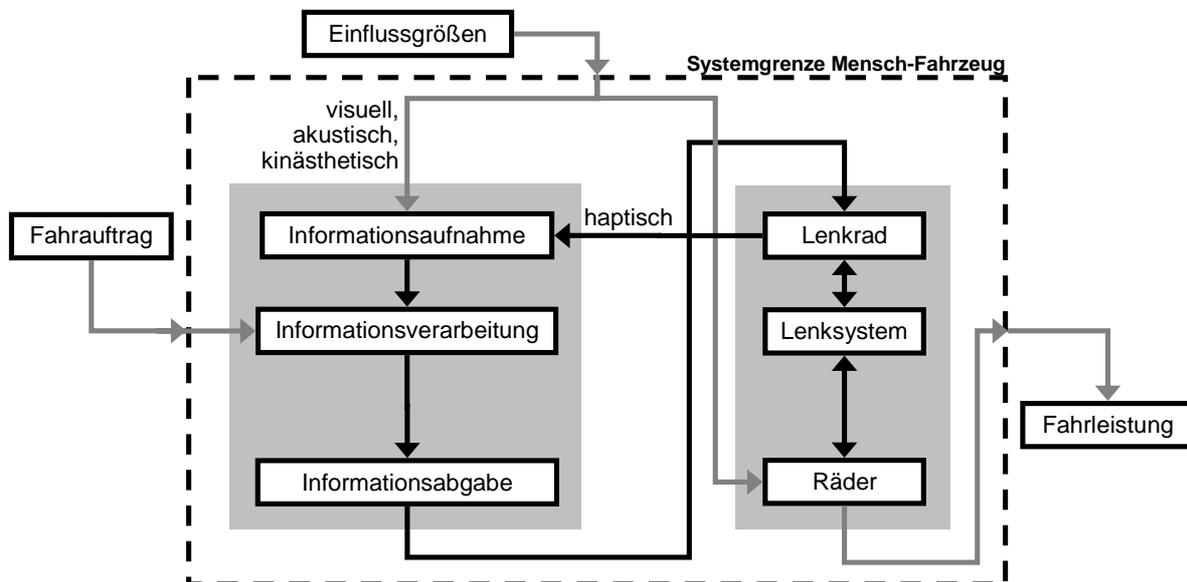


Bild 1–7: Arbeitssystemmodell Mensch-Fahrzeug-Umwelt zur Erklärung der Ausbildung eines „Lenkgefühls“ (eigene Darstellung, abgeleitet aus [3]).

In dieser stark vereinfachten Abbildung des realen Systems Mensch-Fahrzeug-Umwelt repräsentiert die gestrichelte Linie die Systemgrenze Mensch-Fahrzeug. Über diese Grenze hinweg existieren Signal-, Energie- und Stoffflüsse zwischen dem Mensch-Fahrzeug-System und der Umwelt. Außerhalb dieser Grenze befindet sich die Umwelt mit den für eine Lenktätigkeit notwendigen Eingangsgrößen – hier als „Fahrauftrag“ und „Einflussgrößen“ bezeichnet.

Hierbei beinhalten die „Einflussgrößen“ nicht nur Einflüsse, welche die Informationsaufnahme des Fahrers beeinträchtigen (Sichtbehinderung, Klima, Gesundheitszustand, ...), sondern auch visuelle und akustische Informationen über den Fahrzustand und die Umwelt sowie energetische Rückwirkungen durch die Fahrdynamik auf

die Fahrzeugkarosserie und den Fahrersitz und über Räder und Lenksystem auf die Betätigungseinheit. Gerade diese Rückwirkungen können – je nach Amplitude und Frequenz – der Fahrzeugführung dienlich oder abträglich sein. Die Ausgangsgrößen des Systems Fahrer-Fahrzeug wurden im Rahmen dieser Darstellung auf die Fahrleistung reduziert. Die Fahrleistung soll hierbei sowohl die Qualität der Fahrzeugführung als auch das Fahrgefühl, das sich beim Fahrer einstellt, beinhalten.

Innerhalb der Systemgrenze Mensch-Fahrzeug befinden sich die zwei Säulen Mensch (linke Säule) und Fahrzeug (rechte Säule). Während der Mensch durch die drei Ebenen Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung und Informationsabgabe beschrieben wird, wird das Fahrzeug – beschränkt auf Elemente zur lateralen Führung – durch Räder, Lenksystem und Lenkrad beschrieben. Wie im vorigen Abschnitt erläutert, wird der Fahrzustand indirekt über die Lenkung an den Fahrer weitergeleitet. Das Betätigungselement Lenkrad stellt also gleichzeitig auch ein Informationselement dar, das dem Fahrer somit bei seinen Lenkaufgaben Unterstützung bieten und das Fahrgefühl beeinflussen kann.

Auf der Fahrzeugführungsebene ([64], [65], [66], [67], [68]) beginnt der Fahrer zunächst einen Lenkradwinkel einzusteuern (antizipatorische Steuerung), um mit dem Fahrzeug einem Sollkurs folgen zu können. Dieser Sollkurs wird vom Fahrer maßgeblich aufgrund visuell gewonnener Informationen über Straßenverlauf und Verkehrssituation gebildet. Der Fahrer erhält bei Beginn der Lenkaktion zunächst aufgrund phasenvoreilender Charakteristiken (dissipative Lenkradmomentanteile) eine Momentinformation, die jedoch weitestgehend lenksysteminhärent und nicht fahrsituationsspezifisch ist ([118]). Diese phasenvoreilenden Momente sind einer präzisen Winkelstellung äußerst zuträglich. Nach Überwindung der lenksysteminhärenten Elastizität wird an den Rädern ein Radlenkwinkel eingestellt. Die entstehende Seitenkraft und deren Verteilung zwischen den Achsen entscheidet nun über den Istkurs des Fahrzeuges (**Bild 1–4**). Die Seitenkraft leistet die Zentripetalkraft- und Giermomentabstützung. Über den im vorigen Abschnitt beschriebenen Mechanismus (Übertragungsverhalten Spurstangenkraft – Lenkradmoment) stellt sich somit ein Rückstellmoment am Lenkrad ein. Der Fahrer erhält also eine im Lenkradmoment enthaltene Information über den aktuellen Fahrzustand. Ist der Fahrer aufgrund seiner Erfahrungen und daraus gebildeter Modelle in der Lage diese Information zu deuten, so kann er, falls nötig, nun auf der Stabilisierungsebene durch Änderung des Lenkradwinkels einen Abgleich zwischen Soll- und Istkurs vornehmen (kompensatorische Regelung). Regelungstechnisch betrachtet bildet der Fahrer eine Vorsteuerung mit unterlagerter Regelschleife (**Bild 1–8**).

Als primäre Informationsquelle dient dem Fahrzeugführer der visuelle Kanal [136]. Zur Stabilisierung zieht er zusätzlich auch haptische, kinästhetische und akustische Informationen hinzu [243]. Die Begrifflichkeiten Haptik und Kinästhetik finden in der Literatur keine einheitliche Verwendung. Im Rahmen dieser Arbeit soll sich auf die in [41] gewählte Definition bezogen werden. Hierbei umfasst die kinästhetische Wahrnehmung die Eigenbewegung des Körpers im Raum, gestützt auf Informationen des Vestibularorgans, des

Maculaorgans, der Stellungsrezeptoren der Muskeln und Gelenke, und der Mechanorezeptoren in der Haut. Die Haptik beinhaltet schließlich die Wahrnehmung von Bewegung, Form und Oberflächenkonsistenz von berührten Objekten. Hierbei fusioniert der Organismus Informationen der Stellungsrezeptoren in Muskeln und Gelenken, der Mechanorezeptoren in der Haut sowie der Thermorezeptoren.

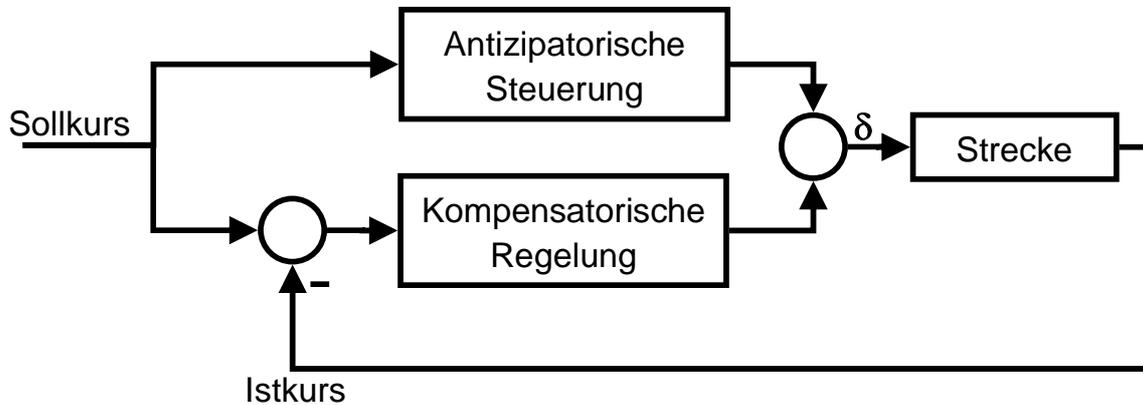


Bild 1–8: 2-Ebenen-Modell der Fahrzeugführung mit Vorsteuerung und unterlagerter Regelung (nach [66], modifiziert).

Die für die Fahrzeugführung wichtigen haptischen Informationen basieren weitestgehend auf der Betätigung/Rückmeldung der primären Bedienelemente (Lenkrad/Pedalerie). Aber auch über den Fahrzeugsitz in das Gesäß und die Beine eingeleitete Kräfte finden Berücksichtigung.

Die kinästhetische Information nutzt der Fahrer zur Bestimmung der Fahrzeugbewegung, sowie seiner Bewegung relativ zum Fahrzeug. Akustische Informationen können der Wahrnehmung von Geschwindigkeit oder auch möglicher Kraftschlussänderungen (z.B. Regen/Spritzwasser, Reifenquietschen) dienen.

Während im Normalfahrbereich ($a_y < 5\text{m/s}^2$, Erklärung siehe S. 13) die meisten Informationen durch den optischen Sinneskanal gewonnen werden, nimmt bei anspruchsvolleren Fahraufgaben die Bedeutung von haptischen und akustischen Informationen für die Fahrzeugstabilisierung zu [243]. Die haptischen Informationen können im Vergleich zu visuellen oder vestibulären Informationen auf unterbewusster Ebene durch die dort höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit wesentlich schneller in eine entsprechende Handlung umgesetzt werden ([73], [89]). Hieraus ergibt sich speziell in unvorhergesehenen, kritischen Situationen (z.B. Seitenwind [82]) eine verbesserte Regelgüte des Fahrers. Für die Gestaltung eines Bedienelements sollte nach Förster ([89], [90]) und Rühmann ([235]) generell berücksichtigt werden, dass kraftfreie Stellbewegungen nur unpräzise ausgeführt werden können. Ebenso ist „Spiel“, auch „Totgang“ oder „Lose“ genannt, zu vermeiden ([15]). Weiterhin beschreibt Bernotat ([15]), dass wegabhängige Widerstände als Stellungsrückmeldung sehr nützlich sind und stellgeschwindigkeitsabhängige Widerstände

ungewollte Eingaben unter Vibration mindern. Weiterhin können Dämpfungsanteile der Abschwächung oder der Verhinderung ungewollter Lenkungsschwingungen dienen ([45], [102], [214], [271]). Massenproportionaler Widerstand ist i. Allg. „wegen seiner Störwirkung zu vermeiden“ ([234] zitiert in [15]).

Die hohe Priorität des haptischen Sinneskanals bei der Fahrzeugführung wird auch bei der Betrachtung der möglichen Verarbeitungsgeschwindigkeit und Informationsrate der unterschiedlichen Sinneskanäle deutlich. In **Bild 1–9** sind drei Ebenen der Informationsverarbeitung dargestellt ([89]): Quasireflex, unterbewusster Pfad und bewusster Pfad. Von Rasmussen [219] wird die Informationsverarbeitung ebenfalls in drei Ebenen unterteilt, die er als fertigkeitbasiert, regelbasiert und wissensbasiert bezeichnet. Die fertigkeitbasierte Ebene ermöglicht eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit und somit eine sehr schnelle Reaktion auf situative Veränderungen. Es handelt sich hierbei um sensumotorische Handlungen, die ohne bewusste Regulation als automatisierte, gleichmäßige und hochintegrierte Verhaltensmuster auftreten [162]. „Das regelbasierte Verhalten läuft auf kognitiv anspruchsvolleren Ebenen ab und wird durch einfache Entscheidungsvorgänge auf Basis von gespeicherten Regeln bestimmt. Diese Regeln werden durch empirische Erfahrungen, kommunizierte oder gelesene Verhaltensanweisungen gesammelt“ ([3]). In neuen, unbekanntenen Situationen, liegen noch keine Regeln vor, so dass die Informationsverarbeitung auf der wissensbasierten Ebene abläuft.

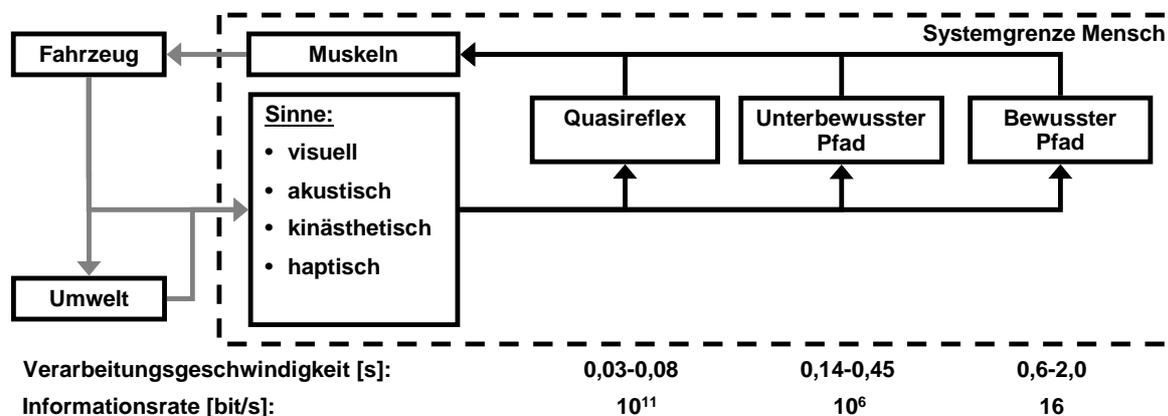


Bild 1–9: Schematische Darstellung der Informationsverarbeitung des Fahrers (nach [73] und [89], modifiziert).

In der Regel stehen dem Fahrer zeitlich vor der visuell wahrnehmbaren Änderung der Fahrzeugbewegung bereits haptische Informationen über die Betätigungseinrichtungen zur Verfügung. Können diese Informationen durch beim Fahrer vorhandene Erfahrungen auf dem regelbasierten (unterbewussten) Pfad oder fertigkeitbasierten Pfad (Quasireflex) verarbeitet werden, so kann sehr schnell eine notwendige Handlung eingeleitet werden ([89]).

Die jeweiligen menschlichen Fähigkeiten der Informationsaufnahme und –verarbeitung spielen bei der Qualität der Fahrzeugführung eine entscheidende Rolle. Die

Leistungsfähigkeit eines jeden Menschen ist abhängig von dessen anatomischen Eigenschaften, physiologischen Funktionen, psychischen Prozessen und seiner subjektiven Wertebildung ([218]). Ebenso können bezüglich der Empfindung und Beurteilung von Erlebnissen inter- und intraindividuelle Unterschiede existieren ([298]).

Bezieht man diese Aussagen auf das Lenkgefühl eines Fahrzeuges, so könnte dem Fahrer sein persönliches Lenkgefühl zur Verfügung gestellt werden, wenn explizit bekannt wäre, in welcher Art und welcher Ausprägung Informationen über das Fahrzeugverhalten diesem Fahrer dargeboten werden müssten.

Einige wenige Untersuchungen beschäftigen sich mit der Ermittlung von Wahrnehmungsschwellen der einzelnen Informationen. Diese Wahrnehmungsschwellen sind insofern wichtig, als dass sie aufzeigen, dass nicht alle anliegenden oder gemessenen fahrdynamischen Signale auch vom Fahrer wahrgenommen und somit interpretiert und in Handlungen umgesetzt werden können. Diese Wahrnehmungsschwellen sind daher sowohl bei der Interpretation von Versuchsdaten, als auch bereits bei der Auslegung von Parcours für die Versuchsdurchführung sehr dienlich. In [275] existiert hierzu folgende Tabelle:

Tabelle 1–1: Vestibuläre Wahrnehmungsschwellen fahrdynamischer Bewegungsgrößen aus der Literatur (nach [275]).

	a_y $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$	\ddot{y} $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^3} \right]$	$\dot{\psi}$ $\left[\frac{\circ}{\text{s}} \right]$	$\ddot{\psi}$ $\left[\frac{\circ}{\text{s}^2} \right]$	$\dddot{\psi}$ $\left[\frac{\circ}{\text{s}^3} \right]$
Durth [74]	0,18	0,09	12	6	3
McConnel [173]	0,18	0,09	5	2	1
Graybiel, Kerr, Bartley in [273]				bis 4	
de Vries in [273]				bis 4	
Clark, Steward [51]				4	

Auch bei der Gestaltung und Bewertung von Fahrmanövern ist es von großem Interesse, den Erfahrungsbereich der Fahrer zu kennen. Es ist davon auszugehen, dass ein Fahrer, der sich ausschließlich im normalen Straßenverkehr bewegt, einen geringeren Erfahrungsbereich besitzt als professionelle Testfahrer, die sich täglich im fahrdynamischen Grenzbereich bewegen. Ein in diesem Sinne untrainierter Autofahrer wird im Folgenden als „Normalfahrer“ bezeichnet. Für diese Normalfahrer sind in der Literatur die in **Tabelle 1–2** aufgelisteten Werte zu finden.

Tabelle 1–2: Erfahrungsbereich fahrdynamischer Größen von Normalfahrern aus der Literatur (Maximalwerte).

	a_Y $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$	$\dot{\psi}$ $\left[\frac{\circ}{\text{s}} \right]$	$\ddot{\psi}$ $\left[\frac{\circ}{\text{s}^2} \right]$
Hackenberg, Heißing [104]	~ 4,2		
Koide [152]	3,9		
Tomaske [275]			
Autobahn	2,5	3,5	1,8
Bundesstraße	1,8	4	2,5
Landstraße	4,8	10	3,8
Nebenstraße	4,5	17	4,5

Betrachtet man das Lenkradmoment über dem Schräglaufwinkel, so kann bei der Modellierung des Rückstellmoments in Fahrzeugmodellen zwischen einem linearen und einem nichtlinearen Bereich unterschieden werden (**Bild 1–4**). Im linearen Bereich kann der Reifennachlauf in erster Linie als konstant angenommen werden [230]. Im nichtlinearen Bereich werden entweder spezielle Reifenmodelle oder aber Kennfelder zur Modellierung des Reifenverhaltens und somit zur Verbesserung der Modellqualität genutzt. Es zeigt sich jedoch, dass bereits mit einfachen, linearen Einspurmodellen befriedigende Ergebnisse bei der Abbildung des Normalfahrbereichs möglich sind ([10], [230]). Für einfache Modelle wird in der Regel bis zu einem Drittel der maximal möglichen Seitenkraft linearisiert [182]:

$$\left(\frac{F_{Y,\max}}{F_Z} \right)_{lin} = \left(\frac{a_Y}{g} \right)_{lin} \leq \frac{1}{3} \mu_H \quad (1-1)$$

Bei trockener Straße (Reibbeiwert: 1 bis 1,2) entspricht dies in etwa der oberen Grenze des Erfahrungsbereichs eines Normalfahrers.

ber Wahrnehmungsschwellen von Lenkradmomenten bzw. von Lenkradmomentnderungen (Differenzschwellen) existieren nur wenige Untersuchungen. Sowohl [214] als auch [180] und [185] machen die Beobachtung, dass die Wahrnehmung der Differenzschwelle in Abhängigkeit der Höhe des Lenkkradmoments (Stimulus) variiert. Bei hohem Stimulus ist die Differenzschwelle größer als bei niedrigem Stimulus. Diese Beobachtung deckt sich mit dem aus der Psychophysik bekannten Weber'schen Gesetz, das ein konstantes Verhältnis zwischen Differenzschwelle und Stimulus formuliert (vgl. [106]):

$$k = \frac{\Delta S_0}{S_j} \quad (1-2)$$

mit ΔS_0 : Differenzschwelle, S_j : Stimulus.

In [45] und [247] wird gezeigt, dass bezogen auf Lenkradmomentuntersuchungen die Gültigkeit des Weber'schen Gesetzes nicht bestätigt werden kann (**Bild 1–10**). Es ist bekannt, dass das Weber'sche Gesetz im Bereich geringer Stimuli seine Gültigkeit verliert ([106]). Es kann daher angenommen werden, dass die Lenkradmomentstimuli in beiden Untersuchungen (bis 4,5 Nm) im unteren Stimulusbereich lagen. Weiterhin könnten die Versuchsbedingungen entscheidend für die beobachteten Differenzschwellen sein. Während Schumann ([247]) von den Probanden parallel eine Trackingaufgabe, bei der der Lenkradwinkel vom Probanden entsprechend einer Vorgabe nachgeführt werden soll, durchführen lässt, ist dies bei den Untersuchungen von Buschardt ([45]) nicht der Fall. Eine Überprüfung von Buschardt für einen ausgewählten Lenkstimulus bei paralleler Trackingaufgabe hat sogar eine geringere Differenzschwelle zur Folge ($\Delta S_0 = 0,33 \text{ Nm}$, $S_j = 3 \text{ Nm}$). Dies könnte nach Buschardt z.B. in der geringeren durchschnittlichen Belastung einzelner Muskelgruppen durch die Bewegung im Rahmen der Trackingaufgabe begründet sein. Ebenfalls stellte Buschardt bei den Versuchen mit paralleler Trackingaufgabe fest, dass die zuvor ermittelten Unterschiede der Differenzschwellen bei Erhöhung oder Verringerung des Lenkradmoments nun nicht mehr auszumachen waren. In der Untersuchung von Schumann wurden den Probanden Lenkradmomentverläufe präsentiert, die sowohl negative als auch positive Lenkradmomentveränderungen beinhalteten, so dass hieraus keine Unterscheidung der Differenzschwellen bei Erhöhung oder Verringerung abgeleitet werden kann.

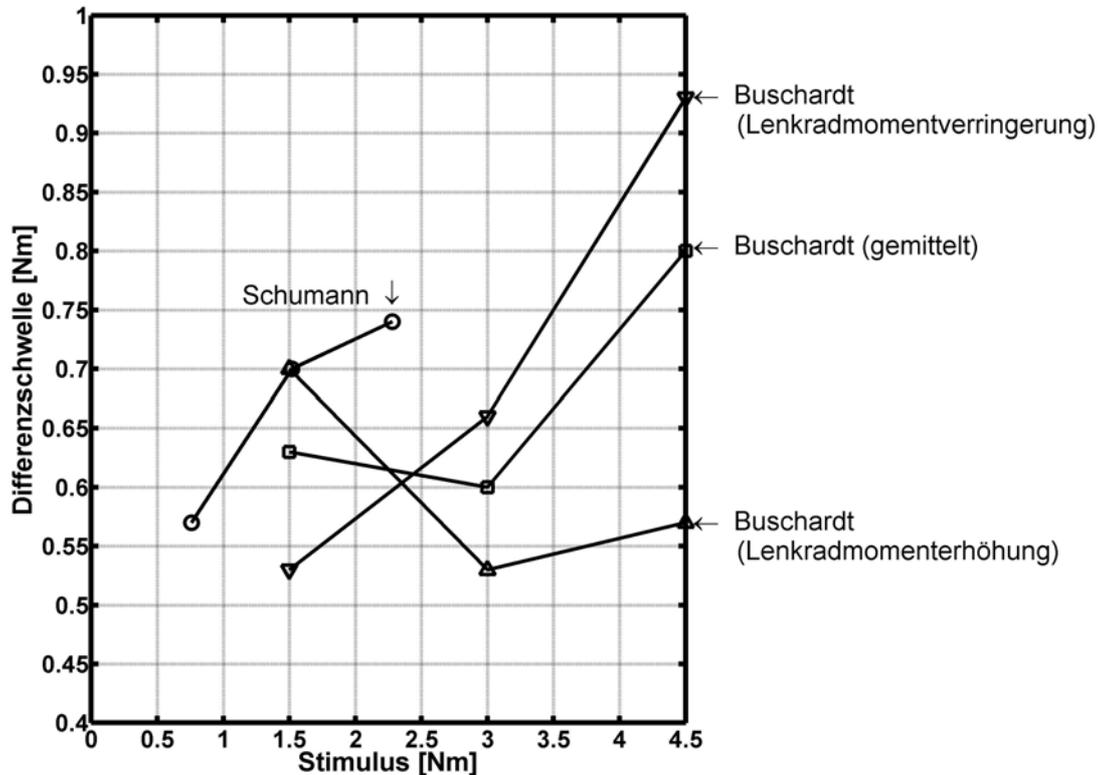


Bild 1–10: Darstellungen der ermittelten Differenzschwellen des Lenkradmoments in den Untersuchungen von Buschardt [45] und Schumann [247].

1.2.2 Das Lenkgefühl

„Gefühl lässt sich nicht definieren, sondern nur umschreiben, da es sich auf nichts zurückführen lässt. In Gefühlen manifestieren sich persönliche Stellungnahmen des einzelnen zu den Inhalten seines Erlebens“ [70]

Diese persönliche Stellungnahme entsteht durch Gewichtung und Bewertung verschiedenster Wahrnehmungen bewusster oder unterbewusster Art sowie deren Reflexion an bisherigen Erfahrungen und Wahrnehmungen [298]. Bezogen auf den Begriff „Lenkgefühl“ bedeutet dies, dass in erster Linie alle Informationen und Erfahrungen des Fahrers aus dem Bereich Fahrzeugführung/Lenken/Querregelung solch ein Gefühl definieren. Aber auch persönliche Einstellungen und charakterliche Ausprägungen würden solch ein Gefühl beeinflussen können.

Im vorigen Abschnitt wurde auf die für den Fahrer relevanten Informationen und Informationskanäle bei der Fahrzeugführung eingegangen. Offen bleibt aber, inwieweit der Fahrer eine klare Zuordnung von Informationen zur Quer- oder Längsregelung vornehmen kann. Teilweise liegen Informationen redundant von mehreren Sinneskanälen vor, teilweise wird ein und dieselbe Information zur Quer- und Längsregelung verwendet ([142]). Auch kann bei der komplexen Zusammensetzung des Lenkradmoments oft nicht eindeutig auf einen bestimmten Fahrzustand geschlossen werden. Um dies zu erreichen müsste das Lenkradmomentsignal mit anderen Informationen fusioniert und interpretiert werden ([41]). Dies gelingt nur, insofern geeignete Erfahrungen und Modelle beim Fahrzeugführer vorhanden sind. Weiterhin spielt die Reflexion an bisherigen Erfahrungen eine große Rolle für die Gewichtung und Bewertung von Informationen ([41], [298]).

All diese Gründe lassen vermuten, dass es für einen in der Beurteilung von Fahrzeugen untrainierten Autofahrer mit seinem begrenzten Erfahrungsschatz und Grenzen bei der Informationsaufnahme sehr schwer fallen dürfte, ein „Lenkgefühl“ reproduzierbar zu interpretieren und allgemeingültig zu formulieren. Diese Erfahrungen münden bei Setright ([254], [255]) schließlich in der Aussage: „steering feel is a myth“.

Trotzdem existieren zahlreiche Untersuchungen in der wissenschaftlichen Literatur, die zumindest Teilaspekte eines „Lenkgefühls“ beschreiben oder optimieren. Untersuchungen, die sich ausschließlich mit der Gestaltung des Lenkradmoments beschäftigen, lassen sich im Wesentlichen in drei Kategorien unterteilen. Dies sind Untersuchungen zum „Center-Point-Feeling“ ([57], [58], [59], [79], [80], [81], [120], [206], [213]), Untersuchungen zu fahrsituationsabhängigen ([101], [107], [122], [152]), insbesondere auch geschwindigkeitsabhängigen Lenkradmomentverläufen ([5], [17], [103], [240], [267]) und Untersuchungen zu Lenkassistentenfunktionen ([18], [19], [45], [92], [256], siehe Abschnitt 1.2.3).

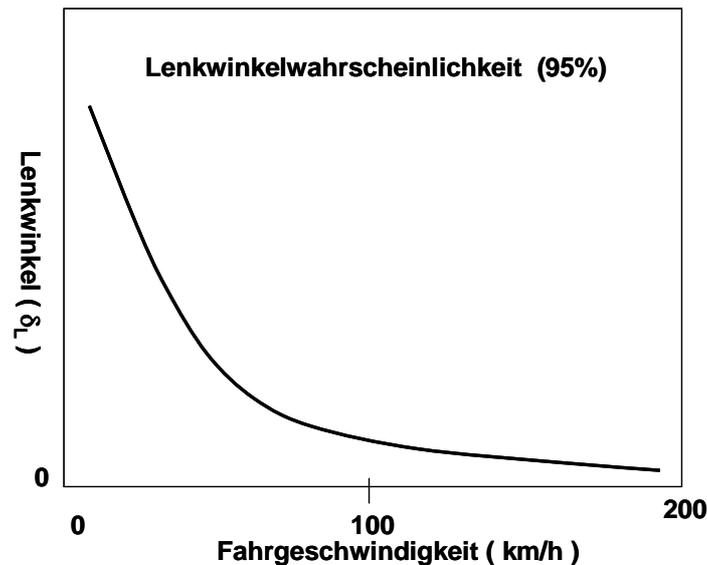


Bild 1–11: Lenkwinkelwahrscheinlichkeit über der Fahrzeuggeschwindigkeit (nach [105]).

Das Lenkradmoment im Bereich der Mittenposition des Lenkrades, das so genannte „Center-Point-Feeling“ besitzt eine herausragende Bedeutung. Knapp 50% der zurückgelegten Fahrleistung wird auf Schnellstraßen bzw. Autobahnen erbracht [80]. Aufgrund der Streckenführung der verschiedenen Straßenkategorien und den bereits aus **Tabelle 1–2** bekannten Erfahrungsbereichen (Abhängigkeit der Querschleunigung von der Straßenkategorie bzw. Fahrzeuggeschwindigkeit) ergibt sich für die Lenkradwinkelwahrscheinlichkeit der in **Bild 1–11** dargestellte Verlauf.

Deppermann [57] und Engels [80] beschreiben die Güte des Geradeauslaufs primär durch die vom Fahrer notwendigen, aufzubringenden Effektivwerte des Lenkradwinkels. Aber auch in diesen Untersuchungen wird auf das Lenkradmoment als wesentlicher Bestandteil eines subjektiv empfundenen Geradeauslaufs hingewiesen. Auch wenn das Verhalten des in den Untersuchungen verwendeten Fahrermodells nicht durch Lenkungsreibung oder Rückstellmomente beeinflusst wird, so erwähnt Deppermann [57] auch, dass diese Größen das Lenkgefühl des Fahrers beeinflussen werden. Nach Deppermann [57] stellt sich ein gutes Lenkgefühl um die Mittellage bei geringer Lenkungsreibung (Reibung zwischen Lenkrad und Lenkgetriebe), großem Nachlauf und steifer Lenkung ein.

Waldmann ([285], [286]) beschreibt ebenfalls in seiner Arbeit, die eine große Bandbreite an Fahrsituationen des Normalfahrbereichs untersucht, dass eine Variation der Lenkradmomentverläufe zu keiner Veränderung der Lenkradwinkelverläufe führt. Auch Good [101] kommt in seiner Untersuchung zu dem Schluss, dass die Güte der Fahrzeugführung, bewertet durch z.B. RMS-Wert der Gierrate ($\sqrt{\dot{\psi}^2}$), primär von den Parametern Gierverstärkung oder Ansprechzeit des Fahrzeugs abhängt und sich das Lenkradmoment eher im Subjektivurteil niederschlägt. Jürgensohn [141] berichtet nach zahlreichen Untersuchungen von Lenkradwinkelverläufen von einer „Handschrift des Lenkens“, die verschiedene Fahrer

eindeutig voneinander unterscheidet. Auch Neukum [200] berichtet von reproduzierbaren Lenkstrategien verschiedener Fahrer.

Diese Aussagen lassen den Schluss zu, dass eine Veränderung des Lenkradmoments nicht den Fahrstil, also die „Handschrift“ des Fahrers ([141]) beeinflussen würde, sondern lediglich seine Empfindung, sein „Lenkgefühl“.

Farrer [81] definiert das „On-Centre Handling“ durch das Zusammenspiel von drei Anteilen. Ein Fahrzeug, das minimale Lenkkorrekturen (Handwheel Activity) benötigt, den Fahrer darüber informiert, wie groß die Korrektur ausfallen muss (Steering Feel) und anschließend die Eingabe durch den Fahrer präzise ausführt (Vehicle Response), besitzt ein gutes "On-Centre Handling".

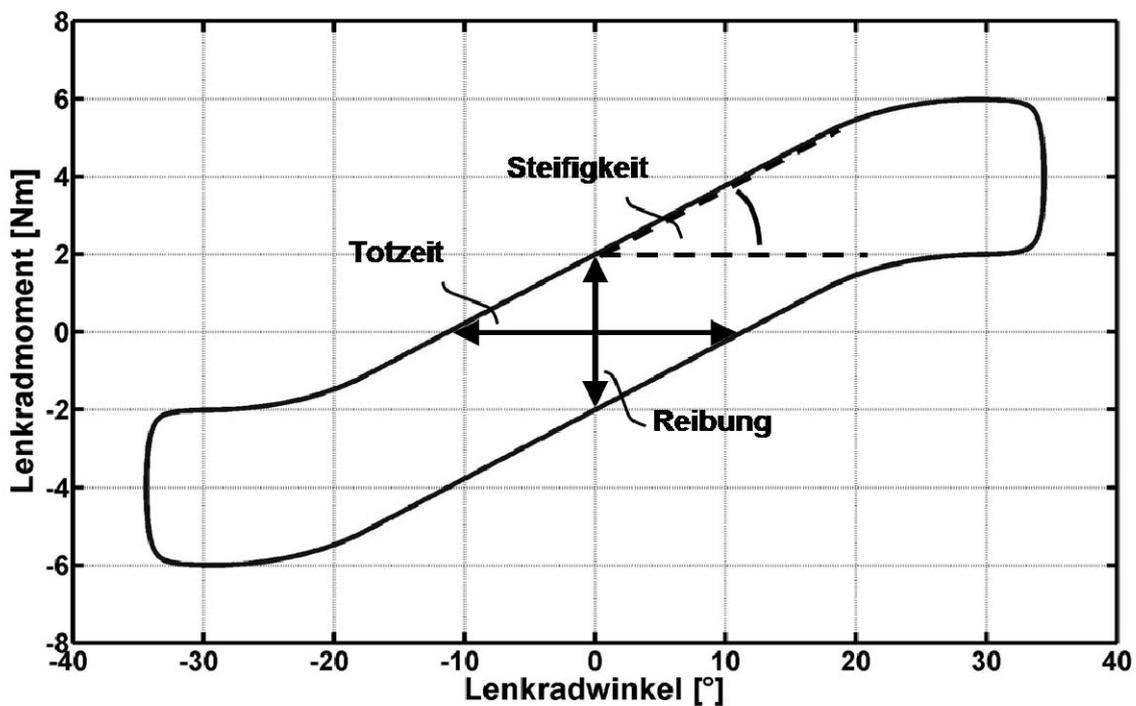


Bild 1–12: Schematische Darstellung der Hystereseschleife: Lenkradmoment über Lenkradwinkel (nach [81]).

Die Kennwerte zur Objektivierung des Begriffs „Steering Feel“ nach Farrer [81] lassen sich an der Hystereseschleife Lenkradmoment über Lenkradwinkel (**Bild 1–12**) darstellen (Versuchsbedingungen: sinusförmiger Lenkradwinkelverlauf mit 0,2 Hz bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von $v = 100$ km/h und einer maximalen Amplitude der Fahrzeugquerbeschleunigung von $a_y \approx 1$ m/s²). Die Breite der Schleife in der Vertikalen bei Lenkradwinkel = 0 wird der Reibung im Lenksystem gleichgesetzt. Die Breite der Schleife in der Horizontalen bei Lenkradmoment = 0 wird als ein Maß für die Momententotzeit angesehen. Ein drittes Charakteristikum, die Steifigkeit der Lenkung, wird durch den Gradienten des Lenkradmomentes gegenüber dem Lenkradwinkel bei Lenkradwinkel = 0°

beschrieben. Auch Dettki [59] nutzt die Steifigkeit, hier den Lenkradmoment-Radlenkwinkel-Gradienten, zur Beschreibung des Lenkgefühls um die Mittellage. Unter den gleichen Versuchsbedingungen wie bei Farrer [81] zeigt sich in seiner Untersuchung ein subjektives Beurteilungsoptimum bei $\frac{M_H}{\delta_s} \approx 9,5 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$.

Norman [206] greift in seiner Untersuchung ebenfalls auf Kennwerte zurück, die sich aus der Darstellung von Hystereseschleifen ableiten lassen. Allerdings nutzt er nicht allein die Beziehung zwischen Lenkradmoment und Lenkradwinkel, um daraus Kennwerte abzuleiten, sondern er zieht die Beziehungen Lenkradmoment zu Querbeschleunigung, Lenkradwinkel zu Querbeschleunigung und Gradient der Lenkarbeit zur Querbeschleunigung hinzu. Für den aus der Lenkarbeit abgeleiteten Kennwert „Steering Work Sensitivity“ (Gleichung (1-3), siehe auch [133]) lässt sich nach Norman [206] eine Bevorzugung für den Bereich $2,5 \cdot \frac{g^2}{100 \cdot \text{Nm}} < SS < 3,5 \cdot \frac{g^2}{100 \cdot \text{Nm}}$ ableiten.

$$SS = \left(\frac{da_y}{d\delta_H} \right) \cdot \left(\frac{dM_H}{dM_H} \right) \quad (1-3)$$

Weiterhin ist in einigen Untersuchungen der Kennwert

$$\frac{dM_H}{da_y} \quad (1-4)$$

zu finden. Nach Waldmann [287] sollte dieser Wert bei 35,4 Nm/g liegen. Segel [252] empfiehlt einen Wert von 23 Nm/g und Good [101] definiert den optimalen Bereich von 22-28 Nm/g.

Wie bereits in Abschnitt 1.2.1 beschrieben, wurden hydraulische Lenkkraftunterstützungen entwickelt, die es ermöglichen, die Hilfskraft auch in Abhängigkeit von der Fahrzeuggeschwindigkeit zu dosieren. Ziel war es, beim Parkieren die Lenkarbeit durch Erhöhung der Hilfskraft zu verringern und bei hohen Geschwindigkeiten durch die Reduktion der Lenkkraftunterstützung das Fahrzeug nicht zu nervös werden zu lassen ([5], [34], [138], [139]). Bertolini [17] und Green [103] belegen in ihren Untersuchungen, dass solch ein Anstieg des Lenkradmoments mit steigender Fahrgeschwindigkeit sich mit den von den Probanden bevorzugten Lenkradmomenthöhen deckt (**Bild 1–13**).

Sato [240] schließlich untersucht die Abhängigkeit des Reibmoments (gemäß der Lenkradmoment-Lenkradwinkel-Hystereseschleife) von der Fahrzeuggeschwindigkeit. Aus der Beurteilung verschiedener Lenkungen leitet der Autor einen bevorzugten Bereich von 0,1 bis 0,2 Nm ab, der sich auch mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit nicht verändert.

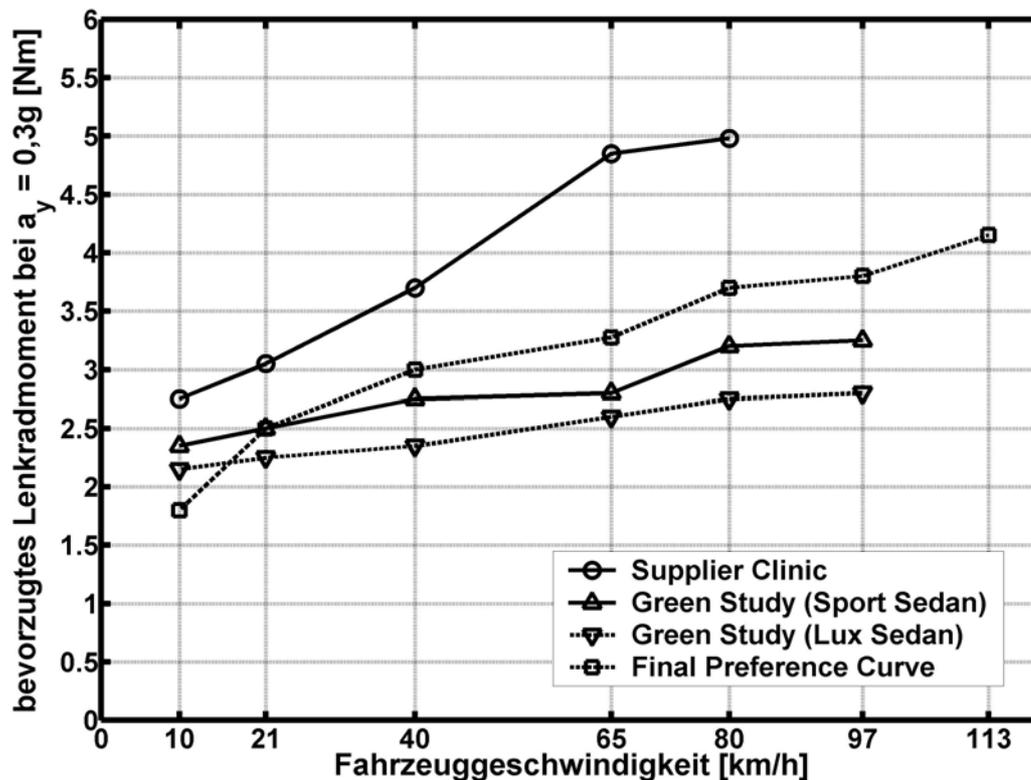


Bild 1–13: Bevorzugte Lenkradmomente in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit (nach [17]).

Nahezu alle beschriebenen Untersuchungen betrachten bei der Bewertung oder Optimierung eines Parameters lediglich das Gesamtkollektiv. Es wird versucht, ein allgemeingültiges Optimum zu definieren. Wie zu Beginn des Abschnitts erwähnt, entsteht ein Gefühl durch eine persönliche Empfindung und somit auch eine individuelle Stellungnahme zu Erlebnissen. Es kann also auch nicht ohne weiteres davon ausgegangen werden, dass alle Probanden die gleiche Gewichtung und Bewertung der Informationen durchführen und sich somit ein gleiches „Lenkgefühl“ einstellt. Dies bedeutet wiederum, dass, sofern kein allgemeingültiges Optimum existiert, eine Abhängigkeit von Probandenbeurteilungen zum „Lenkgefühl“ und z.B. demografischen Merkmalen wie „Alter“ und „Geschlecht“ zielführend sein könnte. In diesem Zusammenhang sollte bei einer Befragung von Normalfahrern die geringere Leistungsfähigkeit dieser Gruppe im Vergleich zu professionellen Testfahrern bedacht werden. Dies umfasst z.B. die Überprüfung von Wahrnehmungsschwellen, Adaptivität und Konzentrationsfähigkeit. All diese Faktoren spiegeln sich in der Reproduzierbarkeit (Streuung) der Probandenurteile wider ([163], [200]).

Es existieren zahlreiche Untersuchungen, die fahrdynamische Kennwerte nutzen, um einen Zusammenhang zwischen dem Fahrverhalten des Fahrzeugs (z.B. [1], [53], [54], [101], [122], [252]) oder auch einem Fahrstil des Probanden (z.B. [19], [38], [79], [156], [304]) mit subjektiven

Beurteilungen herzuleiten. Die Untersuchungen sind jedoch bezüglich ihrer Fragestellungen nicht vergleichbar. Dies spiegelt sich auch in Anzahl und Kombination der für die Bildung der Kennwerte genutzten Größen wieder. Ein allgemeingültiger Kennwert z.B. zur Beschreibung eines Fahrstils wurde nicht gefunden. Dennoch ist festzustellen, dass häufig die fahrdynamischen Größen Lenkwinkel (z.B. [57], [81], [122], [225]) und Querschleunigung (z.B. [133], [152], [224], [240]) Verwendung finden.

Wie bereits beschrieben, werden von Marketingabteilungen der Automobilindustrie oftmals zwei unterschiedliche Kundenbedürfnisse identifiziert. Die Umsetzung in Fahrzeugen findet sich dann meist in den Termini „Sport“ und „Komfort“ oder analogen Begrifflichkeiten wieder (z.B. [8], [24], [25], [178]). Neben einem veränderbaren Übertragungsverhalten von Antriebsstrang oder Fahrwerk steht diese Anpassungsmöglichkeit auf elegante Weise auch bei Lenksystemen mit elektromechanischer Hilfskraft zur Verfügung, auch wenn nur wenige Serienfahrzeuge diese Möglichkeit nutzen [9]. Friedrich [94] unterteilt hier ebenfalls zwischen sportlich-orientierten und komfort-orientierten Fahrern. Als Vorschläge für eine Lenkradmomentauslegung werden für die erste Gruppe größere Rückstellmomente und für die zweite Gruppe kleinere Momente angeführt. Worauf sich diese Aussage stützt, geht jedoch aus der Veröffentlichung nicht hervor. Auch wird nicht näher darauf eingegangen, wie ein sportlicher oder komfortabler Fahrer definiert wird.

Hiramatsu [121] erwähnt in seiner Untersuchung, dass u.a. eine Abhängigkeit der Beurteilung von Fahrzeugvarianten und der Fahrerfahrung der Probanden besteht. Ebenfalls beschreibt Abendroth [3], dass Fahrer unterschiedlichen Alters auch ein unterschiedliches Unterstützungsbedürfnis durch Assistenzfunktionen zeigen. Auch existieren Patentschriften, die eine Anpassung verschiedener Fahrzeugparameter (Lenkung, Bremse, Antriebsstrang) an den Fahrer in Abhängigkeit seines Alters vorschlagen [278].

1.2.3 Synthetische Lenkradmomente

In Abschnitt 1.2.1 wurde der komplexe Zusammenhang zwischen Informationen am Bedienelement „Lenkrad“ und dem eigentlichen vorherrschenden Fahrzustand erläutert. Existiert ein aktiver Momentensteller in der Lenkanlage (z.B. EPS, SbW), so kann ein Lenkradmoment direkt aufgrund von Sensorinformationen oder indirekt über Modelle, die den fahrdynamischen Zustand beschreiben, synthetisch erzeugt werden. Das Moment kann nun z.B. derart gestaltet werden, dass es nur noch proportional einer einzigen fahrdynamischen Größe ist ([28], [29], [30], [77], [154]). Dies würde dem Fahrer die Interpretation des aktuellen Fahrzustandes aufgrund der haptisch erfassten Lenkradmomentinformation deutlich erleichtern. Bubb [41] spricht hierbei von der Verbesserung der Fahrzeugführung durch mechatronische Systeme.

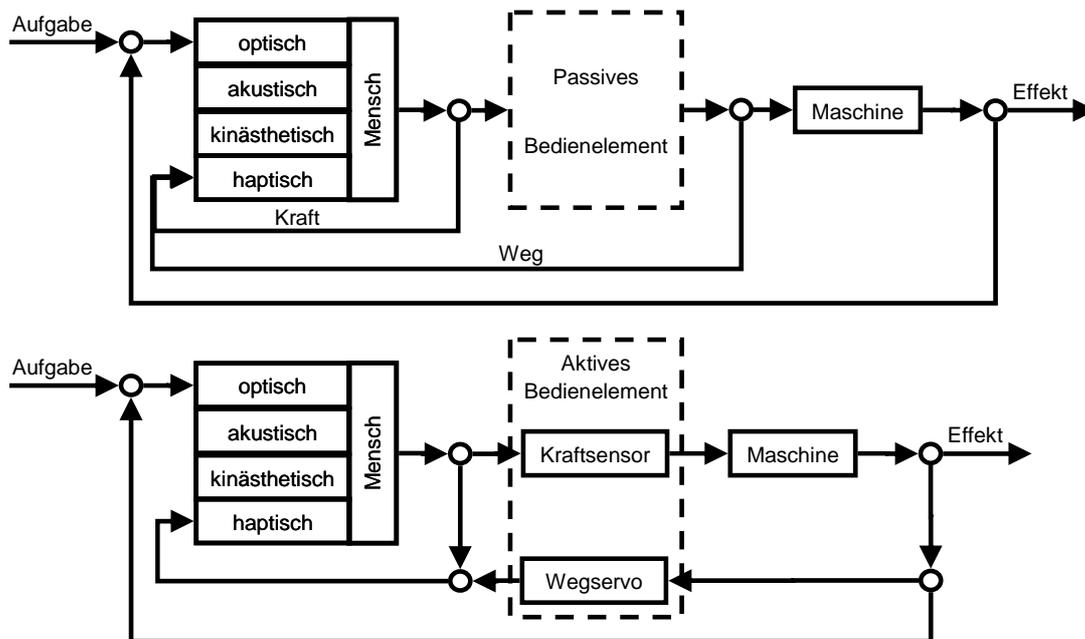


Bild 1–14: Vergleich: passives Bedienelement und aktives Bedienelement mit Wegrückmeldung (nach [28]).

Bild 1–14 zeigt den Informationsfluss in regelungstechnischer Darstellung. Es wird deutlich, dass der Fahrer durch ein aktives Bedienelement unmittelbar und eindeutig interpretierbar über den aktuellen Fahrzustand, also das Resultat seiner Eingabe informiert werden kann. Der Abgleich zwischen Soll- und Istkurs kann somit sehr schnell erfolgreich umgesetzt werden.

Weiterhin können zusätzliche Warninformationen in ein synthetisches Lenkradmoment eingebunden werden. Bei der Gestaltung dieser Warninformation ist darauf zu achten, dass diese Information weiterhin einen geringen Komplexitätsgrad aufweist, somit schnell und eindeutig vom Fahrer interpretiert werden kann und entsprechende Handlungen daraus abgeleitet werden können [45].

Neben Warninformationen über den aktuellen Kraftschlussbeiwert ([19], [45]) können z.B. auch Spurverlassenswarnungen, permanent wirkende Spurführungsfunktionen oder auch fahrdynamische Stabilisierungsfunktionen bei der Gestaltung eines synthetischen Lenkradmoments berücksichtigt werden ([92], [247], [256]).

Aus der Diskussion in den vorangegangenen Abschnitten werden nun folgende Anforderungen an ein synthetisches Lenkradmoment abgeleitet:

- die Verringerung der Komplexität der Fahrzustandsinformation am Lenkrad und deren phasenoptimierte Darstellung.
- die Möglichkeit der Implementierung von Warn- und Assistenzfunktionen unter Beachtung der eindeutigen und schnellen Interpretierbarkeit durch den Fahrer.
- die fahrertyp- und fahrsituationsspezifische Anpassung der Momentcharakteristik zur Verbesserung der individuellen Fahrzeugführung und des persönlichen „Lenkgefühls“.

Es existieren zahlreiche Untersuchungen, die sich mit der Modellierung von Lenkradmomenten beschäftigen ([10], [63], [69], [71], [128], [167], [192], [203], [207], [210], [238], [259], [303]). Allerdings haben diese Modelle meist die möglichst gute Abbildung der Realität zum Ziel – oft weit über den zuvor definierten Normalfahrbereich hinaus. Buschardt [45] nutzt für seine Untersuchung zur Lenkmomentwarnung ein von der Grundstruktur her stark vereinfachtes Modell, das ähnlich unter anderem auch in [204] und [214] zu finden ist. Generell kommen hierbei die grundlegenden Parameter eines physikalischen Ersatzmodells – Steifigkeit, Dämpfung, Trägheit – zur Anwendung. Diese parametrischen Modelle erlauben auf einfache Weise eine Erfüllung der ersten beiden Anforderungen an ein synthetisches Lenkradmoment. Allerdings besteht die Gefahr, dass eine Simplifizierung der Darstellung des synthetischen Lenkradmoments zu einer ungenügenden Erfüllung der Anforderungen an ein gutes Lenkgefühl führt. Hierzu wurden in der Literatur bisher keine quantifizierbaren Vergleiche von realen mit einfachen, synthetischen Lenkradmomenten auf subjektiver Ebene gefunden.

1.3 Fazit

Das Lenkrad dient für den Fahrer sowohl als Bedienelement zur Vorgabe eines Sollkurses als auch als Informationsquelle zur Einschätzung des aktuellen Istkurses. Durch Einsteuern eines Lenkradwinkels versucht der Fahrer einer gewünschten Solltrajektorie zu folgen. Durch die hierdurch entstandene Kursänderung kommt es zu Änderungen der Kräfte im Reifenlatsch und somit zu Veränderungen der Spurstangenkräfte. Durch das Übertragungsverhalten der Lenkanlage (Dämpfung, Elastizität, Trägheit, Übersetzung, Hilfskräfte) entsteht aus diesen Spurstangenkräften ein Lenkradmoment. Ist der Fahrer in der Lage, aus diesem Lenkradmoment die Information über den aktuellen Fahrzustand zu extrahieren, so kann er eventuell notwendige Handlungen hieraus ableiten und die Abweichung zwischen Soll- und Istkurs ausregeln.

Der Zusammenhang zwischen Lenkradmoment und Fahrsituation ist oftmals nicht eindeutig und erfordert vom Fahrer eine Fusion mit weiteren fahrdynamischen Informationen, um die Situation richtig zu interpretieren. Hiermit ist der ungeübte Fahrer oftmals überfordert ([41]).

Eine Möglichkeit zur Vereinfachung der Interpretation bieten aktive Bedienelemente. Für den Bereich der Lenkung fallen hierunter zum einen Systeme mit elektromechanischer Lenkkraftunterstützung und zum anderen Steer-by-Wire-Systeme. Bei diesen Systemen kann die Momentinformation für den Fahrer gezielt gestaltet werden. Es bieten sich somit Vorteile im Bereich der zeitoptimierten und eindeutigen Darstellung des Fahrzustandes als auch die Möglichkeit einer einfachen Anpassung des HMI „Lenkung“ an Fahrsituation und Fahrertyp. Diese Dinge führen zu einer verbesserten Fahrzeugführung ([41]) und ermöglichen eine Antwort auf Marktanforderungen bezüglich der Fahrzeugindividualisierung ([94]). Zur Beschreibung eines Fahrzeugcharakters, bzw. eines Fahr- oder Lenkgefühls, finden insbesondere die Schlagworte „sportlich“ und „komfortabel“ Anwendung. Eine Definition dieser Begriffe bezogen auf ein „Lenkgefühl“ konnte jedoch nicht gefunden werden. Sie kann

daher auch für die Formulierung von Richtlinien zur Individualisierung dieser Mensch-Maschine-Schnittstelle nicht genutzt werden.

Es existieren in der Literatur Untersuchungen, in denen durch Kennwerte ein Zusammenhang von Subjektivurteilen zu objektiven, fahrdynamischen Größen beschrieben wird. Allerdings scheinen die bisher verwendeten Kennwerte nicht allgemeingültig anwendbar zu sein, da nur wenige Untersuchungen identische Kennwerte nutzen. Es ist daher zu überprüfen, inwieweit eine Individualisierung des „Lenkgefühls“ in Abhängigkeit anderer Parameter möglich ist. Zum Beispiel sind demografische Merkmale wie „Alter“ und „Geschlecht“ gebräuchliche Merkmale für die Beschreibung unterschiedlicher Kunden- oder Zielgruppen (z.B. [93], [113], [274]). Bei Lenksystemen mit der Möglichkeit der einfachen Variation des Lenkradmoments (EPS, SbW) existiert die Möglichkeit, nicht nur die Fahrerinformation auf haptischem Wege deutlich zu verbessern, sondern auch eine Anpassung des „Lenkgefühls“ an persönliche Präferenzen vorzunehmen. Bei der Umsetzung ergeben sich jedoch zum einen die Frage nach der Art und notwendigen Komplexität der Erzeugung eines synthetischen Lenkradmoments und zum anderen die Frage nach den individuellen Präferenzen der Fahrzeugführer.

1.4 Hypothesenbildung

Es werden Hypothesen gebildet, die sich aus dem zuvor dargestellten Stand der Forschung ableiten. Im Einzelnen sollen folgende Hypothesen überprüft werden:

Hypothese bezüglich der Gestaltung eines synthetischen Lenkradmoments:

H1: Es ist nicht möglich, ein reales Lenkradmoment im Normalfahrbereich durch ein synthetisches Lenkradmoment zu ersetzen. Selbst ein in der Bewertung solcher Systeme ungeübter Autofahrer würde den Unterschied bemerken.

Sollte es entgegen dieser Hypothese dennoch möglich sein, ein reales Lenkradmoment durch ein synthetisches Lenkradmoment zu ersetzen, so ist eine Übertragbarkeit auf die Beurteilung von „Lenkgefühlen“ aktueller auf dem Markt befindlicher Fahrzeuge gewährleistet.

Hypothesen bezüglich eines fahrsituationsspezifischen Lenkradmoments:

H2: Bei der Beurteilung von Lenkradmomentvarianten existiert eine Abhängigkeit von der gefahrenen Fahrzeuggeschwindigkeit. Mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit werden Varianten mit höherem Lenkradmoment bevorzugt.

Sollte sich diese Hypothese bewahrheiten, so könnte ein verbessertes Lenkgefühl durch Entwicklungen im Lenkungsbereich, wie z.B. einer geschwindigkeitsabhängigen Lenkkraftunterstützung, bestätigt werden.

Hypothesen bezüglich eines fahrertypspezifischen Lenkradmoments:

H3a: Bei der Beurteilung von Lenkradmomentvarianten treten keine Unterschiede in Abhängigkeit des Lebensalters des Fahrers auf.

H3b: Bei der Beurteilung von Lenkradmomentvarianten treten keine Unterschiede in Abhängigkeit des Geschlechts des Fahrers auf.

Wird davon ausgegangen, dass solche Unterschiede trotzdem existieren, so würde eine Gestaltung des Lenkradmoments in Abhängigkeit dieser demografischen Merkmale eine verbesserte Bewertung der HMI bedeuten.

Das Alter der Probanden könnte, begründet z.B. auf Fahrerfahrung und oder physischer Konstitution, unterschiedliche Beurteilungen der Lenkradmomentvarianten zur Folge haben. Aber auch eine von Physis und Fahrerfahrung entkoppelte und originär auf Lebenserfahrung oder –Einstellung begründete abweichende Beurteilung ist denkbar. Unterteilt man das Gesamtkollektiv nach dem Geschlecht der Probanden in zwei Teilkollektive, so können sich eventuell aufgrund der unterschiedlichen Definition der befragten Kriterien, bzw. einer abweichenden Empfindung und Bewertung der einzelnen Varianten, Unterschiede in der Beurteilung ergeben. Aber auch hier könnten physische Unterschiede der beiden Gruppen, in einer unterschiedlichen Beurteilung der Lenkradmomente münden.

Ebenso könnte es möglich sein, dass trotz der identischen Fahraufgabe aller Probanden unterschiedliche Fahrstile der beiden Teilkollektive in einem unterschiedlichen Erleben der Lenkradmomente resultieren.

H3c: Es existieren fahrdynamische Größen, die eine Differenzierung innerhalb der Teilkollektive „Alter“ und „Geschlecht“ zulassen.

Diese Hypothese soll nur untersucht werden, wenn sich die Hypothesen H3a oder H3b nicht bestätigen lassen. Sollten sich entsprechend der Hypothese H3c fahrdynamische Größen zur Differenzierung eignen, so könnten diese als Kennwerte für ein adaptives Lenkradmoment dienen.

2 Methodik

Im Rahmen dieser Untersuchung wird eine Methodik vorgestellt, die es ermöglicht, eine übertragbare Aussage über bevorzugte haptische Rückmeldungen von Betätigungseinheiten zu finden. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Methodik für die Untersuchung eines bevorzugten Lenkradmoments eingesetzt.

Bei der Beantwortung der in Abschnitt 1.4 aufgestellten Hypothesen begegnet man zunächst der Problematik, dass man zwar Urteile von Normalfahrern über eine Variante einer Lenkung erheben möchte, die Lenkungsvariante hierzu aber bereits existent sein muss. Somit wird der mögliche Lösungsraum für das Auffinden einer „optimalen“ Lenkvariante bereits stark vom Versuchsdesign eingeschränkt. Das selbständige Gestalten von Lenkvarianten durch den Probanden ist auf Grund seines geringen Vorwissens und der zahlreichen möglichen Freiheitsgrade zur Gestaltung eines Lenkradmoments nicht zielführend. Für eine Beschränkung auf die Variation nur eines Parameters bei Lenkungsbeurteilungen existieren in der Literatur einige erfolgreiche Beispiele (z.B. [123], [247], [268]). Bei mehreren Parametern steigt der Versuchsaufwand jedoch stark an und ist ab einer gewissen Anzahl nicht mehr zu vertreten. Erfahrene Testfahrer als Experten könnten dies wahrscheinlich noch mit akzeptablem Zeitaufwand leisten, jedoch wiederum vermutlich keine repräsentativen Aussagen über individuelle Bevorzugungen verschiedener Nutzergruppen treffen.

Zum Auflösen dieses Zielkonflikts wird zunächst festgelegt, welche Anteile einer haptischen Rückmeldung für das Ausbilden eines Urteils über ein Lenkgefühl bei einem Normalfahrer von Relevanz sind. Somit kann die Zahl der Freiheitsgrade bei der Gestaltung festgelegt werden. In einem nächsten Schritt wird dann eine sinnvolle Bandbreite der einzelnen Anteile ermittelt. Innerhalb dieser Bandbreite werden nun Varianten gestaltet, die von Normalfahrern beurteilt werden. Einen Überblick über die einzelnen Schritte der Methodik zur Beurteilung bevorzugter Lenkradmomente liefert **Bild 2-1**.

Hierin ist eine Unterteilung in die drei Phasen: „Modellerstellung“, „Vorversuche“ sowie „Hauptversuche & Auswertung“ vorgenommen worden. Die erste Phase umfasst die Erzeugung eines Modells zur Generierung synthetischer Lenkradmomente im Versuchsträger, sowie Identifikation der auf dem Markt befindlichen Parameterbandbreite verschiedener Fahrzeuge. Die Vorversuche beinhalten die Anpassung des Modells und der Parameter an die Belange der Hauptversuche, um eine ökonomische Durchführung zu gewährleisten. Hierbei werden bevorzugte Wertebereiche der einzelnen Parameter ermittelt und die Qualität des synthetischen Lenkradmoments an einem realen Lenkradmoment gemessen. Bei der Ermittlung des bevorzugten Wertebereichs können aufgrund der Ausprägung des Maximums auch gleichzeitig diejenigen Parameter bestimmt werden, die von geringerer Priorität für die Lenkradmomentbeurteilung sind. Die Phase der Hauptversuche besteht aus der Generierung von Lenkradmomentvarianten durch Auswahl geeigneter Parametersätze, den eigentlichen Hauptversuchen zur Ermittlung der bevorzugten Lenkradmomentvarianten und der

spezifischen Auswertung der erhobenen Daten, die schließlich zu einer fahrertyp- und fahrsituationsspezifischen Lenkradmomentgestaltung führt.

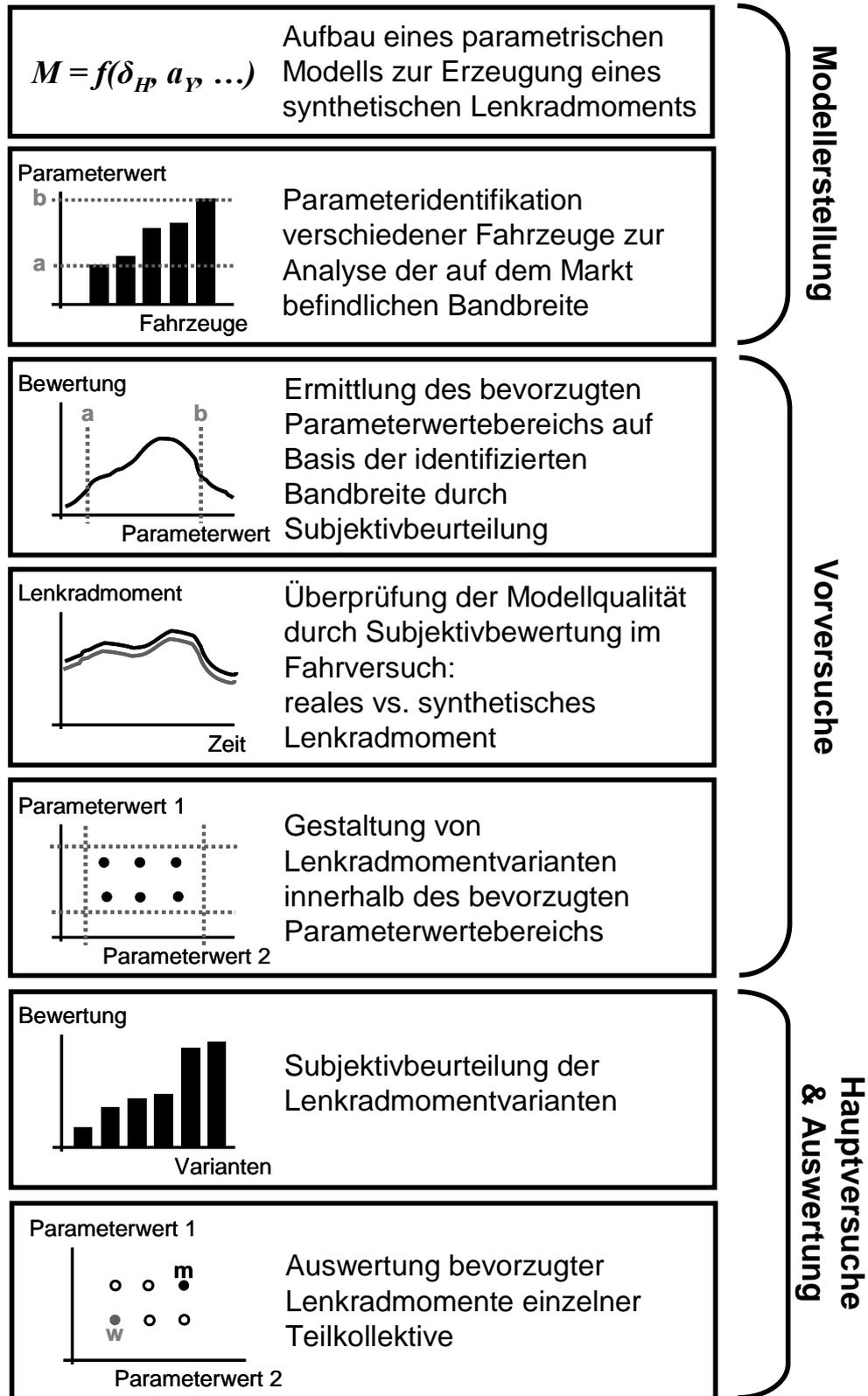


Bild 2–1: Darstellung der einzelnen Schritte der Methodik zur Untersuchung bevorzugter haptischer Rückmeldungen am Beispiel des Lenkradmoments.

Im Folgenden wird der Aufbau eines Lenkradmomentmodells für eine synthetische, haptische Rückmeldung dargestellt.

2.1 Lenkradmomentmodellierung

In Kapitel 1.2 wird gezeigt, dass bereits seit einigen Jahrzehnten das HMI „Lenkrad“ im Kraftfahrzeug durch technische Systeme verbessert wurde und die Forderungen an Fahrsicherheit und Komfort in hohem Maße erfüllt werden ([138], [139]). Um eine Übertragbarkeit und eine Einordnung der Ergebnisse der Probandenversuche zu gewährleisten, wird die Forderung aufgestellt, dass ein synthetisch generiertes Lenkradmoment auch in der Lage ist, derzeit existierende reale Lenkradmomente abzubilden.

2.1.1 Messtechnik

Um der Forderung nach der Abbildung realer Lenkradmomente gerecht zu werden, wurde eine so genannte „Adaptive Messtechnik“ entwickelt. Die Bezeichnung „adaptiv“ bezieht sich hierbei auf die Anpassungsfähigkeit der Messtechnik im Sinne ihrer Befestigung unter verschiedensten Bauraumgrößen und -formen. Diese Messtechnik erlaubt es, potentiell relevante Größen zur Generierung eines Modells für ein synthetisches Lenkradmoment zu erfassen.

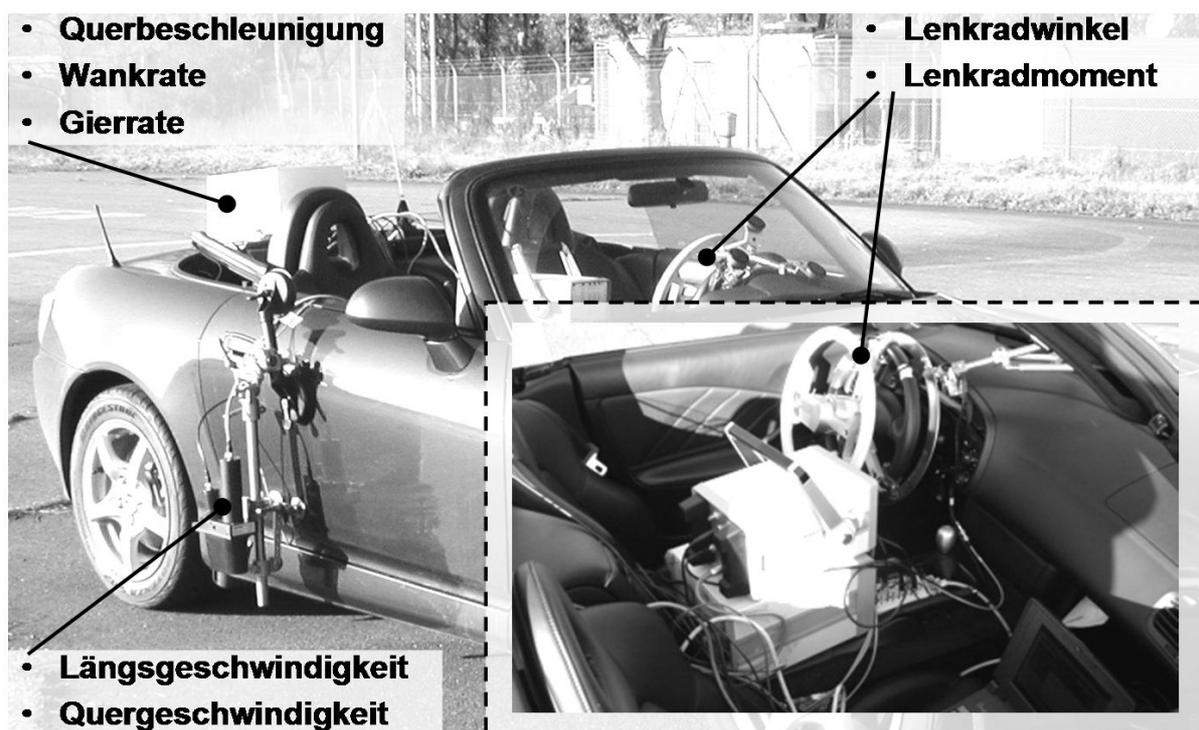


Bild 2–2: Aufbau der adaptiven Messtechnik.

Eine ähnliche Messtechnik wurde in der Vergangenheit bereits für Untersuchungen des Bremspedalgefühls eingesetzt [21]. Sie wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit erweitert und für den Einsatz von Untersuchungen des Lenkgefühls optimiert.

Die wesentlichen Größen, die mit dieser Messtechnik (**Bild 2–2**) erfasst werden, sind:

- Lenkradwinkel,
- Lenkradmoment,
- Fahrzeuggeschwindigkeit (Längs- + Querrichtung),
- Querbeschleunigung,
- Gierrate und
- Wankrate.

Der Lenkradwinkel wird über einen 360°-Absolutwinkelgeber, welcher auf dem Hallprinzip basiert, erfasst. Er ist auf der Welle eines Rädchens, das auf einem hinter dem Lenkrad montierten, zweigeteilten Ring abrollt, befestigt (**Bild 2–3**). Die Absolutposition des Lenkrades wird in der späteren Datenauswertung ermittelt.

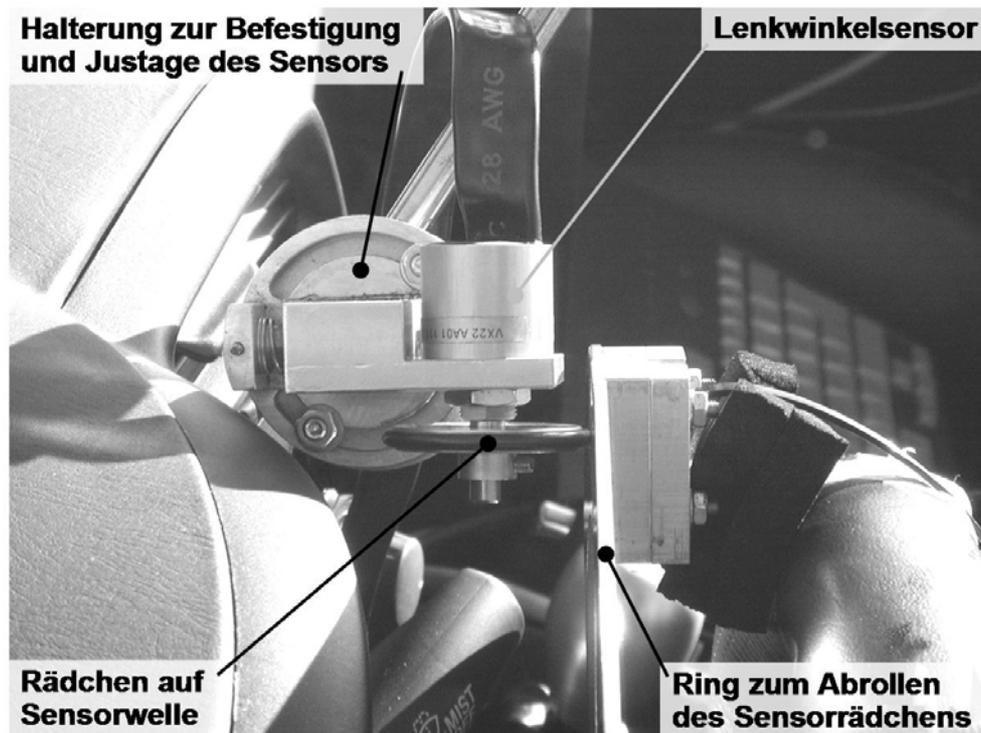


Bild 2–3: Erfassung des Lenkradwinkels.

Das Lenkradmoment wird mit der DMS-Messnabe eines zweiten Lenkrades erfasst, das mittels eines Dreibeines auf das Originallenkrad montiert wird (**Bild 2–4**). Die Signalübertragung vom Sensor zum Verstärker erfolgt per Telemetrie. Fahrzeuglängs- und –quergeschwindigkeit werden mittels eines berührungslosen Sensors, der nach dem korrelationsoptischen Verfahren arbeitet, erfasst.

Die Aufbaubewegungen (Querbeschleunigung, Gierrate, Wankrate) werden durch Sensoren, wie sie auch in derzeit auf dem Markt befindlichen ESP-Systemen Verwendung finden, bestimmt. Diese Sensoren sind gemeinsam in einer Box untergebracht, die mittels einer Magnetplatte steif mit der Fahrzeugkarosserie verbunden wird. Um mögliche Einflüsse durch

Fahrtwind und Feuchtigkeit zu minimieren, wird über der Messbox eine Haube angebracht, die ebenfalls mit der Karosserie über Saugnäpfe verbunden ist (**Bild 2–5**).

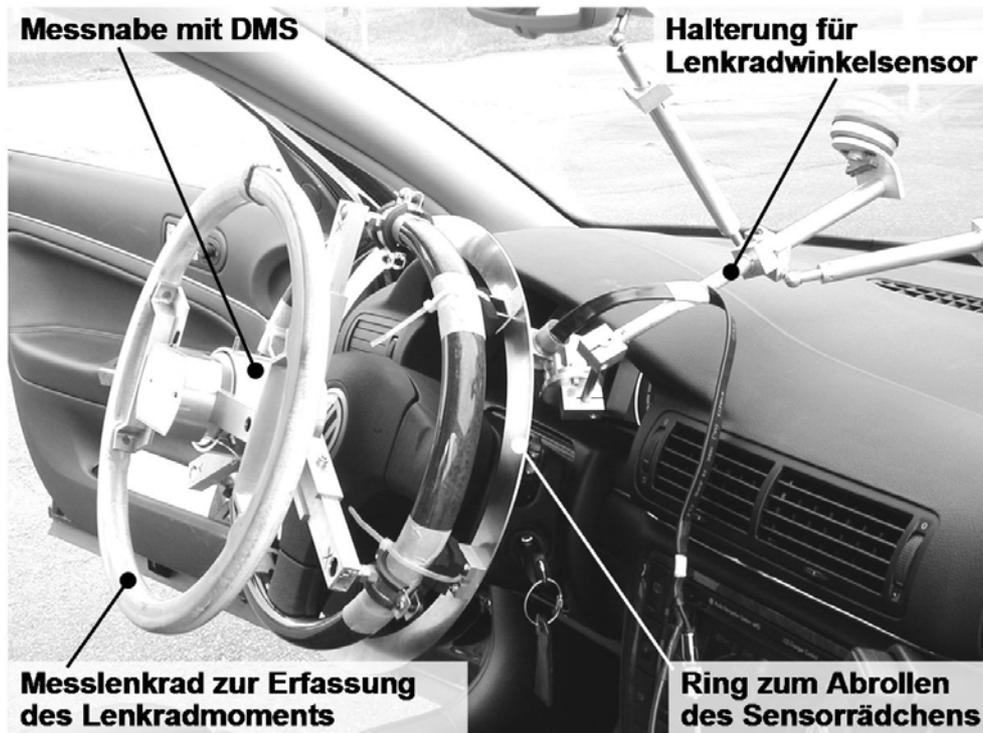


Bild 2–4: Erfassung des Lenkradmoments.

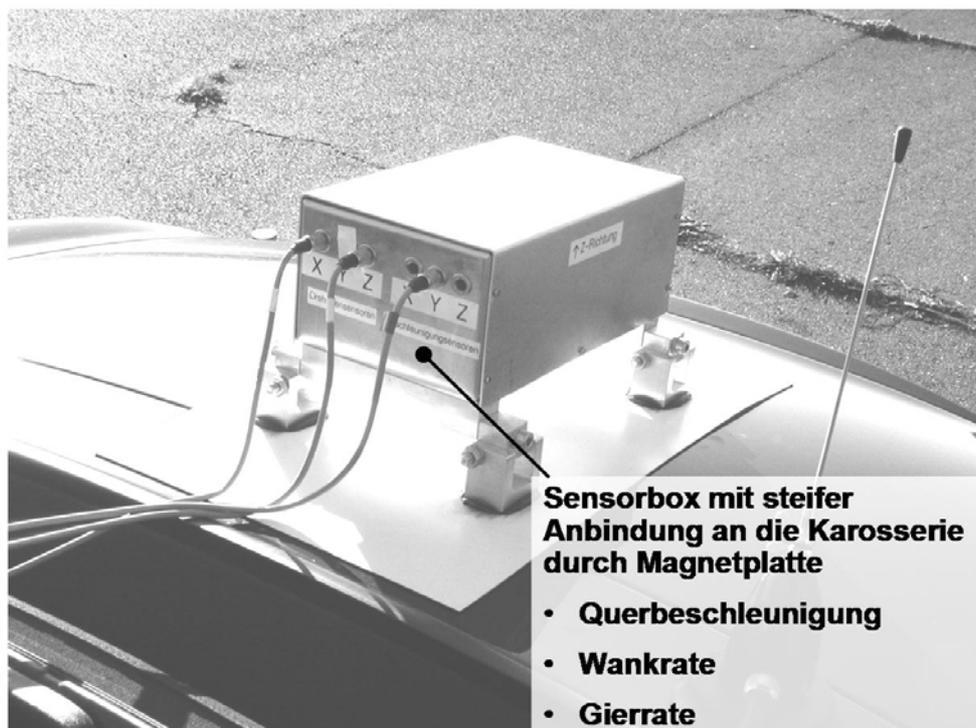


Bild 2–5: Erfassung der Fahrzeugbewegung (Querbeschleunigung, Gierrate, Wankrate) mit der Sensorbox.

Weiterhin wurden für jedes Fahrzeug die statische Gesamtlängsübersetzung, der Lenkraddurchmesser, der Radstand, die Spurweiten, die Fahrzeugmasse und die Position der Sensor-Box erfasst.

Eine Betrachtung der Auswirkung von Messfehlern wird in Kapitel 2.1.4 durchgeführt.

2.1.2 Messreihen

Nachdem die Fahrzeuge mit dieser Messtechnik ausgestattet waren, wurden Sie nach einem hierfür entworfenen Versuchskonzept vermessen.

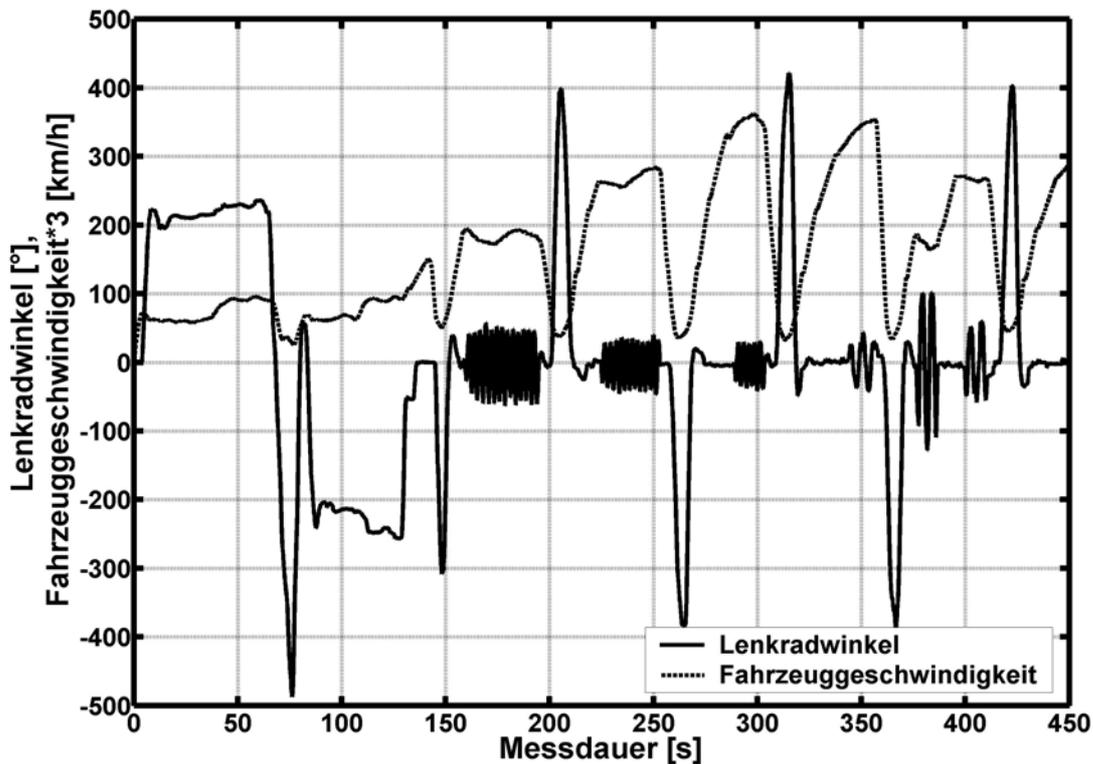


Bild 2–6: Exemplarische Messung des Lenkradwinkels und der Fahrzeuggeschwindigkeit zur Analyse der Lenkcharakteristik.

Um später die Größe der einzelnen Lenkradmomentanteile mit dem Ziel der Verringerung des quadratischen Fehlers mit mathematischen Modellen identifizieren zu können, war es notwendig, alle als relevant identifizierten Messgrößen in einem weiten Bereich anzuregen. Weiterhin sollten die Anregungshöhen nach Möglichkeit zeitlich gleichwertig verteilt sein und auch alle Kombinationen der Anregungshöhen der unterschiedlichen Signale sollten möglichst gleich verteilt sein (bei Einsatz von Parameteroptimierungsverfahren auf Basis der Minimierung des quadratischen Fehlers). Diese Forderungen lassen sich nur schwer erfüllen, da die einzelnen Messgrößen nicht unabhängig voneinander sind. Weiterhin werden dadurch Anforderungen an die Größe eines Versuchsgeländes gestellt, wie es im Rahmen dieser Untersuchung nicht bereit stand. Der gefundene Kompromiss orientiert sich an

Anregungsbandbreiten und –kombinationen, wie sie durch im öffentlichen Straßenverkehr vorkommende Manöver erzeugt werden.

Die gefahrenen Geschwindigkeiten lagen zwischen 20km/h und 120km/h. Die Radien der Parcourselemente wurden für resultierende Fahrzeugquerbeschleunigungen von bis zu 5m/s^2 ausgelegt. Die Parcourselemente stellten in erster Linie Manöver dar, die an standardisierte Testverfahren angelehnt waren (Slalom, doppelter Spurwechsel, stationäre Kreisfahrt). Zusätzlich kamen auch spezielle aus dem Straßenbau bekannte Elemente (Klotoide) zum Einsatz. In **Bild 2–6** ist ein exemplarischer Messschrieb des Lenkradwinkels und der Fahrzeuggeschwindigkeit dargestellt.

Die Messfahrten von 22 Fahrzeugen unterschiedlicher Fahrzeugsegmente wurden von drei speziell eingewiesenen Testfahrern durchgeführt, um die Streuung der Messdaten durch eine individuelle „Handschrift des Lenkens“ (siehe Abschnitt 1.2.2) möglichst gering zu halten. Der Parcours wurde durch Pylonen markiert und manöverspezifische Soll-Geschwindigkeiten definiert. Pro Fahrzeug wurden mindestens vier Messwiederholungsfahrten durchgeführt.

2.1.3 Aufbau Lenkradmomentmodell

Um ein reales Lenkradmoment nachbilden zu können, stehen prinzipiell zunächst zwei Möglichkeiten zur Verfügung: parametrische Modelle oder Kennfelder ([130]). Auf Mischformen dieser beiden Modelltypen soll zunächst nicht näher eingegangen werden.

Das hier zu verwendende Modell unterliegt gewissen Randbedingungen. Zum einen soll das Modell reale Lenkradmomentverläufe nachbilden können. Zum anderen muss dieses Modell im Hinblick auf die geplanten Probandenversuche eine echtzeitfähige Implementation im Versuchsträger erlauben. Weiterhin ist die Struktur des Modells derart zu wählen, dass es in den geplanten Probandenversuchen einfach zu handhaben ist. Auch soll in den späteren Probandenversuchen ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Lenkradmomentanteil und Subjektivurteil herausgearbeitet werden können. Insbesondere die letzte Forderung erzwingt für eine ökonomische Versuchsdurchführung nahezu ein parametrisches Modell. Unter versuchsökonomischen und Auswertungsgesichtspunkten ist es daher geboten, ein parametrisches Modell mit möglichst wenigen Freiheitsgraden zu verwenden.

Spiegelt solch ein Modell die physikalischen Zusammenhänge ausreichend wider, kann es durch die Methoden der Parameteridentifikation auf einfache Weise an die Verläufe der gemessenen Lenkradmomente angepasst werden (siehe auch [130]). Die Qualität des Modells wird hierbei jedoch nicht allein an Hand von quadratischen Fehlern oder vergleichbaren Kriterien bewertet. Das Modell wird zusätzlich hinsichtlich der Wahrnehmung eines Unterschieds zwischen einem realen und einem synthetischen Lenkradmoment durch Normalfahrer überprüft. Diese Qualitätsbestimmung des Modells wird in Kapitel 2.1.5 genauer beschrieben.

Basis des Modells zur Lenkradmomentgenerierung ist ein Einspur-Fahrzeugmodell und ein einfaches Lenkungsmodell. Das Fahrzeugmodell liefert die aus der Fahrodynamik

resultierenden Seitenkräfte. Das Lenkungsmodell beschreibt das Übertragungsverhalten der Lenkung (Winkel-Übersetzung, Dämpfung, Reibung, Trägheit und Lenkkraftunterstützung).

Da es sich um eine Untersuchung im Normalfahrbereich handelt, wird zunächst von einem linearen Einspurmodell ausgegangen. Hierbei werden folgende vereinfachende Annahmen getroffen:

- Änderungen der Radstellung durch kinematische und elastische Eigenschaften des Fahrwerks bleiben unberücksichtigt.
- Der Einschlagwinkel der beiden Vorderräder (δ_H/i_S) ist identisch (arithmetisches Mittel der beiden unterschiedlichen Radlenkwinkel).
- Der Fahrzeugschwerpunkt liegt auf Höhe der Fahrbahn.
- Die Schräglaufsteifigkeiten der Reifen werden als konstant angenommen.
- Der Reifennachlauf ($r_{\tau T}$) wird als konstante Größe angenommen und kann so mit dem konstruktiven Nachlauf ($r_{\tau S}$) zusammengefasst werden ($r_{\tau} = r_{\tau T} + r_{\tau S}$).
- Die Einflüsse aerodynamischer Kräfte bleiben unberücksichtigt.
- Die Längskräfte an den gelenkten Rädern werden vernachlässigt.
- Der Einfluss des Schwimmwinkels (β) wird vernachlässigt.

Aus dem Einspurmodell ergibt sich schließlich bei stationärer Kreisfahrt folgende mathematische Beschreibung des Rückstellmoments am Lenkrad:

$$M'_H = \frac{m \cdot l_R \cdot r_{\tau}}{i_S \cdot l} \cdot a_Y \quad (2-1)$$

mit
$$a_Y = \delta_H \cdot \left(\frac{1}{i_S} \cdot \frac{1}{l/v^2 + EG} \right) \quad (2-2)$$

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die meisten auf dem Markt befindlichen Lenksysteme mit einer hydraulischen Lenkkraftunterstützung ausgestattet sind. Betrachtet man die Übertragungsfunktion einer solchen Lenkkraftunterstützung (**Bild 1–6**), so lässt sich die Charakteristik des degressiven Verlaufs des Lenkradmoments in erster Näherung durch folgende, abschnittsweise definierte Funktion darstellen (**Bild 2–7**):

$$\text{für } M'_H \leq -M'_{H,cut} : \quad M_{H,Rück} = -cut \quad (2-3)$$

$$\text{für } -M'_{H,cut} < M'_H < +M'_{H,cut} : \quad M_{H,Rück} = M'_H \quad (2-4)$$

$$\text{für } M'_H \geq +M'_{H,cut} : \quad M_{H,Rück} = cut \quad (2-5)$$

Um den Übergang in den Sättigungsbereich nicht zu abrupt zu gestalten, wird nachträglich ein kleiner Übergangsradius eingeführt, dessen Kreismittelpunkt derart platziert ist, dass sich eine stetig differenzierbare Funktion ergibt.

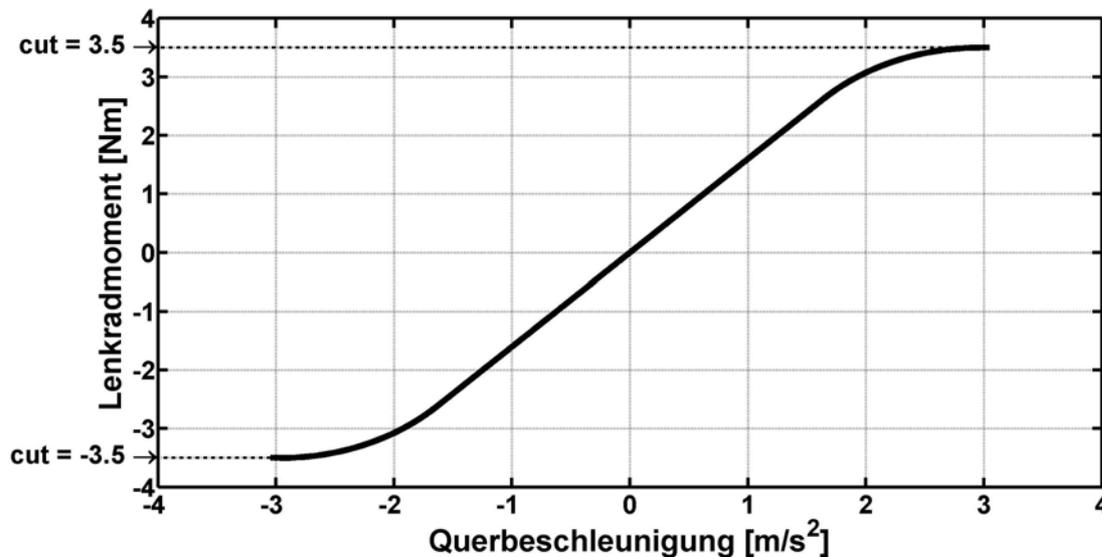


Bild 2–7: Bild des Graphen des Rückstellmomentanteils mit Sättigung.

Dieses Rückstellmoment wirkt sich bei konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit wie eine Federsteifigkeit auf das Lenkradmoment aus. Dieser Lenkradmomentanteil besitzt also einen energiespeichernden Charakter und wird daher im Folgenden auch als konservative Größe des Lenkradmoments bezeichnet. Zusätzlich existieren in technischen Systemen auch Anteile mit dissipativem Charakter. Hier sind in erster Linie die hydrodynamische, Newton'sche Dämpfung und die Coulomb'sche Reibung zu nennen.

Die hydrodynamische Dämpfung lässt sich folgendermaßen mathematisch beschreiben:

$$M_{H,Dämpf} = D \cdot \dot{\delta}_H \quad (2-6)$$

Die ideale Coulomb'sche Reibung lässt sich durch eine sign-Funktion der Lenkradwinkelgeschwindigkeit darstellen. Berücksichtigt man jedoch die mögliche Signalqualität eines Lenkradwinkelsensors und die Vorgabe der späteren Implementierungsmöglichkeit der Lenkradmomentfunktion in einem Versuchsträger, so muss eine Funktion mit einem endlichen, nicht zu steilen Gradienten um die Mittellage gefunden werden. Diese lässt sich wie folgt formulieren:

$$M_{H,Reib} = R \cdot \tanh(\dot{\delta}_H \cdot Grad) \quad (2-7)$$

Mit der Variablen „Grad“ kann bei der späteren Implementierung im Versuchsträger die tanh-Funktion unter Berücksichtigung der Signalqualität und der Systemdynamik bestmöglich an die idealisierte sign-Funktion angenähert werden. Stick-Slip-Effekte, welche die Reibung in realen Systemen charakterisieren, bleiben unberücksichtigt.

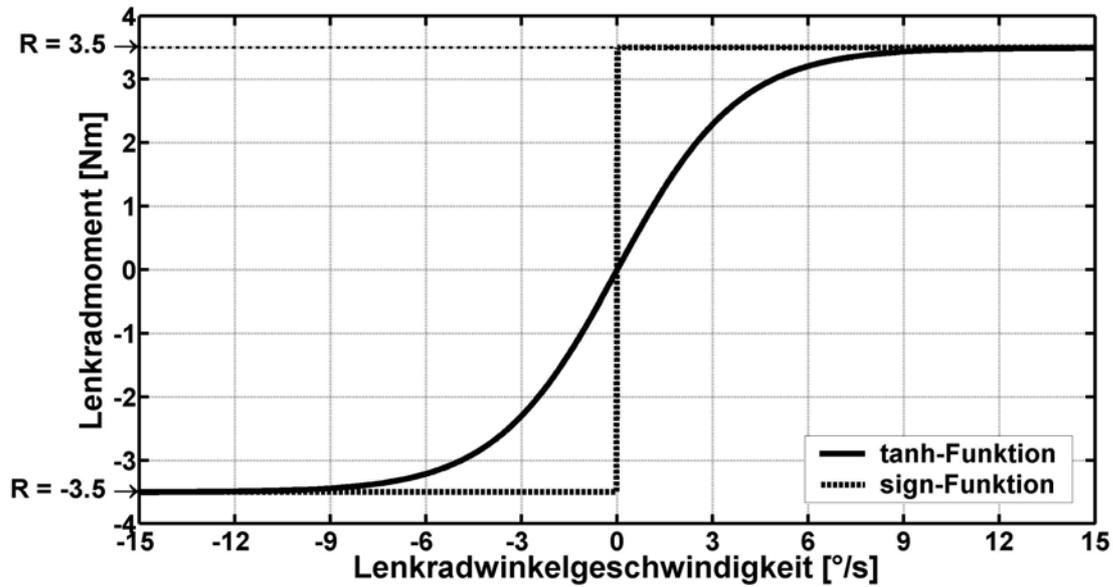


Bild 2–8: Bild des Graphen des Reibmomentanteils im Vergleich zur sign-Funktion.

Weiterhin sind mechanische Systeme mit Trägheiten behaftet. Diese sollen im Folgenden als Massenträgheiten behandelt werden. Es gilt:

$$M_{H,Träg} = \Theta \cdot \ddot{\delta}_H \quad (2-8)$$

Fasst man nun die vier vorgestellten Lenkradmomentanteile additiv zusammen, so ergibt sich folgende Gleichung:

$$M_H = M_{H,Rück} + M_{H,Dämpf} + M_{H,Reib} + M_{H,Träg} \quad (2-9)$$

Um nun ein parametrisches Modell zu erhalten, werden folgende Anteile in aus Messdaten zu identifizierenden Parametern zusammengefasst; alle übrigen Größen werden messtechnisch bestimmt. Im Einzelnen existieren folgende fünf Parameter:

$$C_1 = C_{Rück} = \frac{m \cdot l_R \cdot r_\tau}{l} \quad \text{in } [\text{Ns}^2] \quad (2-10)$$

$$C_2 = C_{Cut} = cut \quad \text{in } [\text{Ns}^2] \quad (2-11)$$

$$C_3 = C_{Dämpf} = D \quad \text{in } [\text{Nms}/\text{rad}] \quad (2-12)$$

$$C_4 = C_{Reib} = R \quad \text{in } [\text{Nm}] \quad (2-13)$$

$$C_5 = C_{Träg} = \Theta \quad \text{in } [\text{Nms}^2/\text{rad}] \quad (2-14)$$

Der Radstand und die Gesamtlenkübersetzung werden einmalig für jedes zu vermessende Fahrzeug bestimmt. Der Lenkradwinkel und die Fahrzeuggeschwindigkeit werden als dynamische Parameter während des Fahrversuchs erfasst. Der Eigenlenkgradient eines jeden

Fahrzeuges kann aus dem Vergleich der gemessenen Fahrzeugquerbeschleunigung und der aus Gleichung (2-2) errechneten Fahrzeugquerbeschleunigung bestimmt werden. Hierzu eignen sich insbesondere Kreisfahrten mit konstanter Geschwindigkeit und steigenden Radien. Da allerdings zur Ermittlung des Eigenlenkgradienten nach dieser Methode eine sehr große Testfläche erforderlich wäre ($> 200\text{m}$ Durchmesser), wurde in der DIN ISO 4138 der stationäre Kreisfahrttest auf einem konstanten Radius von 30m bis 50m genormt. Ähnlich gute Ergebnisse lassen sich auch durch ein slalomähnliches Manöver aus aneinander gereihten Kreisbögen erzielen. Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten wurde letztere Vorgehensweise zur Ermittlung des Eigenlenkgradienten ausgewählt.

Der Gradient der tanh-Funktion des Reibanteils wurde soweit abgesenkt bis im Versuchsträger mit aktivierter Lenkradmomentregelung keine spürbare Beeinflussung des Lenkradmoments durch Schwankungen des Lenkradwinkelsignals mehr auftrat. Genauere Informationen zum Versuchsträger und zur Modellimplementierung finden sich in Kapitel 2.2.1.

Der Aufbau des gesamten Modells ist in **Bild 2–9** schematisch dargestellt. Man erkennt, dass lediglich Lenkradwinkel und Fahrzeuggeschwindigkeit als Variablen das Lenkradmoment beeinflussen. Es soll auch an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, dass der Gültigkeitsbereich des Modells auf den Normalfahrbereich ($a_y < \sim 5\text{m/s}^2$) beschränkt ist.

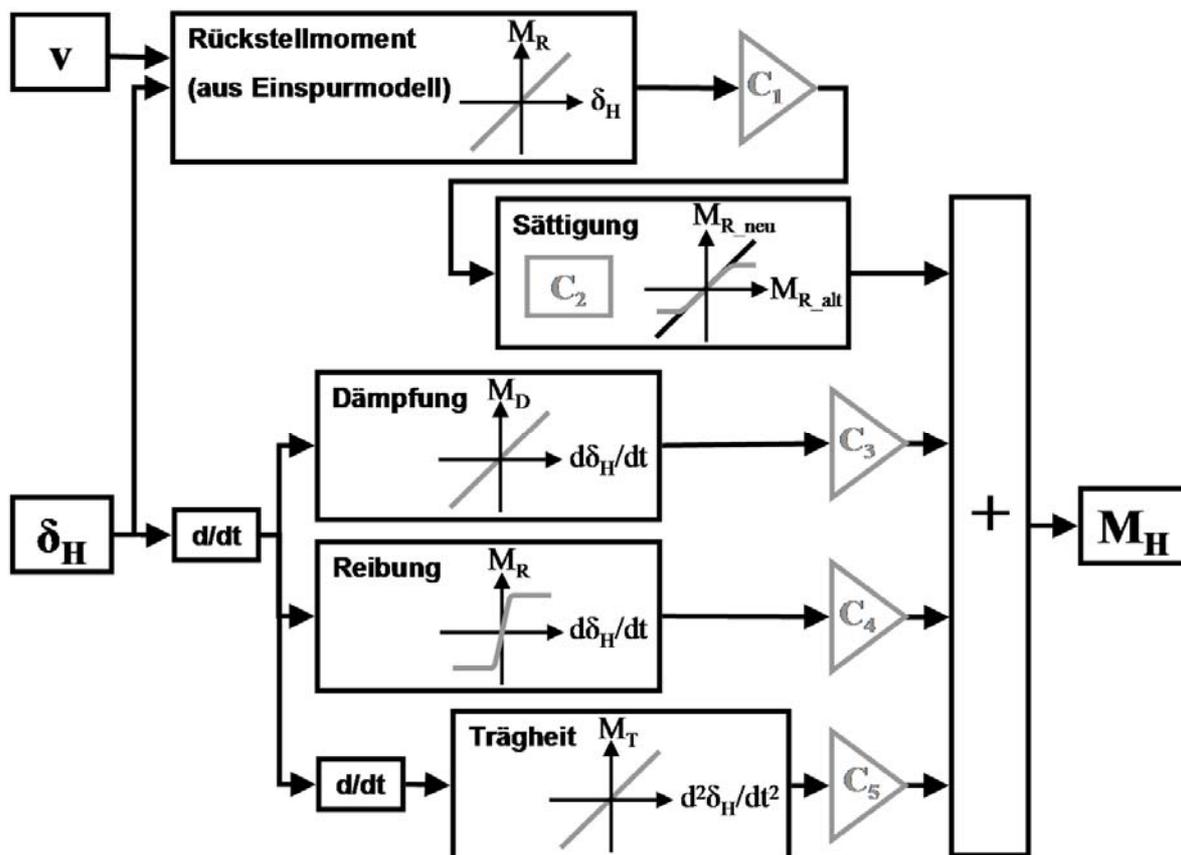


Bild 2–9: Schema des Aufbaus des parametrischen Lenkradmomentmodells.

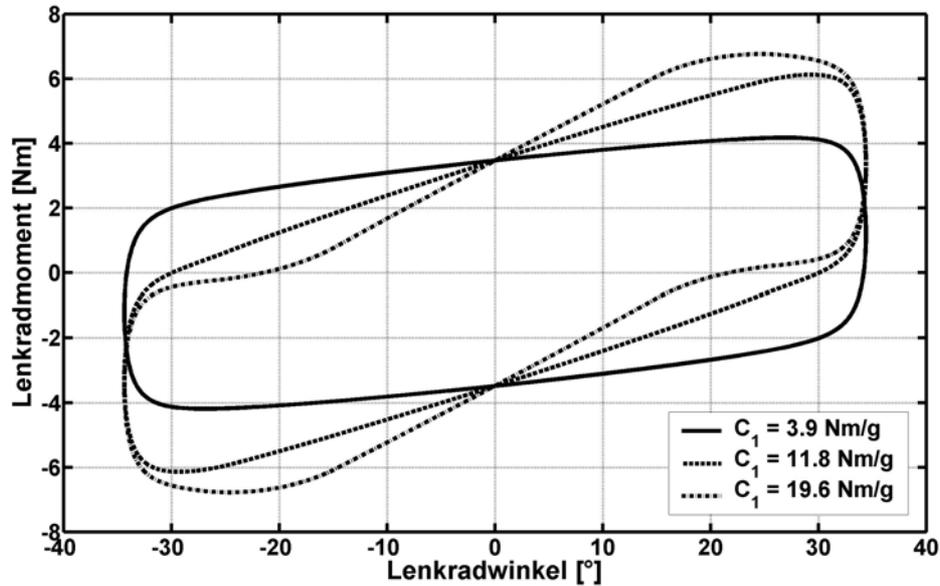


Bild 2–10: Exemplarische Darstellung zur Veränderung des Lenkradmoments in Abhängigkeit der Gewichtung des Rückstellmomentanteils C_1
 – Sinuslenken: Frequenz: 0,2Hz, Amplitude: 0,6rad –
 ($C_2 = 3.5 \text{ Ns}^2$, $C_3 = 4 \text{ Nms/rad}$, $C_4 = 3 \text{ Nm}$, $C_5 = 0 \text{ Nms}^2/\text{rad}$).

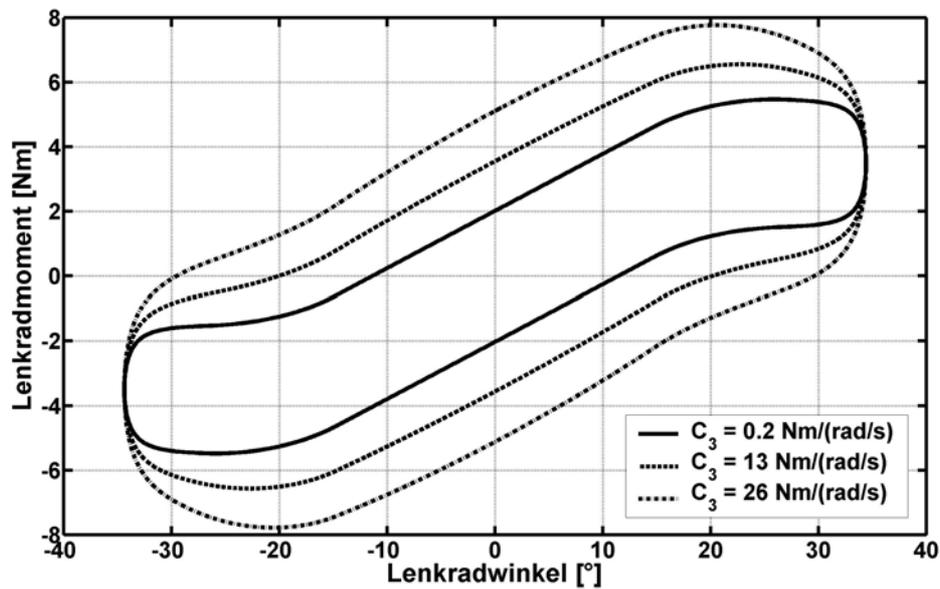


Bild 2–11: Exemplarische Darstellung zur Veränderung des Lenkradmoments in Abhängigkeit der Gewichtung des Dämpfungsmomentanteils C_3
 – Sinuslenken: Frequenz: 0,2Hz, Amplitude: 0,6rad –
 ($C_1 = 20 \text{ Ns}^2$, $C_2 = 3.5 \text{ Ns}^2$, $C_4 = 2 \text{ Nm}$, $C_5 = 0 \text{ Nms}^2/\text{rad}$).

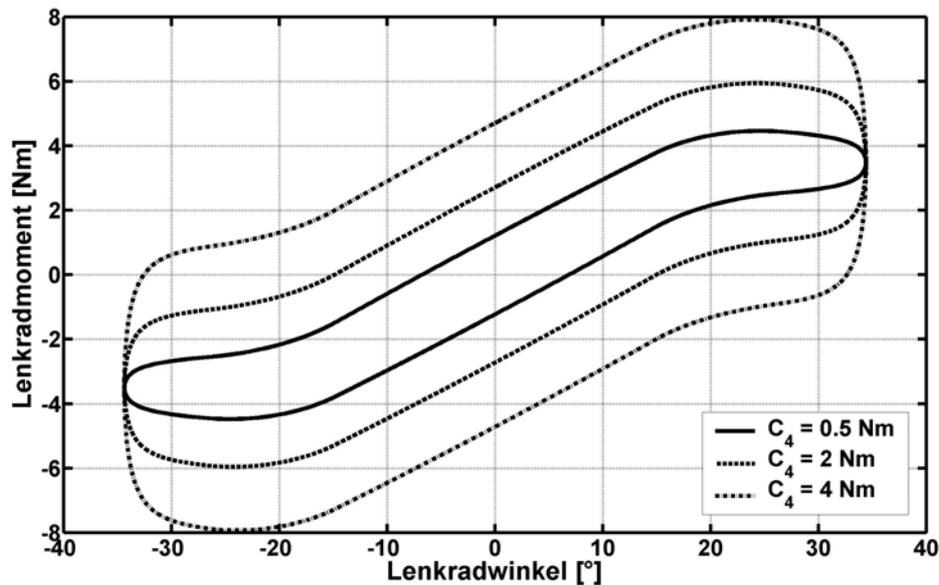


Bild 2–12: Exemplarische Darstellung zur Veränderung des Lenkradmoments in Abhängigkeit der Gewichtung des Reibmomentanteils C_4
 – Sinuslenken: Frequenz: 0,2Hz, Amplitude: 0,6rad –
 ($C_1 = 20 \text{ Ns}^2$, $C_2 = 3.5 \text{ Ns}^2$, $C_3 = 6 \text{ Nms/rad}$, $C_5 = 0 \text{ Nms}^2/\text{rad}$).

Die drei Grafen zeigen exemplarisch die Beeinflussung des Lenkradmoments in Abhängigkeit der drei Parameter C_1 , C_3 und C_4 . Die Lenkradmomentverläufe resultieren aus einem sinusförmigen Lenkradwinkelverlauf (Frequenz: 0,2 Hz, Amplitude: 0,6 rad) bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h. In **Bild 2–10** ist zu erkennen, dass mit steigendem Parameter C_1 die Steifigkeit größer wird und schließlich auch die Sättigung (cut) zum Tragen kommt. Bei Steigerung des Parameters C_3 zeigt sich, dass die Kontur immer bauchiger wird (**Bild 2–11**). Eine Veränderung des Parameters C_4 hat eine gleichmäßige Dehnung der Hystereseschleife in vertikaler Richtung zur Folge (**Bild 2–12**).

2.1.4 Parameteridentifikation

Die Parameter des Modells lassen sich mit Hilfe der Methode der kleinsten Fehlerquadrate auf einfache Weise an die mit der adaptiven Messtechnik gewonnenen Daten anpassen. Man sollte somit für jedes Fahrzeug einen charakteristischen Parametersatz erhalten, der in der Lage ist, das Lenkradmoment des entsprechenden Fahrzeuges zu beschreiben. Wie bereits zu Beginn von Kapitel 2 diskutiert, soll diese Bandbreite als Grundlage dienen, um in Vorversuchen bevorzugte Bereiche der einzelnen Parameter durch Probanden bestimmen zu lassen und somit gezielt einzelne Lenkradmomentkonfigurationen für die Hauptversuche zu gestalten.

Die Parameteridentifikation ergab das in **Bild 2–13** bis **Bild 2–16** dargestellte Ergebnis (siehe auch Anhang 6.1).

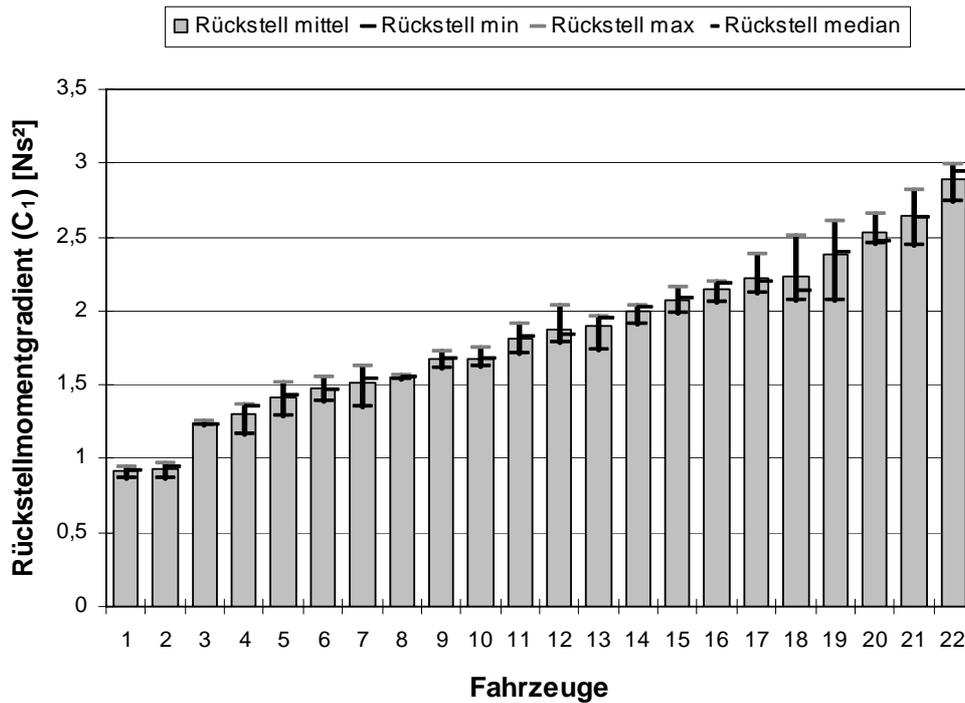


Bild 2–13: Identifikationsergebnis des Rückstellmomentgradienten (C_1) für die untersuchten 22 verschiedenen Fahrzeuge.

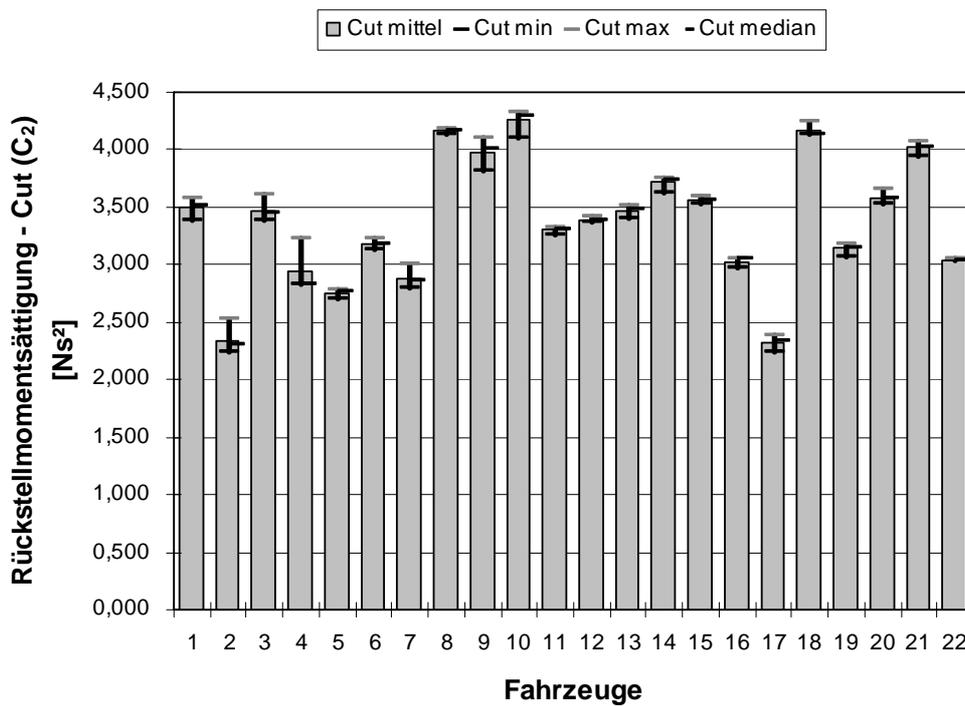


Bild 2–14: Identifikationsergebnis der Rückstellmomentsättigung (C_2) für die untersuchten 22 verschiedenen Fahrzeuge.

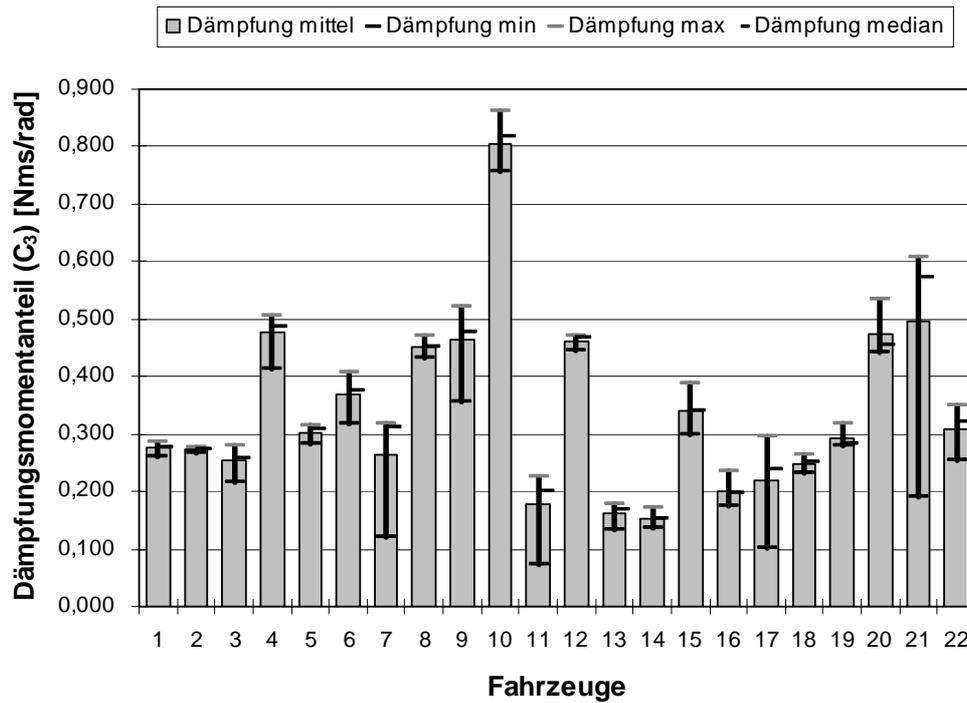


Bild 2–15: Identifikationsergebnis des Dämpfungsmomentanteils (C_3) für die untersuchten 22 verschiedenen Fahrzeuge.

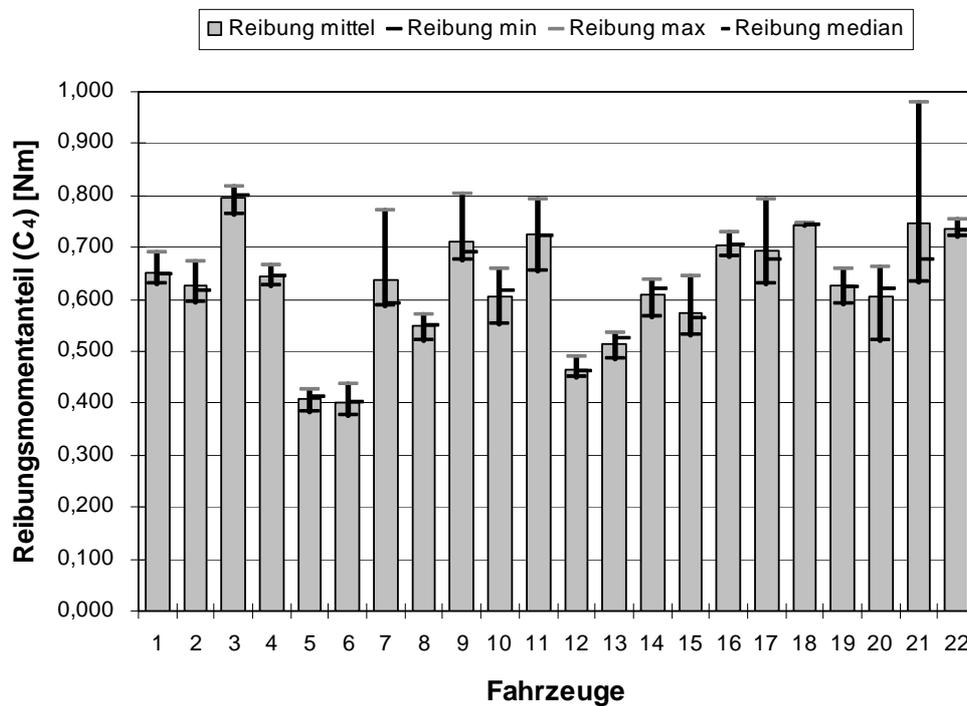


Bild 2–16: Identifikationsergebnis des Reibmomentanteils (C_4) für die untersuchten 22 verschiedenen Fahrzeuge.

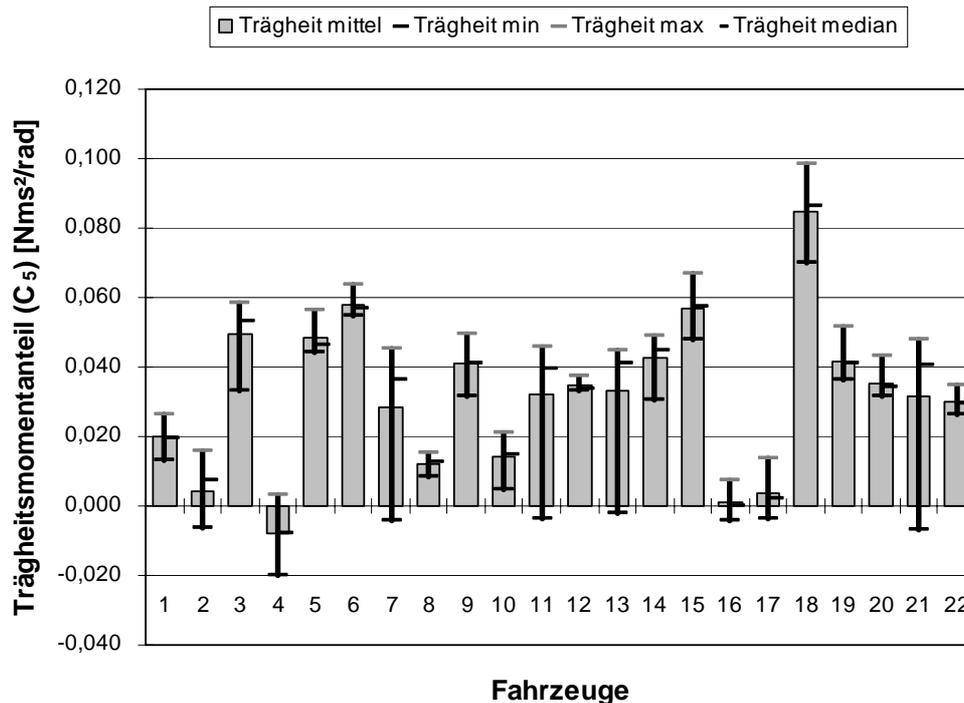


Bild 2–17: Identifikationsergebnis des Rückstellmomentgradienten (C_5) für die untersuchten 22 verschiedenen Fahrzeuge.

Man erkennt bei der vergleichenden Betrachtung der Fahrzeuge, dass die Parametersätze große Unterschiede aufweisen und somit eine Differenzierung der Fahrzeuge durch ihre Parameterwerte ermöglichen. Die im Anhang befindlichen Darstellungen der signifikanten Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests [165] bestätigen diese Aussage. Die Streuung der Parameter (C_1 bis C_4) eines Fahrzeuges, die primär durch die abweichende Fahrweise zwischen den einzelnen Versuchsfahrten hervorgerufen wird, kann daher als gering gegenüber der Parameterbandbreite aller Fahrzeuge bezeichnet werden.

An den großen Streuungen des Trägheitsterms (C_5) ist zu erkennen, dass die Trägheit mit diesem Modellansatz nicht als solche identifiziert werden kann. Dies könnte in der nicht ausreichenden Anregung der Lenkradwinkelbeschleunigung im Fahrversuch begründet sein, da auch ohne Filterung der Signale keine Verbesserung festgestellt wurde. Es müssten hierzu gezielt reproduzierbare Fahrmanöver mit unterschiedlichen Lenkradwinkelbeschleunigungen durchgeführt werden (mögliches Fahrmanöver: hochfrequentes Sinuslenken mit veränderlicher Frequenz). Dies war bei der in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Versuchsreihe jedoch nicht der Fall. Allerdings sei erwähnt, dass man sich bei dem Entwurf der Versuchsreihe auf Fahrmanöver des Normalfahrbereichs beschränkt hat.

Wird der Parameter C_5 zu null gesetzt und somit aus der Identifikation herausgenommen, so ändert dies nichts an den zuvor gemachten Aussagen über die Parameter C_1 bis C_4 . Die Änderungen dieser vier Parameter durch ein Vernachlässigen der Trägheit änderten sich im Durchschnitt um weniger als 1,5% und werden daher als nicht relevant betrachtet.

Es lassen sich insbesondere an den Parametern C_1 und C_2 Tendenzen der Auslegungswünsche der Fahrzeughersteller erahnen (**Bild 2–18**). Fahrzeuge mit sportlichem Image (Porsche Carrera (10), Honda S2000 (8), Mini Cooper (9)) besitzen tendenziell höhere Parameterwerte als Fahrzeuge mit komfortorientiertem Charakter (Audi A8 (5), Mercedes Benz S-Klasse (4), BMW X5 (2)). Allerdings kann aufgrund der Modellgenauigkeit und der Beschränkung auf den Normalfahrbereich hieraus keine detaillierte Auslegungsphilosophie der einzelnen Hersteller abgeleitet werden.

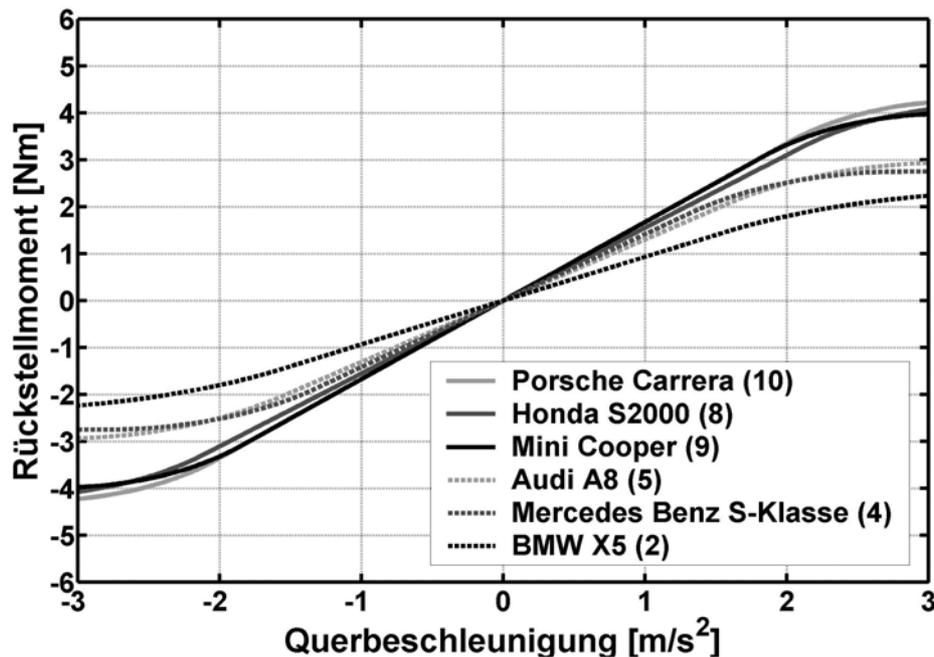


Bild 2–18: Exemplarische Darstellung der Kennlinien des Rückstellmoments von sechs Fahrzeugen mit unterschiedlichem Charakter (sportlich – komfortabel). Die Nummern hinter den Fahrzeugbezeichnungen korrespondieren mit denen aus **Bild 2–13** bis **Bild 2–17**.

Die identifizierten Werte für den Rückstellmomentgradienten entsprechen nahezu den aus der Literatur bekannten Werten (Kapitel 1.2.2). **Tabelle 2–1** stellt diese zusammenfassend dar.

Waldmann [287] gibt als Ergebnis seiner Untersuchung aus dem Jahr 1971 einen etwas höheren Lenkradmoment/Querbeschleunigungsgradienten an. Es ist zu erkennen, dass die aus der Literatur als „bevorzugte Werte“ genannten Größen sich von Autor zu Autor stark unterscheiden. Die neueste Untersuchung bezüglich des Lenkradmoment-Querbeschleunigungsgradienten stammt von Bertollini [17] aus dem Jahr 1999. Dessen Ergebnisse liegen teilweise unterhalb des identifizierten Wertebereichs.

Tabelle 2–1: Gegenüberstellung der identifizierten und der aus der Literatur bekannten Rückstellmomentgradienten.

Kennwert	Werte aus der Literatur	Identifikationsergebnisse
$\frac{dM_H}{da_y}$ in $\left[\frac{\text{Nm}}{\text{g}} \right]$	Waldmann [287]: 35,4 Segel [252]: 23 Good [101]: 22-28 Bertollini [17]: 6,0-16,7	9,0-28,4
$\frac{dM_H}{d\delta_H}$ in $\left[\frac{\text{Nm}}{\text{rad}} \right]$	Dettki [59]: 9,5	5,8-17,8 ¹

Um die Qualität der bestimmten Parametersätze zu überprüfen, wurde eine Sensitivitätsanalyse der identifizierten Parameter durch Verfälschung der Eingangssignale Lenkradwinkel und Fahrzeuggeschwindigkeit durchgeführt. In **Tabelle 2–2** sind für zwei ausgewählte Fahrzeuge die Auswirkungen der veränderten Eingangssignale auf die Identifikationsergebnisse dokumentiert.

Tabelle 2–2: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse (Auswirkung der Verfälschung der Modelleingangsgrößen Fahrzeuggeschwindigkeit und Lenkradwinkel um jeweils 5% auf die Ergebnisse der Parameteridentifikation).

	Jaguar XJ 8 (2002) (17)				Golf IV (2002) (12)			
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
	[Ns ²]	[Ns ²]	[Nms/rad]	[Nm]	[Ns ²]	[Ns ²]	[Nms/rad]	[Nm]
Original	2,22	2,32	0,19	0,71	1,86	3,36	0,46	0,47
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
$v \cdot 1,05$	7,75	0,15	0,03	0,24	9,17	-0,33	-0,02	0,34
$v \cdot 0,95$	-8,05	0,04	-0,15	-0,01	-7,33	0,10	0,16	-0,31
$\delta \cdot 1,05$	4,60	-0,15	-2,94	1,17	5,82	-0,12	4,91	0,90
$\delta \cdot 0,95$	-5,25	-0,12	-3,36	0,93	-4,15	-0,11	-4,12	-1,36

Wie zu erwarten, verändert sich bei der Variation der Fahrzeuggeschwindigkeit insbesondere der Parameter C₁ (Rückstellmomentgewichtung). Die Veränderung der Parameter C₃ (Dämpfungsmomentgewichtung) und C₄ (Reibmomentgewichtung) sind, da diese keine Gewichtung der Fahrzeuggeschwindigkeit vornehmen, durch den Identifikationsalgorithmus begründet. Bei der Veränderung des Lenkradwinkels sind C₁, C₃ und C₄ betroffen. Der

¹ Umrechnung des ermittelten Identifikationskoeffizienten C₁ [Ns²] in [Nm/rad] für Versuchsbedingungen nach [59] (Fahrzeuggeschwindigkeit: 100 km/h, Lenkfrequenz: 0,2 Hz, Querbeschleunigungsamplitude: 1 m/s²).

Lenkradwinkel bzw. die Lenkradwinkelgeschwindigkeit werden direkt durch diese Parameter gewichtet. Der Reibmomentparameter C_4 unterliegt durch die Verknüpfung mit der nichtlinearen tanh-Funktion geringeren Schwankungen. Der Parameter C_2 (Sättigung des Rückstellmoments) erfährt bei den hier durchgeführten Sensitivitätsuntersuchungen im Vergleich zu den Schwankungen der anderen drei Parameter keine nennenswerten Veränderungen.

Es wird davon ausgegangen, dass die Fehler der beiden Eingangsgrößen im Mittel einem geringeren Fehler als angenommen unterworfen sind und die gefundene Bandbreite sowie die Tendenzen der Parameter in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps die Lenkradmomentanteile für eine Untersuchung des Lenkgefühls ausreichend gut wiedergeben. Diese Annahme wird durch die identische Einweisung der Testfahrer und die Länge der Versuchsdauer, sowie die Mittelung über mehrere Fahrten eines jeden Fahrzeugs begründet. Die Mittelwerte der beiden Größen Fahrzeuggeschwindigkeit und Lenkradwinkel der vier Versuchsfahrten der beiden untersuchten Fahrzeuge unterschieden sich von den Gesamtmittelwert der beiden Größen für das jeweilige Fahrzeug um weniger als 3%.

2.1.5 Qualitätsbeurteilung

Ein Ziel der Lenkradmomentmodellierung ist die realitätsnahe Darstellung bzgl. des empfundenen Lenkgefühls im Normalfahrbereich. Die Qualität des Modells lässt sich daher nicht allein an Hand von mathematischen Verfahren, wie z.B. quadratischen Fehlern oder ähnlichem, bewerten. Die Modellierung ist dann gelungen, wenn ein Normalfahrer keinen Unterschied zwischen einem realen und einem synthetischen Lenkradmoment wahrnimmt. Zur Validierung, ob das Modell mit den vier Freiheitsgraden ein reales Lenkgefühl in ausreichender Qualität nachbilden kann, wurden Fahrversuche mit dem in Kapitel 2.2.1 näher beschriebenen Versuchsträger durchgeführt, der ein Umschalten zwischen diesen beiden Modi (reales und synthetisches Lenkradmoment) erlaubt. Weiterhin wurde geprüft, welche der vier Parameter (C_1 bis C_4) eine Beurteilung des Lenkgefühls primär beeinflussen.

Für die Qualitätsbeurteilung der Lenkradmomente wurden zwei unterschiedlich lange Parcours, wie in **Bild 2–19** dargestellt, mit Pylonen aufgebaut. Slalom und Spurwechsel der beiden Parcours wurden derart bemessen, dass bei Fahrzeuggeschwindigkeiten von 60km/h und 90km/h die maximale Fahrzeugquerbeschleunigung ca. 4 m/s² betrug. Die Probanden fuhren die Parcours mit der vorgegebenen Geschwindigkeit jeweils zehnmal. Nach jeder Fahrt wurde der Proband befragt, ob er eine Veränderung des Lenkradmoments bemerkt hat. Hierbei fuhr der Proband ohne sein Wissen in zufällig gewählter Reihenfolge jeweils fünf Fahrten mit Umschalten und jeweils fünf so genannte Placebofahrten, bei denen kein Umschalten zwischen synthetischem und realem Lenkradmoment in der Mitte der Versuchstrecke stattfand. Um auszuschließen, dass bereits ein durchschnittlicher Normalfahrer einen Unterschied wahrnimmt, wurden diese Validierungsfahrten mit erfahrenen Normalfahrern und einigen Experten, die zwischen 4 und 13 Jahren Erfahrung bei

der Beurteilung von Fahrzeugsystemen hatten, durchgeführt. Insgesamt nahmen 16 Personen (Geschlecht: männlich, Alter: 21 – 46 Jahre) an der Untersuchung teil.

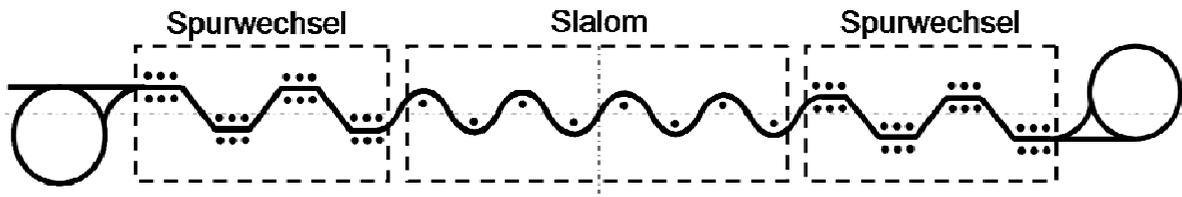


Bild 2–19: Aufbau des Parcours für die Validierungsfahrten (Länge des Parcours für 60km/h \approx 780m, für 90 km/h \approx 1180m).

Es wurden folgende Hypothesen formuliert, die anhand des vorliegenden Materials überprüft wurden:

- H_0 = Die beiden Merkmale A (Umschaltfahrt/Placebofahrt) und B (bemerken bzw. nicht bemerken einer Veränderung des Lenkradmoments) sind voneinander unabhängig.
- H_1 = Die beiden Merkmale A und B sind nicht voneinander unabhängig.

Als statistischer Test wurde der χ^2 -Unabhängigkeitstest gewählt. Die entsprechende Kontingenztabelle ist in **Tabelle 2–3** dargestellt. Hierbei bezeichnet h_{ij}^0 die beobachtete Häufigkeit und h_{ij}^e die erwartete Häufigkeit. Ein Test auf Unabhängigkeit lässt sich mit der χ^2 -Teststatistik von Pearson durchführen.

$$\chi^2 = \frac{h_{.1}^0 \cdot (h_{11}^0 \cdot h_{22}^0 - h_{12}^0 \cdot h_{21}^0)^2}{h_{1.}^0 \cdot h_{.1}^0 \cdot h_{2.}^0 \cdot h_{.2}^0} \quad (2-15)$$

Tabelle 2–3: Kontingenztabelle für die Untersuchung der Placebofahrten.

Veränderung des Lenkradmoments	Umschaltfahrten	Placebofahrten	Σ
bemerkt	$h_{11}^0 = 63$ $h_{11}^e = 62$	$h_{12}^0 = 61$ $h_{12}^e = 62$	$h_{1.}^0 = 124$
nicht bemerkt	$h_{21}^0 = 97$ $h_{21}^e = 98$	$h_{22}^0 = 99$ $h_{22}^e = 98$	$h_{2.}^0 = 196$
Σ	$h_{.1}^0 = 160$	$h_{.2}^0 = 160$	$h_{..}^0 = 320$

Bei einem zu untersuchenden Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ ergibt sich nach [108] ein $\chi_c^2 = 3,84$ als kritischer Wert für die nach Gleichung (2-15) errechnete Testgröße, der nicht

überschritten werden darf. Der aus den Daten errechnete Wert für die Testgröße beträgt aber lediglich 0,053, so dass die Nullhypothese H_0 nicht abgelehnt werden kann. Erst ab einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,82$ wäre dies zulässig (P-Wert). Dies hieße aber, eine richtige Nullhypothese in 82% der Fälle zu Unrecht zu verwerfen. Man kann also nicht annehmen, dass ein Bemerkten bzw. Nicht-Bemerkten von Lenkradmomentveränderungen von der Art des dargebotenen Lenkradmoments (Umschaltfahrt oder Placebo) abhängig ist.

Dies wiederum lässt die Interpretation zu, dass zwischen einem realen und einem synthetischen Lenkradmoment auf Basis des in Kapitel 2.1.3 beschriebenen Modells von den Probanden kein Unterschied wahrgenommen werden kann. Die Qualität des Modells kann daher für die angedachten Untersuchungen als ausreichend bezeichnet werden.

Mit diesem Modell kann somit die zuvor (Kapitel 1.4) formulierte Hypothese

H1: Es ist nicht möglich, ein reales Lenkradmoment im Normalfahrbereich durch ein synthetisches Lenkradmoment zu ersetzen. Selbst ein in der Bewertung solcher Systeme ungeübter Autofahrer würde den Unterschied bemerken.

als widerlegt gelten.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass ein fehlender Trägheitsterm von den Probanden unter diesen Versuchsbedingungen nicht bemerkt wurde. Ebenfalls wurde die unterschiedliche Charakteristik des Aufbaus des Rückstellmoments zwischen dem realen Lenkradmoment (zeitlich verzögert, vergl. Kapitel 1.2.1) und dem synthetischen Lenkradmoment (quasi zeitgleich mit einer Lenkradwinkeländerung) von den Probanden nicht wahrgenommen.

Es wurde auch geprüft, welche der vier Parameter (C_1 bis C_4) eine Beurteilung des Lenkgefühls primär beeinflussen. Hierzu wurde folgender Versuch durchgeführt. Ausgehend von dem für den Versuchsträger (Kapitel 2.2.1) identifizierten Parametersatz wurde pro Versuchsreihe jeweils ein Parameter in seinem mit der adaptiven Messtechnik identifizierten Wertebereich variiert. Folgende Bereiche wurden für die Parameter ausgewählt:

Rückstellmomentgradient (C_1):	0,5 bis 3,0	in $[\text{Ns}^2]$
Sättigung/Cut (C_2):	1,0 bis 6,0	in $[\text{Ns}^2]$
Dämpfung (C_3):	0,1 bis 0,9	in $[\text{Nms}/\text{rad}]$
Reibung (C_4):	0,03 bis 1,23	in $[\text{Nm}]$

Insgesamt neun Probanden (Geschlecht: männlich, Alter: 23 – 35 Jahre) hatten den Fahrauftrag bei zwei Geschwindigkeiten – 60km/h und 120km/h – sinusförmige Lenkbewegungen verschiedener Frequenz und Amplitude nach eigenem Ermessen auf der 20m breiten und knapp 1200m langen Versuchsstrecke durchzuführen. Die gefahrene Querbeschleunigung sollte 5m/s^2 nicht überschreiten. Hierbei wurde der zu verändernde Parameter von seinem geringsten bis zu seinem höchsten Wert schrittweise während der Fahrt

verändert. Der Proband sollte in mehreren Versuchsdurchgängen jeweils eine Veränderung des Lenkgefühls bezüglich der Kriterien „empfundener Lenkkomfort“, „empfundener Fahrspaß“ und „empfundene Sicherheit“ mitteilen. Eine bessere Beurteilung des jeweiligen Kriteriums bei der schrittweisen Erhöhung eines Parameters wurde mit „+1“ vermerkt, eine Verschlechterung mit „-1“. Wurde lediglich eine geringe Verbesserung bzw. Verschlechterung bemerkt, konnten die Probanden auch halbe Punkte vergeben.

Es zeigte sich, dass eine Veränderung des Parameters C_2 (Sättigung) unter den hier dargestellten Versuchsbedingungen eine geringe Relevanz für die Ausprägung eines Lenkgefühls besitzt, da keine nennenswerte Verbesserung bzw. Verschlechterung der Kriterienbeurteilung zu verzeichnen war (**Bild 2–20**). Dies war zu erwarten, da dieser Parameter erst bei höheren Querschleunigungen zum tragen kommt. Die Probanden erreichen diesen Querschleunigungsbereich jedoch nur sehr selten und für kurze Zeit, was eine Wahrnehmung von Veränderungen in diesem Bereich erschwert.

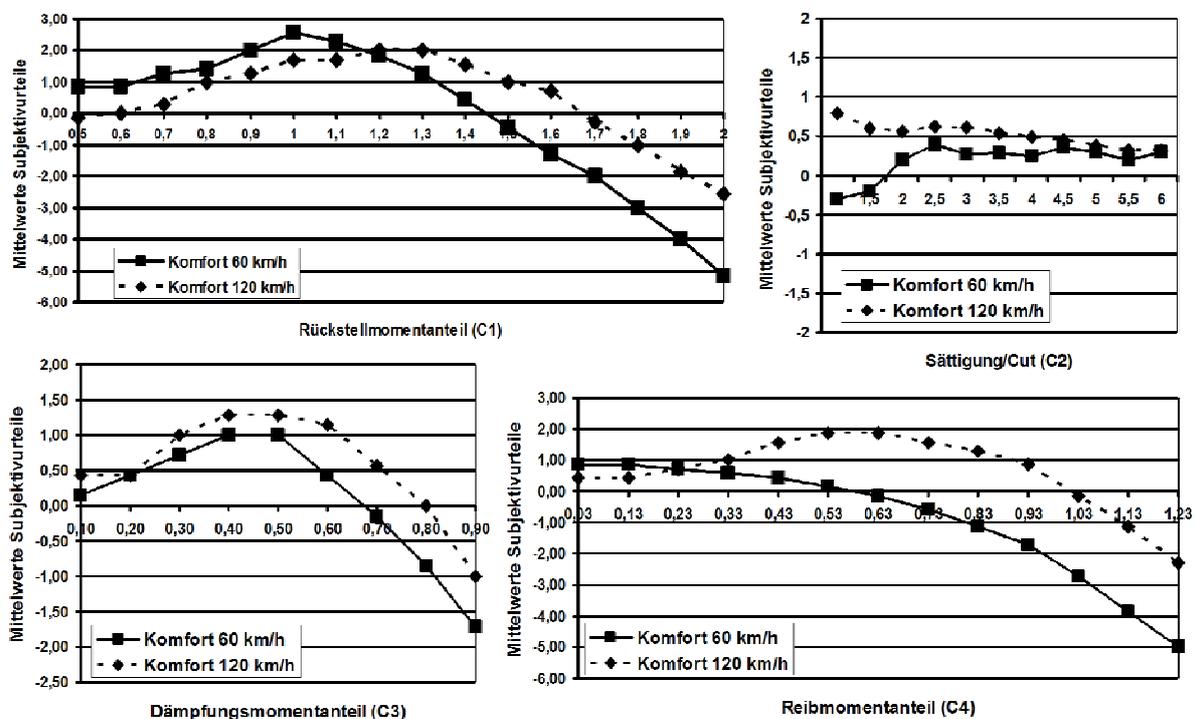


Bild 2–20: Darstellung der Vorversuchsergebnisse zur Beurteilung der Veränderung der Parameter C_1 (Rückstellmoment), C_2 (Sättigung/Cut), C_3 (Dämpfung) und C_4 (Reibung) für das Kriterium „empfundener Komfort“.

Die Verläufe der Subjektivurteile der Parameter C_1 (Rückstellmoment) und C_3 (Dämpfung) weisen durch ihre Gradienten darauf hin, dass die Veränderungen von den Probanden erkannt wurden. Weiterhin ist ein bevorzugter Bereich an Parameterwerten zu erkennen. Bei der Beurteilung der Auswirkung des Parameters C_4 (Reibung) auf ein empfundenes Lenkgefühl gab es innerhalb des Kollektivs große Unterschiede und weniger ausgeprägte Maxima, insbesondere bei 60 km/h. Die große Streuung könnte in der Schwierigkeit begründet sein,

Veränderungen des Reibungsanteils am Lenkradmoment unterhalb bzw. oberhalb einer gewissen Schwelle ausreichend zu detektieren.

Gleichzeitig ist in **Bild 2–20** beispielhaft für Parameter C_1 und C_3 zu erkennen, dass innerhalb der untersuchten Bandbreite ein Maximum existiert. Es wird im Weiteren angenommen, dass es sich hierbei um ein globales Maximum handelt, da selbst durch Erweiterung des hier dargestellten Parameterspektrums um +/- drei Schrittweiten (negative Werte wurden nicht überprüft) keine Gradientenänderung in den Randbereichen stattfand. Die Bewertungen der beiden anderen Kriterien (Sportlichkeit/Fahrspaß und Sicherheit) weisen vergleichbare Tendenzen auf. Die Abbildungen befinden sich im Anhang.

2.1.6 Abschließendes Lenkradmomentmodell

Das endgültige Lenkradmomentmodell besitzt vier Freiheitsgrade, wobei nur drei Freiheitsgrade für eine Untersuchung im Normalfahrbereich als relevant identifiziert wurden. Der Parameter C_2 (cut), der die Sättigung des Rückstellmoments beschreibt, sollte bei den anstehenden Hauptversuchen derart festgelegt werden, dass er von den Probanden nur in äußerst seltenen Fällen erfahren werden kann.

Der schematische Aufbau des endgültigen Modells ist **Bild 2–21** zu entnehmen (vergl. **Bild 2–9**).

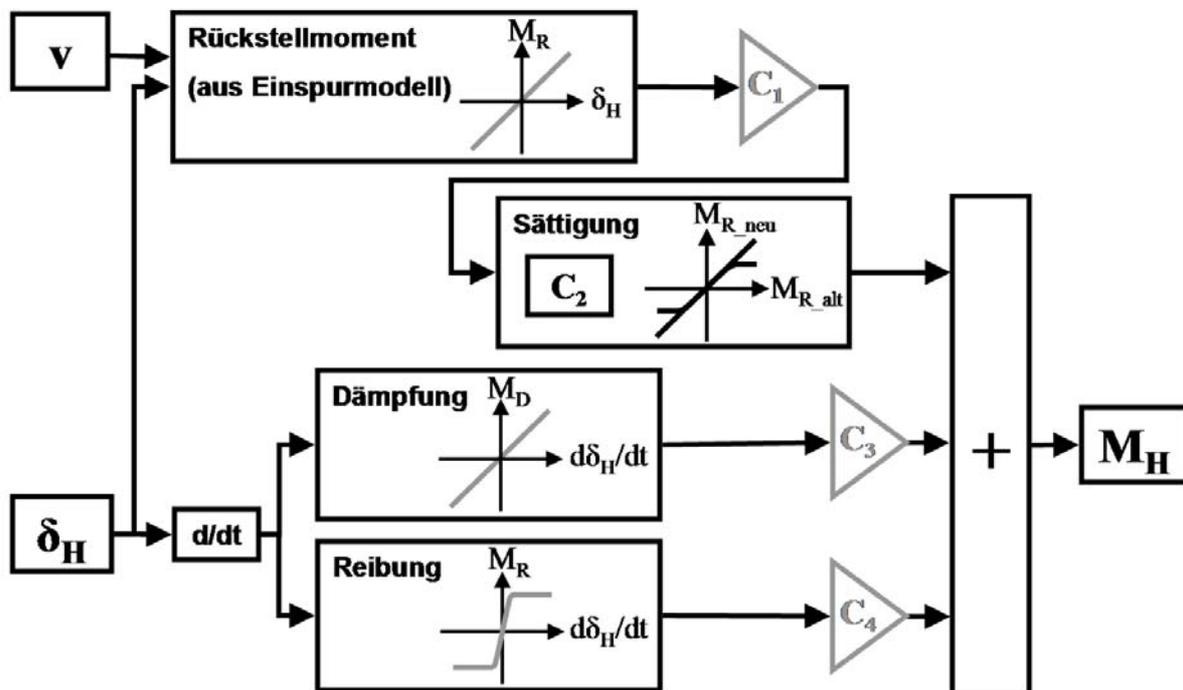


Bild 2–21: Schematischer Aufbau des endgültigen parametrischen Lenkradmomentmodells für die Hauptversuche.

2.2 Versuchskonzept

Im geplanten Hauptversuch sollen nun verschiedene Parametersätze aus dem ermittelten „bevorzugten Bereich“ Probanden zur Subjektivbeurteilung zur Verfügung gestellt werden,

- um eine Aussage über ein bevorzugtes Lenkradmoment in Abhängigkeit der gefahrenen Streckencharakteristik zu erhalten.
- um ein bevorzugtes Lenkradmoment in Abhängigkeit des Geschlechts und des Alters der Probanden zu ermitteln.
- um einen Kennwert zu ermitteln, der in der Lage ist, Gruppen mit unterschiedlichen Urteilen zum „Lenkgefühl“ anhand ihres Fahrstils zu beschreiben.

Hierzu müssten alle potenziell relevanten Eingangsgrößen für solch einen Kennwert (Lenkradmomentparameter, Fahrsituationen, Probandenkollektiv, ...) unabhängig voneinander variiert werden; dies würde einen erheblichen Mehraufwand bei der Versuchsdurchführung bedeuten. Daher wurde ein Kompromiss gesucht, der unter versuchsökonomischen Gesichtspunkten die Untersuchung eines jeden Einflusses in vertretbaren Grenzen ermöglicht und die nachfolgend genannten Randbedingungen erfüllt:

- Die drei als primär identifizierten Einflüsse des Lenkradmomentes werden variiert.
- Für ein reproduzierbares Urteil von Normalfahrern zum Bediengefühl wird ein direkter Paarvergleich vorgenommen. In Vorversuchen konnten nämlich keine reproduzierbaren Absolutbeurteilungen erreicht werden.
- Die Dauer der Untersuchung beträgt höchstens eine Stunde. Hier wird auch auf die Erkenntnisse der Vorversuche zurückgegriffen, bei denen sich zeigte, dass reproduzierbare Urteile wegen Nachlassens der Konzentrationsfähigkeit nach einer Stunde Testzeit nicht mehr gewährleistet waren.
- Möglichst geringe Zeitspanne zwischen zwei Varianten im Paarvergleich, damit die Erinnerung an die Empfindung der ersten Variante des Paarvergleichs noch präsent ist. Idealerweise kann dies durch ein Umschalten der Varianten während der Fahrt gewährleistet werden.
- Repräsentative Bandbreite von für den Normalfahrbereich relevanten Fahrsituationen.
- Hinreichend große Probandenanzahl, um auch Teilkollektive statistisch bewerten zu können, da interindividuelle Streuungen (z.B. Alter und Geschlecht) untersucht werden sollen. Angelehnt an [42] wird hierzu eine Probandenanzahl > 30 angestrebt.

Die Umsetzung dieser Anforderungen in ein Versuchskonzept wurde zusammen mit dem Fachgebiet Arbeitswissenschaft der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt (siehe [4]) und wird in den Abschnitten 2.2.2 bis 2.2.6 beschrieben. Zunächst wird jedoch der in den Probandenversuchen eingesetzte Versuchsträger näher erläutert.

2.2.1 Versuchsfahrzeug

Für die angestrebte Hauptuntersuchung wurde ein Fahrzeug aufgebaut, das es ermöglicht, ein definiertes Lenkradmoment zu generieren. Hierzu wurde das in **Bild 2–22** schematisch dargestellte Konzept umgesetzt.

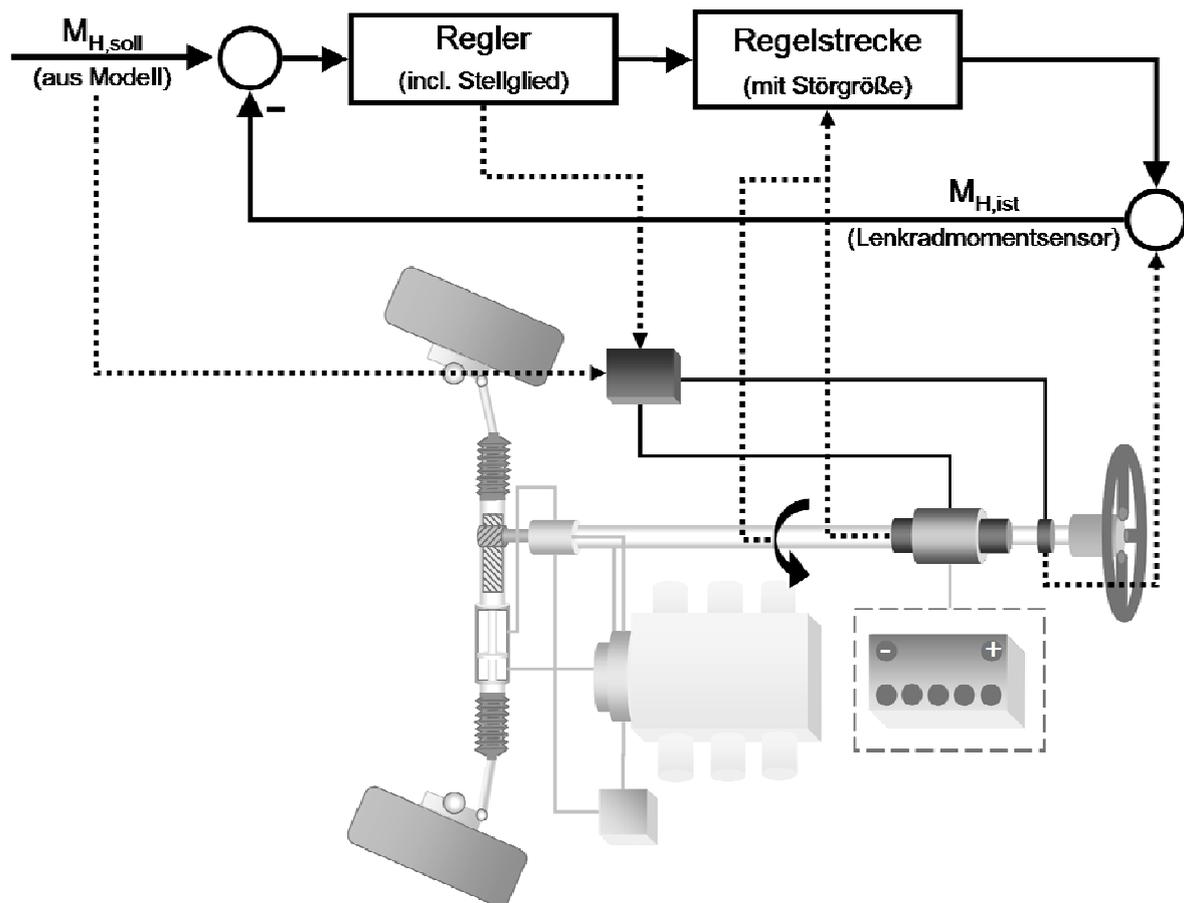


Bild 2–22: Schematisches Konzept der Lenkradmomentgenerierung in regelungstechnischer Darstellung.

Das durch das Modell errechnete Soll-Lenkradmoment wird mit dem am Lenkrad durch einen Sensor erfassten Ist-Lenkradmoment verglichen. Der Regler spricht nun über eine Leistungselektronik einen an der Lenksäule montierten Torquemotor derart an, dass die Differenz zwischen Soll- und Ist-Moment minimiert wird. Die auf die Regelstrecke wirkende Störgröße setzt sich in erster Linie aus den weitergeleiteten Radrückstellmomenten und dem Übertragungsverhalten der verbauten hydraulischen Lenkkraftunterstützung zusammen.

Mit diesem Konzept kann trotz der hohen Vorderachslast des Versuchsträgers (knapp 10.000N) eine ausreichende Dynamik des Systems für Lenkradmomentbeurteilungen im Normalfahrbereich erreicht werden (siehe Abschnitt 2.1.5). Der Torquemotor liefert ein Spitzenmoment von ca. 6 Nm (120s) und ein Dauermoment von bis zu 3Nm. Diese Werte werden bis zu Lenkwinkelgeschwindigkeiten $> 700^\circ/\text{s}$ erreicht. Der verwendete Lenkradwinkelsensor besitzt eine Auflösung $< 0,1^\circ$. Die Regelkreiseckfrequenz liegt nach Angabe des Ausrüsters bei ca. 20Hz. Unter diesen Bedingungen kann angenommen werden, dass in allen fahrdynamisch relevanten Situationen des Normalfahrbereichs ein Sollmoment ausreichend eingeregelt werden kann. Voruntersuchungen zeigten, dass die Regelabweichungen kleiner 0,05 Nm waren und somit weit unterhalb der aus der Literatur

bekannten Differenzschwellen für die Wahrnehmung von Lenkradmomenten ([45], [247]). Offen bleibt allerdings der Einfluss von Vibrationen (Abrollvibrationen) oberhalb der Regelkreiseckfrequenz. Bei EPS-Systemen könnten, im Gegensatz zu SbW-Systemen, diese Vibrationen durch die mechanische Verbindung bis an das Lenkrad weitergeleitet werden und somit das Lenkgefühl beeinflussen.

Als Versuchsträger diente ein Fahrzeug der Oberklasse (Mercedes-Benz S500 / W220, siehe **Bild 2–23**). In diesem Fahrzeug wurde zusätzlich zur Regelung und Aktuatorik zahlreiche weitere Sensorik verbaut, deren Signale sowohl der Messdatenerfassung als auch der Regelung und Sollmomentberechnung zur Verfügung standen. Das parametrische Lenkradmomentmodell wurde unter Matlab-Simulink² aufgebaut und schließlich via Real-Time-Workshop³ und C-Code-Kompilierung in das Rahmenprogramm auf dem Versuchsrechner im Fahrzeug eingebunden. Die vordefinierten Parameter des Lenkradmomentmodells standen auf einem Eingabeterminal im Fahrzeuginnenraum dem Versuchsbegleiter als online zu verändernde Variablen zur Verfügung.

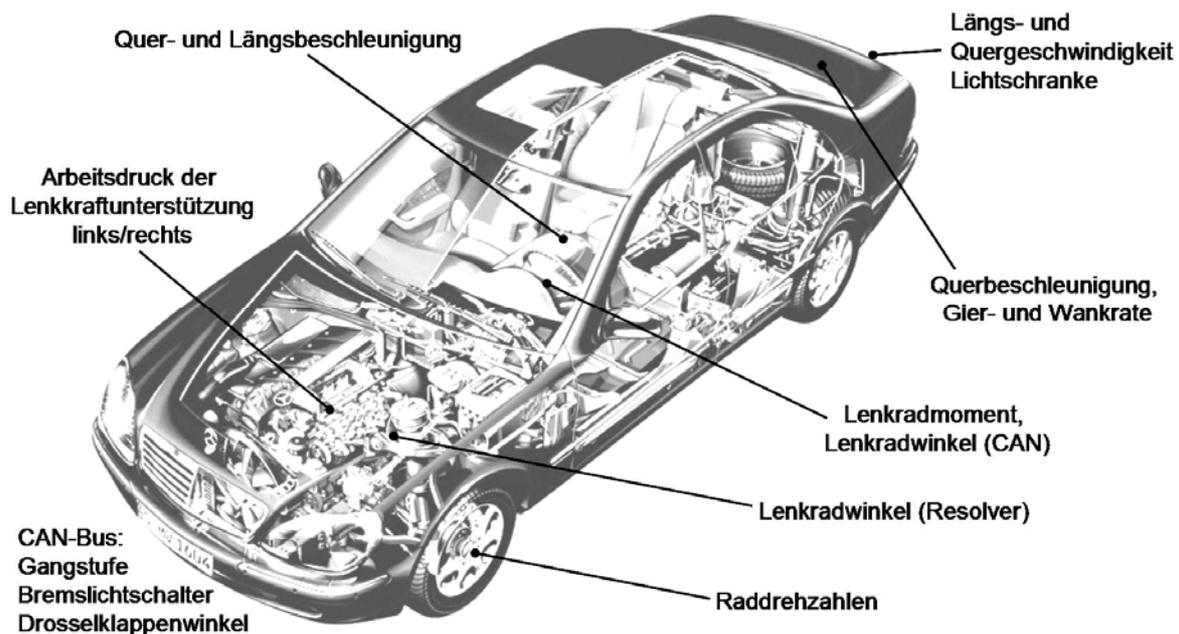


Bild 2–23: Versuchsträger mit eingezeichneten Messstellen.

Der Fahrzeuginnenraum wurde nur gering verändert (Bedienelemente in der Mittelkonsole, Messlenkrad), so dass die Bedienungsergonomie des Serienfahrzeugs vollständig erhalten blieb. Lenkradkranz und Pralltopf konnten aus dem Serienfahrzeug übernommen werden. Auch stand die serienmäßig vorhandene axiale und vertikale Lenkradverstellung den Probanden weiterhin zur Verfügung.

² Software von: The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA

³ Software von: The MathWorks, Inc., Natick, MA, USA

2.2.2 Versuchsplan / Anzahl der Lenkradmomentvarianten

Wie bereits zu Beginn von Abschnitt 2.2 erwähnt, gibt es bei der Beurteilung von Lenkradmomenten durch Normalfahrer zwei maßgebliche Randbedingungen zu beachten:

- Relativbeurteilung von Lenkradmomentvarianten in Paarvergleichen,
- Versuchsdauer geringer als eine Stunde.

Unter Berücksichtigung dieser beiden Randbedingungen wird im Folgenden ein Versuchsplan entworfen.

Für eine einfache Untersuchung der drei relevanten Lenkradmomentanteile (C_1 , C_3 und C_4) wären eine dreifache Ausprägung eines jeden Parameters sowie eine vollständige Permutation wünschenswert. Hierbei entstünden folglich $j = 27$ Varianten. Diese Anzahl an Varianten würde nach Formel (2-16) wiederum in $V_j = 351$ Paarvergleichen resultieren. Hierbei sind Reihenfolgeeffekte bereits ausgeschlossen worden.

$$V_j = \binom{j}{2} = \frac{j!}{2!(j-2)!} \quad (2-16)$$

Will man diese in einer Stunde beurteilen, so blieben lediglich 10s für einen Paarvergleich bzw. 5s für die Fahrt mit einer Variante. In dieser Zeit ist es jedoch nicht möglich, eine genügend große Anzahl an Fahrmanövern durchzuführen, um sich einen Eindruck über die jeweilige Lenkvariante verschaffen zu können. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass auch ein entsprechender Zeitaufwand für das Erheben der Beurteilung eingeplant werden muss.

Nimmt man umgekehrt an, dass für einen Paarvergleich inkl. Befragung etwa 3 min. benötigt werden (entspricht zum Beispiel bei einer Befragungsdauer von ca. 40s auf einem Landstraßenparcours einer Länge von insgesamt ca. 3km), so ergeben sich lediglich 7 statt 27 Varianten, was wiederum eine Einschränkung in der Anzahl der Ausprägungen eines jeden Parameters bzw. in deren Kombination bedeutet. Der getroffene Kompromiss betrifft zum einen die Ausprägung und die Permutation der Lenkradmomentanteile und zum andern die beurteilten Varianten pro Proband.

Es wurden die zwei in Vorversuchen (Kapitel 2.1.5) für ein Lenkgefühl als primär definierten Anteile (Rückstellmoment und Dämpfung) in drei Ausprägungen und der dritte Parameter (Reibung) in zwei Ausprägungen nach einem teilhierarchischen Plan derart kombiniert [32], dass neun Varianten entstanden (**Tabelle 2–4**).

Dies reduzierte die Anzahl der Paarvergleiche auf 36, die nun auf zwei Probanden ähnlichen Alters und gleichen Geschlechts verteilt wurden. Die so entstandenen „Zwillinge“ führen nun jede Variante, nicht aber jeden Paarvergleich innerhalb einer Stunde. Um eine statistisch vergleichbare Aussage treffen zu können, wurde daher die anfangs geplante Probandenanzahl von „> 30“ auf „> 60“ Personen verdoppelt [42].

Tabelle 2–4: Teilhierarchischer Versuchsplan.

a1			a2			a3		
b1	b2	b3	b1	b2	b3	b1	b2	b3
c2	c1	c2	c1	c2	c1	c2	c1	c2
a1b1c2	a1b2c1	a1b3c2	a2b1c1	a2b2c2	a2b3c1	a3b1c2	a3b2c1	a3b3c2

2.2.3 Datenerhebung

Die Befragung der Probanden sollte jeweils direkt nach dem Paarvergleich stattfinden, um die noch frischen Eindrücke zu erfassen. Hierbei wurden vom Versuchsbegleiter einzelne mögliche Eigenschaften eines „Lenkgefühls“ abgefragt. Die hier ausgewählten Eigenschaften orientieren sich an bereits durch Umgangssprache und Marketing geprägten Fahrzeugeigenschaften.

Wie im vorigen Kapitel beschrieben, existieren im automobilen Marketing die zwei Schlagwörter „Komfort“ und „Sport“ oder verwandte Begrifflichkeiten zur Charakterisierung von Fahrzeugen und deren Fahrverhalten (z.B. [8], [24], [25], [178]). Weiterhin ist zu beobachten, dass zahlreiche Untersuchungen zum Fahrverhalten von Fahrzeugen existieren, die die Sicherheit des Systems bewerten (z.B. [53], [201], [202], [252]).

Vor diesem Hintergrund wurden die Kriterien

- empfundener Komfort,
- empfundene Sportlichkeit bzw. empfundener Fahrspaß,
- empfundene Sicherheit und
- allgemeine Bevorzugung

zur Lenkungsbeurteilung herangezogen. Das vierte Kriterium, die „allgemeine Bevorzugung“, sollte als integrales Kriterium die Möglichkeit eröffnen, die Gewichtung der ersten drei Kriterien bei der letztendlichen Bevorzugung festzustellen.

Am Ende jedes Paarvergleichs wurde dem Probanden die Möglichkeit gegeben, bezüglich der vier Kriterien sein Relativurteil abzugeben. Ein zweistufiges kategoriales Urteil wurde als nicht ausreichend erachtet, da auch der Zustand einer gleichen Bewertung der beiden Varianten von Interesse ist. Die Wahrnehmungsschwelle des Probanden liegt in diesem Fall oberhalb der Differenz der beiden Lenkkradmomente. Die Zahl der Antwortkategorien wurde daher um eine dritte Antwortkategorie „gleich“ erweitert. Mummendey [187] stellt fest, dass durch zahlreiche Forschungsergebnisse bestätigt wird, dass es für die Datenverarbeitung der Fragebogen-Resultate unerheblich ist, ob Urteile auf zwei-, drei-, fünf- oder mehrstufigen Antwortskalen zustande gekommen sind. Mehrstufige Skalen können jedoch dem Probanden die Entscheidung für eine Antwort erleichtern. Somit wurde sich für die in **Bild 2–24** dargestellte 5 stufige bipolare Ankerskala entschieden.

Neben den Antwortmöglichkeiten „viel“, „wenig“ und „gleich“ (kein Unterschied zwischen den Varianten spürbar) konnten die Probanden auch „weiß nicht“ antworten, wenn sie zwar einen Unterschied zwischen den Lenkradmomentvarianten spürten, sich aber nicht für eine Präferenz einer der beiden Varianten, bezogen auf das jeweilige Kriterium, entscheiden konnten.

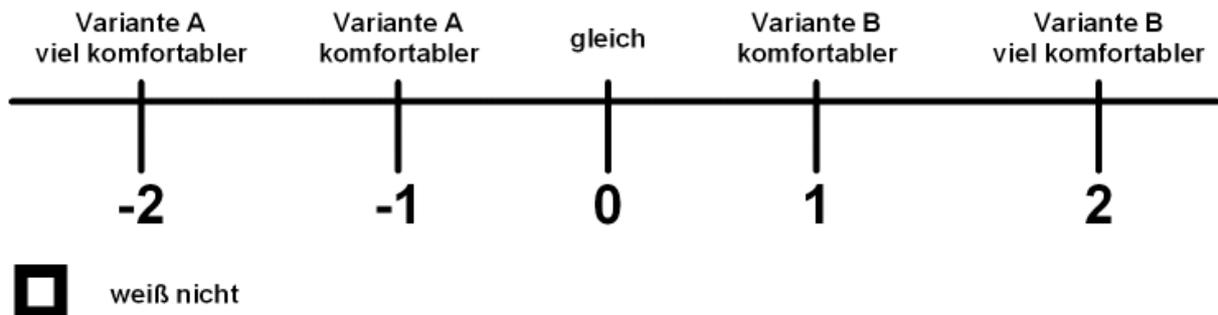


Bild 2–24: Bewertungsskala.

Alle Antworten der Probanden wurden vom Versuchsbetreuer direkt in eine Software-Datenbank eingetragen, um mögliche Fehler beim späteren Übertrag der Daten in den Rechner zu vermeiden. Zur Kontrolle der Reproduzierbarkeit der Antworten wurde ein beliebiger, bereits zuvor gefahrener Paarvergleich ohne Wissen des Probanden wiederholt.

2.2.4 Versuchsstrecken

Insgesamt wurden drei verschiedene Versuchsreihen durchgeführt, um die in der Realität vorhandene Bandbreite an Fahrsituationen im Normalfahrbereich möglichst gut abbilden zu können. Die Parcours wurden so gestaltet bzw. ausgewählt, dass sie annähernd symmetrisch zu einem Umschaltunkt in der Mitte der Strecke waren. Somit konnte mit dem verwendeten Versuchsträger an diesem Umschaltunkt während der Fahrt ohne Stopp innerhalb von ca. 50ms von einer Variante A auf eine zweite Variante B umgeschaltet werden.

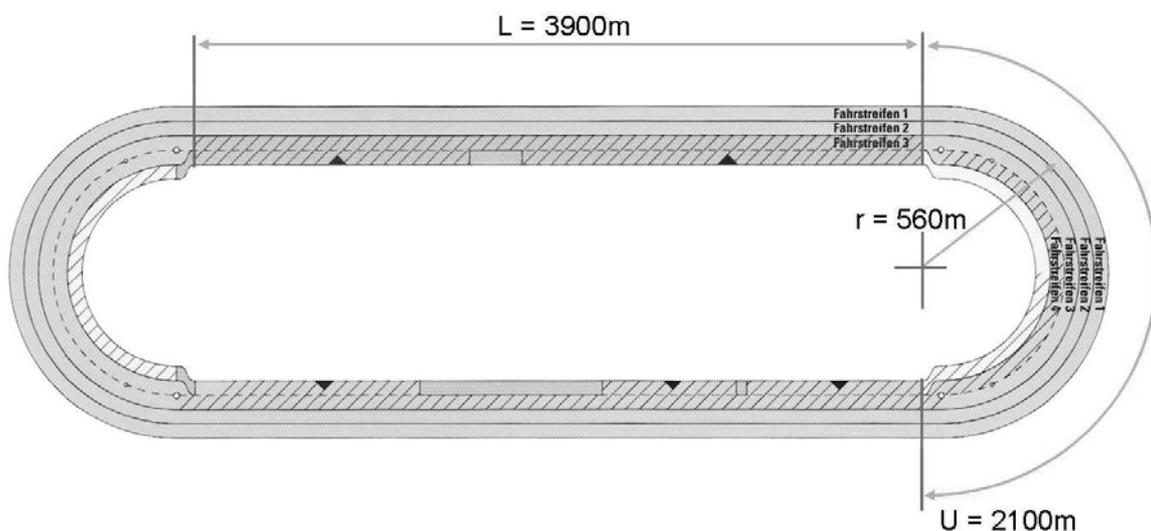


Bild 2–25: Autobahnparcours (Testgelände, ATP, Papenburg).

Der Autobahnparcours (**Bild 2–25**) wurde mit tempomatgeregelten 130 km/h gefahren. Der Fahrauftrag für die Probanden bestand im Durchführen von gemäßigten Spurwechseln ($a_y < 5\text{m/s}^2$). Weiterhin war ein „Spielen um die Mittellage“ innerhalb der Fahrspur erlaubt. Fahrmanöver und Bewertung fanden lediglich auf den beiden Geraden des Autobahnparcours statt.

Auf dem Landstraßenparcours (**Bild 2–26**) wurden Schilder mit Geschwindigkeitsbeschränkungen angebracht, um die beiden Hälften des Parcours im Querbeschleunigungsniveau anzupassen. Es wurde der Geschwindigkeitsbereich zwischen 50 und 90 km/h gefahren. Ein Schneiden der Kurven wurde ausdrücklich verboten.

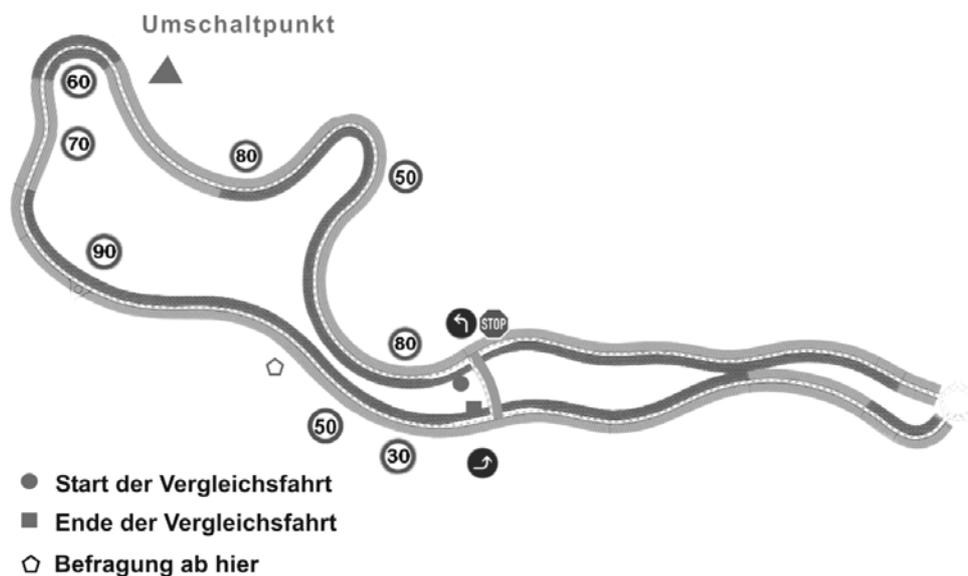


Bild 2–26: Landstraßenparcours (Testgelände, ATP, Papenburg), Länge: ~3000m.

Der Stadtparcours (**Bild 2–27**) wurde mit Pylonen auf dem August-Euler-Flugplatz in Griesheim erstellt und spiegelt Geschwindigkeits- und Lenkradwinkelbereiche wider, wie man Sie im städtischen Verkehr findet. Parkiersituationen wurden nicht berücksichtigt.

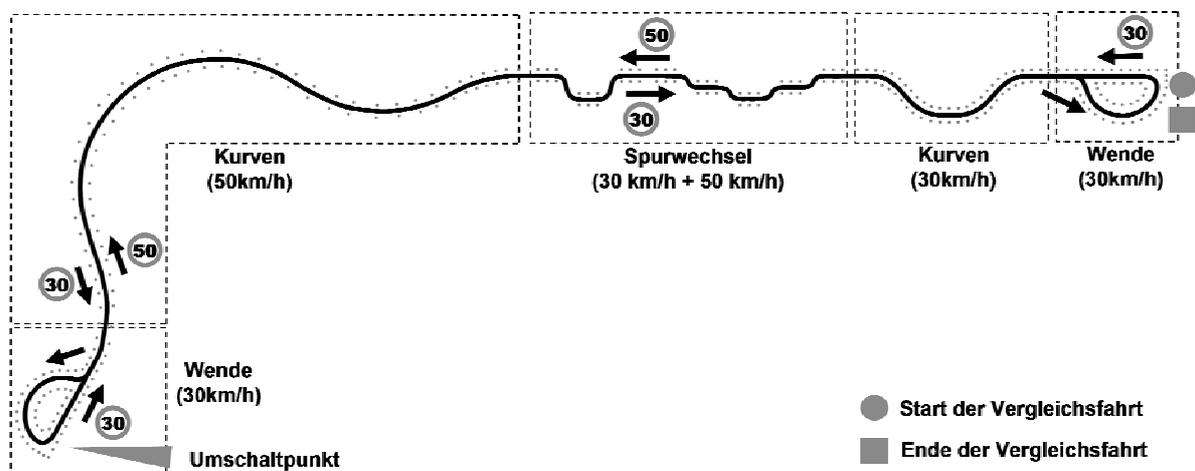


Bild 2–27: Stadtparcours (August-Euler-Flugplatz, Darmstadt/Griesheim), Länge: ~830m.

2.2.5 Lenkradmomentvarianten

Wie bereits in Kapitel 2.2.2 abgeleitet, wurden neun unterschiedliche Lenkradmomentvarianten den Probanden zur Beurteilung präsentiert. Hierbei waren auf Grund von Voruntersuchungen der Rückstellmoment- und der Dämpfungsanteil als primäre Parameter identifiziert worden, der Reibungsanteil als sekundärer Parameter. Aus dem im Rahmen der Versuchskonzeptentwicklung erstellten hierarchischen Versuchsplan (**Tabelle 2–4**) geht hervor, dass die primären Parameter in drei Stufen zu variieren und vollständig zu permutieren sind, so dass neun Varianten entstehen. Die Reibung variiert in zwei Stufen und wurde abwechselnd auf die existierenden neun Varianten verteilt.

Um eine Aussage über die bevorzugten Lenkradmomentvarianten in Abhängigkeit des gefahrenen Parcours zu erhalten, sollten nach Möglichkeit auf allen Parcours die gleichen neun Varianten beurteilt werden. Es war also notwendig, die Ausprägungsstufen der drei Parameter gleichzeitig für alle drei Parcours zu gestalten. Orientiert wurde sich bei der Wahl der Parameterwerte an den in Kapitel 2.1.4 ermittelten bevorzugten Wertebereichen.

Der letztendlich gewählte Aufbau der neun Lenkradmomentvarianten ist in **Bild 2–28** dargestellt.

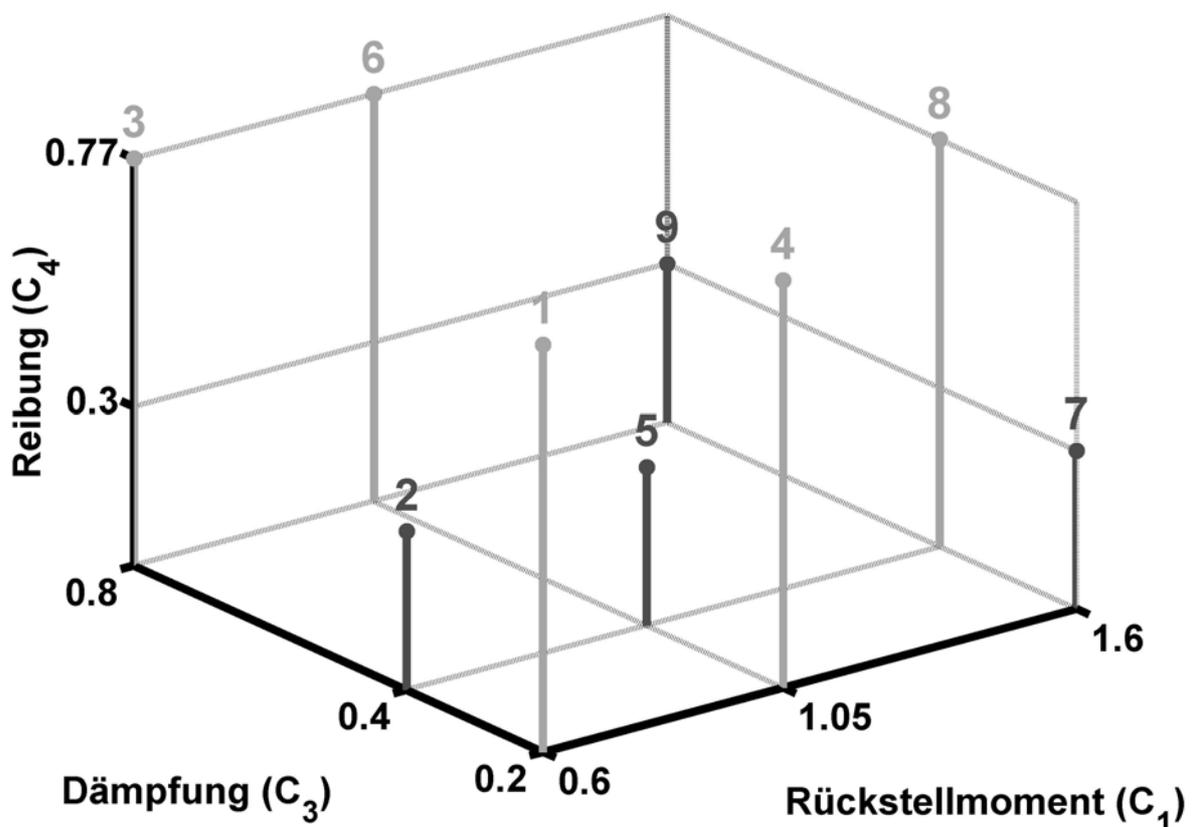


Bild 2–28: Parameterwerte der neun in den Probandenversuchen zu beurteilenden Lenkradmomentvarianten. Die hohen Reibmomente sind hellgrau, die niedrigen Reibmomente dunkelgrau dargestellt.

Die Variante mit geringem Rückstellmomentanteil und geringer Dämpfung (Variante Nr. 1) wurde durch einen hohen Reibmomentanteil ergänzt, um die Fahrbarkeit auf dem Autobahnparcours zu gewährleisten. Ein zu geringes Lenkradmoment in dieser Fahrsituation hätte eine schlechtere Beurteilung zur Folge ([17], [103]). Neben den Erkenntnissen aus der Literatur basierte der Aufbau der Lenkradmomentvarianten maßgeblich auf den Kenntnissen und Erfahrungen von zwei Experten, die sich beide schon länger als fünf Jahre mit der Beurteilung von Lenksystemen beschäftigen.

Die Variante mit hohem Rückstellmoment und hoher Dämpfung (Variante Nr. 9) benötigt hingegen die Ergänzung durch ein niedriges Reibmoment, um sie auf dem Stadtparcours noch ausreichend fahrbar zu machen. Ein zu hohes Lenkradmoment würde sich aufgrund der hohen Belastung unter diesen Bedingungen ebenfalls schlecht auf eine Beurteilung auswirken ([17], [103]).

Die übrigen Zwischenstufen wurden so gewählt, dass nach Überprüfung durch drei erfahrene Testfahrer die Varianten nach Möglichkeit ein ausgewogenes Verhältnis der Anteile repräsentieren und gleichzeitig die Fahrbarkeit des Fahrzeugs auf allen drei Parcours nicht verschlechtert wird.

2.2.6 Versuchspersonenkollektiv

Ein Ziel der Untersuchung ist die Klärung der Auswirkung des Fahreralters auf ein bevorzugtes Lenkradmoment. Es wurde eine gleichmäßige Altersverteilung bei den Probanden von 25 bis 55 Jahren angestrebt. Junge Fahrer und Fahranfänger wurden bewusst ausgeklammert, da eine mangelnde Fahrpraxis eine geringere Konzentration auf die eigentliche Aufgabe – das Sensieren von Unterschieden im Lenkradmoment – erwarten lässt. Auch ältere Fahrer sind durch die Aufgabe „Fahrzeugführen“ in einem höheren Maße ausgelastet [3].

An den Versuchsreihen für Stadt-, Landstraßen- und Autobahnparcours nahmen insgesamt 197 Probanden teil. Die Zusammensetzung des Probandenkollektivs ist nach den wichtigsten Kriterien in **Bild 2–29** bis **Bild 2–32** dargestellt. Man sieht, dass bezogen auf Geschlecht und Alter der Probanden die angestrebte Gleichverteilung mit geringen Abweichungen erreicht werden konnte.

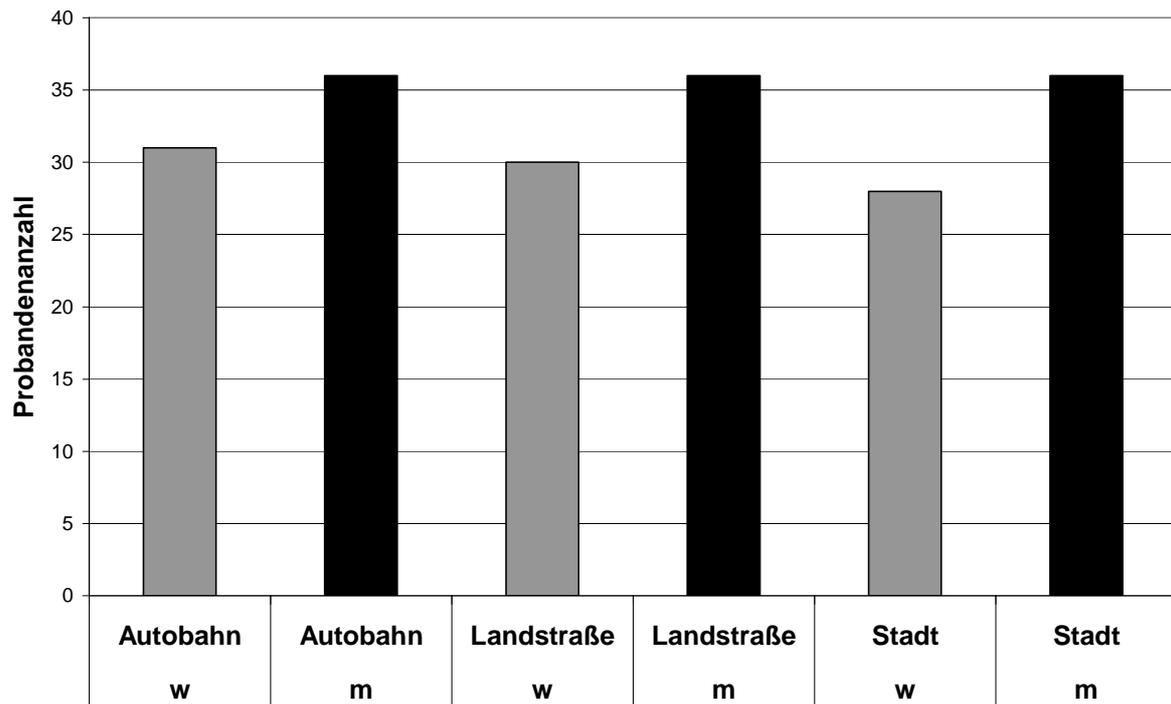


Bild 2–29: Zusammensetzung des Probandenkollektivs
(Geschlechterverteilung bezogen auf Parcours).

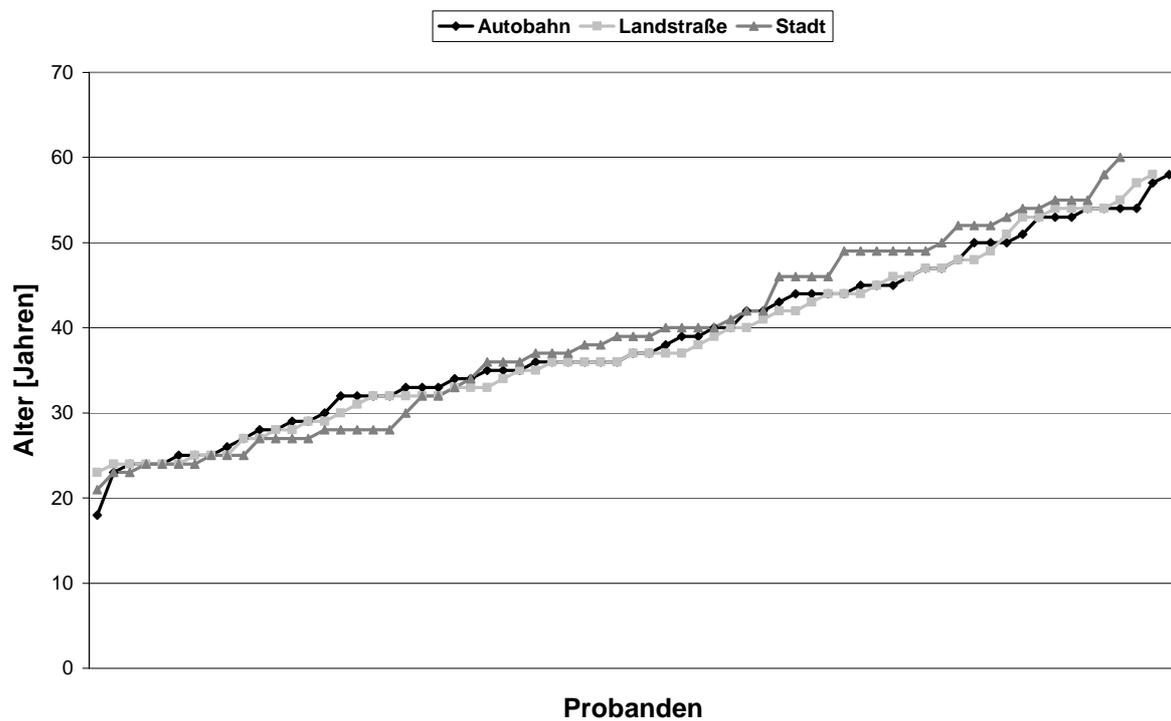


Bild 2–30: Zusammensetzung des Probandenkollektivs
(Altersverteilung bezogen auf Parcours).

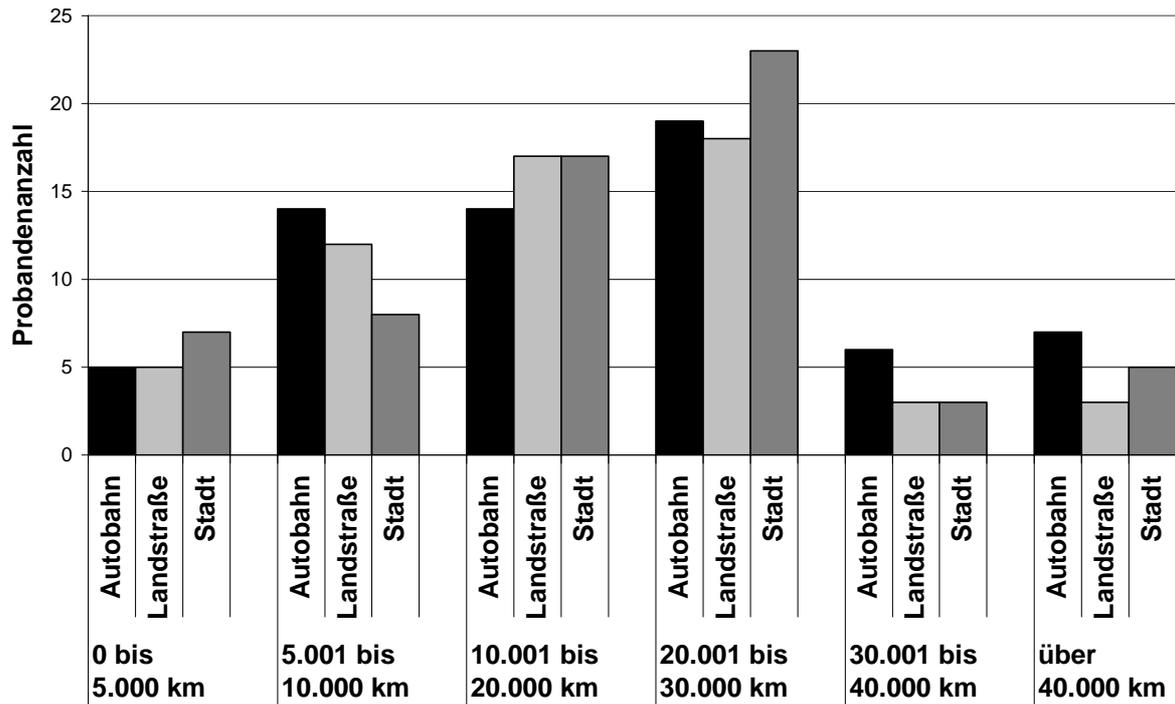


Bild 2–31: Zusammensetzung des Probandenkollektivs
(Jahresfahrleistung bezogen auf Parcours)

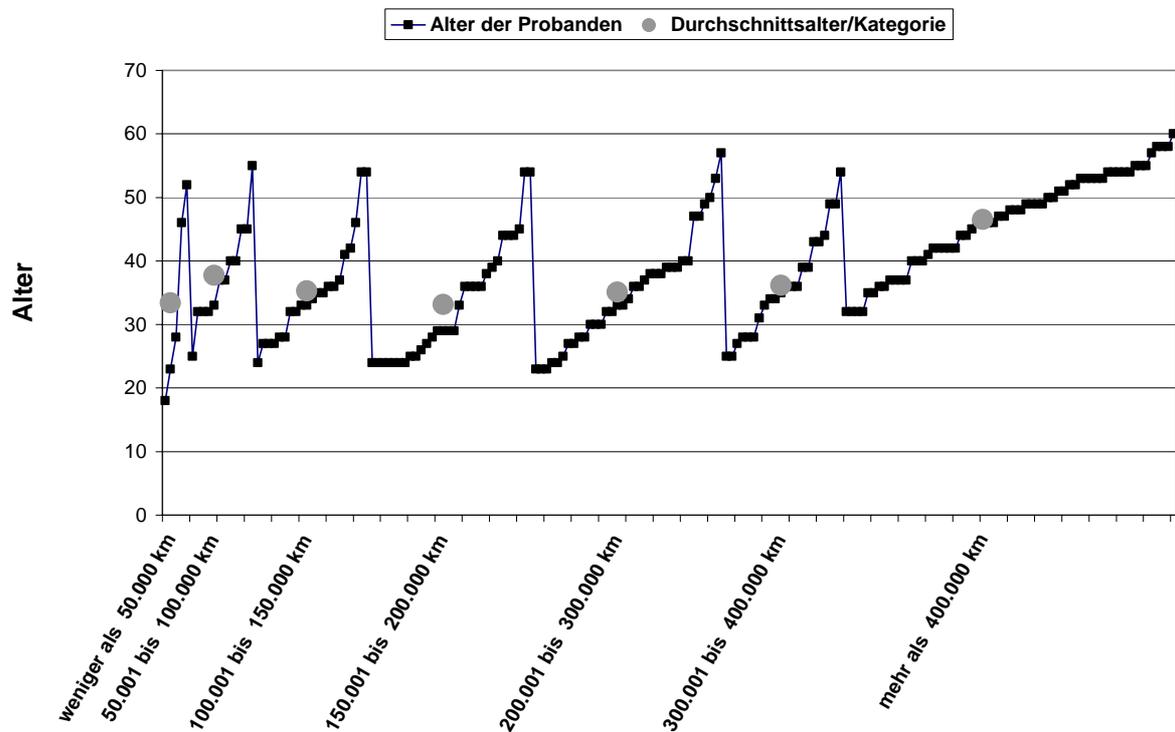


Bild 2–32: Zusammensetzung des Probandenkollektivs
(Lebensfahrleistung bezogen auf Alter).

2.3 Auswertung

Im folgenden Kapitel werden wichtige Schritte der Auswertung näher erläutert. Hierzu gehören in erster Linie die Aufbereitung der fahrzeugtechnischen und der erhobenen subjektiven Daten. Weiterhin wird das Datenmaterial auf signifikante Effekte hin untersucht. Das angewandte Verfahren wird in Kapitel 2.3.2 genauer beschrieben. Im Anschluss daran wird die im Kapitel 3 verwendete Darstellung der Ergebnisse erläutert.

2.3.1 Datenaufbereitung

Die erhobenen fahrzeugtechnischen Daten wurden vor Ihrer Auswertung zunächst hinsichtlich der Übereinstimmung der tatsächlich gemessenen und den im Versuchsplan vorgesehenen Lenkradmomentvarianten überprüft. Gleichzeitig wurden die Signalverläufe auf Unregelmäßigkeiten (Sensorausfälle, Signalspitzen, Regelabweichungen nach dem Umschalten zwischen den Varianten) hin untersucht. Entsprechende Fahrten wurden vollständig verworfen oder, wenn möglich, kleine Teilbereiche bei der späteren Auswertung ausgeklammert. Um fahrdynamische Kennwerte zu bilden, wurden die Signale mit einem nichtkausalen, d.h. Gruppenlaufzeit kompensierenden Butterworth-Tiefpassfilter 2. Ordnung und einer Grenzfrequenz von 5Hz gefiltert. Durch den Fahrer induzierte Lenkradwinkelfrequenzen befinden sich – innerhalb des Normalfahrbereichs – unterhalb dieser gewählten Grenzfrequenz ([57], [156]).

Die subjektiven Daten wurden ebenfalls einer Plausibilitätsuntersuchung hinsichtlich möglicher Antwortkombinationen unterzogen; z.B. erzwingt die Aussage „gleich“ bezüglich eines Kriteriums „Komfort“ auch ein „gleich“ in den übrigen drei Kategorien.

Weiterhin mussten die Subjektivurteile („weiß nicht“, „gleich“, „wenig ...“, „viel ...“) mit entsprechenden Zahlenwerten gewichtet werden. Da nahezu ein Drittel der Aussagen die Ausprägung „viel ...“ besitzt, konnten die beiden Aussagen „wenig ...“ und „viel ...“ nicht zusammengefasst werden. Bei solch einer Verteilung ist davon auszugehen, dass die Probanden in der Lage sind, diese beiden Ausprägungen zu differenzieren.

Es ergab sich somit folgende Gewichtung der Antworten:

- „weiß nicht“ : Gewinnervariante = 0 Punkte / Verlierervariante = 0 Punkte
- „gleich“ : Gewinnervariante = 0 Punkte / Verlierervariante = 0 Punkte
- „wenig ...“ : Gewinnervariante = 1 Punkte / Verlierervariante = 0 Punkte
- „viel ...“ : Gewinnervariante = 2 Punkte / Verlierervariante = 0 Punkte

2.3.2 Statistik

Wie bereits beschrieben, war es notwendig, Relativbewertungen der Lenkradmomentvarianten in Form von Paarvergleichen durchzuführen, um reproduzierbare Urteile zu erlangen. Da somit keine metrisch skalierten Daten vorlagen, konnten zahlreiche aussagekräftige statistische Methoden (z.B. Varianzanalyse) nicht angewandt werden.

Auf Grund des vorliegenden Datenmaterials und der unbekanntenen Verteilung innerhalb der Stichprobe wurde der „Wilcoxon-Test“ oder auch „Vorzeichenrangtest“ ausgewählt ([108], [165], [236]).

Der Vorzeichenrangtest ist ein statistisches Verfahren zum Vergleich zweier unterschiedlicher Messreihen. Im Gegensatz zu zahlreichen anderen Testverfahren setzt der Vorzeichenrangtest keine bestimmte Verteilung der Messwerte (Stichproben) voraus und gehört somit zu den verteilungsfreien (nichtparametrischen) Verfahren.

Die Formulierung der Nullhypothese (H_0) geht von einer zufälligen Verteilung der Probandenurteile aus. Dies bedeutet, dass kein Unterschied in der Beurteilung der beiden Varianten bei der zu untersuchenden Lenkradmomentkombination besteht. Die Alternativhypothese (H_1) besagt, dass eine bevorzugte Lenkradmomentvariante existiert. Welche der beiden getesteten Lenkradmomentvarianten bevorzugt wird, kann somit jedoch noch nicht beantwortet werden. Hierzu muss der Test zweimal durchgeführt werden.

Im ersten Schritt besagt die Nullhypothese (H_{01}), dass die Beurteilung zufällig ist. Die Alternativhypothese (H_{11}) lautet, dass die Lenkradmomentvariante A besser beurteilt wird als die Lenkradmomentvariante B.

Im zweiten Schritt wird in der Nullhypothese (H_{02}) erneut die Aussage gemacht, dass die Beurteilung zufällig ist. Die Alternativhypothese (H_{12}) besagt nun jedoch, dass die Lenkradmomentvariante B besser beurteilt wird als die Lenkradmomentvariante A.

Wenn keine der beiden Nullthesen verworfen werden kann, kann auch keine Aussage über eine bevorzugte Lenkradmomentvariante getroffen werden. In den beiden anderen möglichen Fällen kann eine bessere Beurteilung der Variante A bzw. B unterhalb einer gewissen Irrtumswahrscheinlichkeit abgesichert werden. Das Datenmaterial wurde auf dem Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$, in Einzelfällen auch auf $\alpha = 0,05$, mit Hilfe dieses Testverfahrens überprüft.

Reihenfolgeeffekte bleiben bei der statistischen Auswertung unberücksichtigt. Da das Versuchskonzept derart ausgelegt ist, dass innerhalb des Gesamtkollektivs, aber auch innerhalb der Geschlechter- und Altersklassen beide Paarvergleiche (A – B und B – A) mit der gleichen Häufigkeit gefahren und beurteilt werden, wird kein Reihenfolgeeinfluss erwartet.

2.3.3 Ergebnisdarstellung

Die Art der grafischen Darstellung der Ergebnisse der Subjektivbeurteilung der Lenkradmomentvarianten soll im Folgenden kurz erläutert werden (Bsp.: **Bild 2–33**):

Auf den beiden horizontalen Achsen sind die Ausprägungen des Rückstellmomentanteils (C_1) und des Dämpfungsanteils (C_3) aufgetragen. Auf der vertikalen Achse ist das relative Subjektivurteil pro Variante abzulesen. Die Bezeichnung „rel. Subjektivurteile“ (rS_k) bedeutet hier, dass die Summe der Subjektivurteile pro Variante (P_k) auf die maximal

mögliche Punktsomme pro Variante ($P_{k,\max} = 2$) bezogen wurde.

$$rS_k = \frac{\sum_1^n P_k}{\sum_1^n P_{k,\max}} \quad (2-17)$$

Hierbei bezeichnet n die Anzahl aller zugrundeliegenden Vergleichfahrten und k die Nummer der jeweiligen Variante.

Die Variation der Reibung ist durch dunkelgraue (niedrige Ausprägung von C_4) und hellgraue Punkte (hohe Ausprägung von C_4) zu erkennen. Die Position der einzelnen Varianten in den folgenden Grafiken ist analog **Bild 2–28**.

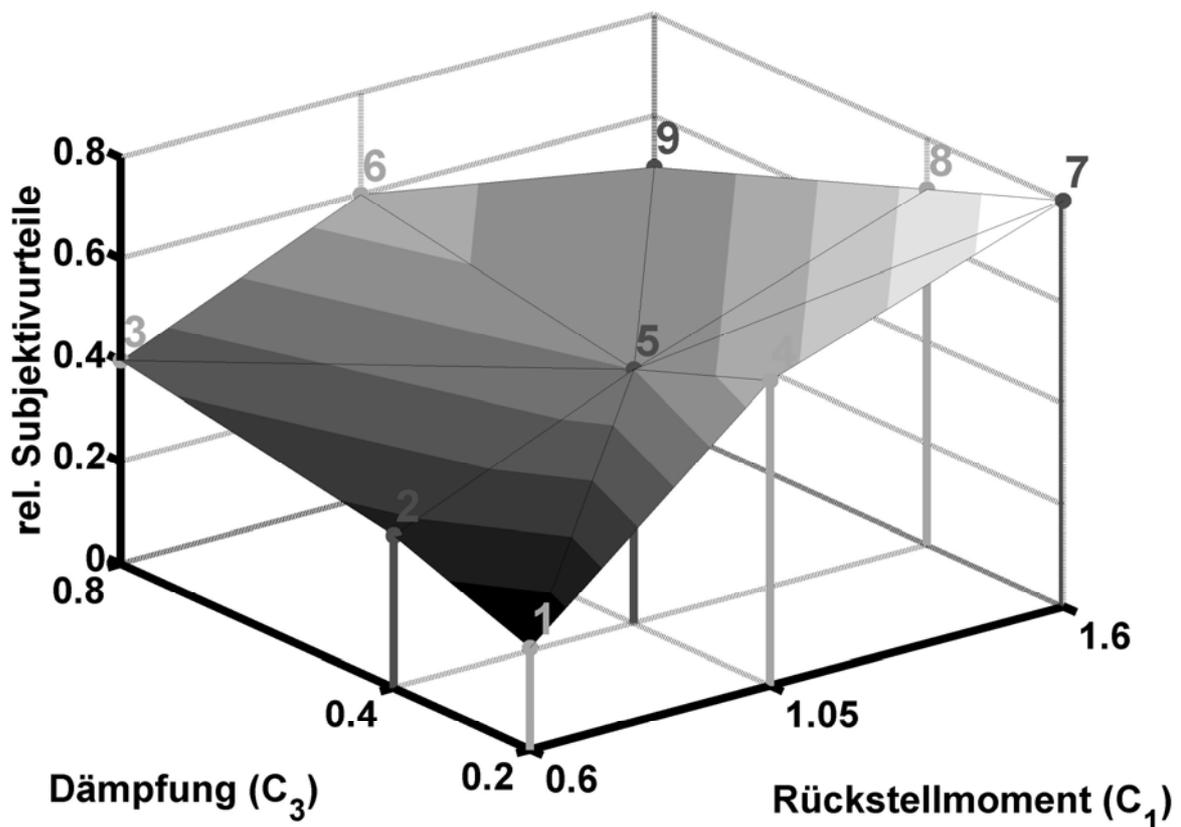


Bild 2–33: Beispielhafte Darstellung der relativen Subjektivurteile.

Die sich ergebende Fläche der relativen Subjektivurteile über den neun Varianten wurde entsprechend der Verteilung einer 10-stufigen Grauskala eingefärbt. Um eine gute Erkennbarkeit von Tendenzen in den Subjektivurteilen zu ermöglichen, wurden folgende Grenzen gewählt: schwarz = schlecht = 0 rel. Subjektivurteil, weiß = gut = 0.8 rel. Subjektivurteil.

Die Verfälschungsmöglichkeit des relativen Subjektivurteils durch vereinzelt Datenverlust (es wurden somit nicht alle Paarvergleiche gleich oft gefahren) wurde durch Überprüfung der Rangfolge der rel. Subjektivurteile mit den signifikanten Paarvergleichen des Vorzeichenrangtests auf Widerspruchsfreiheit eingeschränkt.

Eine Darstellung der statistischen Ergebnisse in klassischen Darstellungen, wie z.B. den so genannten Box-Plots, ist bei dem vorliegenden Datenmaterial nicht möglich, da die Daten auf Relativurteilen aus Paarvergleichen resultieren. Eine zweidimensionale Darstellung von signifikanten Paarvergleichen hätte zudem den Nachteil, dass die Information über die Lenkradmomentanteile verloren ginge. Daher wurde eine dreidimensionale Darstellung signifikanter bzw. nichtsignifikanter Paarvergleiche gewählt. Die in **Bild 2–34** dargestellte Form zeigt die letztendlich ausgewählte Darstellungsart.

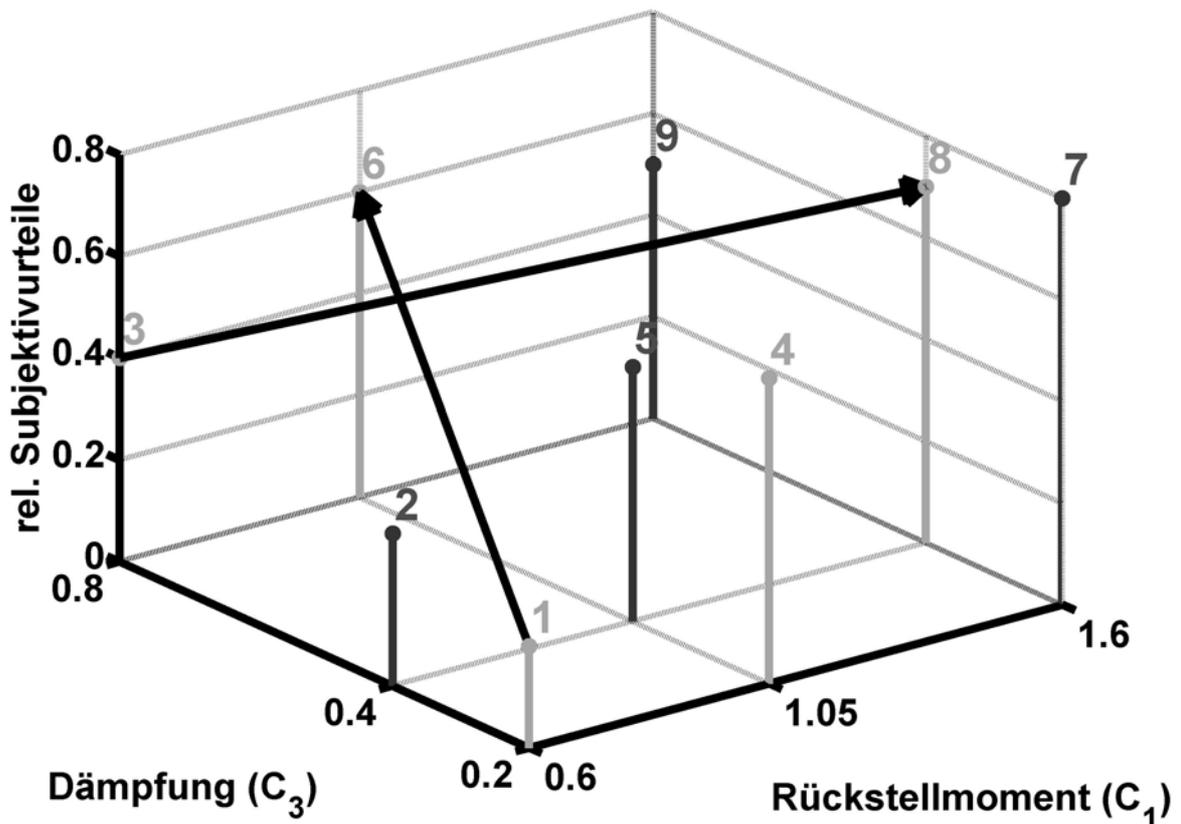


Bild 2–34: Beispielhafte Darstellung der signifikanten Paarvergleiche.

Die drei Achsen bezeichnen wie zuvor die zwei Lenkradmomentanteile, Rückstellmoment und Dämpfung, sowie das relative Subjektivurteil. Die Variation der Reibung ist durch dunkelgraue (niedrige Ausprägung von C_4) und hellgraue Punkte (hohe Ausprägung von C_4) zu erkennen. Die signifikanten Pärchen sind durch dicke, schwarz eingefärbte Pfeile miteinander verbunden. Die Pfeilspitze zeigt jeweils zur signifikant besser beurteilten Lenkradmomentvariante des entsprechenden Paarvergleichs. Das zutreffende Testniveau (z.B. $\alpha = 0,01$) wird in der Beschreibung des Bildes angegeben.

Somit können in der ersten Grafik (**Bild 2–33**) erkannte Tendenzen nun statistisch abgesichert und die Einflüsse der drei Lenkradmomentanteile genauer erkannt werden.

2.4 Fazit

Im vorliegenden Kapitel 2 „Methodik“ wurde ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, eine Aussage über bevorzugte Rückwirkungen an Betätigungseinheiten im Allgemeinen und über bevorzugte Lenkradmomente im Besonderen zu machen.

Es wurde ein mathematisches Modell aufgestellt, das zur Generierung eines synthetischen Lenkradmoments für den Normalfahrbereich ($a_Y < 5\text{m/s}^2$) in einem entsprechend ausgerüsteten Versuchsträger dienen soll. Dieses parametrische Modell wurde im Rahmen einer Systemidentifikation unterschiedlicher Fahrzeuge validiert und die entsprechenden Modellparameter bestimmt. Die hohe Abbildungsqualität von realen Lenkradmomentverläufen durch dieses Modell konnte in Probandenversuchen bestätigt werden. Auf Basis dieser Ergebnisse kann die Hypothese

H1: Es ist nicht möglich, ein reales Lenkradmoment im Normalfahrbereich durch ein synthetisches Lenkradmoment zu ersetzen. Selbst ein in der Bewertung solcher Systeme ungeübter Autofahrer würde den Unterschied bemerken.

eindeutig widerlegt werden.

Ebenso konnten in Probandenversuchen der Rückstellmomentanteil und der Dämpfungsanteil des Modells als primäre Einflussgrößen und der Reibungsanteil als sekundäre Einflussgröße auf das Lenkgefühl identifiziert werden.

Weiterhin wurde ein Versuchskonzept (Anzahl und Ausprägung der Lenkradmomentvarianten, Datenerhebung, Versuchsstrecken) entworfen, das insbesondere unter Berücksichtigung der Beurteilungsleistung von Normalfahrern eine Aussage über bevorzugte Lenkradmomentvarianten zulässt.

Ferner wurde der Aufbau des verwendeten Versuchsträgers beschrieben. Auch wurde in diesem Kapitel bereits auf die generelle Auswertung der Daten (Filterung, Statistik) sowie deren Darstellungsart näher eingegangen.

3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Datenauswertung dargestellt. Hierbei wird abschnittsweise auf die in Kapitel 1.4 aufgestellten Hypothesen eingegangen. Es soll an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die Aussagen über die Urteile der einzelnen Teilkollektive in keiner Weise eine vergleichende Bewertung hinsichtlich „gut“ oder „schlecht“ zulassen, da es sich hierbei um subjektive, individuelle Aussagen zu einer persönlichen Empfindung handelt. Es werden lediglich Unterschiede zwischen Teilkollektiven festgestellt und mögliche Ursachen für diese Unterschiede diskutiert.

3.1 Fahrsituationsspezifische Lenkradmomentbeurteilung

In diesem Unterkapitel werden Ergebnisse dargestellt, die der Überprüfung der Hypothese

H2: Bei der Beurteilung von Lenkradmomentvarianten existiert eine Abhängigkeit von der gefahrenen Fahrzeuggeschwindigkeit. Mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit werden Varianten mit höherem Lenkradmoment bevorzugt.

dienen.

Zur Prüfung der Hypothese H2 werden sowohl grafische Darstellungen objektiver Daten (Lenkradmomente, Fahrzeuggeschwindigkeiten, ...), als auch subjektiver Daten (relative Subjektivurteile, signifikante Paarvergleiche) herangezogen. Hierbei finden alle vier Beurteilungskriterien („empfundener Komfort“, „empfundene Sportlichkeit/Fahrspaß“, „empfundene Sicherheit“ und „allgemeine Bevorzugung“) Berücksichtigung.

3.1.1 Objektive Messdaten

Im Folgenden werden die in den Probandenversuchen gemessenen fahrzeugtechnischen Daten dargestellt. Dies sind sowohl die fahrdynamischen Größen Fahrzeuggeschwindigkeit, Querbeschleunigung, Lenkradwinkel und Lenkradwinkelgeschwindigkeit, als auch das Lenkradmoment.

Zunächst sollen die arithmetischen Mittelwerte der Geschwindigkeiten einer jeden Teilfahrt betrachtet werden. Es zeigt sich eine eindeutige Differenzierung der drei Parcours (**Bild 3–1**). Wie zu erwarten, unterscheiden sich die Geschwindigkeitsprofile der drei Parcours im Mittel eindeutig. Während sich auf dem Autobahnparcours durch den Gebrauch der Geschwindigkeitsregelung des Fahrzeugs nahezu keine Schwankungen der Mittelwerte ergeben, ist auf den anderen beiden Parcours der schwankende Mittelwert durch die unterschiedliche Fahrweise innerhalb der Teilfahrten zu erklären. Dies zeigt, dass sich trotz der parcoursbezogenen, einheitlichen Geschwindigkeitsvorgaben bei der Versuchsdurchführung unterschiedliche Mittelwerte ergeben.

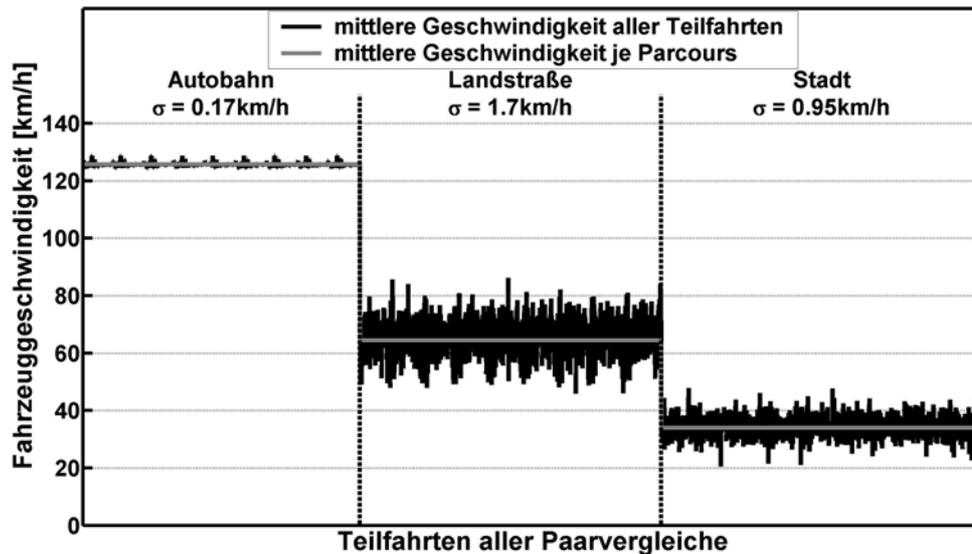


Bild 3–1: Darstellung des arithmetischen Mittelwertes der gefahrenen Geschwindigkeiten der Teilfahrten aller Paarvergleiche, deren parcoursbezogene Standardabweichungen (σ), sowie die gemittelten Geschwindigkeiten für alle drei Parcours.

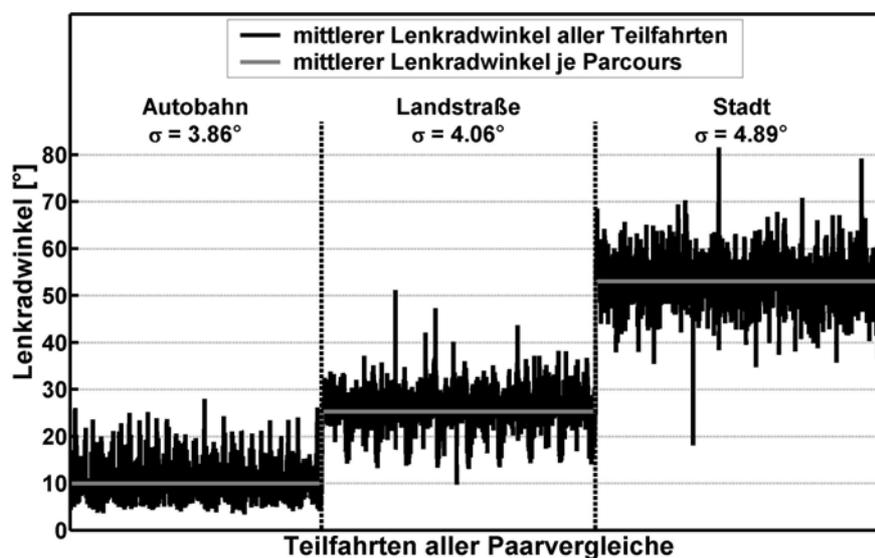


Bild 3–2: Darstellung des arithmetischen Mittelwertes des Lenkradwinkelverlaufs der Teilfahrten aller Paarvergleiche, deren parcoursbezogene Standardabweichungen (σ), sowie der gemittelte Lenkradwinkelverlauf für alle drei Parcours.

Die gefahrene Geschwindigkeit ist nur ein Einflussparameter auf das Gesamtlenkradmoment. Ebenso gehen der Lenkradwinkel und die Lenkradwinkelgeschwindigkeit mit entsprechenden funktionalen Zusammenhängen in das Gesamtmoment ein. In **Bild 3–2** bis **Bild 3–4** sind die

einzelnen gemittelten das Lenkradmoment direkt bzw. indirekt beeinflussenden Größen für die jeweiligen Teilfahrten aufgetragen.

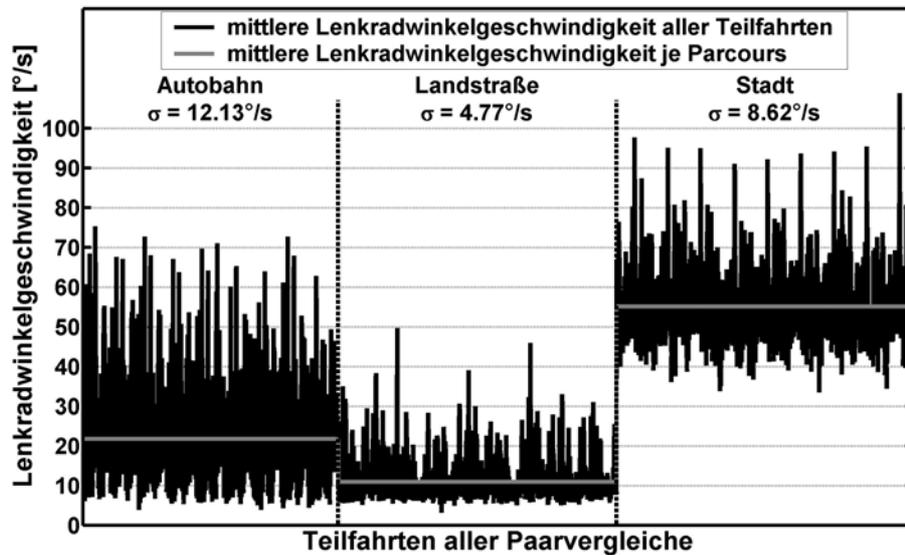


Bild 3–3: Darstellung des arithmetischen Mittelwertes der Lenkradwinkelgeschwindigkeit der Teilfahrten aller Paarvergleiche, deren parcoursbezogene Standardabweichungen (σ), sowie der gemittelten Lenkradwinkelgeschwindigkeit für alle drei Parcours.

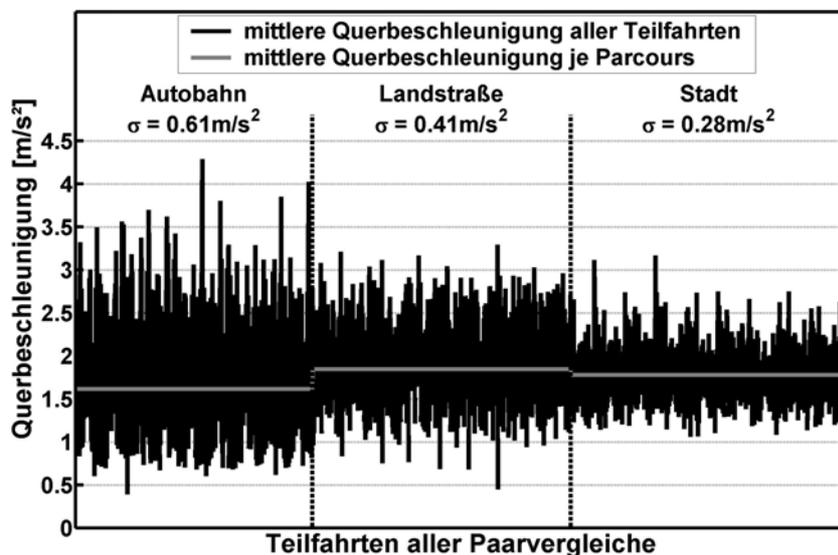


Bild 3–4: Darstellung des arithmetischen Mittelwertes der Querbeschleunigung der Teilfahrten aller Paarvergleiche, deren parcoursbezogene Standardabweichungen (σ), sowie der gemittelten Querbeschleunigung für alle drei Parcours.

Man erkennt, dass sich die drei Parcours nicht nur durch die mittlere gefahrene Geschwindigkeit differenzieren lassen, sondern auch durch die fahrdynamischen Größen Lenkradwinkel und Lenkradwinkelgeschwindigkeit. Das Querschleunigungsprofil zeigt nur geringe parcoursspezifische Abweichungen. Dies kann durch die Auslegung der Parcours und die Anweisungen an die Probanden (kein Überschreiten der max. Querschleunigung von 5m/s^2) begründet werden.

Die folgenden Grafiken der unterschiedlichen Lenkradmomente sind Grundlage späterer Diskussionen und zeigen den Unterschied auf zwischen der Höhe des gemessenen Lenkradmoments, der Höhe der einzelnen Lenkradmomentanteile und der Ausprägung des entsprechenden Parameters C des Lenkradmomentanteils.

In **Bild 3–5** bis **Bild 3–8** sind zunächst jeweils die gemittelten drei Lenkradmomentanteile (Rückstellmoment, Dämpfungsmoment, Reibmoment) sowie das gemittelte Gesamtmoment sowohl je Teilfahrt als auch je Variante aufgetragen. Die Sortierung der Werte ist innerhalb des Parcours nach aufsteigender Variantenummer und innerhalb der Variante nach aufsteigenden Momenten vorgenommen worden. In **Bild 3–9** schließlich sind das mittlere Gesamtmoment, sowie alle drei mittleren Lenkradmomentanteile für jede Variante aufgezeigt.

In **Bild 3–5** sind bei Betrachtung der gemittelten Rückstellmomente je Variante die drei Ausprägungen des Parameters C_1 auf allen drei Parcours gut zu erkennen (vergl. **Bild 2–28**). Es zeigt sich, dass die höchsten mittleren Rückstellmomente auf dem Landstraßenparcours, gefolgt vom Stadt- und vom Autobahnparcours, erzielt werden. Da die Rückstellmomente direkt proportional der Querschleunigung des Fahrzeugs sind, verhalten sich die gefahrenen Querschleunigungen dementsprechend (vergl. **Bild 3–4**). Die drei Ausprägungen des Parameters C_2 spiegeln sich in den Verläufen des mittleren Dämpfungsmoments wider (**Bild 3–6**). Es ist zu erkennen, dass auf dem Stadtparcours die höchsten Dämpfungsmomente erreicht wurden. Auf dem Landstraßenparcours sind die Dämpfungsmomente am geringsten. Da das Dämpfungsmoment durch Gewichtung der Lenkradwinkelgeschwindigkeit gebildet wird, sind demnach auf dem Stadtparcours die höchsten Lenkradwinkelgeschwindigkeiten erzielt worden, gefolgt vom Autobahn- und Landstraßenparcours (vergl. **Bild 3–3**). **Bild 3–7** zeigt die zwei Ausprägungen des Parameters C_3 an Hand des Verlaufs des mittleren Reibmoments je Variante.

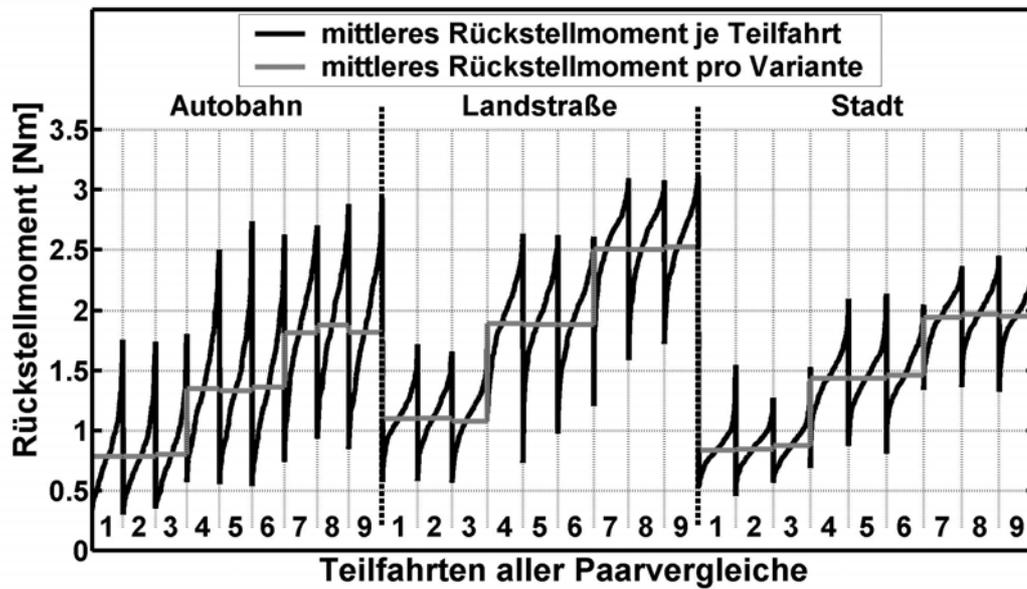


Bild 3–5: Darstellung des arithmetischen Mittelwertes des Rückstellmoments sowohl für jede Teilfahrt als auch für jede Variante.

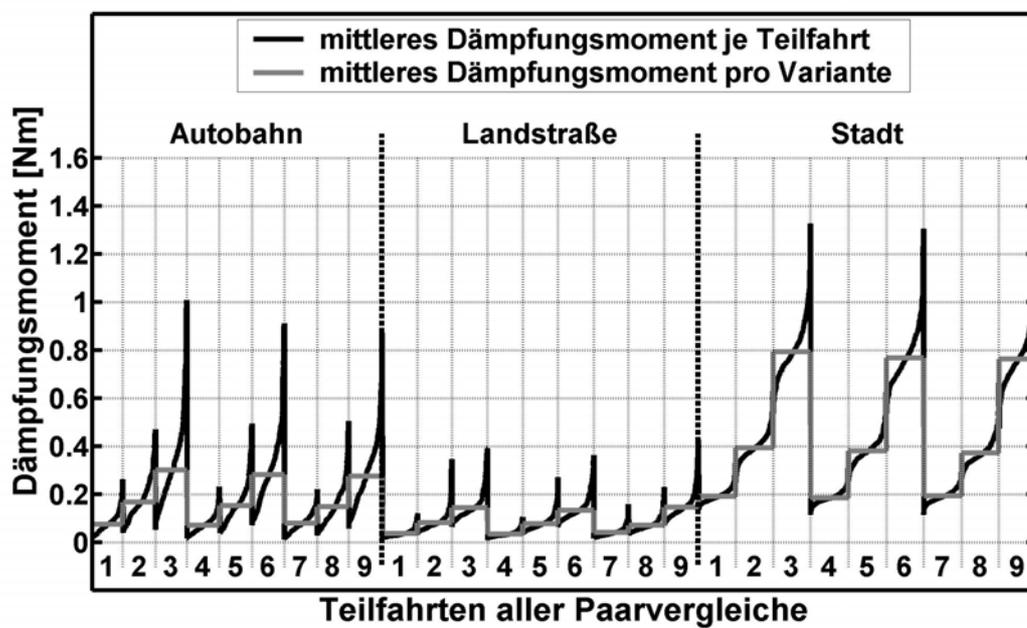


Bild 3–6: Darstellung des arithmetischen Mittelwertes des Dämpfungsmoments sowohl für jede Teilfahrt als auch für jede Variante.

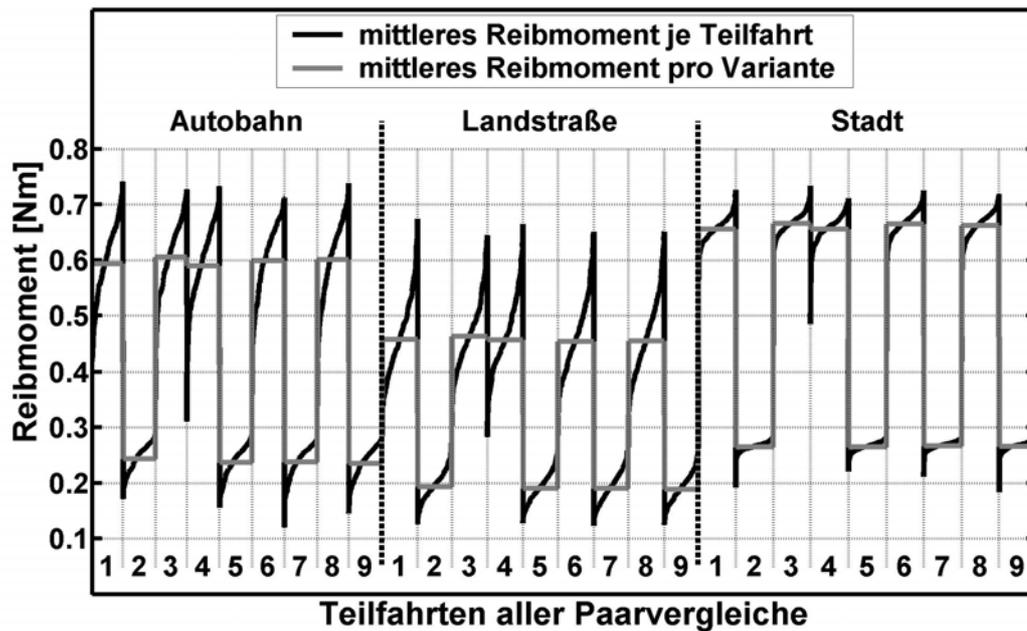


Bild 3–7: Darstellung des arithmetischen Mittelwertes des Reibmoments sowohl für jede Teilfahrt als auch für jede Variante.

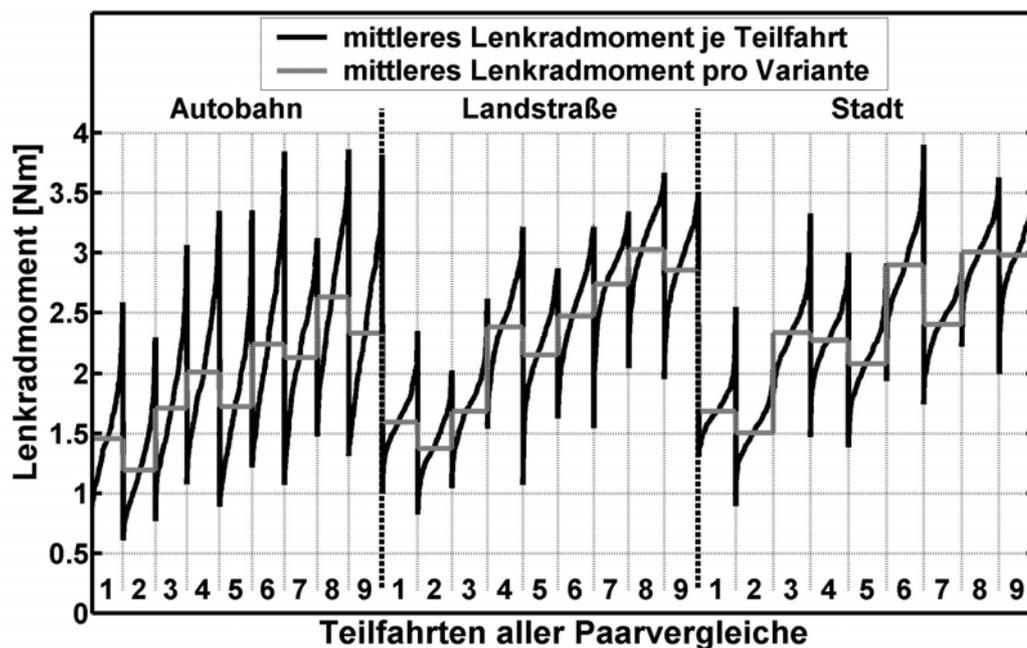


Bild 3–8: Darstellung des arithmetischen Mittelwertes des Gesamtmoments sowohl für jede Teilfahrt als auch für jede Variante.

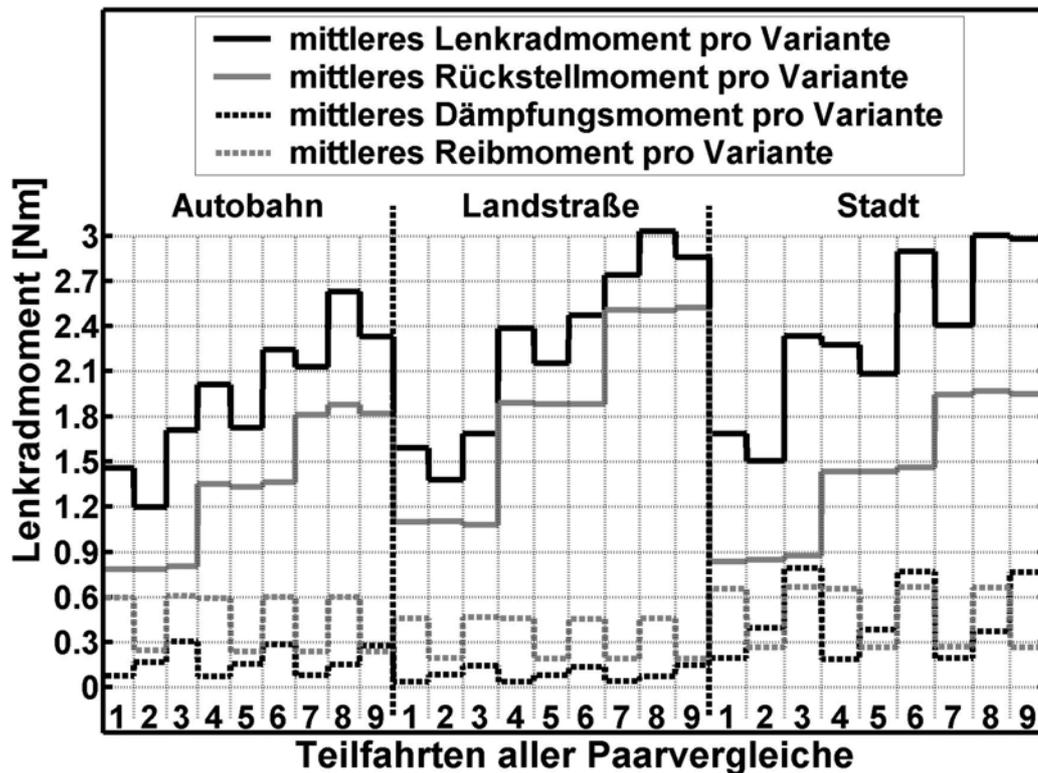


Bild 3–9: Darstellung des arithmetischen Mittelwertes des Gesamtmoments sowie der drei gemittelten Lenkradmomentanteile für jede Variante.

In **Bild 3–8** sind die Ausprägungen des Gesamtlenkradmoments dargestellt. Da sich das Gesamtmoment aus den zuvor beschriebenen drei Lenkradmomentanteilen additiv zusammensetzt, spiegeln sich hier die parcoursspezifischen Gewichtungen der drei Anteile wider. Auf dem Landstraßenparcours ist der Einfluss des Rückstellmoments am Gesamtmoment eindeutig zu erkennen. Auf dem Autobahnparcours spielt zusätzlich die Reibung einen erkennbaren Einfluss. Auf dem Stadtparcours ist neben dem Rückstellmomentanteil die Dominanz der Dämpfung zu erkennen. Die höchsten mittleren Lenkradmomente werden auf dem Landstraßenparcours, gefolgt vom Stadt- und Autobahnparcours erreicht. In **Bild 3–9** sind das mittlere Gesamtmoment und die drei gemittelten Lenkradmomentanteile zusammenfassend dargestellt.

3.1.2 Subjektivbeurteilungen

In **Tabelle 3–1** sind die Korrelationskoeffizienten der rel. Subjektivurteile aufgezeigt. Der Korrelationskoeffizient gibt somit Auskunft über die Ähnlichkeit der neun rel. Subjektivurteile zwischen zwei verschiedenen Beurteilungskriterien oder zwei verschiedenen Parcours. In der Literatur werden Korrelationskoeffizienten $|r| \geq 0,8$ mit einer sehr hohen Korrelation in Verbindung gebracht, so dass diese Werte in den nachfolgenden Tabellen fett gedruckt und grau hinterlegt sind.

Betrachtet man zunächst die Korrelationen innerhalb eines Parcours, so zeigt sich, dass eine hohe Übereinstimmung auf allen drei Parcours zwischen den rel. Subjektivurteilen der

„empfundene Sicherheit“ und der „allgemeinen Bevorzugung“ existiert ($r = 0,89$ bis $r = 0,97$). Ebenfalls ist, wenn auch etwas geringer, eine hohe Korrelation zwischen den rel. Subjektivurteilen des „empfundene Komforts“ und der „allgemeinen Bevorzugung“ zu erkennen ($r = 0,82$ bis $r = 0,92$).

Tabelle 3–1: Korrelationskoeffizienten der Verteilungen der rel. Subjektivurteile der vier Beurteilungskriterien auf den drei Parcours (Korrelationskoeffizienten $|r| \geq 0,8$: fett gedruckt und grau hinterlegt).

	Autobahn				Landstraße				Stadt			
	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung
Autobahn	Komfort											
	Sportlichkeit	0,63										
	Sicherheit	0,86	0,54									
	Bevorzugung	0,92	0,63	0,96								
Landstraße	Komfort	0,48	-0,29	0,36	0,32							
	Sportlichkeit	0,58	-0,01	0,27	0,27	0,80						
	Sicherheit	0,70	0,09	0,84	0,75	0,76	0,49					
	Bevorzugung	0,71	-0,01	0,75	0,68	0,86	0,64	0,97				
Stadt	Komfort	0,48	0,47	0,36	0,41	-0,13	0,24	0,04	0,06			
	Sportlichkeit	0,73	0,60	0,71	0,73	0,06	0,28	0,41	0,39	0,89		
	Sicherheit	0,88	0,60	0,95	0,90	0,39	0,40	0,80	0,73	0,50	0,80	
	Bevorzugung	0,80	0,67	0,81	0,81	0,11	0,31	0,51	0,47	0,82	0,97	0,89

Bei der Überprüfung der Korrelationen zwischen den Parcours ist eine hohe Übereinstimmung der „empfundene Sicherheit“ auf allen drei Parcours festzustellen. Auch kann eine hohe Korrelation der rel. Subjektivurteile des Kriteriums „allgemeine

Bevorzugung“ zwischen Autobahn- und Stadtparcours beobachtet werden. Der Landstraßenparcours zeigt hingegen mit keinem der beiden Parcours eine hohe Übereinstimmung. Die Kriterien „empfundener Komfort“ und „empfundene Sportlichkeit/Fahrspaß“ weisen nur geringe Korrelationskoeffizienten zwischen den drei Parcours auf.

In den folgenden Abschnitten werden die vier Beurteilungskriterien („empfundener Komfort“, „empfundene Sportlichkeit/Fahrspaß“, „empfundene Sicherheit“, „Allgemeine Bevorzugung“) im Hinblick auf die gefundenen Abhängigkeiten bei der Betrachtung der Korrelationskoeffizienten näher beleuchtet. Begonnen wird mit dem Kriterium „empfundene Sicherheit“.

Sicherheit

In **Bild 3–10** sind zunächst die relativen Subjektivurteile und die signifikanten Paarvergleiche auf dem Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$ dargestellt. Die Darstellungsweise ist entsprechend der Beschreibung in Kapitel 2.3.3 umgesetzt.

Auf dem Autobahnparcours ist eine Neigung der Fläche der rel. Subjektivurteile in Abhängigkeit des Rückstellmomentanteils zu beobachten. Je höher die Gewichtung des Rückstellmomentanteils, umso sicherer wird die Lenkradmomentvariante beurteilt. Auf dem Landstraßenparcours ist zusätzlich eine große Neigung der sich aus den rel. Subjektivurteilen ergebenden Fläche in Abhängigkeit der Reibmomentgewichtung zu erkennen. Auf dem Stadtparcours ist wiederum die Abhängigkeit der Flächenneigung vom Rückstellmomentanteil festzustellen.

Die beobachteten hohen Korrelationskoeffizienten der Beurteilungen der „empfundene Sicherheit“ zwischen den drei Parcours sind in der Darstellung der rel. Subjektivurteile eindeutig wieder zu erkennen.

In **Bild 3–11** sind die mittlere Fahrzeuggeschwindigkeit je Parcours, sowie das mittlere Lenkradmoment und das relative Subjektivurteil für das Kriterium „empfundene Sicherheit“ je Lenkradmomentvariante für alle drei Parcours dargestellt. Hierbei sind die Werte innerhalb eines Parcours nach aufsteigenden rel. Subjektivurteilen sortiert. Vergleicht man zunächst die Lenkradmomente mit den rel. Subjektivurteilen für jeden Parcours separat, so fällt auf, dass auf dem Autobahnparcours höhere Lenkradmomente – mit Ausnahme der Variante 7 – auch mit einer höher empfundenen Sicherheit einhergehen. Dieser Zusammenhang ist auf dem Landstraßen- oder Stadtparcours nicht zu erkennen. Dies lässt den Schluss zu, dass die Höhe des Lenkradmoments auf diesen beiden Parcours nicht allein entscheidend für die Ausprägung des Subjektivurteils „empfundene Sicherheit“ ist. Weiterhin ist beim Vergleich der bestbeurteilten Variante je Parcours festzustellen, dass das höchste mittlere

Lenkradmoment auf dem Stadtparcours, gefolgt vom Autobahn- und Landstraßenparcours erfahren wird.

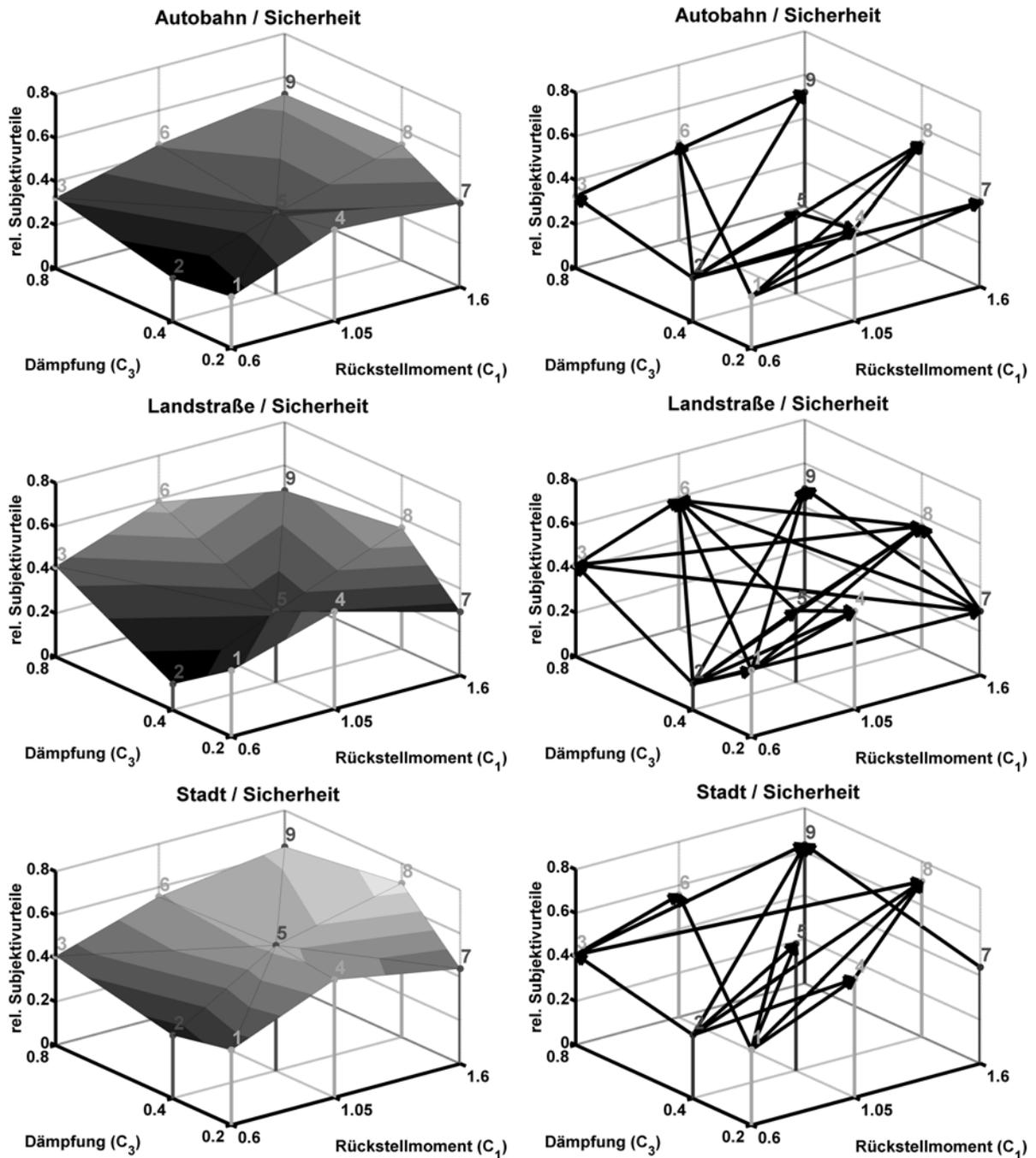


Bild 3–10: Vergleich der „empfundene Sicherheit“ des Gesamtkollektivs auf den drei unterschiedlichen Parcours (Signifikanzniveau, $\alpha = 0,01$).

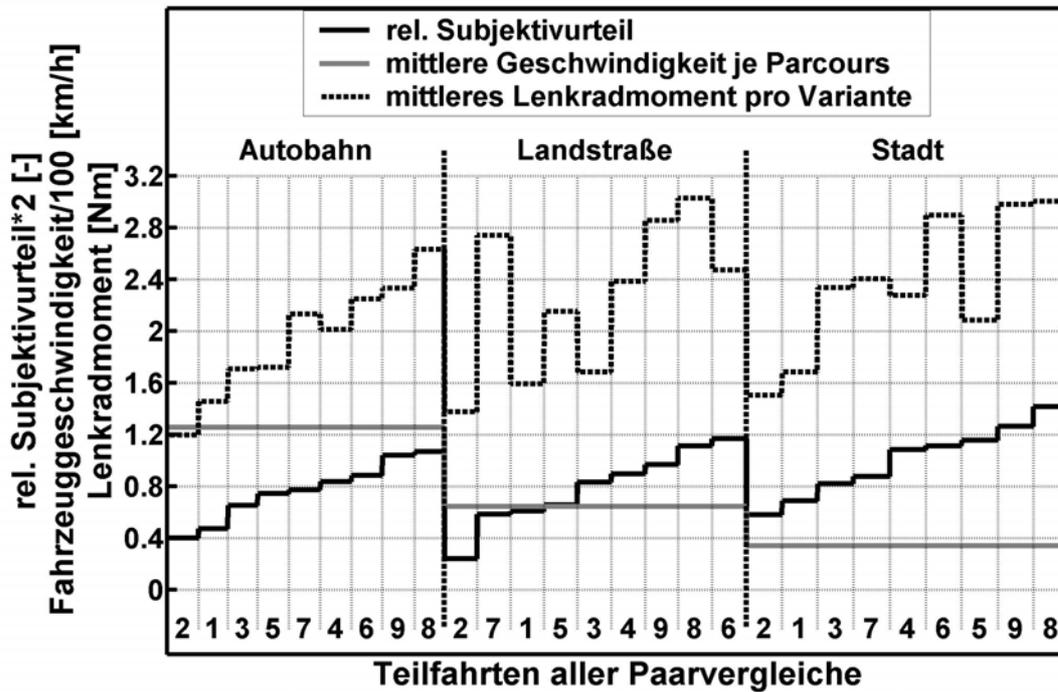


Bild 3–11: Darstellung des arithmetischen Mittelwertes der Fahrzeuggeschwindigkeit je Parcours, sowie des gemittelten Lenkradmoments und des rel. Subjektivurteils für das Kriterium „empfundene Sicherheit“ je Lenkradmomentvariante für alle drei Parcours.

Bei herkömmlichen geschwindigkeitsabhängigen Lenkkraftunterstützungssystemen wird das Lenkradmoment lediglich in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit und nicht auch weiterer fahrdynamischer Größen variiert. Somit würde sich im Mittel ein Lenkradmoment entsprechend dem gemittelten Geschwindigkeitsprofil des jeweiligen Parcours einstellen. Die Anpassung des Lenkradmoments an die Geschwindigkeit wird durch eine Variation der Hilfskraft erreicht (vergl. **Bild 1–6**). Bezogen auf das hier verwendete Lenkradmomentmodell spiegelt sich diese Variation maßgeblich in einem veränderten Rückstellmomentparameter (C_1) wider. In **Bild 3–12** ist der mittlere Rückstellmomentanteil des Lenkradmoments pro Variante und Parcours eingetragen. Auch in diesem Diagramm sind die Werte nach aufsteigendem rel. Subjektivurteil sortiert. Nun zeigt sich auf dem Stadtparcours – wie auch auf dem Autobahnparcours – eine bessere Beurteilung von Lenkradmomentvarianten mit höherem Rückstellmomentanteil. Die Variante 7 stellt wieder eine Ausnahme dar. Variante 7 besitzt zwar einen hohen Rückstellmomentgradient (C_1), aber einen geringen Dämpfungsmomentgradient (C_2) und einen geringen Reibmomentgradient (C_3). Sie besitzt also einen hohen konservativen Anteil und nur einen sehr geringen dissipativen Anteil (vergl. **Bild 3–9**). Weiterhin ist zu erkennen, dass die beiden als am sichersten beurteilten Varianten auf dem Stadt- und Autobahnparcours identisch sind (Varianten 8 und 9). Beide Varianten besitzen den gleichen Rückstellmomentgradient C_1 . Die sich bei diesen beiden Varianten

ergebenden Momente sind auf dem Stadtparcours geringfügig höher als auf dem Autobahnparcours. Der Rückstellmomentanteil der als am sichersten beurteilten Variante auf dem Landstraßenparcours (Variante 6) ist mit dem der bestbeurteilten Varianten auf den beiden anderen Parcours vergleichbar. Auf den Landstraßenparcours sind die auf dem Stadt- und Autobahnparcours gefundenen Zusammenhänge zwischen Rückstellmomentanteilen und rel. Subjektivurteilen nicht übertragbar. Auch eine Betrachtung der anderen beiden Lenkradmomentanteile auf dem Landstraßenparcours zeigt keine Abhängigkeit des rel. Subjektivurteils von nur einem Lenkradmomentanteil. Auch wenn die Flächengradienten und die signifikanten Paarvergleiche aus **Bild 3–10** eine Abhängigkeit vom Rückstellmomentanteil und dem Reibungsanteil nahe legen, kann kein direkter Zusammenhang zwischen den Subjektivurteilen und allein diesen beiden Lenkradmomentanteilen gefunden werden.

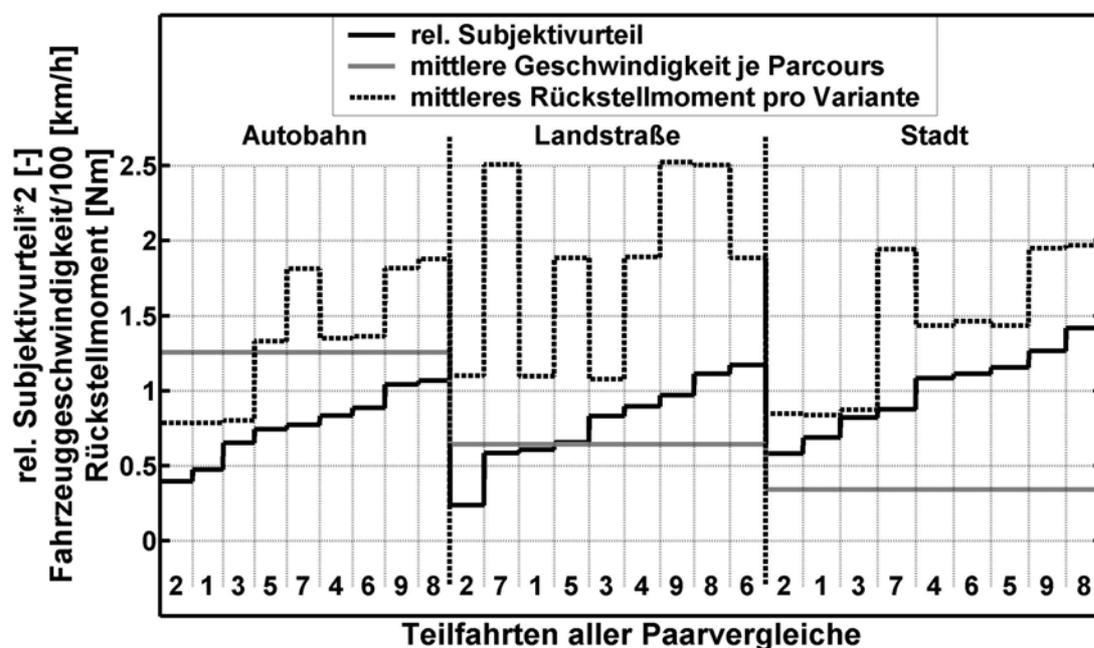


Bild 3–12: Darstellung des arithmetischen Mittelwertes der Fahrzeuggeschwindigkeit je Parcours, sowie des gemittelten Rückstellmomentanteils und des rel. Subjektivurteils für das Kriterium „empfundene Sicherheit“ je Lenkradmomentvariante für alle drei Parcours.

In **Bild 3–13** ist beispielhaft das Produkt aller drei Lenkradmomentanteile dargestellt. Durch Kombination der drei Anteile zu einem Kennwert lässt sich eine weitere Verbesserung herbeiführen. Die Ausnahme bildet hierbei die Lenkradmomentvariante 3, die im Gegensatz zur Variante 7 einen sehr hohen dissipativen Anteil und einen nur geringen konservativen Rückstellmomentanteil besitzt.

Die aufgeführten Darstellungen zwischen dem rel. Subjektivurteil und den Anteilen des Lenkradmoments zeigen auf, dass sich die Urteile der Probanden nicht nur auf einen einzigen Lenkradmomentanteil stützen, sondern die Kombination dieser drei Anteile je nach Fahrsituation bzw. Parcours das Urteil prägt.

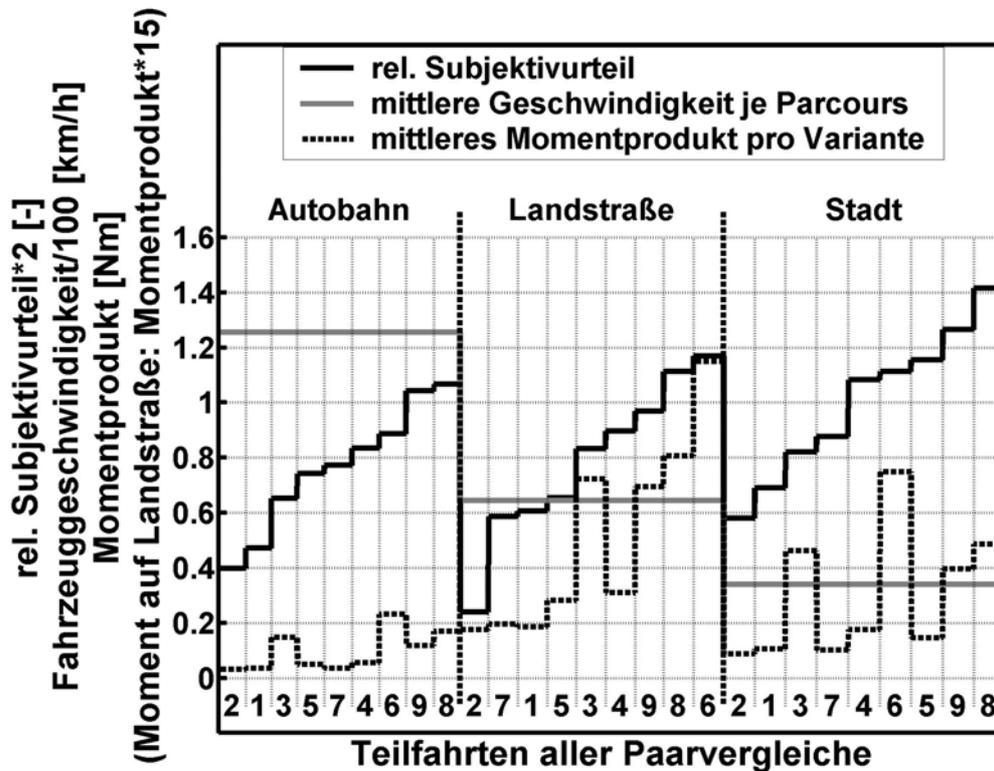


Bild 3–13: Darstellung des arithmetischen Mittelwertes der Fahrzeuggeschwindigkeit je Parcours, des Produktes aus gemitteltem Rückstellmomentanteil, gemitteltem Dämpfungsmomentanteil und gemitteltem Reibmomentanteil sowie des rel. Subjektivurteils für das Kriterium „empfundene Sicherheit“ je Lenkradmomentvariante für alle drei Parcours.

Bisher wurde lediglich das Kriterium „empfundene Sicherheit“ überprüft. Die übrigen drei Kriterien werden in den folgenden Abschnitten näher betrachtet.

Komfort

In **Bild 3–14** sind die rel. Subjektivurteile sowie die signifikanten Paarvergleiche bezüglich des Beurteilungskriteriums „empfundener Komfort“ dargestellt.

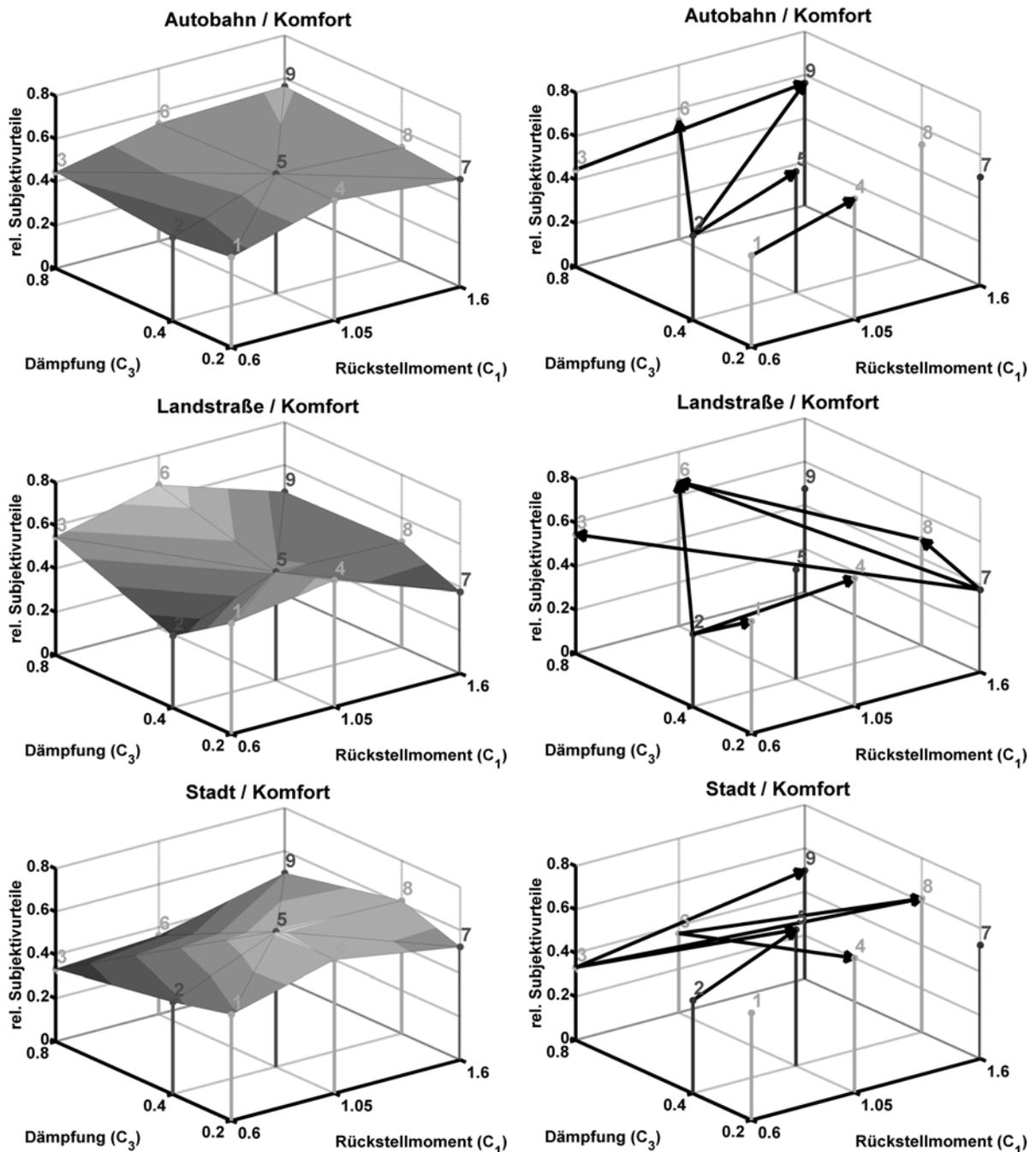


Bild 3–14: Vergleich des „empfundene Komfort des Gesamtkollektivs“ auf den drei unterschiedlichen Parcours (Signifikanzniveau, $\alpha = 0,01$).

Generell ist zu erkennen, dass für das Kriterium „empfundener Komfort“ weniger signifikante Paarvergleiche existieren, als dies bei der Beurteilung des Kriteriums „empfundene Sicherheit“ der Fall ist. Die Komfort- und die Sicherheitsbeurteilung auf dem Autobahn- und Landstraßenparcours ähneln sich stark. Für den Autobahnparcours ergibt sich ein Korrelationskoeffizient der beiden Verteilungen von $r = 0,86$, auf dem Landstraßenparcours von $r = 0,76$. Anhand des Flächengradienten der rel. Subjektivurteile auf dem Autobahn- und Landstraßenparcours ist zu erkennen, dass die Abhängigkeit zwischen Rückstellmomentgewichtung und rel. Subjektivurteil weniger stark ausgeprägt ist, als dies bei

der Beurteilung der „empfundene Sicherheit“ zu erkennen ist. Die Lenkradmomentvarianten mit mittlerer Gewichtung des Rückstellmomentanteils (4, 5, 6) werden nun tendenziell höher bewertet als die Varianten mit hohem Rückstellmomentanteil (7, 8, 9). Dieser Zusammenhang ist in **Bild 3–15** anschaulich dargestellt.

Bei dem Vergleich der beiden Beurteilungen auf dem Stadtparcours zeigen die Flächengradienten größere Unterschiede ($r = 0,50$). Insbesondere die Abhängigkeit der Beurteilung von der Gewichtung des Dämpfungsanteils weist bei den beiden Kriterien „empfundener Komfort“ und „empfundene Sicherheit“ eine gegensätzliche Tendenz auf (vergl. **Bild 3–10** und **Bild 3–14**). Hohe Dämpfungsanteile werden als unkomfortabel beurteilt. Auf dem Stadtparcours sind die Rückstellmomente in ähnlicher Größenordnung vertreten wie auf den beiden anderen Parcours. Die Dämpfungsmomente sind jedoch um etwa den Faktor drei höher (vergl. **Bild 3–9**). Dieses Verhältnis der beiden Lenkradmomentanteile führt zu einer langsameren, selbsttätigen Rückstellung der Lenkung in die Mittenposition.

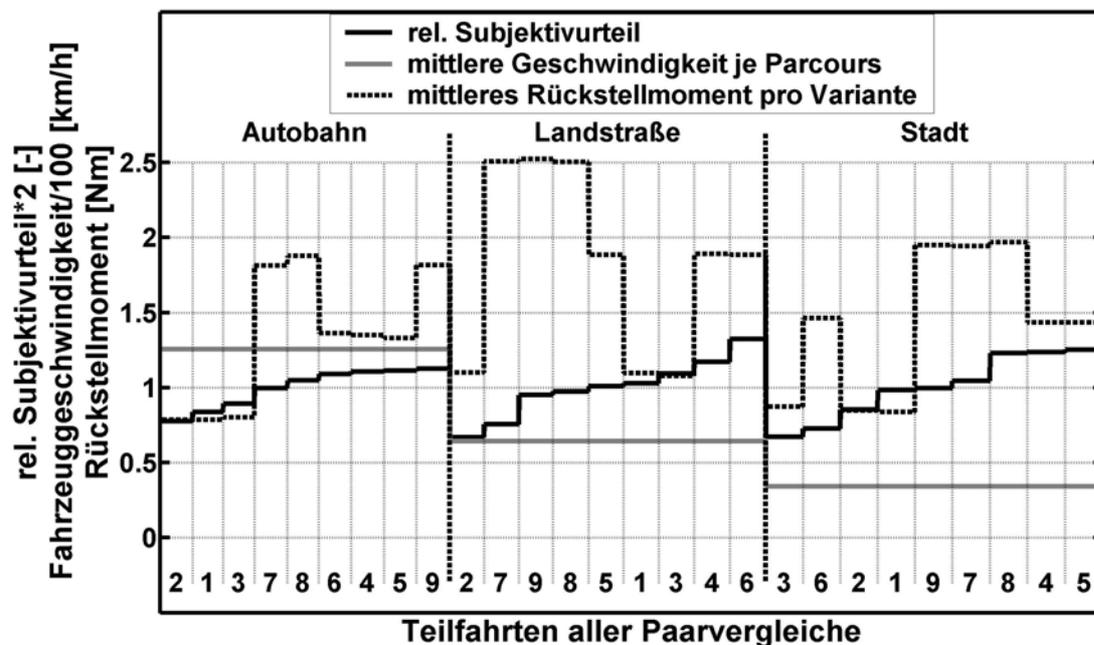


Bild 3–15: Darstellung des arithmetischen Mittelwertes der Fahrzeuggeschwindigkeit je Parcours, sowie des gemittelten Rückstellmomentanteils und des rel. Subjektivurteils für das Kriterium „empfundener Komfort“ je Lenkradmomentvariante für alle drei Parcours.

Sportlichkeit/Fahrspaß

Für den empfundenen Fahrspaß bzw. die empfundene Sportlichkeit lässt sich bezogen auf das Gesamtkollektiv keine Aussage über eine bevorzugte Lenkradmomentvariante machen. Diese

Aussage spiegeln auf eindeutige Weise die flachen Ebenen in **Bild 3–16** wider. Die Ursache dieser Beobachtung könnte z.B. in gegensätzlichen Beurteilungstendenzen von zwei Teilkollektiven begründet sein, die sich bei der Betrachtung des Gesamtkollektivs aufheben. Lediglich auf dem Stadtparcours zeigt sich eine leichte Tendenz hin zu höheren Rückstellmomenten und niedriger Dämpfung. Die gleichen Tendenzen wurden auch bereits bei der Beurteilung des Komforts auf dem Stadtparcours beobachtet. Der Korrelationskoeffizient der beiden Verteilungen der Sportbeurteilung und der Komfortbeurteilung auf dem Stadtparcours beträgt $r = 0,89$.

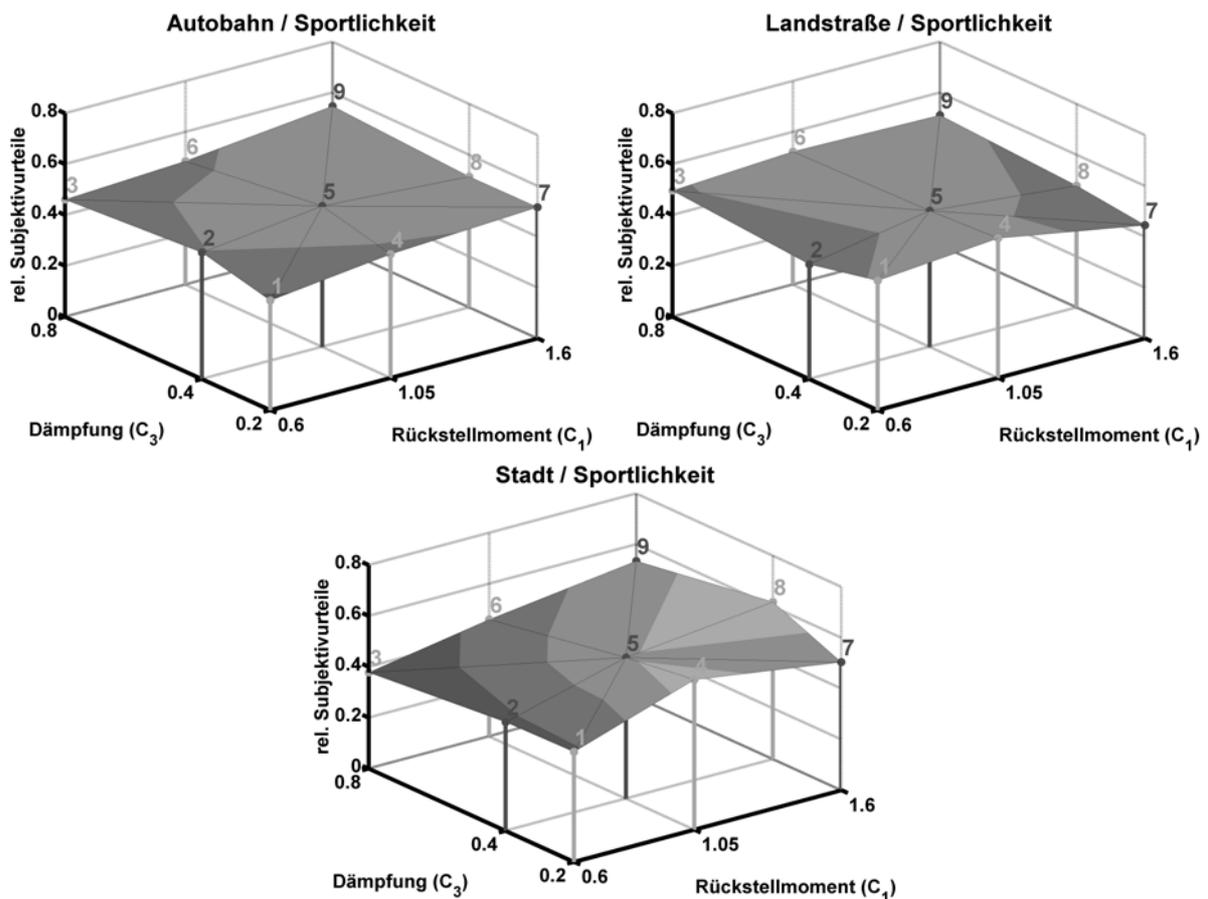


Bild 3–16: Vergleich des „empfundene Fahrspaß/Sportlichkeit“ des Gesamtkollektivs auf den drei unterschiedlichen Parcours (Signifikanzniveau, $\alpha = 0,01$).

Bevorzugung

Betrachtet man die Korrelationskoeffizienten der Beurteilung der „allgemeinen Bevorzugung“ und die der anderen drei Kriterien (**Tabelle 3–1**), so erkennt man, dass sie denen der „empfundene Sicherheit“ (vergl. **Bild 3–10** und **Bild 3–17**) auf allen drei Parcours am stärksten ähneln. Dies könnte den Schluss zulassen, dass in dem integralen Kriterium „allgemeine Bevorzugung“ die empfundene Sicherheit eine dominierende Rolle spielt.

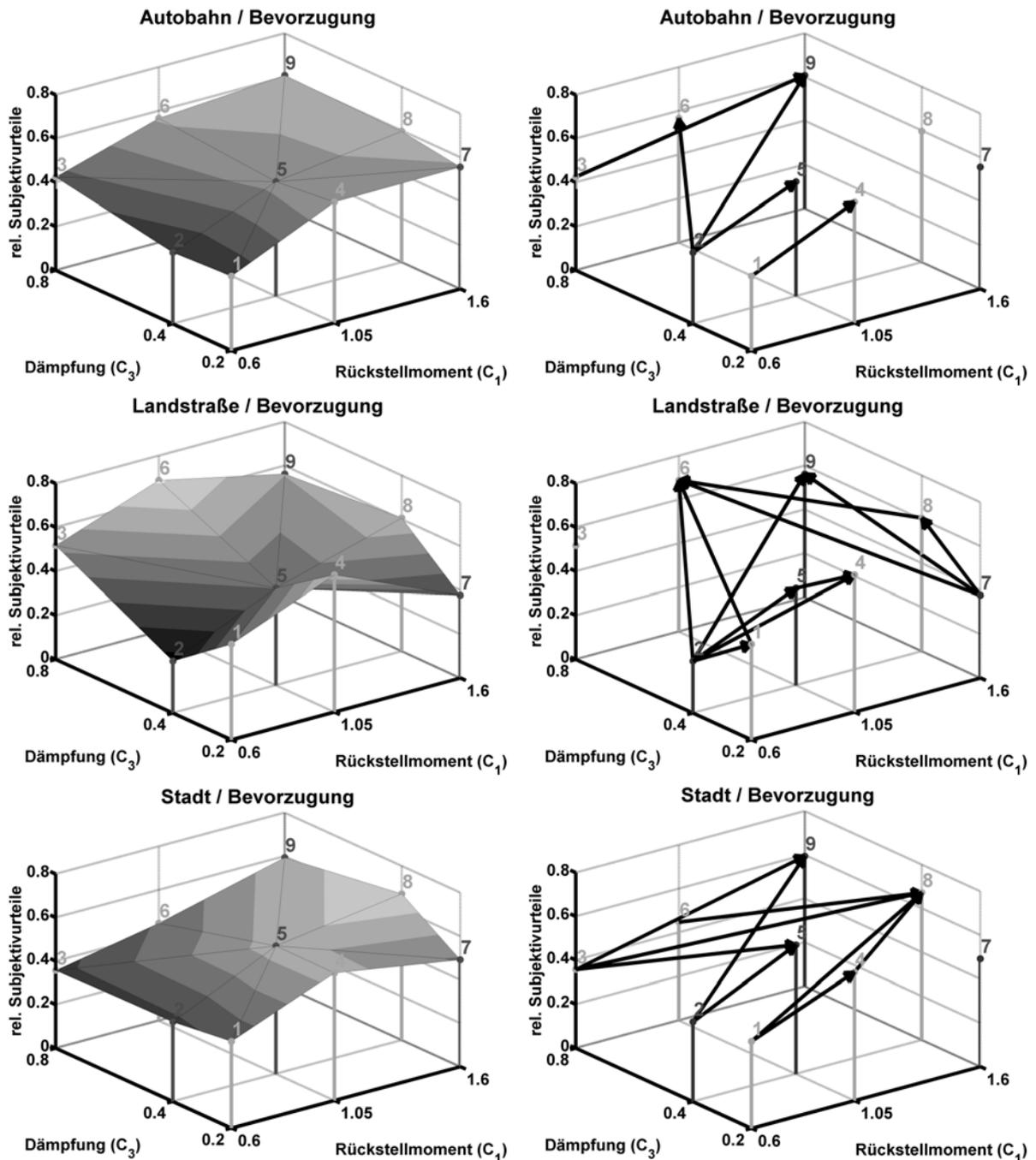


Bild 3–17: Vergleich der „allgemeinen Bevorzugung“ des Gesamtkollektivs auf den drei unterschiedlichen Parcours (Signifikanzniveau, $\alpha = 0,01$).

3.1.3 Fazit

Es wurde gezeigt, dass das Beurteilungskriterium „empfundene Sicherheit“ die meisten signifikanten Paarvergleiche auf dem Signifikanzniveau = 0,01 aufweist. Ebenso konnte gezeigt werden, dass eine sehr hohe Korrelation zwischen den Beurteilungskriterien „empfundene Sicherheit“ und „allgemeine Bevorzugung“ existiert. Dies lässt den Schluss zu, dass das integrale Kriterium „allgemeine Bevorzugung“ maßgeblich von der empfundenen Sicherheit abhängt.

Die drei Parcours konnten sowohl durch unterschiedliche mittlere Fahrzeuggeschwindigkeiten, als auch durch weitere fahrdynamische Daten eindeutig identifiziert werden. Bei der Beurteilung der „empfundene Sicherheit“ zeigte sich, dass sowohl auf dem Autobahn- als auch auf dem Stadtparcours die bestbeurteilten Varianten eine hohe Gewichtung der Rückstellmomente besaßen. Auf dem Landstraßenparcours besaß die bestbeurteilte Variante ein mittleres Rückstellmomentniveau. Somit besaß die bestbeurteilte Lenkradmomentvariante auf dem Landstraßenparcours im Vergleich zu den beiden anderen Parcours zwar identische Rückstellmomentanteile am Gesamtlennradmoment, jedoch eine unterschiedliche parcoursspezifische Gewichtung der Querbeschleunigung im Modell.

Bei der Beurteilung des „empfundene Komforts“ wurden im Vergleich zur „empfundene Sicherheit“ tendenziell niedrigere Rückstellmomente präferiert. Weiterhin zeigte sich insbesondere auf dem Stadtparcours, dass hohe Dämpfungsanteile als unkomfortabel erachtet werden. Für die Beurteilung der „empfundene Sportlichkeit“ konnte auf keinem der drei Parcours eine eindeutige Präferenz von Lenkradmomentanteilen festgestellt werden.

Aufgrund der gefundenen Ergebnisse kann die Hypothese H2

H2: Bei der Beurteilung von Lenkradmomentvarianten existiert eine Abhängigkeit von der gefahrenen Fahrzeuggeschwindigkeit. Mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit werden Varianten mit höherem Lenkradmoment bevorzugt.

eindeutig widerlegt werden.

Die gefundenen Ergebnisse können die von Bertollini et al. [17] und Green et al. [103] beschriebenen Zusammenhänge nicht bestätigen (vergl. **Bild 1–13**). Eine einfache geschwindigkeitsabhängige Lenkkraftunterstützung, wie sie auf dem Markt erhältlich ist, würde somit nicht die hier ermittelten Präferenzen der Probanden erfüllen können.

3.2 Fahrertypspezifische Lenkradmomentbeurteilung

Im den folgenden beiden Abschnitten werden die Subjektivbeurteilungen verschiedener Teilkollektive (gebildet nach den demografischen Faktoren: Lebensalter und Geschlecht) betrachtet. Die dabei erzielten Ergebnisse dienen zunächst der Beurteilung der Hypothesen

H3a: Bei der Beurteilung von Lenkradmomentvarianten treten keine Unterschiede in Abhängigkeit des Lebensalters des Fahrers auf.

und

H3b: Bei der Beurteilung von Lenkradmomentvarianten treten keine Unterschiede in Abhängigkeit des Geschlechts des Fahrers auf.

Ergebnisse zur Hypothese H3c

H3c: Es existieren fahrdynamische Größen, die eine Differenzierung innerhalb der Teilkollektive „Alter“ und „Geschlecht“ zulassen.

werden daran anschließend in Kapitel 3.2.3 dargestellt.

3.2.1 Beurteilung in Abhängigkeit des Fahreralters

Unter Berücksichtigung der Probandenanzahl wurden drei in etwa gleich große Altersgruppen gebildet:

- < 33 Jahre
- 33 Jahre bis 45 Jahre
- > 45 Jahre

Hierbei wurden die Altersgrenzen der Gruppen derart ausgewählt, dass zum einen die beiden Randgruppen weit genug auseinander liegen und zum andern die Gruppengröße hinsichtlich einer statistischen Auswertung als noch ausreichend angesehen werden kann [42] (ca. 20 Probanden bzw. 10 „Zwillingspärchen“ pro Altersklasse und Parcours – siehe 2.2.2). Zur Überprüfung der Hypothese H3a werden die beiden Gruppen, „< 33 Jahre“ und „> 45 Jahre“, herangezogen. Bei der Betrachtung der folgenden statistischen Ergebnisse ist zu beachten, dass es sich im Gegensatz zum vorigen Kapitel 3.1 lediglich um Teilkollektive von der Größe jeweils etwa eines Drittels des Gesamtkollektivs handelt.

Da eine unterschiedliche Beurteilung von Lenkradmomentvarianten nicht nur durch eine persönliche Präferenz, sondern auch durch eine differierende Fahrweise und somit ein unterschiedliches Erleben des Lenkradmoments zustande kommen könnte, werden zunächst die Differenzen des mittleren Lenkradmoments und der mittleren Lenkradmomentanteile der beiden Teilkollektive („< 33 Jahre“ – „> 45 Jahre“) in **Bild 3–18** dargestellt.

Weiterhin sind in **Bild 3–18** die Summen der Standardabweichungen der Verteilungen der beiden Teilkollektive aufgetragen. Generell ist zu erkennen, dass sich die Mittelwerte der beiden Teilkollektive nur gering unterscheiden. Die Summe der Standardabweichungen ist um mindestens den Faktor drei größer als die Differenz der Mittelwerte. Wird davon ausgegangen, dass die Verteilungen der beiden Teilkollektive vergleichbar sind, so ist diese Diskrepanz der beiden Werte (Differenz der Mittelwerte und Summe der Standardabweichungen) ein anschauliches Maß für die hohe Überlappung dieser beiden Verteilungen. Da die Differenz der Mittelwerte überwiegend positiv ist, zeigt dies, dass die Gruppe der unter 33-jährigen Probanden im Mittel höhere Lenkradmomente bzw. Lenkradmomentanteile erfuhr als die Gruppe der über 45-jährigen.

In **Tabelle 3–2** sind die statistischen Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests auf Basis der Mittelwerte der einzelnen Teilfahrten bezogen auf das Gesamtlenkradmoment dargestellt. Die Hypothese, dass die Verteilungen der beiden Teilkollektive nicht identisch sind, wurde auf den drei Signifikanzniveaus „ $\alpha = 0,05$ “, „ $\alpha = 0,01$ “ und „ $\alpha = 0,001$ “ überprüft. Es zeigt sich, dass diese Hypothese zweier identischer Verteilungen auf dem Landstraßen- und Stadtparcours nahezu in allen untersuchten Fällen verworfen werden muss. Auf dem Autobahnparcours trifft dies in der Mehrzahl der Fälle jedoch nicht zu.

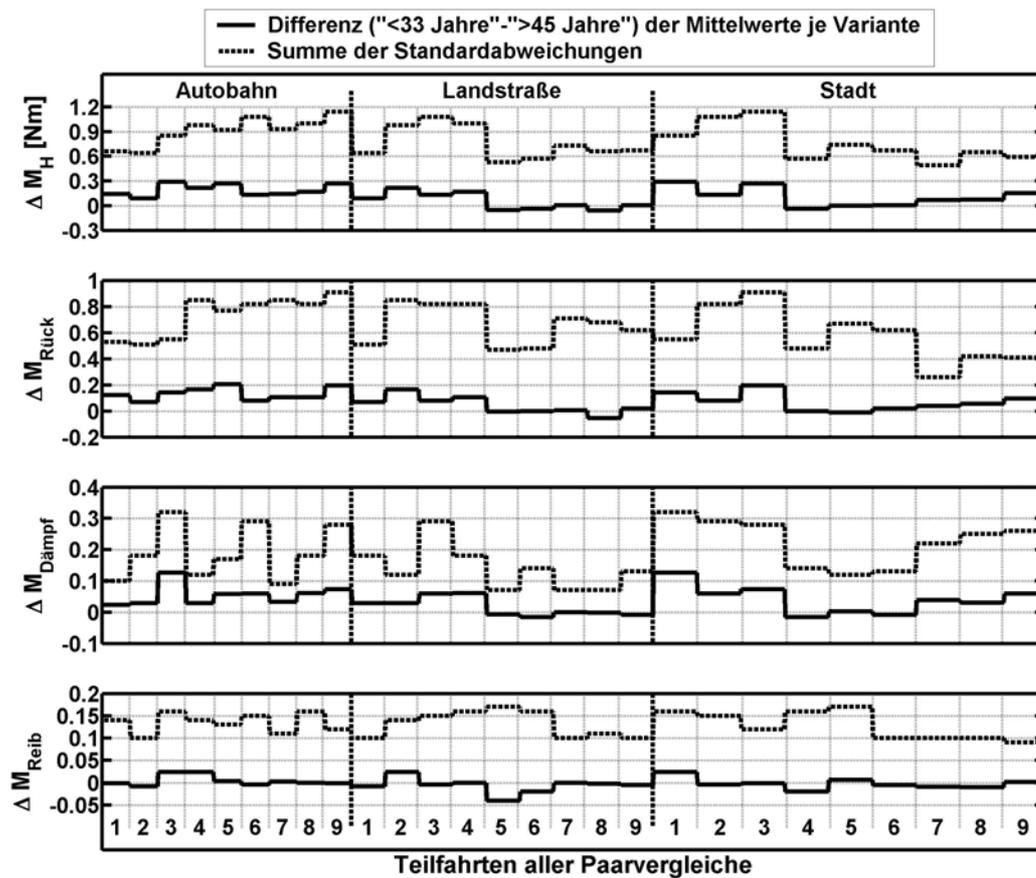


Bild 3–18: Darstellung der Differenz der arithmetischen Mittelwerte der Lenkradmomente bzw. Momentanteile der beiden Teilkollektive „< 33 Jahre“ und „> 45 Jahre“, sowie der Summe der Standardabweichungen der beiden Teilkollektive für jede Variante.

Auch wenn sich die Verteilungen signifikant unterscheiden, so erkennt man bei Betrachtung der Differenzen der Mittelwerte des Lenkradmoments (max. 0,29 Nm), dass sich diese Werte unterhalb der aus der Literatur bekannten Differenzschwellen (min. 0,33 Nm) befinden (vergl. auch **Bild 1–10**). Die von den beiden Teilkollektiven erfahrenen unterschiedlichen Lenkradmomente dürften somit keinen Einfluss auf ein verändertes Lenkgefühl haben.

Tabelle 3–2: Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests auf die Gleichheit der Verteilungen des Gesamtmoments der beiden Teilkollektive „< 33 Jahre“ und „> 45 Jahre“.

Parcours	Autobahn									Landstraße									Stadt													
	Variante	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9				
Signifikanzniveau α		> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,05	> 0,001	> 0,05	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	> 0,05	> 0,001	> 0,001	> 0,001	> 0,001	> 0,05	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

In **Tabelle 3–3** sind die Korrelationskoeffizienten der rel. Subjekturteile der beiden Teilkollektive für jeden der drei Parcours gegenübergestellt. Die Korrelationskoeffizienten der Beurteilungskriterien innerhalb der Teilkollektive befinden sich im Anhang.

Um Unterschiede zwischen den beiden Teilkollektiven feststellen zu können, ist die Betrachtung der Korrelationen des gleichen Kriteriums innerhalb eines Parcours (Winkelhalbierende) notwendig. Hierbei fällt auf, dass die Beurteilungen der „empfundene Sicherheit“ auf dem Autobahn- und Landstraßenparcours eine hohe Übereinstimmung aufweisen, auf dem Stadtparcours ist dies hingegen nicht der Fall. Auch fällt bei der Betrachtung der Winkelhalbierenden der negative Korrelationskoeffizient bei der Beurteilung des „empfundene Komforts“ auf dem Autobahnparcours auf.

Es ist festzustellen, dass sowohl auf dem Autobahn- als auch auf dem Stadtparcours die Beurteilung des „empfundene Komforts“ der Gruppe der Probanden der unter 33-jährigen eine hohe Übereinstimmung mit der Beurteilung der „empfundene Sicherheit“ der Gruppe der Probanden der über 45-jährigen aufweist.

Im Folgenden sollen die berechneten Korrelationskoeffizienten durch die aus vorigen Kapiteln bekannten dreidimensionalen Darstellungen der rel. Subjekturteile visualisiert werden. Hierbei werden insbesondere die eben erörterten Zusammenhänge näher betrachtet.

Tabelle 3–3: Gegenüberstellung der Korrelationskoeffizienten der Verteilungen der rel. Subjektivurteile der vier Beurteilungskriterien auf den drei Parcours der beiden Teilkollektive „< 33 Jahre“ und „> 45 Jahre“ (Korrelationskoeffizienten $|r| \geq 0,8$: fett gedruckt und grau hinterlegt).

		> 45 Jahre				Autobahn				Landstraße				Stadt			
< 33 Jahre		Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung
	Autobahn	Komfort	-0,33	0,26	-0,24	-0,19	-0,11	0,06	-0,32	-0,18	0,04	0,04	-0,16	-0,05	0,04	0,04	-0,16
Sportlichkeit		0,48	0,63	0,49	0,55	-0,11	0,15	0,09	-0,06	0,37	0,21	0,38	0,43	0,37	0,21	0,38	0,43
Sicherheit		0,94	0,48	0,94	0,95	0,50	0,46	0,74	0,56	0,75	0,72	0,83	0,83	0,75	0,72	0,83	0,83
Bevorzugung		0,63	0,66	0,68	0,74	0,02	0,11	0,22	0,03	0,61	0,46	0,50	0,62	0,61	0,46	0,50	0,62
Landstraße	Komfort	-0,29	-0,20	-0,26	-0,23	0,49	0,61	0,19	0,42	-0,20	-0,02	-0,08	-0,11	-0,20	-0,02	-0,08	-0,11
	Sportlichkeit	0,34	0,31	0,41	0,45	0,01	0,04	0,11	0,01	0,61	0,57	0,44	0,58	0,61	0,57	0,44	0,58
	Sicherheit	0,89	0,12	0,88	0,85	0,70	0,57	0,92	0,78	0,73	0,79	0,88	0,83	0,73	0,79	0,88	0,83
	Bevorzugung	0,86	0,26	0,87	0,86	0,74	0,64	0,87	0,78	0,72	0,80	0,81	0,81	0,72	0,80	0,81	0,81
Stadt	Komfort	-0,04	0,24	0,09	0,08	-0,27	-0,34	-0,34	-0,32	0,33	0,05	-0,14	0,08	0,33	0,05	-0,14	0,08
	Sportlichkeit	0,23	0,56	0,34	0,36	-0,09	-0,12	-0,14	-0,15	0,34	0,06	-0,05	0,14	0,34	0,06	-0,05	0,14
	Sicherheit	0,80	0,56	0,86	0,86	0,24	0,15	0,46	0,29	0,91	0,78	0,71	0,82	0,91	0,78	0,71	0,82
	Bevorzugung	0,35	0,54	0,46	0,45	-0,12	-0,15	-0,06	-0,12	0,59	0,34	0,20	0,38	0,59	0,34	0,20	0,38

Sicherheit

In **Bild 3–19** sind die rel. Subjektivurteile bezüglich des Beurteilungskriteriums „empfundene Sicherheit“ der beiden Teilkollektive für alle drei Parcours gegenübergestellt.

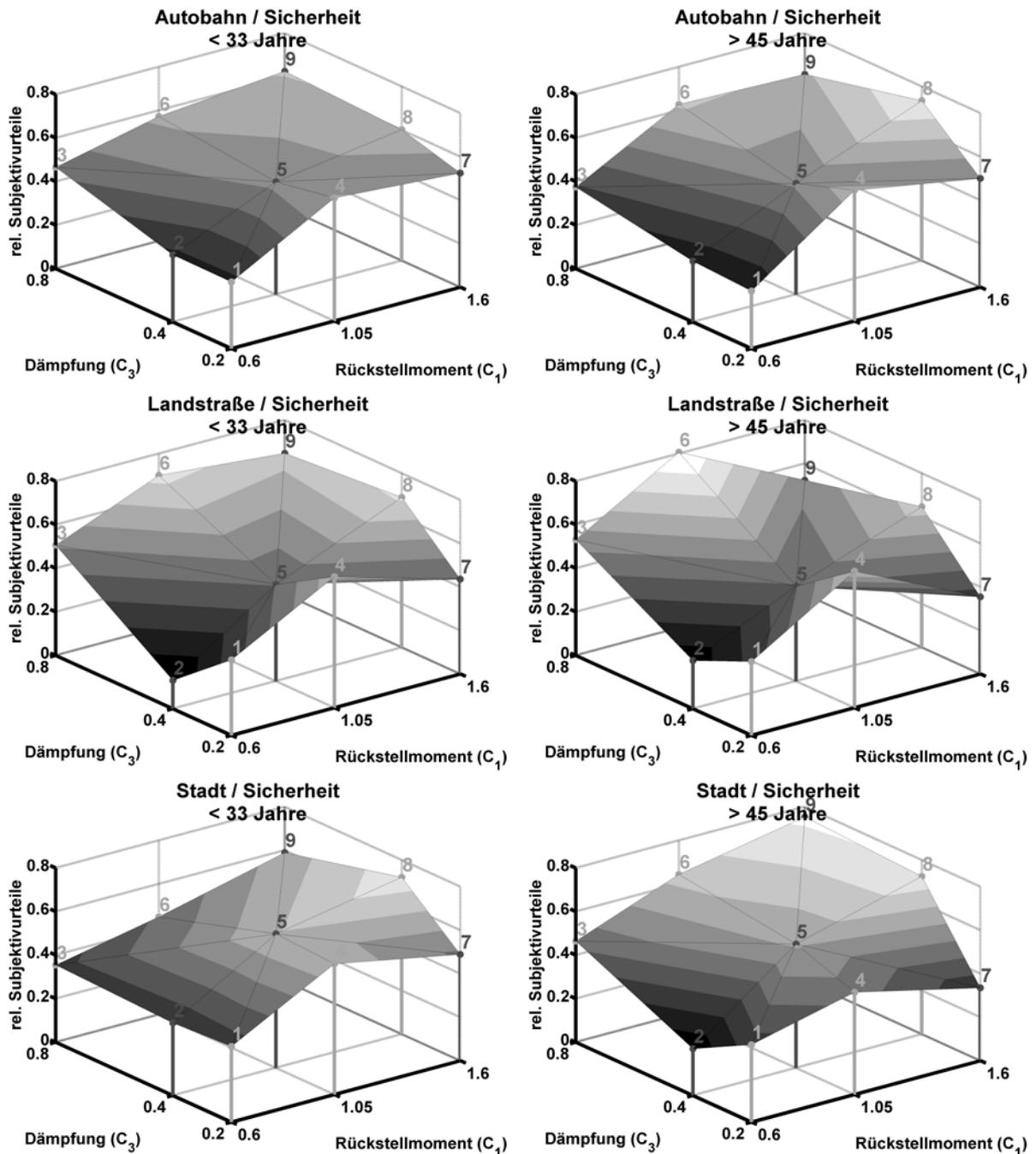


Bild 3–19: Vergleich der rel. Subjektivurteile des Kriteriums „empfundene Sicherheit“ zwischen jüngeren (< 33 Jahre) und älteren (> 45 Jahre) Probanden auf allen drei Parcours.

Auf dem Autobahnparcours und insbesondere auf dem Landstraßenparcours bestätigt sich der gefundene hohe Korrelationskoeffizient in der Darstellung der rel. Subjektivurteile der beiden Teilkollektive. Es zeigt sich auf diesen beiden Parcours eine Tendenz zu Lenkmomentvarianten mit hohen Reibmomentanteilen.

Vergleicht man die rel. Subjektivurteile der beiden Teilkollektive auf dem Stadtparcours (**Bild 3–20**), so ist die Ursache für die geringere Korrelation der „empfundene Sicherheit“ auf

diesem Parcours zu erkennen: ältere Probanden zeigen eine Tendenz zu höheren Dämpfungen, jüngere Probanden zu niedrigeren Dämpfungen.

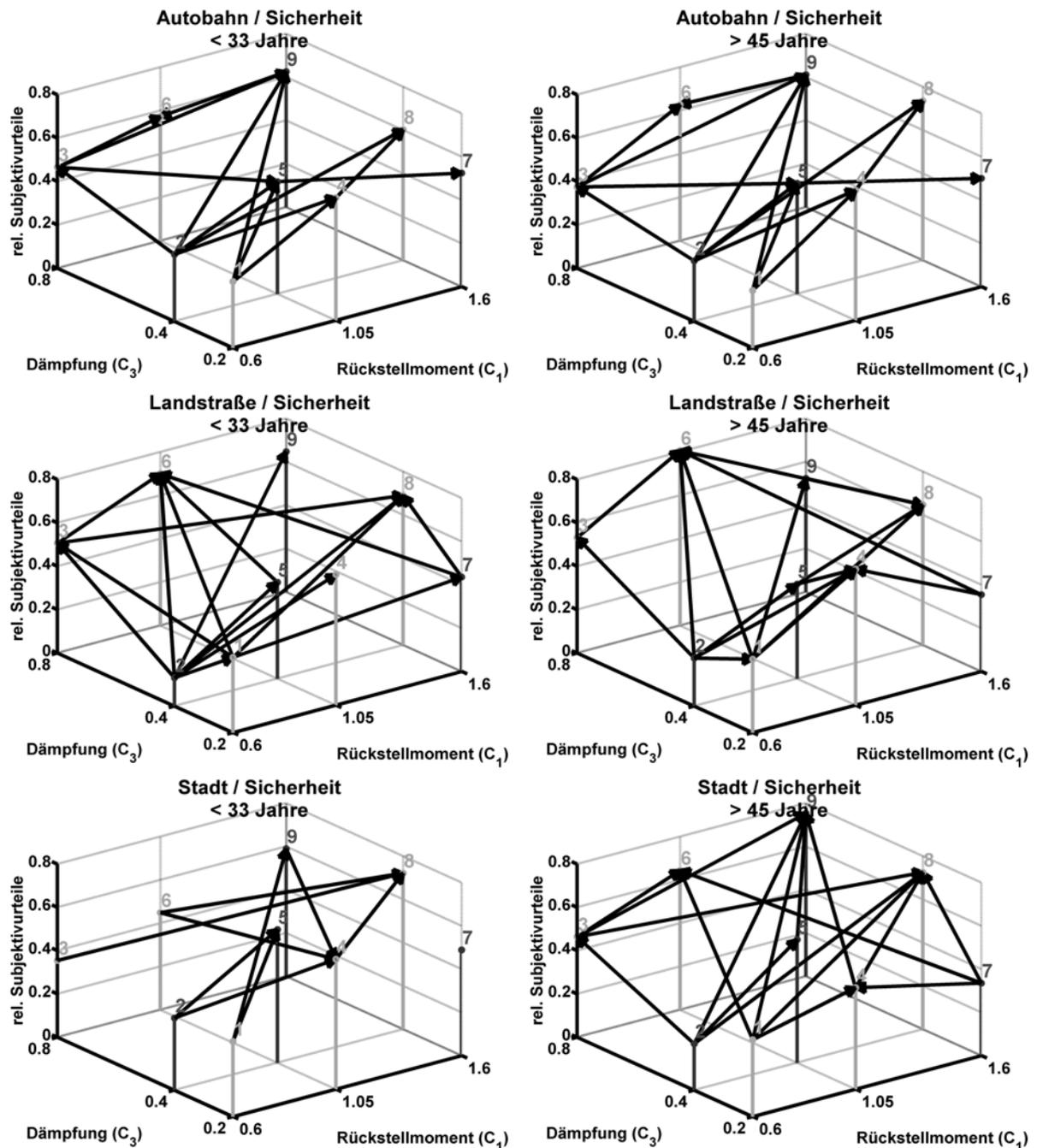


Bild 3–20: Vergleich der signifikanten Paarvergleiche ($\alpha = 0,05$) des Kriteriums „empfundene Sicherheit“ zwischen jüngeren (< 33 Jahre) und älteren (> 45 Jahre) Probanden auf allen drei Parcours.

Komfort

Bei der Betrachtung der Korrelationskoeffizienten wurde auf dem Autobahn- und dem Stadtparcours eine hohe Übereinstimmung der Beurteilung des „empfundene Komfort“ der Gruppe der Probanden der unter 33-jährigen und der Beurteilung der „empfundene Sicherheit“ der Gruppe der Probanden der über 45-jährigen festgestellt.

In **Bild 3–21** sind die rel. Subjektivurteile gegenübergestellt. Auch wenn die hohe Übereinstimmung der Flächencharakteristika ersichtlich ist, so ergeben sich durch die geringen Flächengradienten nur wenige signifikante Paarvergleiche auf dem überprüften Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$.

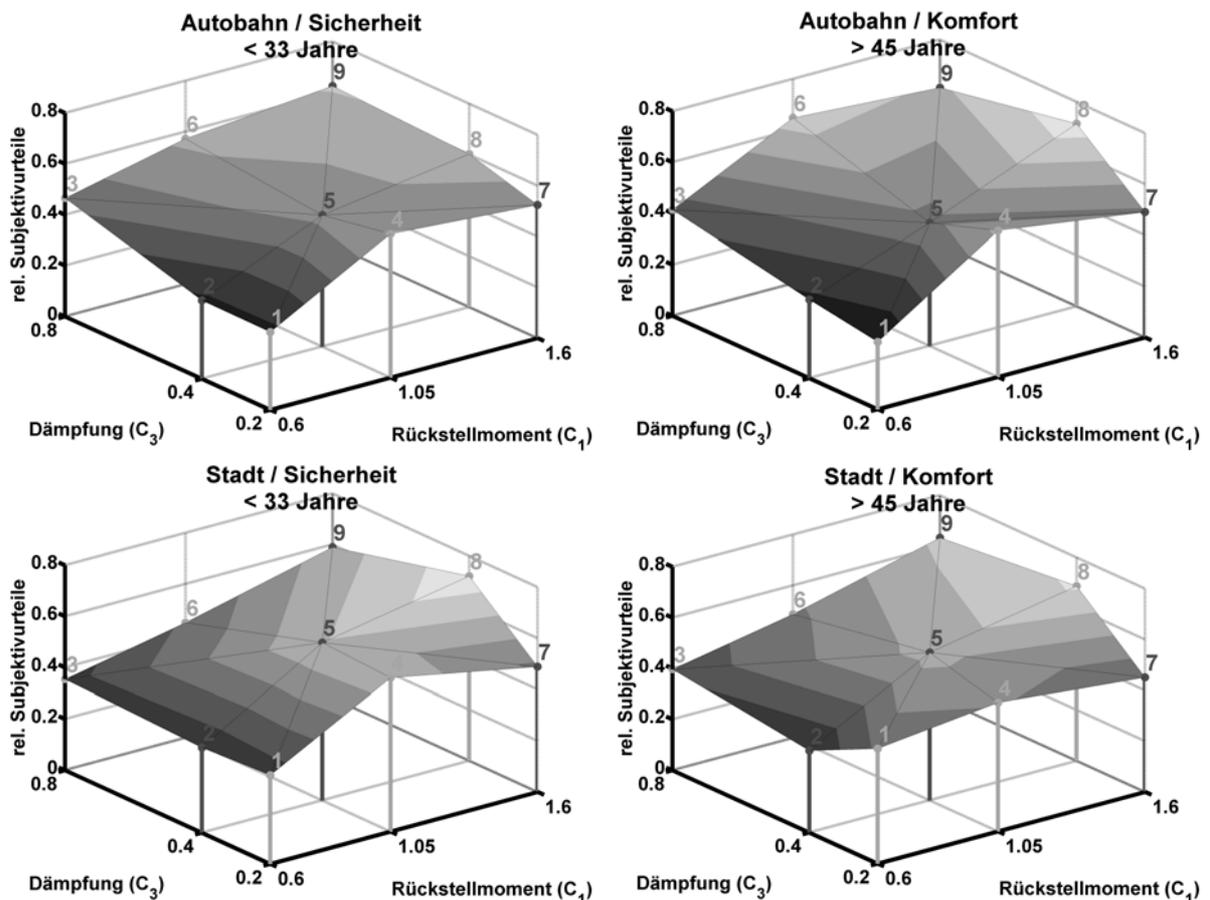


Bild 3–21: Vergleich der rel. Subjektivurteile des Kriteriums „empfundene Sicherheit“ des Teilkollektivs „< 33 Jahre“ und des Kriteriums „empfundener Komfort“ des Teilkollektivs „> 45 Jahre“ auf dem Autobahn- und Stadtparcours.

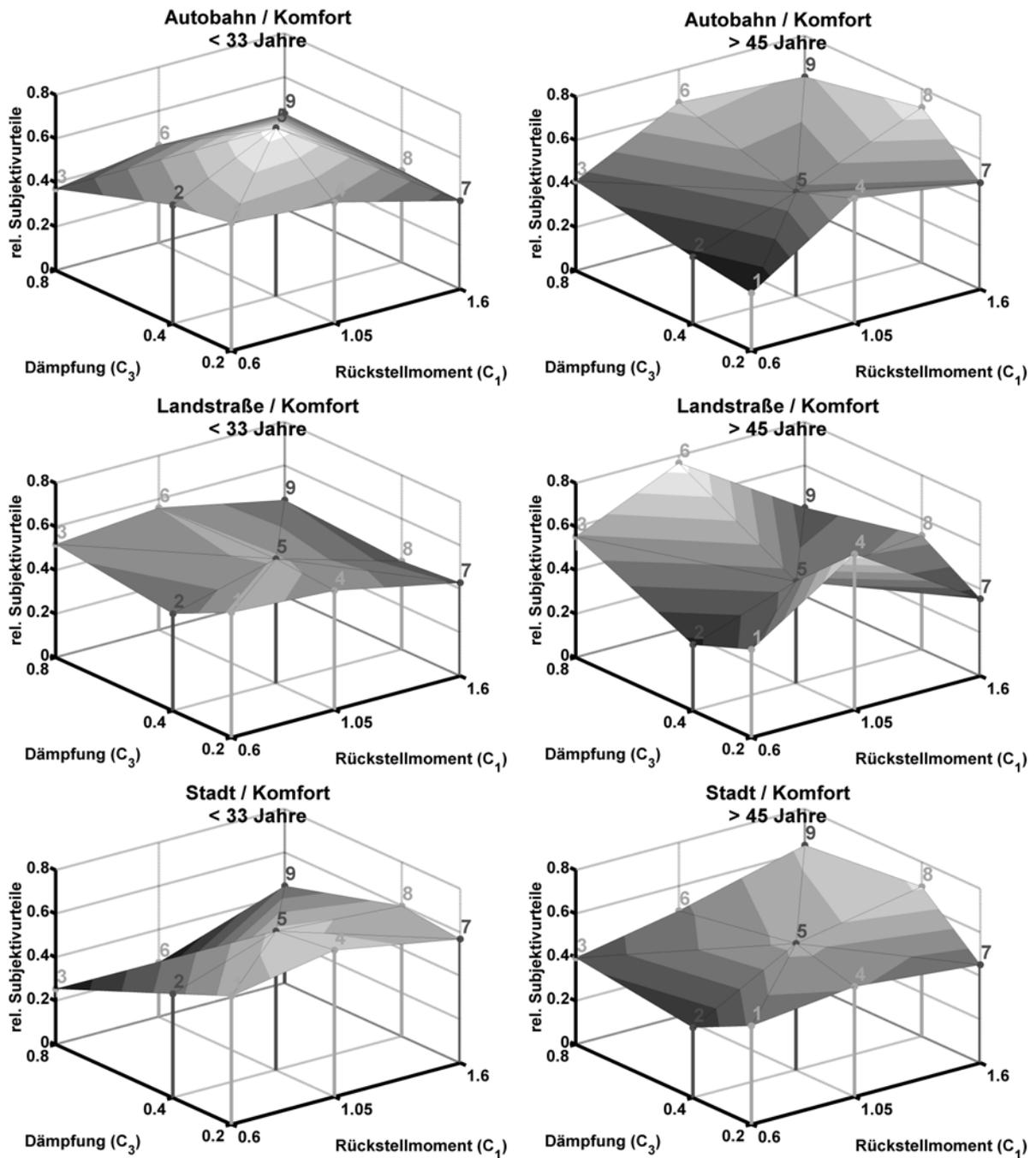


Bild 3–22: Vergleich der rel. Subjektivurteile des Kriteriums „empfundener Komfort“ zwischen jüngeren (< 33 Jahre) und älteren (> 45 Jahre) Probanden auf allen drei Parcours.

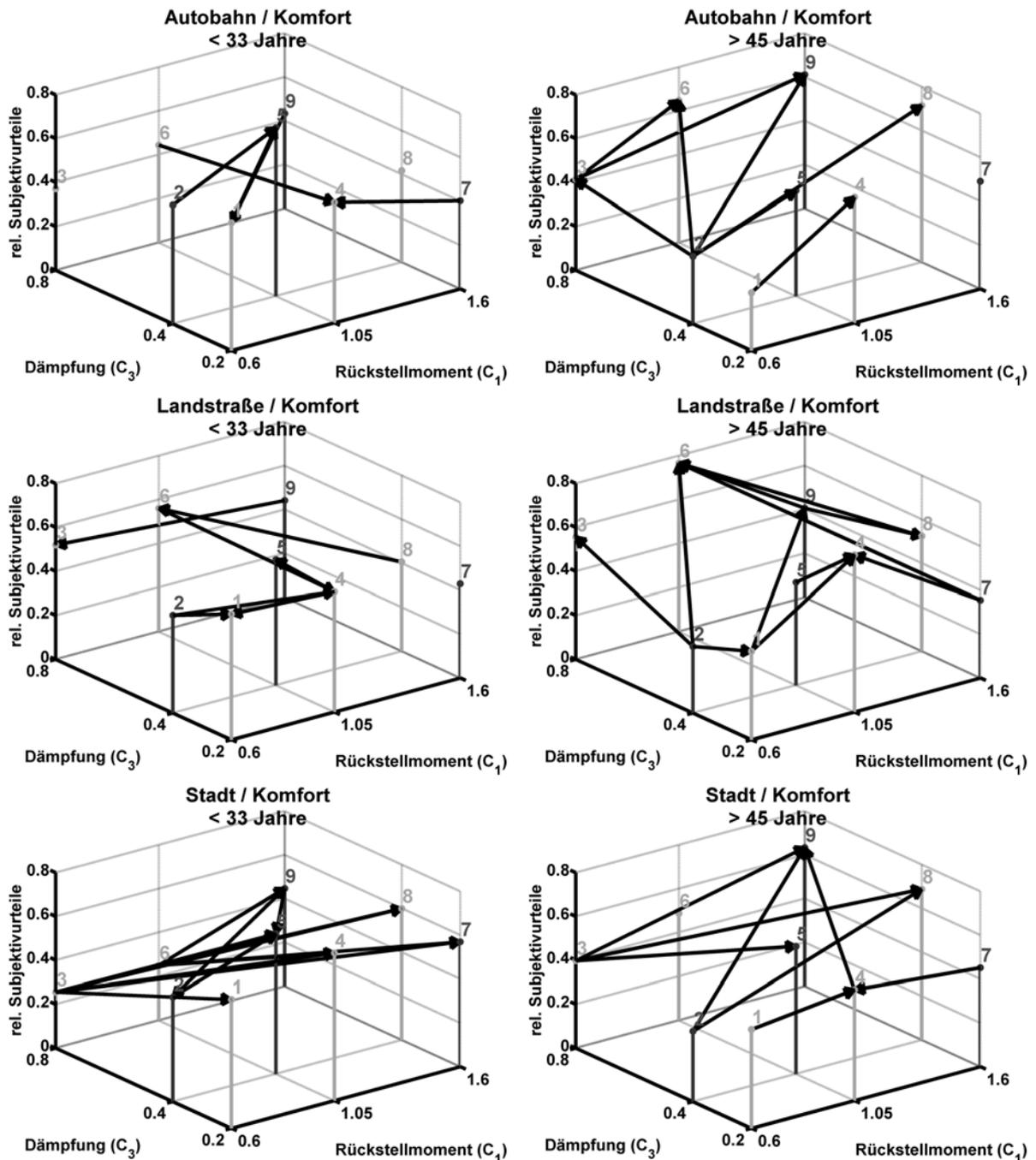


Bild 3–23: Vergleich der signifikanten Paarvergleiche ($\alpha = 0,05$) des Kriteriums „empfundener Komfort“ zwischen jüngeren (< 33 Jahre) und älteren (> 45 Jahre) Probanden auf allen drei Parcours.

Weiterhin wurde auf dem Autobahnparcours eine geringe negative Korrelation bei der Beurteilung des Kriteriums „empfundener Komfort“ beobachtet. **Bild 3–22** bestätigt dies optisch anhand der unterschiedlichen Flächengradienten. Die geringen Übereinstimmungen der Komfortbeurteilungen auf dem Landstraßen- und Stadtparcours sind ebenfalls zu erkennen.

Es zeigen sich auf allen drei Parcours Tendenzen der jüngeren Fahrer hin zu

Lenkradmomentanteilen mit geringem dissipativem Charakter, während die älteren Probanden eher zu hohen dissipativen Anteilen tendieren. Auf dem Autobahn- und Landstraßenparcours bestimmt der Reibungsanteil die Höhe des dissipativen Anteils maßgeblich; auf dem Stadtparcours drängt sich der Dämpfungsanteil in den Vordergrund (vergl. **Bild 3–9**).

In **Bild 3–23** sind die signifikanten Paarvergleiche für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% angegeben. Man erkennt, dass sich die gemachte Annahme bestätigt. Die Varianten mit hohem dissipativem Anteil am Gesamtmoment werden von der Gruppe der über 45-jährigen als komfortabel beurteilt, wohingegen die Gruppe der unter 33-jährigen diese eher als unkomfortabel bewertet.

Sportlichkeit/Fahrspaß

Wie bereits bei der Betrachtung des Gesamtkollektivs festgestellt, zeigen sich beim Beurteilungskriterium „empfundene Sportlichkeit/Fahrspaß“ nur marginale Gradienten der Flächen der rel. Subjektivurteile (**Bild 3–24**). Auch auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ ergeben sich für den Autobahn- und Landstraßenparcours keine signifikanten Paarvergleiche. Auf dem Stadtparcours zeigt die Gruppe der unter 33-jährigen eine geringe Tendenz zu Varianten mit niedrigem Dämpfungsanteil. Diese Tendenz lässt sich jedoch nicht durch signifikante Paarvergleiche auf dem untersuchten Niveau von $\alpha = 0,05$ bestätigen.

Die gemachte Annahme beim Gesamtkollektiv, dies könnte durch gegensätzliche Beurteilungen zweier Teilkollektive begründet sein, kann mit der Bildung von Teilkollektiven nach dem Kriterium „Alter“ nicht bestätigt werden.

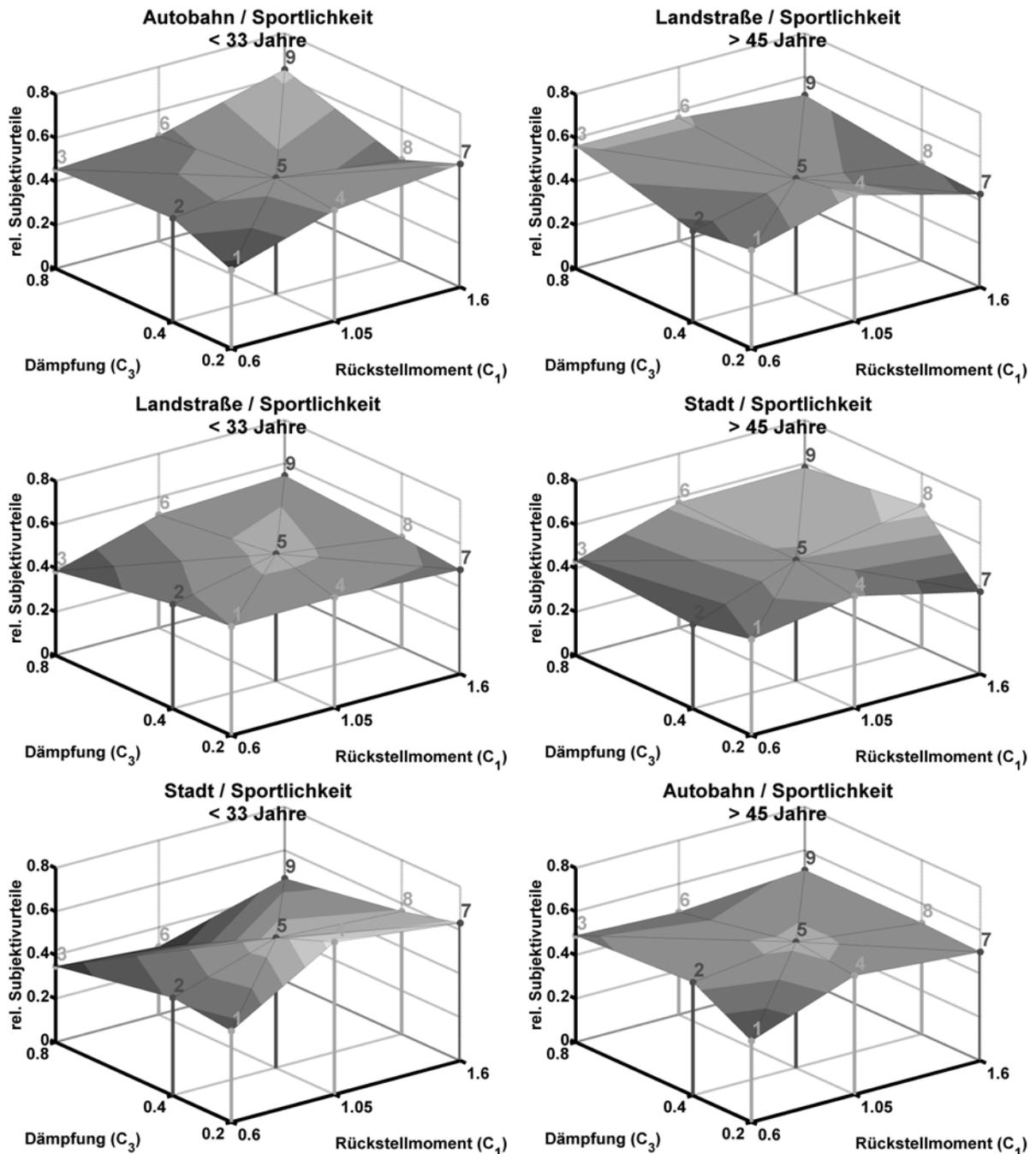


Bild 3–24: Vergleich der rel. Subjektivurteile des Kriteriums „empfundene Sportlichkeit/Fahrspaß“ zwischen jüngeren (< 33 Jahre) und älteren (> 45 Jahre) Probanden auf allen drei Parcours.

Bevorzugung

Die „allgemeine Bevorzugung“ zeigt als zusammenfassendes Kriterium folglich ebenfalls die bereits durchgehend gemachte Beobachtung auf dem Stadtparcours bezüglich der Dämpfung: jüngere Fahrer bevorzugen niedrige Dämpfung, ältere Fahrer bevorzugen hohe Dämpfung (**Bild 3–25**).

Zusätzlich ist auch auf dem Autobahn- und Landstraßenparcours eine eindeutige Tendenz der älteren Probanden hin zu Varianten mit hohem Reibmomentanteil festzustellen. Diese Varianten werden von der Gruppe der unter 33-jährigen weit weniger stark bevorzugt als dies bei der Gruppe der über 45-jährigen der Fall ist.

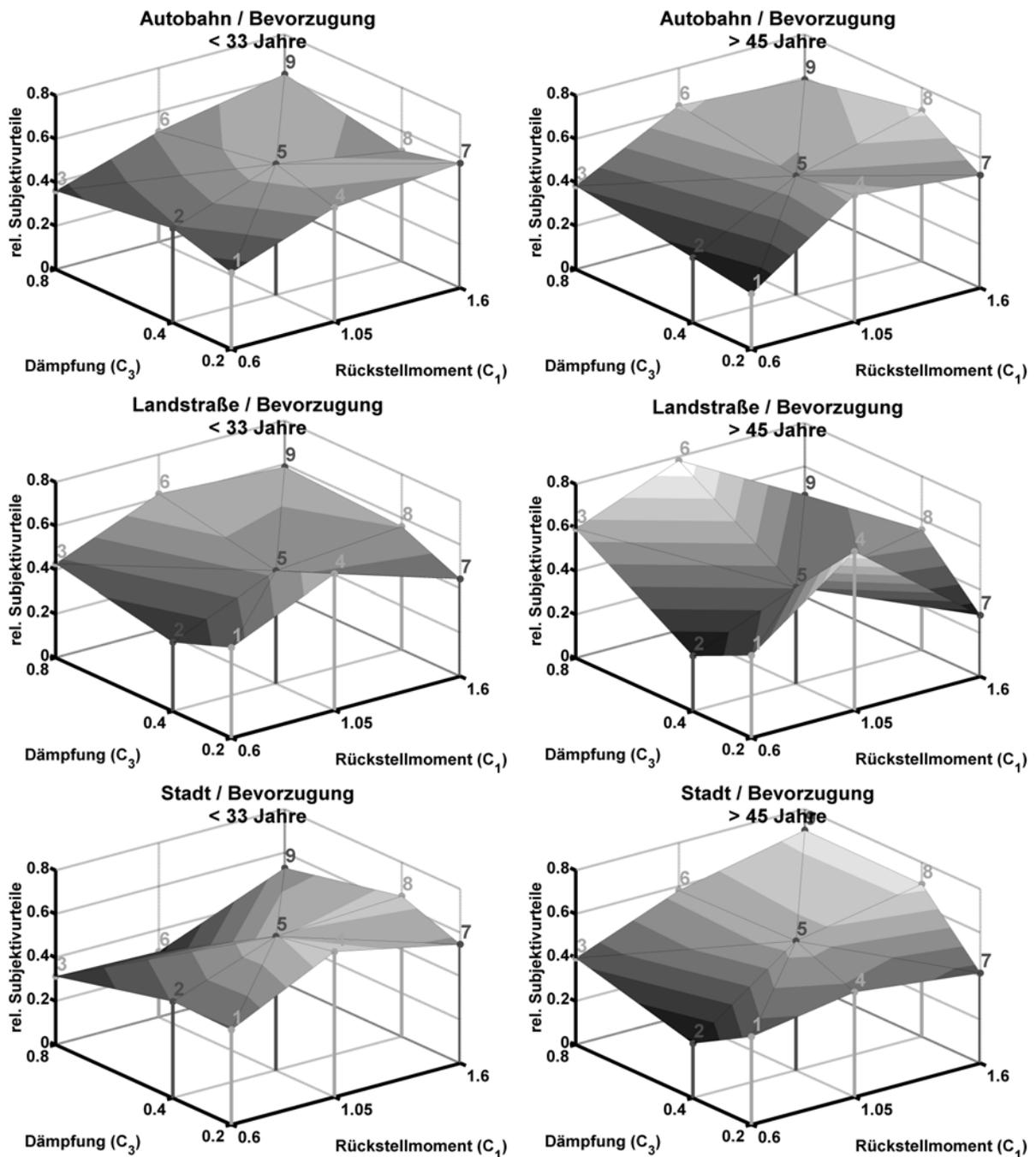


Bild 3–25: Vergleich der rel. Subjektivurteile des Kriteriums „allgemeine Bevorzugung“ zwischen jüngeren (< 33 Jahre) und älteren (> 45 Jahre) Probanden auf allen drei Parcours.

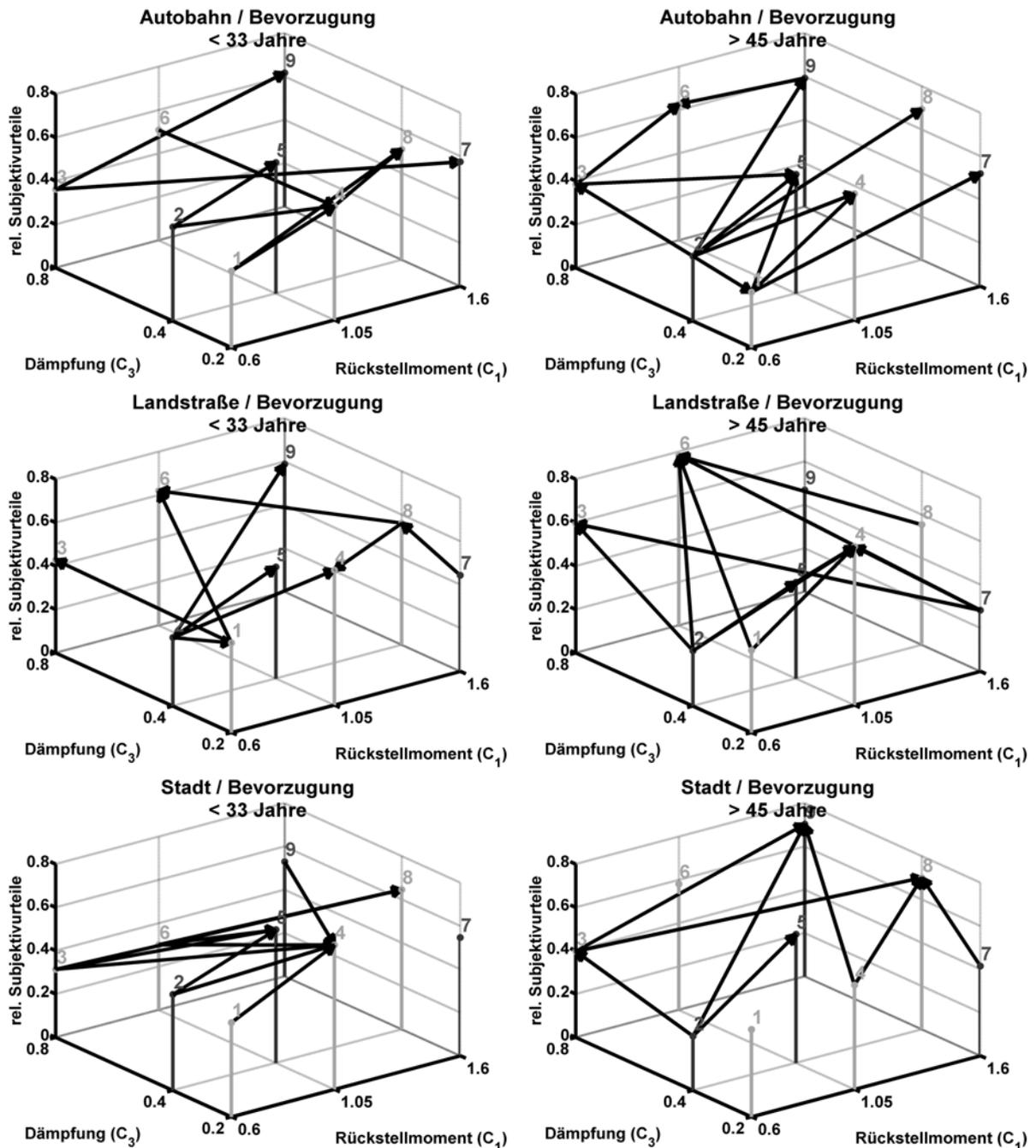


Bild 3–26: Vergleich der signifikanten Paarvergleiche ($\alpha = 0,05$) des Kriteriums „allgemeine Bevorzugung“ zwischen jüngeren (< 33 Jahre) und älteren (> 45 Jahre) Probanden auf allen drei Parcours.

Fazit

Es konnte gezeigt werden, dass sich eindeutige Unterschiede in der Beurteilung zwischen den beiden Teilkollektiven ergeben.

Dies betrifft insbesondere die Beurteilung der Sicherheit auf dem Stadtparcours sowie die Beurteilung des Komforts auf dem Autobahnparcours. In beiden Fällen zeigt sich bei der

Die nahezu ausschließlich positiven Mittelwertdifferenzen (**Bild 3–27**) zeigen, dass die männlichen Probanden im Mittel höhere Lenkradmomente bzw. Lenkradmomentanteile erfuhren als die weiblichen Probanden. Weiterhin deuten die um mindestens den Faktor drei größeren Summen der Standardabweichungen der beiden Teilkollektive auf eine hohe Überlappung der beiden jeweils verglichenen Verteilungen hin. In **Tabelle 3–4** sind die statistischen Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests auf Basis der Mittelwerte der einzelnen Teilfahrten dargestellt. Die Hypothese, dass die Verteilungen der beiden Teilkollektive nicht identisch sind, wurde auf den drei Signifikanzniveaus „ $\alpha = 0,05$ “, „ $\alpha = 0,01$ “ und „ $\alpha = 0,001$ “ überprüft.

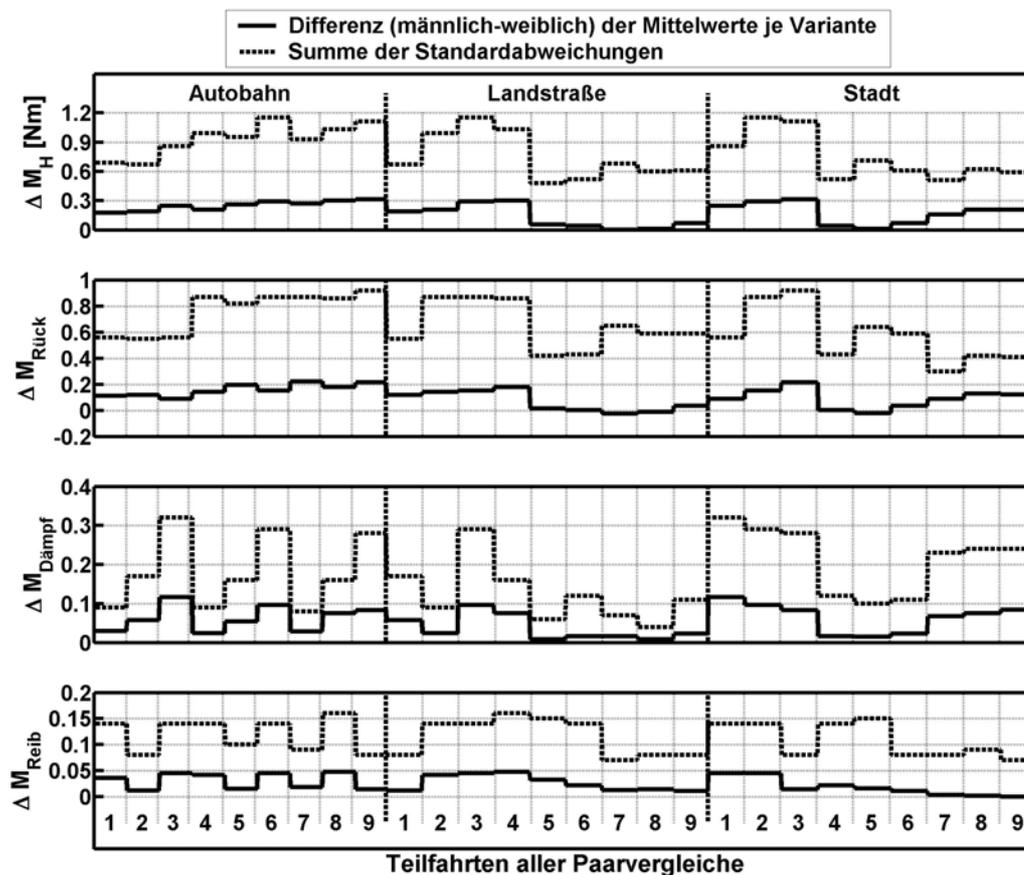


Bild 3–27: Darstellung der Differenz der arithmetischen Mittelwerte der Lenkradmomente bzw. Momentanteile der beiden Teilkollektive „weiblich“ und „männlich“, sowie der Summe der Standardabweichungen der beiden Teilkollektive für jede Variante.

Es zeigt sich, dass diese Hypothese zweier identischer Verteilungen auf dem Landstraßen- und Stadtparcours nahezu in allen untersuchten Fällen verworfen werden muss. Auf dem Autobahnparcours trifft dies in der Mehrzahl der Fälle jedoch nicht zu. Die gleichen Beobachtungen wurden bereits bei der Untersuchung der Teilkollektive „< 33 Jahre“ und „> 45 Jahre“ gemacht. Auch die Aussage bezüglich der Differenz der Mittelwerte der

Lenkradmomente beider Teilkollektive lässt sich übertragen. Trotz signifikant unterschiedlicher Verteilungen, liegen die Differenzen der Mittelwerte des Lenkradmoments (max. 0,31 Nm) unterhalb der aus der Literatur bekannten Differenzschwellen (min. 0,33 Nm) (vergl. auch **Bild 1–10**). Die von den beiden Teilkollektiven erfahrenen unterschiedlichen Lenkradmomente dürften daher auch in diesem Fall keinen Einfluss auf ein verändertes Lenkgefühl haben.

Tabelle 3–5: Gegenüberstellung der Korrelationskoeffizienten der Verteilungen der rel. Subjektivurteile der vier Beurteilungskriterien auf den drei Parcours der beiden Teilkollektive „weiblich“ und „männlich“ (Korrelationskoeffizienten $|r| \geq 0,8$: fett gedruckt und grau hinterlegt).

		Männer				Frauen							
		Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung				
Autobahn	Komfort	0,54	0,90	0,88	0,81	0,52	0,93	0,86	0,88	0,48	0,88	0,98	0,93
	Sportlichkeit	-0,35	-0,77	-0,76	-0,76	-0,47	-0,84	-0,86	-0,88	-0,13	-0,59	-0,67	-0,51
	Sicherheit	0,53	0,93	0,97	0,91	0,32	0,95	0,85	0,87	0,40	0,93	0,96	0,92
	Bevorzugung	0,58	0,90	0,85	0,79	0,30	0,84	0,67	0,70	0,65	0,85	0,92	0,96
Landstraße	Komfort	0,27	0,30	0,42	0,40	0,71	0,53	0,70	0,71	-0,34	0,23	0,36	0,12
	Sportlichkeit	-0,38	-0,90	-0,92	-0,91	0,01	-0,87	-0,77	-0,75	-0,20	-0,81	-0,78	-0,70
	Sicherheit	0,32	0,61	0,71	0,67	0,62	0,79	0,89	0,90	-0,11	0,56	0,65	0,45
	Bevorzugung	0,21	0,36	0,48	0,42	0,74	0,59	0,75	0,77	-0,15	0,39	0,49	0,30
Stadt	Komfort	0,31	0,48	0,31	0,26	0,20	0,35	0,14	0,23	0,94	0,43	0,46	0,65
	Sportlichkeit	0,31	0,41	0,20	0,19	0,13	0,28	0,05	0,13	0,92	0,24	0,30	0,49
	Sicherheit	0,47	0,94	0,84	0,79	0,40	0,91	0,83	0,83	0,52	0,83	0,93	0,87
	Bevorzugung	0,40	0,75	0,58	0,54	0,20	0,64	0,44	0,50	0,85	0,63	0,68	0,78

Eine Betrachtung der Korrelationskoeffizienten zeigt erstmals hohe negative Korrelationen zwischen den rel. Subjektivurteilen der beiden Teilkollektive. Die rel. Subjektivurteile der Gruppe der weiblichen Probanden bezüglich des Kriteriums „empfundene Sportlichkeit/Fahrspaß“ scheinen auf dem Landstraßen und Autobahnparcours also gegensätzliche Tendenzen im Vergleich zu den Urteilen der männlichen Probanden aufzuweisen.

Weiterhin ist zu erkennen, dass eine hohe Korrelation der rel. Subjektivurteile bei Beurteilung der „empfundenen Sicherheit“ auf allen drei Parcours existiert. Die Bevorzugung der unterschiedlichen Lenkradmomentvarianten korreliert auf allen drei Parcours weniger stark.

Die Beurteilung des „empfundenen Komforts“ zeigt eine ansteigende Korrelation vom Autobahnparcours ($r = 0,54$) über den Landstraßenparcours ($r = 0,71$) bis hin zum Stadtparcours ($r = 0,94$).

Diese gefundenen Abhängigkeiten werden nun näher erläutert. Begonnen wird mit der vergleichenden Darstellung der Ergebnisse der Beurteilungen der „empfundenen Sportlichkeit/Fahrspaß“ der beiden Teilkollektive.

Sportlichkeit/Fahrspaß

Bei der Betrachtung des Kriteriums „empfundener Fahrspaß/Sportlichkeit“ der beiden Teilkollektive „weiblich“ und „männlich“ lassen sich erstmals eindeutige Beurteilungsunterschiede auf dem Autobahn- und Landstraßenparcours aufzeigen (**Bild 3-28**).

Es ist festzustellen, dass die weiblichen Probanden generell niedrigere Momente als sportlicher empfinden. Männer hingegen erfahren mehr Fahrspaß bei hohen Gesamtmomenten.

Insbesondere auf dem Landstraßenparcours zeigt sich eine nahezu gegensätzliche Reihenfolge der präferierten Varianten (**Bild 3-30**). Es ist davon auszugehen, dass eben dieser Effekt dazu führte, dass bei der Untersuchung des Gesamtkollektivs oder auch der Teilkollektive „Alter“ keine Aussagen bezüglich des „empfundenen Fahrspaßes/Sportlichkeit“ gemacht werden konnten. Während die weiblichen Probanden eher niedrige Rückstellmomentanteile als sportlich erachten, so empfinden die männlichen Probanden bei hohen Rückstellmomentanteilen mehr Fahrspaß. Gleichzeitig scheinen von den männlichen Probanden, im Gegensatz zu der Gruppe der weiblichen Probanden, auch höhere Reibmomentanteile präferiert zu werden (**Bild 3-28**).

Wie bei den übrigen Betrachtungen auf dem Autobahnparcours bereits festgestellt, besitzt die Reibung auf diesem Parcours einen dominierenden Einfluss, was sich anschaulich in der Flächencharakteristik der relativen Subjektivurteile zeigt. Allerdings können die statistischen Aussagen bei einem Signifikanzniveau von 1% dies nicht bestätigen. Betrachtet man

hingegen die signifikanten Paarvergleiche für ein α -Niveau von 5% (**Bild 3–29**), so kann auch diese Annahme statistisch untermauert werden.

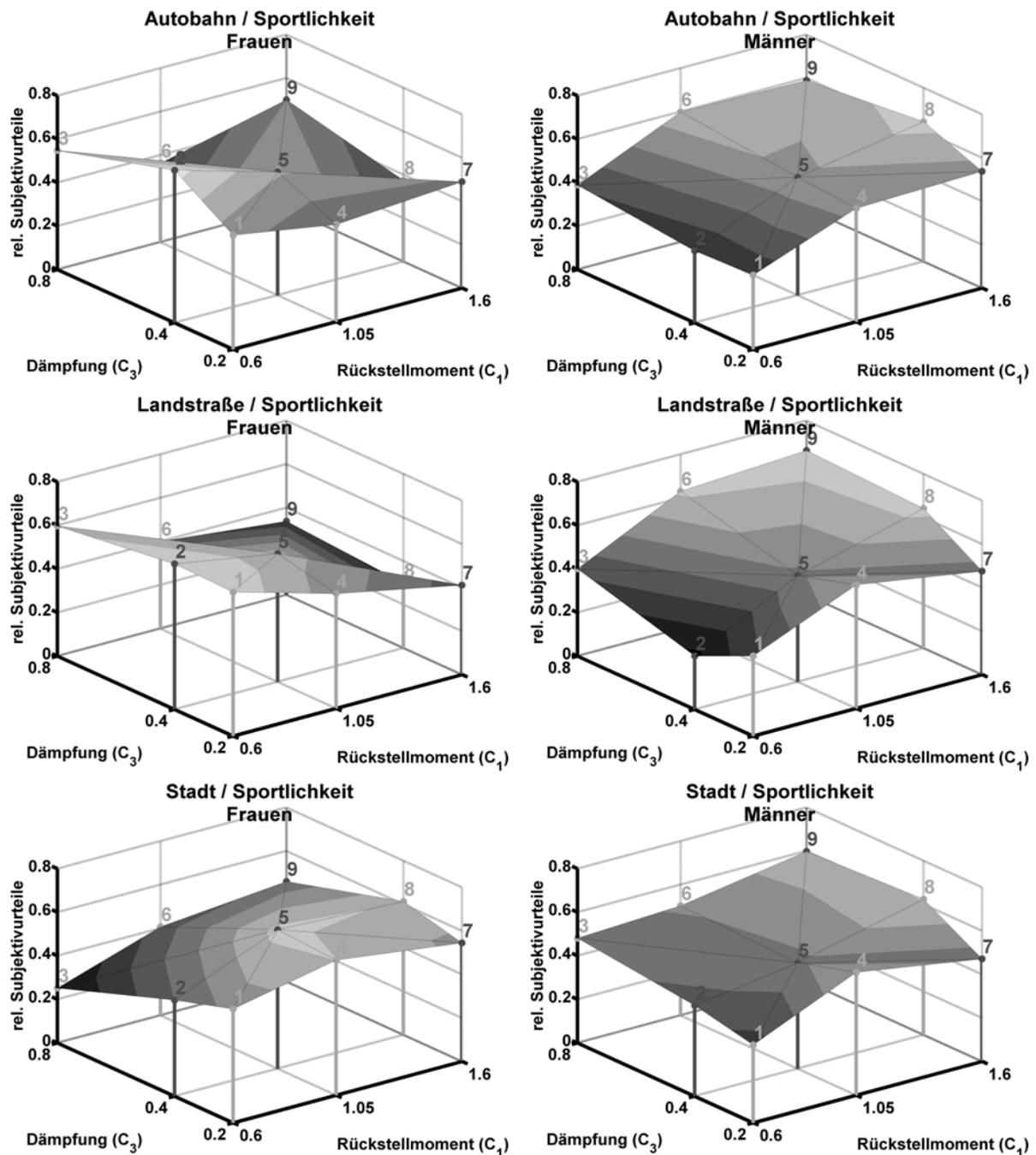


Bild 3-28: Vergleich der rel. Subjekturteile des Kriteriums „empfundene Sportlichkeit/Fahrspaß“ zwischen weiblichen und männlichen Probanden auf allen drei Parcours.

Nun ist auch zu erkennen, dass eine Aussage für den Stadtparcours nur schwer möglich ist. Es zeigen sich ähnliche Tendenzen wie sie bei den Teilkollektiven „Alter“ festgestellt wurden. Hierbei zeigen die weiblichen Probanden die gleiche Tendenz wie die Gruppe der unter 33-jährigen Probanden. Die männlichen Probanden tendieren hingegen nicht zu Varianten mit

niedriger Dämpfung und entsprechen somit eher dem Teilkollektiv der über 45-jährigen. Betrachtet man sich die Altersverteilung der Teilkollektive „Geschlecht“ (Durchschnittsalter: weiblich = 39,6 Jahre, männlich = 37,9 Jahre), so kann der Verdacht nicht geschlechtsspezifische, sondern alterspezifische Charakteristika gemessen zu haben, widerlegt werden. Auf Grund des Durchschnittsalters der Teilkollektive wäre eher eine vertauschte Rolle der Urteile zu erwarten gewesen.

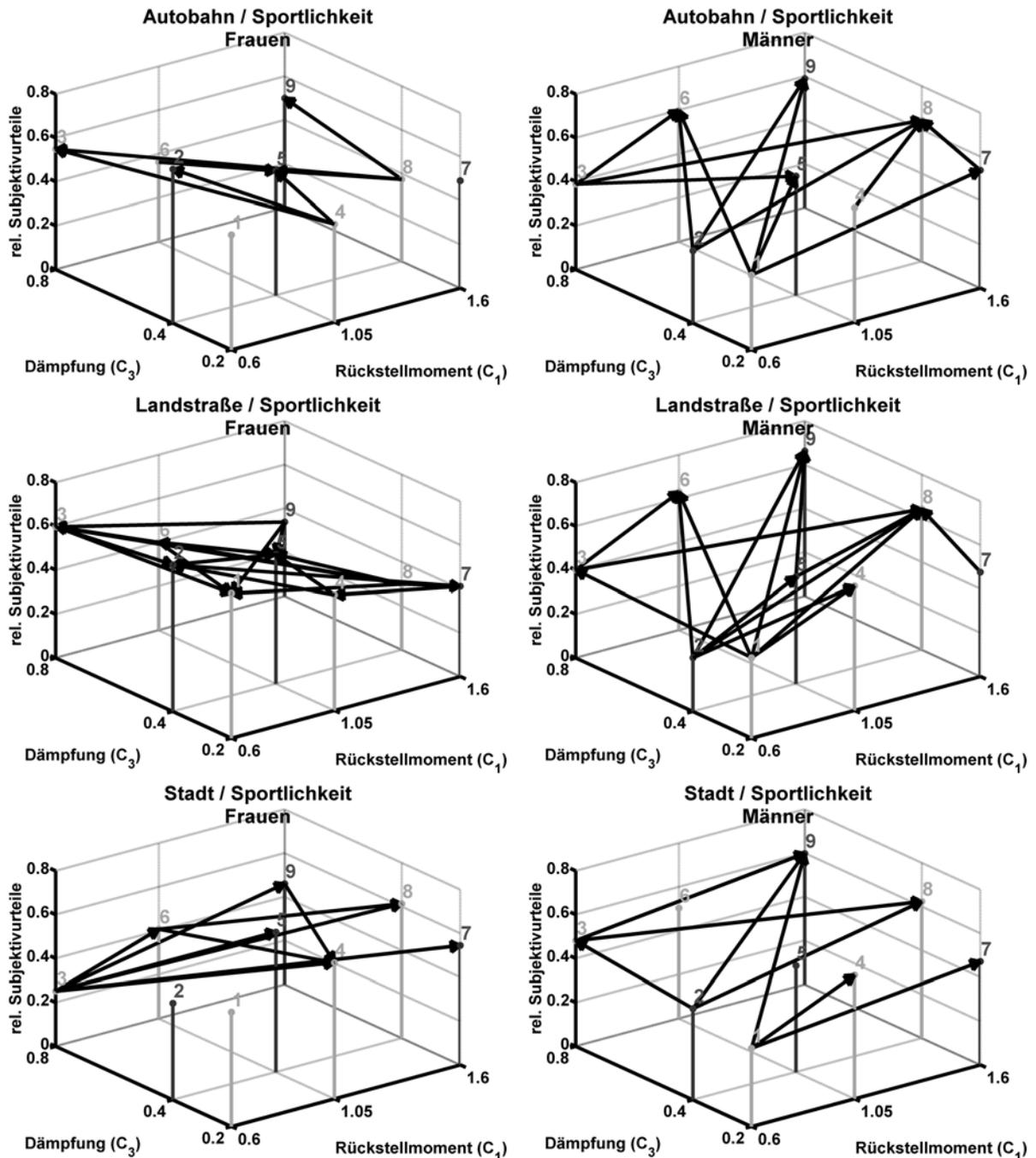


Bild 3–29: Vergleich der signifikanten Paarvergleiche ($\alpha = 0,05$) des Kriteriums „empfundener Fahrspaß/Sportlichkeit“ zwischen weiblichen und männlichen Probanden auf allen drei Parcours.

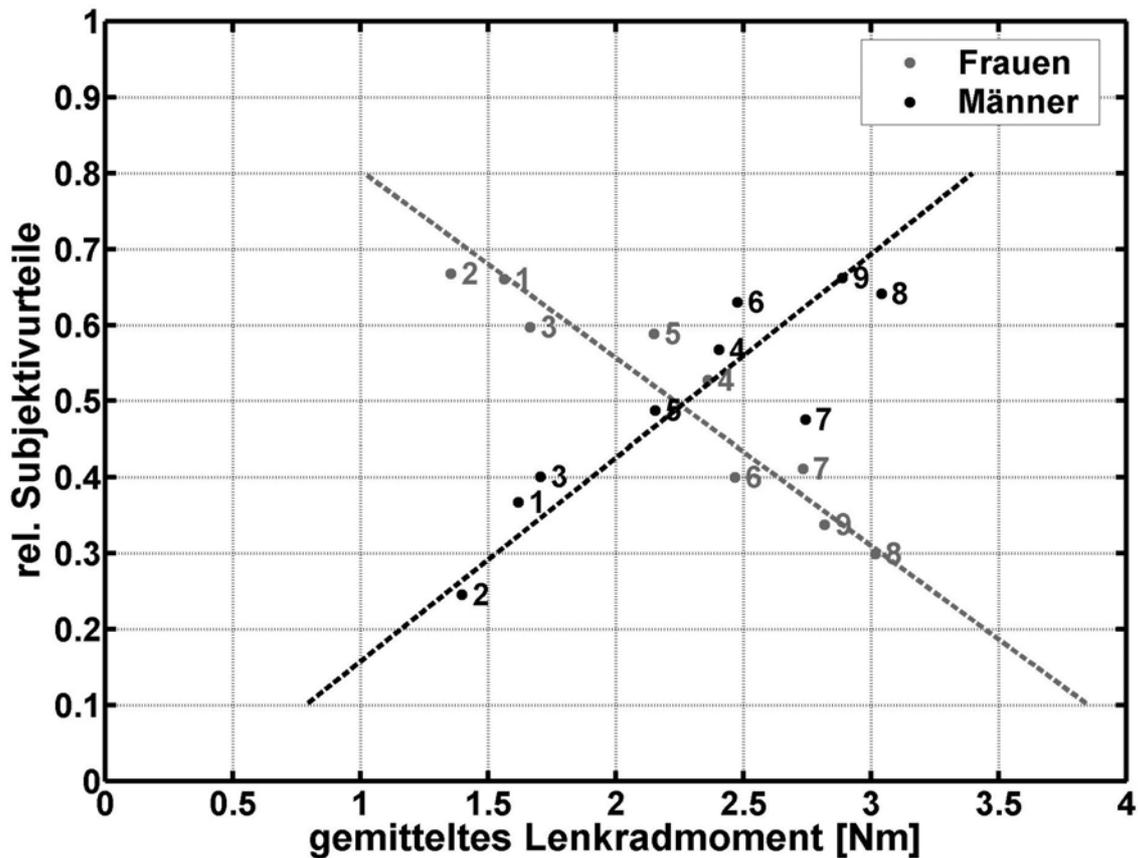


Bild 3–30: Höhe der relativen Subjektivurteile der 9 Lenkradmomentvarianten bezüglich des Kriteriums „empfundener Fahrspaß/Sportlichkeit“ der weiblichen und männlichen Probanden auf dem Landstraßenparcours.

Sicherheit

Betrachtet man das Kriterium „empfundene Sicherheit“ (**Bild 3–31**), so lassen sich zwar statistisch signifikante Aussagen auf dem Landstraßenparcours (**Bild 3–32**) treffen; diese Aussagen der beiden Teilkollektive unterscheiden sich jedoch nur geringfügig. Sie spiegeln prinzipiell die bereits gefundenen Aussagen des Gesamtkollektivs wider. Auf dem Autobahnparcours werden höhere Rückstellmomente und höhere Reibung als sicherer empfunden. Auf dem Landstraßenparcours zeigt sich der Reibungseinfluss noch stärker und wird zur dominanten Größe.

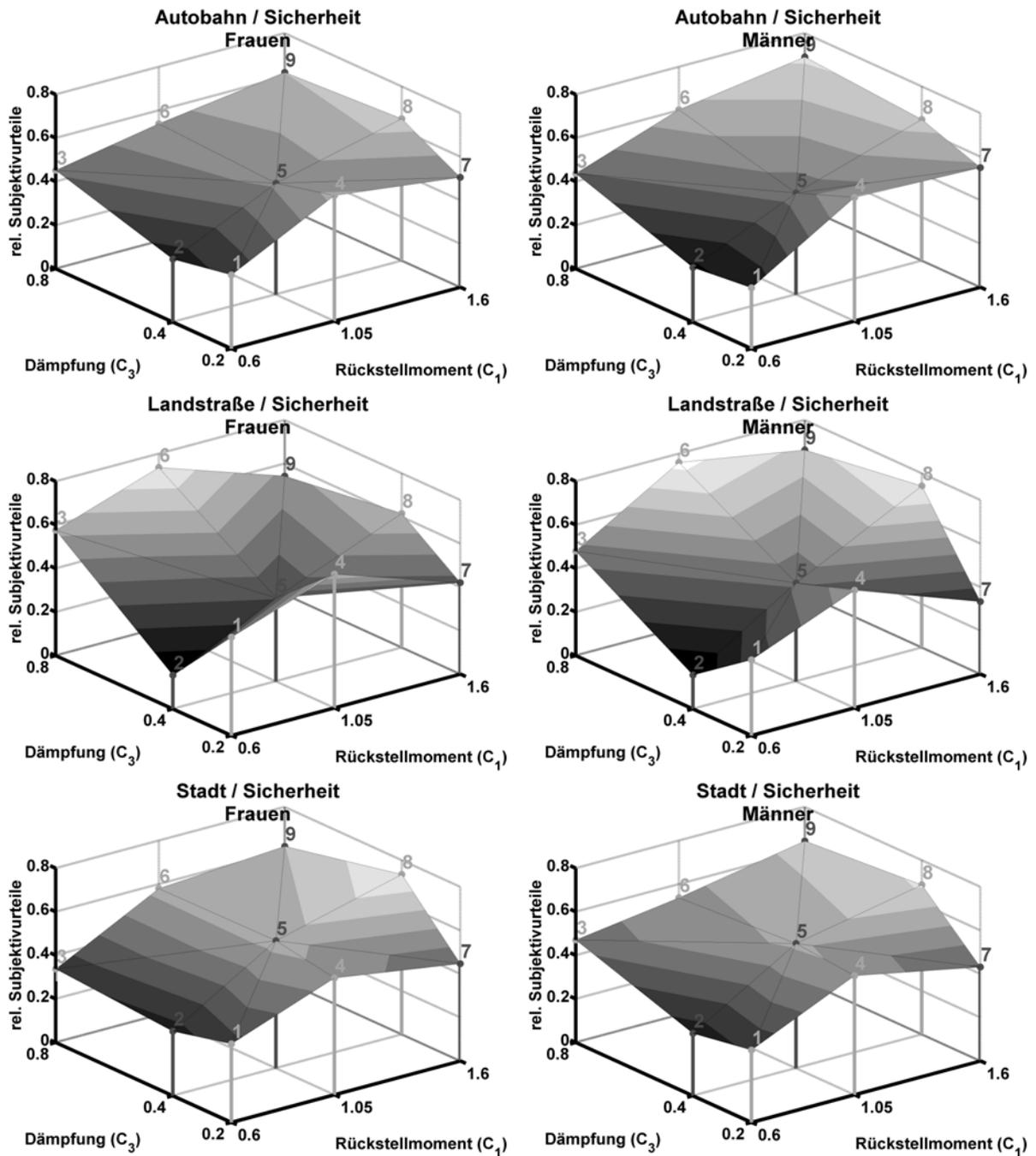


Bild 3–31: Vergleich der rel. Subjektivrteile des Kriteriums „empfundene Sicherheit“ zwischen weiblichen und männlichen Probanden auf allen drei Parcours.

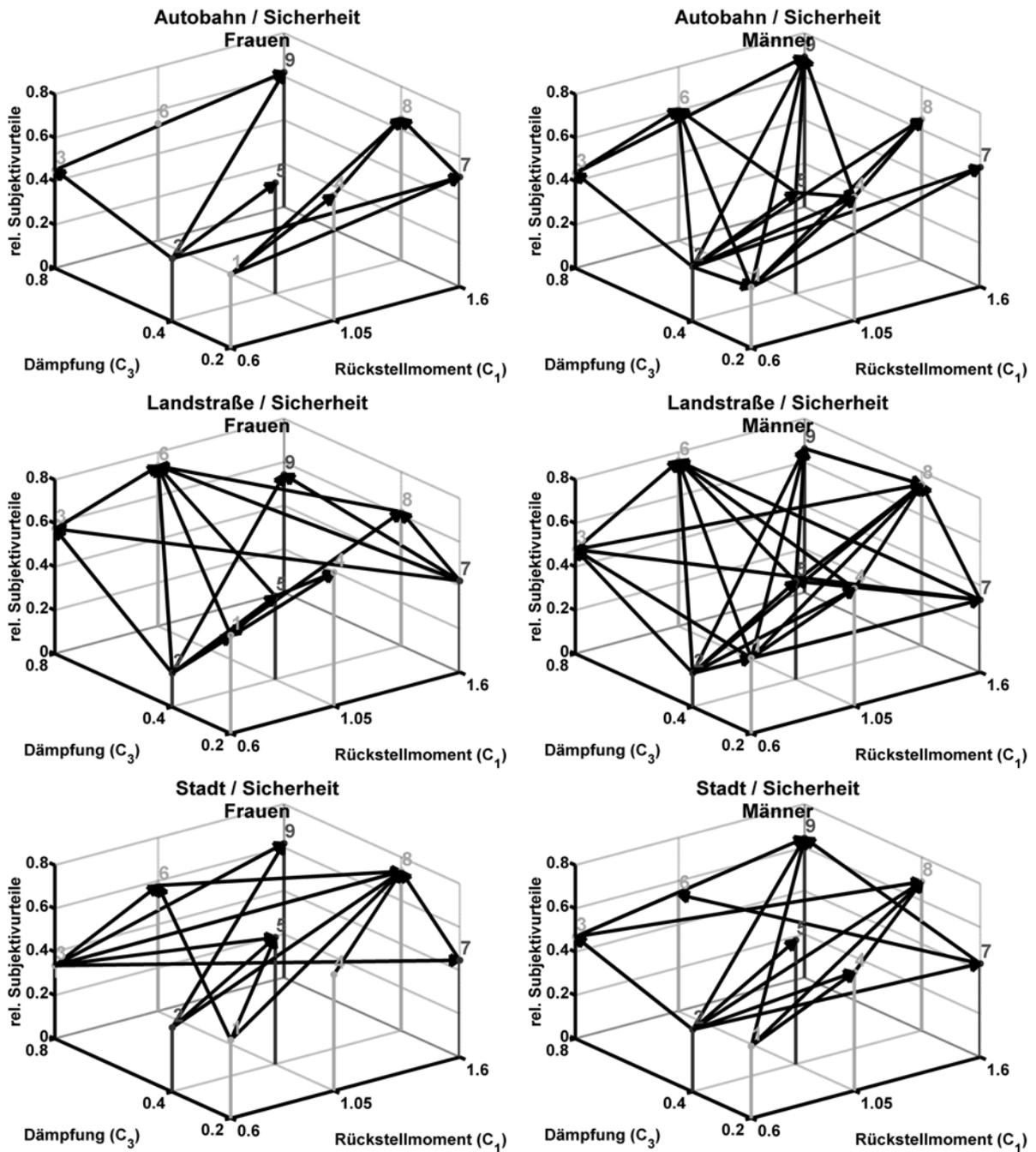


Bild 3–32: Vergleich der signifikanten Paarvergleiche ($\alpha = 0,05$) des Kriteriums „empfundene Sicherheit“ zwischen weiblichen und männlichen Probanden auf allen drei Parcours.

Komfort

Wie aus den nachfolgenden Grafiken (**Bild 3–33** und **Bild 3–34**) ersichtlich lassen sich für das Kriterium „empfundener Komfort“ keine eindeutigen Unterschiede zwischen den beiden Teilkollektiven feststellen. Lediglich auf dem Landstraßenparcours zeichnet sich eine leichte Tendenz der weiblichen Probanden zu einer höheren Gewichtung der Reibung ab.

Generell muss jedoch in Anbetracht der geringen Anzahl signifikanter Paarvergleiche und den geringen Gradientenunterschieden der Fläche der relativen Subjektivurteile zwischen den beiden Teilkollektiven davon ausgegangen werden, dass sich der „empfundene Komfort“ zwischen den beiden Gruppen nicht maßgeblich unterscheidet. Man erkennt vergleichbare Tendenzen wie bei der Betrachtung des Gesamtkollektivs.

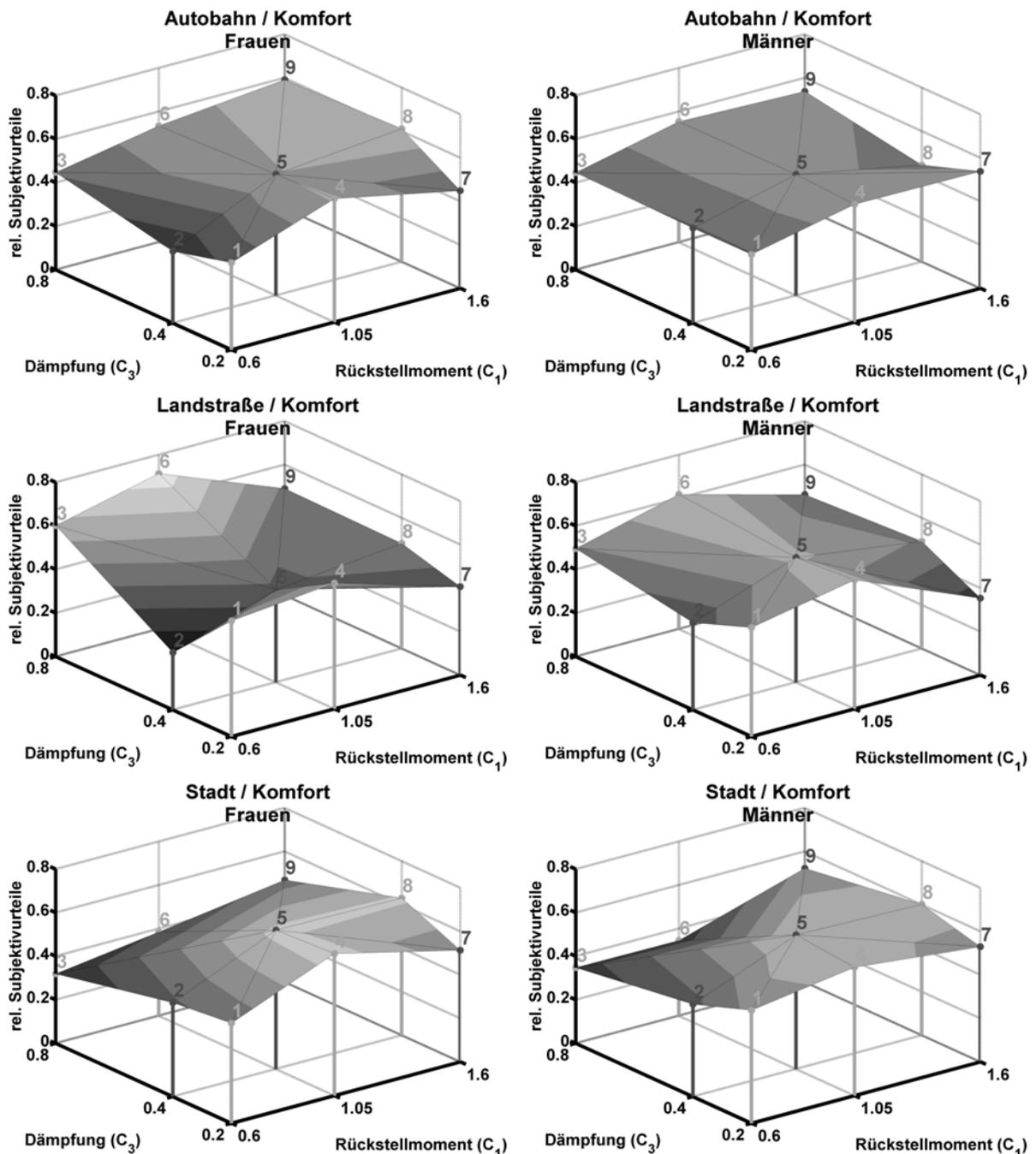


Bild 3–33: Vergleich der rel. Subjektivurteile des Kriteriums „empfundener Komfort“ zwischen weiblichen und männlichen Probanden auf allen drei Parcours.

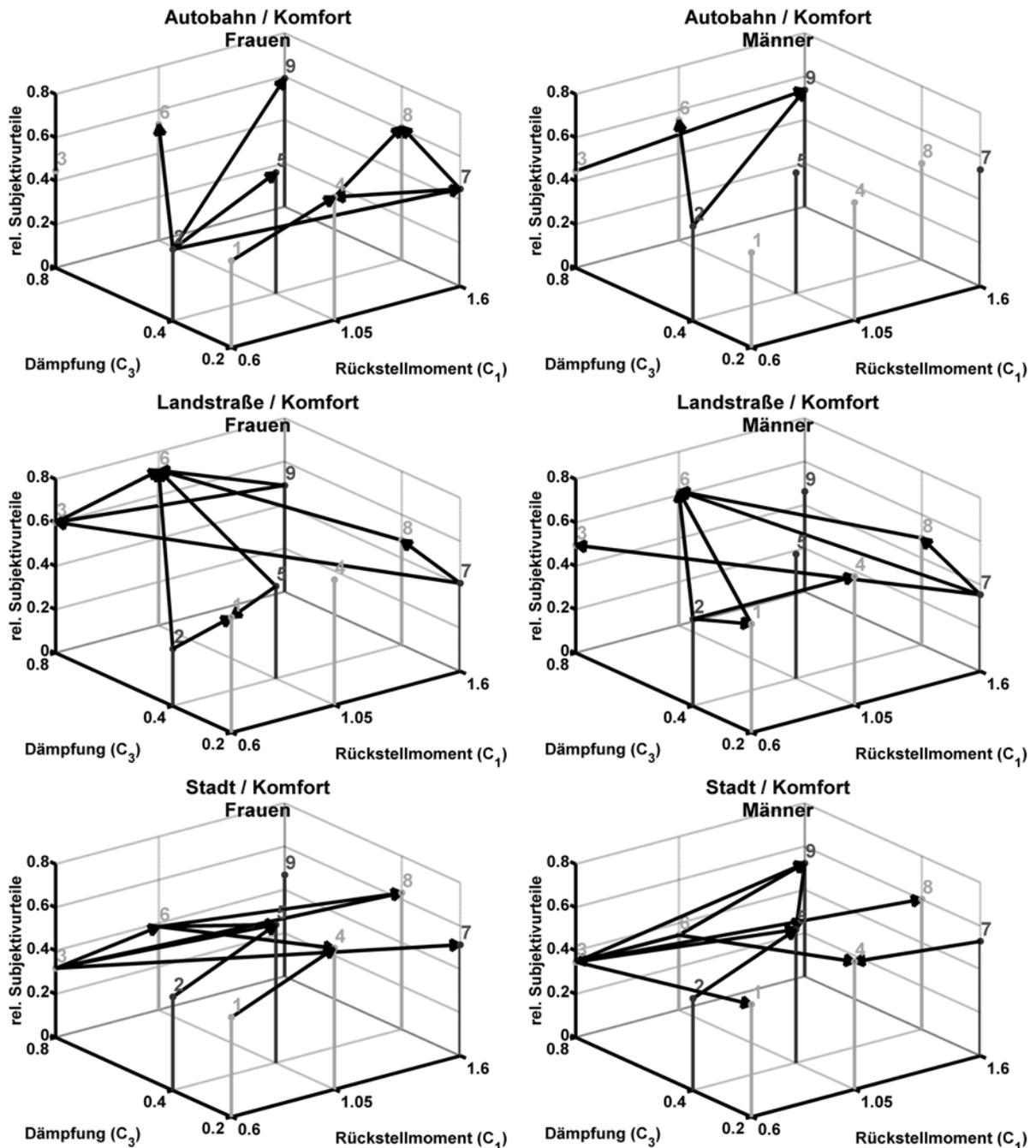


Bild 3–34: Vergleich der signifikanten Paarvergleiche ($\alpha = 0,05$) des Kriteriums „empfundener Komfort“ zwischen weiblichen und männlichen Probanden auf allen drei Parcours.

Bevorzugung

Die „allgemeine Bevorzugung“ der Varianten zeigt lediglich auf dem Stadtparcours (**Bild 3–35** und **Bild 3–36**) eine leicht unterschiedliche Präferenz. Diese ähnelt dem gefundenen Schema beim Kriterium „empfundener Fahrspaß/Sportlichkeit“. Hierbei wünschen Männer eher hohe und Frauen eher geringe Dämpfungen. An Hand der Grafiken lässt sich bei den

Frauen eher eine Bevorzugung der niedrigen Dämpfungsanteile ausmachen, wo hingegen die männlichen Probanden eher eine hohe Gewichtung der Dämpfungsanteile bevorzugen.

Auf dem Autobahn- und Landstraßenparcours sind die Urteile, insbesondere bei der Betrachtung der männlichen Probanden, denen der „empfundene Sicherheit“ sehr ähnlich.

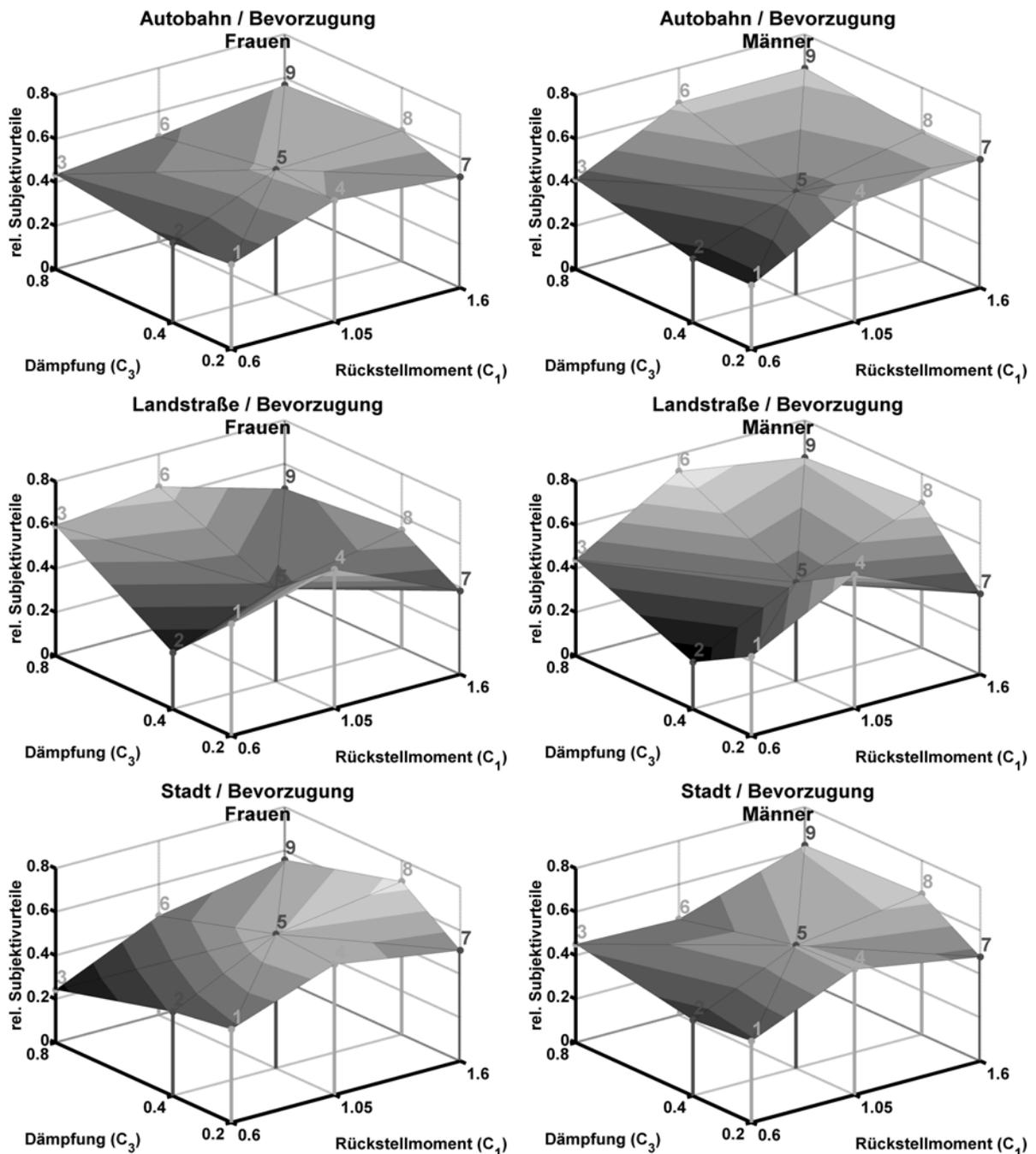


Bild 3–35: Vergleich der rel. Subjektivurteile des Kriteriums „allgemeine Bevorzugung“ zwischen weiblichen und männlichen Probanden auf allen drei Parcours.

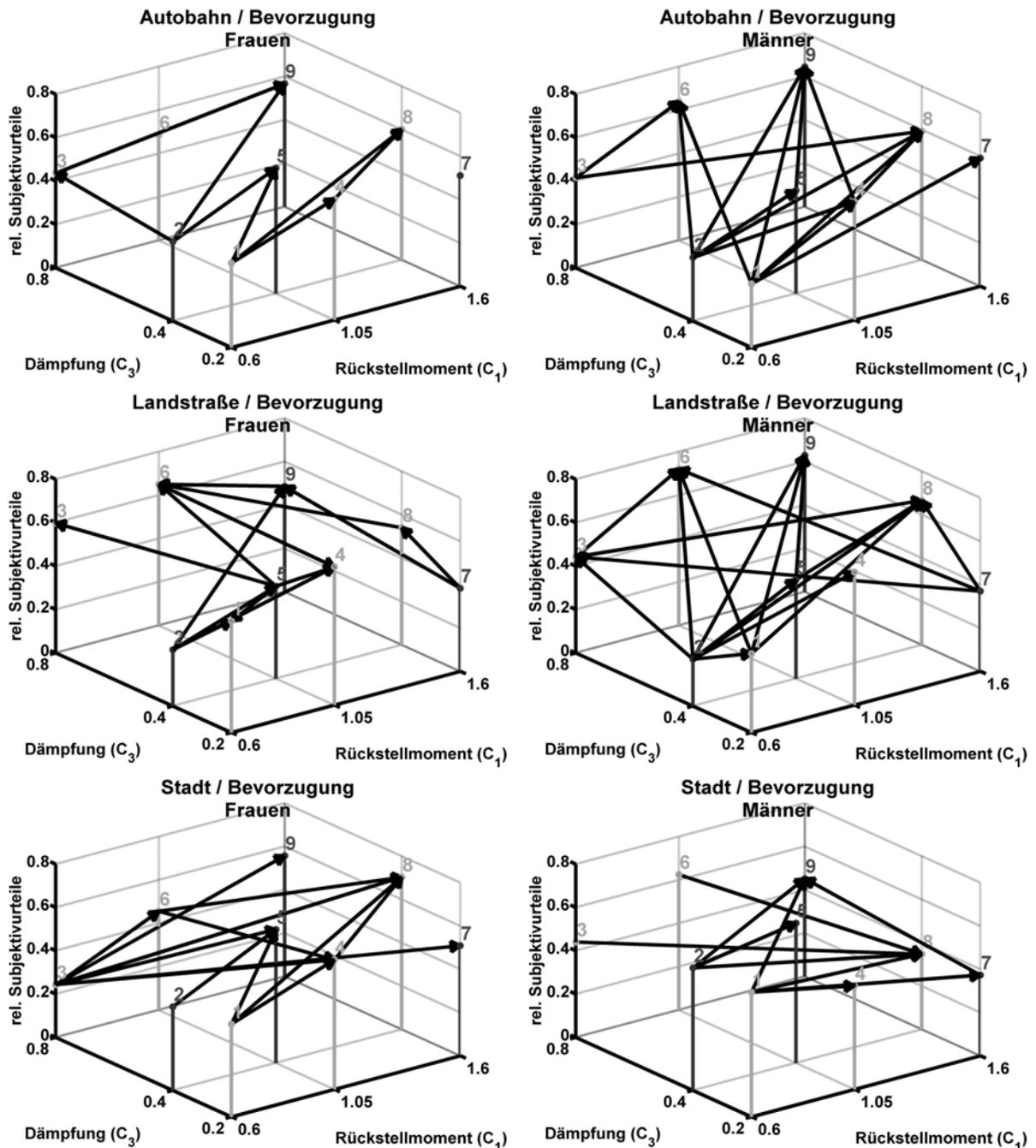


Bild 3–36: Vergleich der signifikanten Paarvergleiche ($\alpha = 0,05$) des Kriteriums „allgemeine Bevorzugung“ zwischen weiblichen und männlichen Probanden auf allen drei Parcours.

Fazit

Zwischen den beiden Teilkollektiven zeigen sich bei der Beurteilung des Kriteriums „empfundene Sportlichkeit/Fahrspaß“ auf dem Autobahn- und Landstraßenparcours eindeutig gegensätzliche Tendenzen. Prinzipiell kann die Aussage getroffen werden, dass die weiblichen Probanden bei niedrigen Lenkmomenten mehr Fahrspaß empfinden; die

männlichen Probanden beurteilen hohe Lenkradmomente als sportlicher.

Die Beurteilung der „empfundene Sicherheit“ zeigt eine hohe Korrelation der beiden Teilkollektive auf allen drei Parcours.

Wie bereits bei der Betrachtung der Teilkollektive „< 33 Jahre“ und „> 45 Jahre“ konnte auch bei den Probandengruppen „weiblich“ und „männlich“ eine Differenz in den mittleren gefahrenen Lenkradmomenten aufgezeigt werden, die sich unterhalb der aus der Literatur bekannten Differenzschwellen der Lenkradmomentwahrnehmung befindet. Diese Differenz der mittleren Lenkradmomente dürfte somit keinen Einfluss auf eine unterschiedliche Beurteilung der Lenkradmomente durch die beiden Teilkollektive besitzen.

3.2.3 Kennwertbildung zur Differenzierung der Teilkollektive

Wie in Kapitel 1.2.2 dargestellt, existieren zahlreiche Untersuchungen, die fahrdynamische Kennwerte zur Beschreibung von Fahrstilen benutzen. Im Rahmen dieser Untersuchung würde solch eine Bildung von Kennwerten eine dynamische Anpassung des Lenkradmoments an die jeweiligen Bedürfnisse des Fahrers ermöglichen. Ziel ist es daher, zu untersuchen, ob sich innerhalb der beiden Teilkollektive „Alter“ und „Geschlecht“, mit differierenden Urteilen zum Lenkradmoment unterschiedliche Fahrstile durch Kennwerte aus fahrdynamischen Größen identifizieren lassen. Die folgenden Darstellungen von Ergebnissen dienen der Überprüfung der Hypothese H3c:

H3c: Es existieren fahrdynamische Größen, die eine Differenzierung innerhalb der Teilkollektive „Alter“ und „Geschlecht“ zulassen.

Voraussetzung für die folgende Untersuchung ist, dass der Fahrstil bzw. die Lenkstrategie der Probanden unabhängig von der eingestellten Lenkradmomentvariante ist. Diese Voraussetzung kann aufgrund von einstimmigen Untersuchungsergebnissen aus der Literatur ([57], [101], [285], [286], vergl. auch [141], [200]) als gegeben angenommen werden.

Da das von den Fahrern beurteilte Lenkradmoment auf den fahrdynamischen Größen „Quereschleunigung“ – über das Fahrzeugmodell berechnet aus „Fahrzeuggeschwindigkeit“ und „Lenkradwinkel“ – und „Lenkradwinkelgeschwindigkeit“ beruht, liegt es nahe, Kennwerte auf Basis dieser Größen zu untersuchen.

Für die vier Teilkollektive „< 33 Jahre“ und „> 45 Jahre“, sowie „weiblich“ und „männlich“ sind in **Bild 3–37** und **Bild 3–38** die Differenzen der Mittelwerte und die Summe der Standardabweichungen dieser vier fahrdynamischen Größen aufgetragen.

Man erkennt bei der Betrachtung der vier fahrdynamischen Größen, dass die Gruppe der unter 33-jährigen durchweg ein höheres mittleres Niveau dieser Größen als die über 45-jährigen Fahrer erreicht. Ausnahmen bilden der mittlere Lenkradwinkel und die mittlere Lenkradwinkelgeschwindigkeit auf dem Landstraßenparcours. Wie bereits bei der Betrachtung der Lenkradmomentanteile festgestellt, so sind auch bei den fahrdynamischen Eingangsgrößen des Lenkradmomentmodells die Standardabweichungen hoch im Vergleich zur Differenz der Mittelwerte. Diese Beobachtung gilt auch für die Teilkollektive „weiblich“

und „männlich“. Die männlichen Probanden erreichen mit Ausnahme des mittleren Lenkradwinkels auf dem Landstraßenparcours durchweg höhere fahrdynamische Größen als die weiblichen Probanden.

In **Tabelle 3–6** sind die statistischen Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests auf Basis der Mittelwerte der einzelnen Teilfahrten dargestellt. Die Hypothese, dass die Verteilungen der beiden Teilkollektive nicht identisch sind, wurde auf den drei Signifikanzniveaus „ $\alpha = 0,05$ “, „ $\alpha = 0,01$ “ und „ $\alpha = 0,001$ “ überprüft.

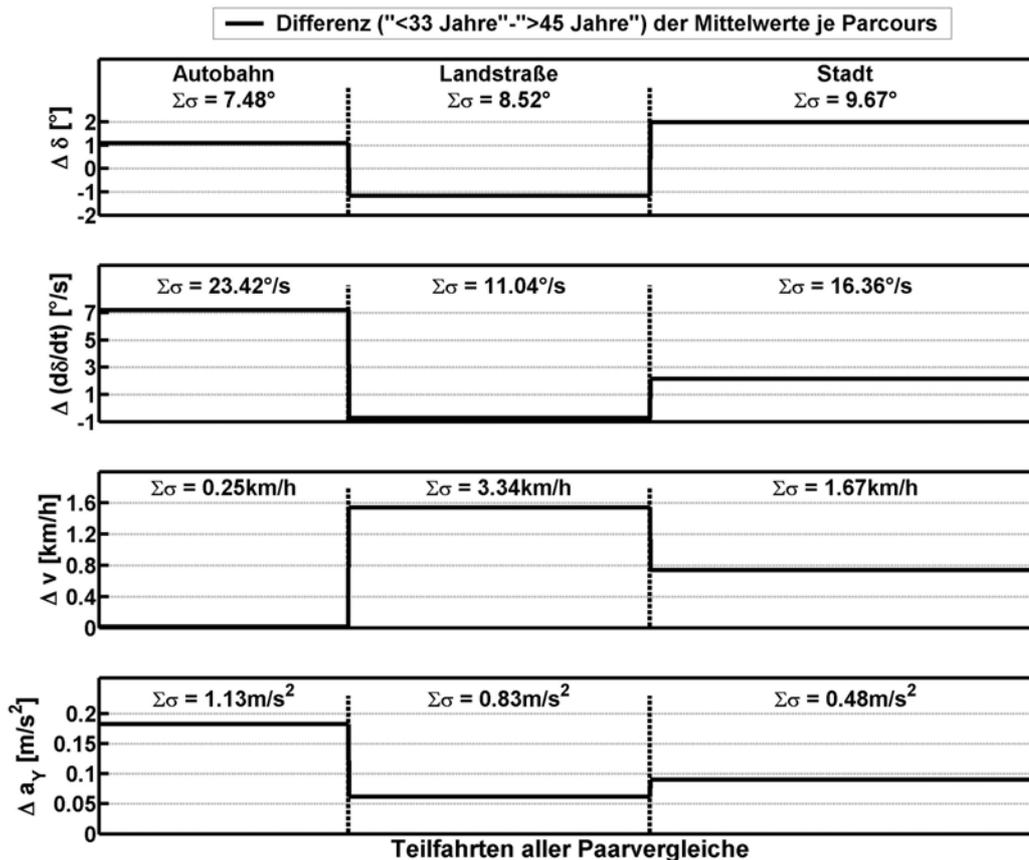


Bild 3–37: Darstellung der Differenz der gemittelten fahrdynamischen Größen Lenkradwinkel (δ), Lenkradwinkelgeschwindigkeit ($\dot{\delta}$), Fahrzeuggeschwindigkeit (v) und Querbeschleunigung (a_y) der beiden Teilkollektive „ < 33 Jahre“ und „ > 45 Jahre“, sowie der Summe der Standardabweichungen der beiden Teilkollektive für jeden Parcours.

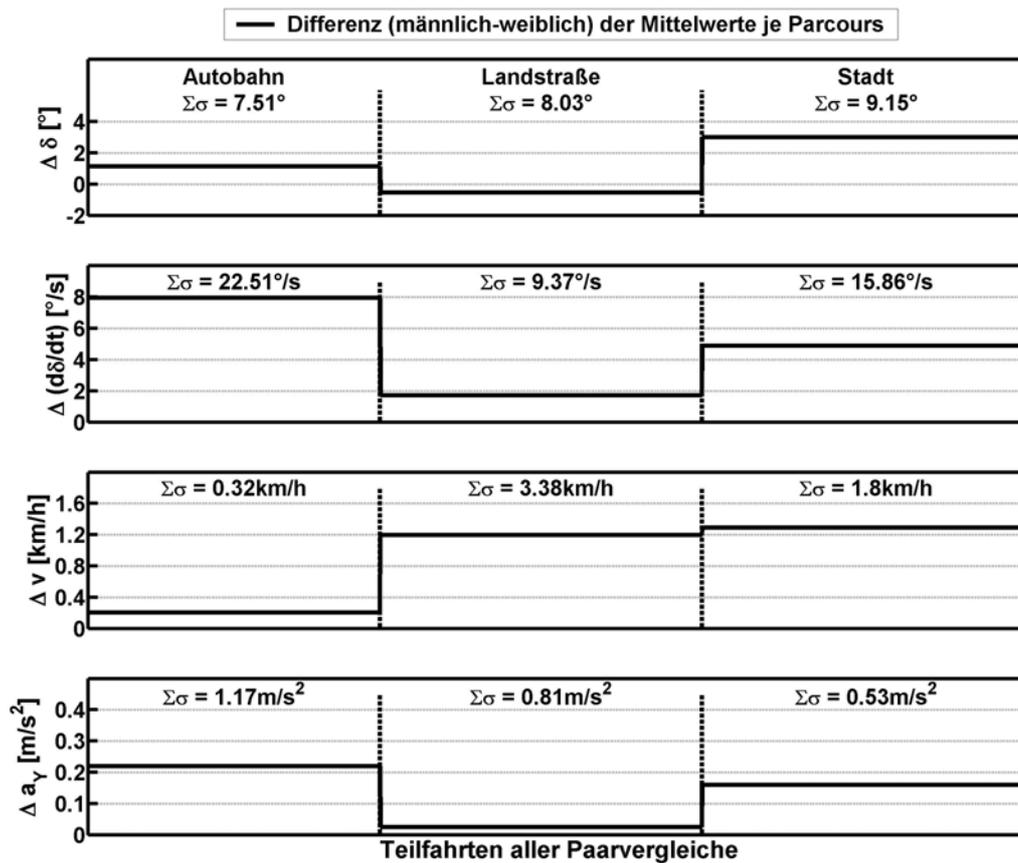


Bild 3–38: Darstellung der Differenz der gemittelten fahrdynamischen Größen Lenkradwinkel (δ), Lenkradwinkelgeschwindigkeit ($\dot{\delta}$), Fahrzeuggeschwindigkeit (v) und Querbeschleunigung (a_y) der beiden Teilkollektive „männlich“ und „weiblich“, sowie der Summe der Standardabweichungen der beiden Teilkollektive für jeden Parcours.

Es zeigt sich, dass eine statistische Aussage auf hohem Niveau die Annahme identischer Verteilungen der entsprechenden beiden Teilkollektive verwirft und somit die Annahme, dass die Teilkollektive einen unterschiedlichen Fahrstil besitzen, bestätigt.

Allerdings zeigen die geringen Unterschiede der Mittelwerte und die hohen Standardabweichungen die Grenzen für eine Umsetzung eines adaptiven, synthetischen Lenkradmoments für die Praxis auf. Die Festlegung von Schwellwerten dürfte sich als problematisch erweisen.

Tabelle 3–6: Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Tests für die Signifikanzniveaus „ $\alpha = 0,05$ “, „ $\alpha = 0,01$ “ und „ $\alpha = 0,001$ “ für vier ausgewählte fahrdynamische Kennwerte.

Teilkollektiv „Alter“				
Kennwert	Berechnungsvorschrift	Signifikanzniveau α (Kruskal-Wallis-Test)		
		Autobahn	Landstraße	Stadt
$\bar{\delta}$	$\bar{\delta} = \frac{\sum_1^n \delta_n}{n}$	< 0,001	< 0,001	< 0,001
$\dot{\bar{\delta}}$	$\dot{\bar{\delta}} = \frac{\sum_1^n \dot{\delta}_n}{n}$	< 0,01	< 0,01	< 0,001
\bar{v}	$\bar{v} = \frac{\sum_1^n v_n}{n}$	> 0,05	< 0,001	< 0,001
\bar{a}_Y	$\bar{a}_Y = \frac{\sum_1^n a_{Yn}}{n}$	< 0,001	< 0,001	< 0,001
Teilkollektiv „Geschlecht“				
Kennwert	Berechnungsvorschrift	Signifikanzniveau α (Kruskal-Wallis-Test)		
		Autobahn	Landstraße	Stadt
$\bar{\delta}$	$\bar{\delta} = \frac{\sum_1^n \delta_n}{n}$	< 0,001	> 0,05	< 0,001
$\dot{\bar{\delta}}$	$\dot{\bar{\delta}} = \frac{\sum_1^n \dot{\delta}_n}{n}$	< 0,001	< 0,001	< 0,001
\bar{v}	$\bar{v} = \frac{\sum_1^n v_n}{n}$	> 0,05	< 0,001	< 0,001
\bar{a}_Y	$\bar{a}_Y = \frac{\sum_1^n a_{Yn}}{n}$	< 0,001	> 0,05	< 0,001

Fazit

Es wurde gezeigt, dass durch Kennwerte, die auf den dynamischen Eingangsgrößen des Modells (Fahrzeuggeschwindigkeit, Querbeschleunigung, Lenkradwinkelgeschwindigkeit, Lenkradwinkel) aufbauen, ein statistisch abgesicherter Unterschied der Teilkollektive beschrieben werden kann. Durch die hohen Standardabweichungen und die geringen

Unterschiede in den Mittelwerten überlappen sich die Verteilungen der Kennwerte jedoch in einem hohen Maße.

3.2.4 Fazit

In den vorigen Kapiteln wurden untersucht, in wie weit Unterschiede in der Lenkradmomentbeurteilung zwischen einzelnen Teilkollektiven existieren. Bei der Betrachtung der beiden Teilkollektive „< 33 Jahre“ und „> 45 Jahre“ wurden insbesondere auf dem Stadtparcours bei der Beurteilung der empfundenen Sicherheit gegensätzliche Tendenzen der beiden Teilkollektive festgestellt. Die jüngeren Probanden präferieren tendenziell niedrigere Dämpfungsanteile; die älteren Probanden präferieren tendenziell höhere Dämpfungsanteile.

Die Hypothese H3a

H3a: Bei der Beurteilung von Lenkradmomentvarianten treten keine Unterschiede in Abhängigkeit des Lebensalters des Fahrers auf.

kann somit eindeutig widerlegt werden.

Bei der Untersuchung der Teilkollektive „Frauen“ und „Männer“ konnten eindeutig gegensätzliche Präferenzen bei der Beurteilung des Kriteriums „empfundene Sportlichkeit/Fahrspaß“ beobachtet werden. Die weiblichen Probanden empfinden niedrigere Lenkradmomente als sportlicher, die männlichen Probanden empfinden hingegen mehr Fahrspaß bei höheren Lenkradmomenten. Dieser Gegensatz der beiden Teilkollektive führte dazu, dass sich durch die Aufhebung der Tendenzen der beiden Teilkollektive keine Präferenzen bei der Betrachtung des Gesamtkollektivs oder der Teilkollektive „Alter“ ergab.

Aufgrund der gefundenen Differenzen bei der Beurteilung des Kriteriums „empfundene Sportlichkeit/Fahrspaß“ durch die beiden Teilkollektive kann die Hypothese H3b

H3b: Bei der Beurteilung von Lenkradmomentvarianten treten keine Unterschiede in Abhängigkeit des Geschlechts des Fahrers auf.

eindeutig widerlegt werden.

Eine Differenzierung der Teilkollektive durch fahrdynamische Kennwerte ist mit statistischen Mitteln möglich. Aufgrund der signifikanten Unterschiede auf hohem Niveau, kann die Hypothese H3c

H3c: Es existieren fahrdynamische Größen, die eine Differenzierung innerhalb der Teilkollektive „Alter“ und „Geschlecht“ zulassen.

daher nicht widerlegt werden.

Die großen Standardabweichungen und die geringen Unterschiede der Mittelwerte der einzelnen gebildeten Kennwerte lassen eine Anwendung im Rahmen einer adaptiven Lenkradmomentgestaltung jedoch problematisch erscheinen.

4 Diskussion

In den nachfolgenden Kapiteln werden sowohl die Methodik als auch die Ergebnisse diskutiert.

4.1 Beurteilung der Methodik

4.1.1 Lenkradmomentmodellierung

Bei der Modellierung des Lenkradmoments bestand die Forderung, ein reales Lenkradmoment nachzubilden. Zur Überprüfung der Qualität des Lenkradmoments wurden Umschaltfahrten um „Placebofahrten“ mit erfahrenen Normalfahrern ergänzt (Kapitel 2.1.5). Hierbei wurde die Qualität als ausreichend betrachtet, wenn die Probanden keinen Unterschied zwischen den beiden Lenkradmomenten (real – synthetisch) wahrnehmen konnten.

Beim Versuchskonzept für diese Qualitätsüberprüfung wurde die Messlatte bewusst sehr hoch gelegt. Dies betrifft zum einen die Auswahl der Probanden – erfahrene Normalfahrer und Fahrer mit Testerfahrung statt durchschnittlich erfahrene Normalfahrer – als auch die Versuchsdurchführung – Umschalten zwischen den beiden Modi ohne Unterbrechung während der Fahrt. Somit ist davon auszugehen, dass ein durchschnittlich erfahrener Normalfahrer keinen Unterschied zwischen dem synthetischen und dem realen Lenkradmoment erkennt. Weiterhin fiel auf, dass die durch die Fahrmanöver (Slalom, Spurwechsel) bedingten Unterschiede im Lenkradmoment teilweise als eine gezielte Änderung des Lenkradmoments gedeutet wurden. Den Unterschied im Lenkradmoment durch das Umschalten (real – synthetisch) empfanden die meisten Probanden als gering gegenüber der Varianz des Lenkradmoments als Folge des Manöverwechsels oder kleiner Fahrbahnunebenheiten. Es wurden daher keine bzw. zu viele Lenkradmomentunterschiede von den Probanden erkannt.

Es wird auch an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, dass sich sowohl die Modellierung des Lenkradmoments, als auch die durchgeführten Untersuchungen auf den Normalfahrbereich ($a_y < 5\text{m/s}^2$) beschränkten. Würde man die gleichen Untersuchungen mit einem angepassten synthetischen Lenkradmoment bei höheren Fahrzeugquerbeschleunigungen durchführen, so kann angenommen werden, dass Normalfahrer durch die gestiegenen Anforderungen an die Fahrzeugführung erst wesentlich größere Differenzen im Lenkradmomentverlauf wahrnehmen würden. Es ist davon auszugehen, dass die Erhebungsmethodik auf höhere Querbeschleunigungsbereiche daher nicht ohne Anpassung übertragbar ist.

Es wurde bisher davon ausgegangen, dass die maßgeblichen Einflüsse auf ein Lenkgefühl niederfrequenten Charakter besitzen. Beide Eingangsgrößen zur Modellierung des synthetischen Lenkradmoments – Lenkradwinkel und Fahrzeuggeschwindigkeit – wurden als vom Fahrer induziert angenommen und wurden somit Tiefpass gefiltert (Eckfrequenz: 5 Hz).

Nimmt man jedoch an, dass primär hochfrequente Anteile am Lenkradmoment – verursacht durch z.B. Fahrbahnerregung, Radunwuchten oder Motorschwingungen - das Lenkgefühl eines realen Lenkradmoments ausmachen, so wäre die im System vorhandene Regelkreiseckfrequenz von 20Hz als zu gering gewählt. Höhere Frequenzen werden in beiden Modi (real – synthetisch) an das Lenkrad und somit den Fahrer weitergeleitet. Wird dieses Modell in einem SbW-Fahrzeug zur Generierung eines Lenkradmoments eingesetzt werden, so ist zu überprüfen, ob nun das Fehlen der hochfrequenten Anteile vom Fahrer wahrgenommen und das Lenkgefühl beeinflusst wird.

Weiterhin wurde das Modell genutzt, um Parameterbandbreiten von auf dem Markt erhältlichen Fahrzeugen zu bestimmen. Hierbei hat sich die Methode der kleinsten Quadrate als ein sehr robustes und zuverlässiges Verfahren zur Parameteridentifikation bewährt. Allerdings ist bei der Anwendung dieses Verfahrens auf eine möglichst breitbandige Anregung der Ein- und Ausgangsgrößen des Modells zu achten. Diese Forderung wurde beim Auslegen des zu fahrenden Parcours – im Rahmen der Ausmaße des zur Verfügung stehenden Testgelände – umgesetzt. Ändert man jedoch die zeitlichen Anteile der einzelnen Manöver, so hat dies auch Auswirkungen auf die Parameterausprägungen, da die Versuchsfahrt als Ganzes vom gewählten Algorithmus optimiert wird. Versucht man schrittweise einzelne Parameter durch gezielt gestaltete Manöver zu bestimmen, so ist dies lediglich bei der stationären Kreisfahrt für die Parameter des Rückstellmoments möglich. Alle übrigen Parameter können nicht (Reibung, Dämpfung) bzw. äußerst schwierig (Trägheit) einzeln bestimmt werden. Außerdem benötigt man für die Durchführung dieser gezielt gestalteten Fahrmanöver entsprechende Ausmaße eines Versuchsgeländes, die im Rahmen dieser Untersuchung nicht zur Verfügung standen. Die identifizierten Parameterbandbreiten sollten daher primär, wie auch schon in Kapitel 2.1.4 erwähnt, als Orientierungshilfe für die Wahl einer bestimmten Parameterausprägung verstanden werden.

4.1.2 Versuchskonzept

Die Entwicklung des Versuchskonzepts für die Hauptversuche umfasste den Versuchsplan, die Art der Datenerhebung und die Versuchsdurchführung incl. der Parcoursgestaltung.

Der gewählte Versuchsplan besteht aufgrund versuchsökonomischer Gründe aus zahlreichen Kompromissen. Festforderungen für die Untersuchung waren zum einen die Durchführung von Paarvergleichen innerhalb einer maximalen Versuchsdauer von ca. 1h und zum andern das Abprüfen von drei Faktoren (Rückstellmoment, Dämpfung, Reibung) auf eine Lenkradmomentbeurteilung. Hierzu wurde schließlich ein teilhierarchischer Versuchsplan ausgewählt. Selbstverständlich können daher nicht alle drei Faktoren unabhängig beurteilt werden. Es konnten jedoch Tendenzen aufgezeigt und auch statistisch abgesichert werden.

Weiterhin wird durch eine Relativbeurteilung im Paarvergleich die Auswertung stark erschwert. Viele klassische statistische Methoden lassen sich daher nicht anwenden. Es lässt sich keine Variante für sich, sondern immer nur relativ zu den anderen Varianten beurteilen.

4.2 Beurteilung der Ergebnisse

4.2.1 Übertragbarkeit

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse ist insbesondere hinsichtlich der Auswahl und Gestaltung der Parcours, der Fahrzeit (Habituationseffekte) und der Zusammensetzung des Probandenkollektivs zu prüfen.

Es ist eine möglichst große Bandbreite an Fahrsituationen aus dem Normalfahrbereich untersucht worden. Die drei gewählten Schwerpunkte (Stadt, Landstraße, Autobahn) spiegeln drei wichtige Verkehrssituationen mit völlig unterschiedlichen Anforderungen wider. Die gewählten Parcours für Autobahn und Landstraße können, da es sich teilweise um Nachbauten realer Strecken handelt, durch ihre Streckenführung und realitätsgetreue Streckengestaltung als repräsentativer Ersatz angesehen werden. Der durch Pylonen gestaltete Stadtparcours hingegen kann lediglich das Geschwindigkeits- und Lenkradwinkel- sowie Lenkradwinkelgeschwindigkeitsprofil einer Stadtfahrt nachbilden. Die Streckengestaltung und insbesondere die in der Realität gegebene hohe informatorische Belastung (Ampeln, Verkehrsschilder, Fußgänger, ...) eines Stadtverkehrs konnten nicht abgebildet werden. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass die Lenkradmomentbeurteilungen auf dem Stadtparcours in ihrer Übertragbarkeit eingeschränkt sind. Eine höhere informatorische Belastung würde die Wahrnehmung von unterschiedlichen Lenkradmomenten in der hier ausgewählten Bandbreite vermutlich einschränken.

Sowohl der Stadtparcours als auch der Landstraßenparcours konnten aufgrund der zur Verfügung stehenden Flächen bzw. Strecken nicht symmetrisch zum Umschaltpunkt gestaltet werden. Es konnte jedoch durch Vorgaben von Fahrgeschwindigkeiten auf dem Landstraßenparcours und vergleichbare Manöver auf dem Stadtparcours eine Anpassung fahrdynamischer Größen wie Lenkradwinkel, Fahrzeuggeschwindigkeit oder Querbeschleunigung auf beiden Streckenhälften des Paarvergleichs erreicht werden. Da keine Reihenfolgeeffekte bei der Beurteilung der Varianten festzustellen waren, gibt es somit keine Hinweise, dass die Differenzen der beiden Parcoursabschnitte eine Beurteilung der Lenkradmomente beeinflussen.

Die Probanden besaßen nur knapp drei Minuten Zeit, um zwei Lenkradmomentvarianten im Paarvergleich zu beurteilen. Durch das Umschalten während der Fahrt und das damit verbundene sofortige Erleben des Unterschieds beider Varianten ist bereits nach wenigen Sekunden ein vergleichendes Urteil durch den Probanden möglich. Dieses Ergebnis wurde in Voruntersuchungen gewonnen. Ebenfalls stammt aus diesen Voruntersuchungen die Kenntnis, dass sich dieses nach dem Umschalten entwickelte Urteil auch bei längerer Fahrt mit der zweiten Variante nicht mehr verändert. Die Ursache hierfür könnte sein, dass es dem Normalfahrer nicht gelingt, ein gefühltes Lenkradmoment über einen längeren Zeitraum zu speichern. Somit wäre der Normalfahrer auch nicht in der Lage, ein absolutes Urteil abgeben zu können. Auch am Rande der Probandenversuche gemachte Erfahrungen zeigen dies eindrucksvoll. In der Regel waren die Probanden darüber erstaunt, wie sich nach einer Stunde

Versuchsfahrt mit neun verschiedenen Lenkradmomenten das seit Jahren und über mehrere Tausend Kilometer bekannte Lenkradmoment ihres eigenen Fahrzeuges anfühlt. Ein Zusammenhang zwischen dem eigenen Fahrzeug und den bevorzugten Lenkradmomentvarianten wurde nicht gefunden. All diese Erfahrungen sprechen gegen länger andauernde Habituationseffekte bei der Subjektivbeurteilung eines Lenkgefühls. Es gibt keine Hinweise, dass die gewählte Einwirkzeit von ca. 1,5 Minuten pro Lenkradmomentvariante als nicht ausreichend betrachtet werden kann. In anderen Literaturquellen finden sich in der Regel sogar geringere Werte bei Lenkradmomentbeurteilungen (z.B. [45], [247]).

Bei der Auswahl des Probandenkollektivs wurde insbesondere auf die Alters- und Geschlechterverteilung geachtet. Zahlreiche andere demografische und biografische Faktoren konnten jedoch nicht berücksichtigt werden.

Bezüglich der gemachten Aussagen im Abschnitt 3.2.1 kann z.B. nicht ausgeschlossen werden, dass die unterschiedlichen Beurteilungen auf dem Stadtparcours nicht originär dem Alter, sondern der Fahrerfahrung bzw. der Lebensfahrleistung zuzuschreiben sind (**Bild 4–1**). Allerdings ist zu erkennen, dass die Gradienten der Flächen nicht so ausgeprägt erscheinen, wie dies bei der Unterteilung nach dem Alter der Probanden der Fall ist.

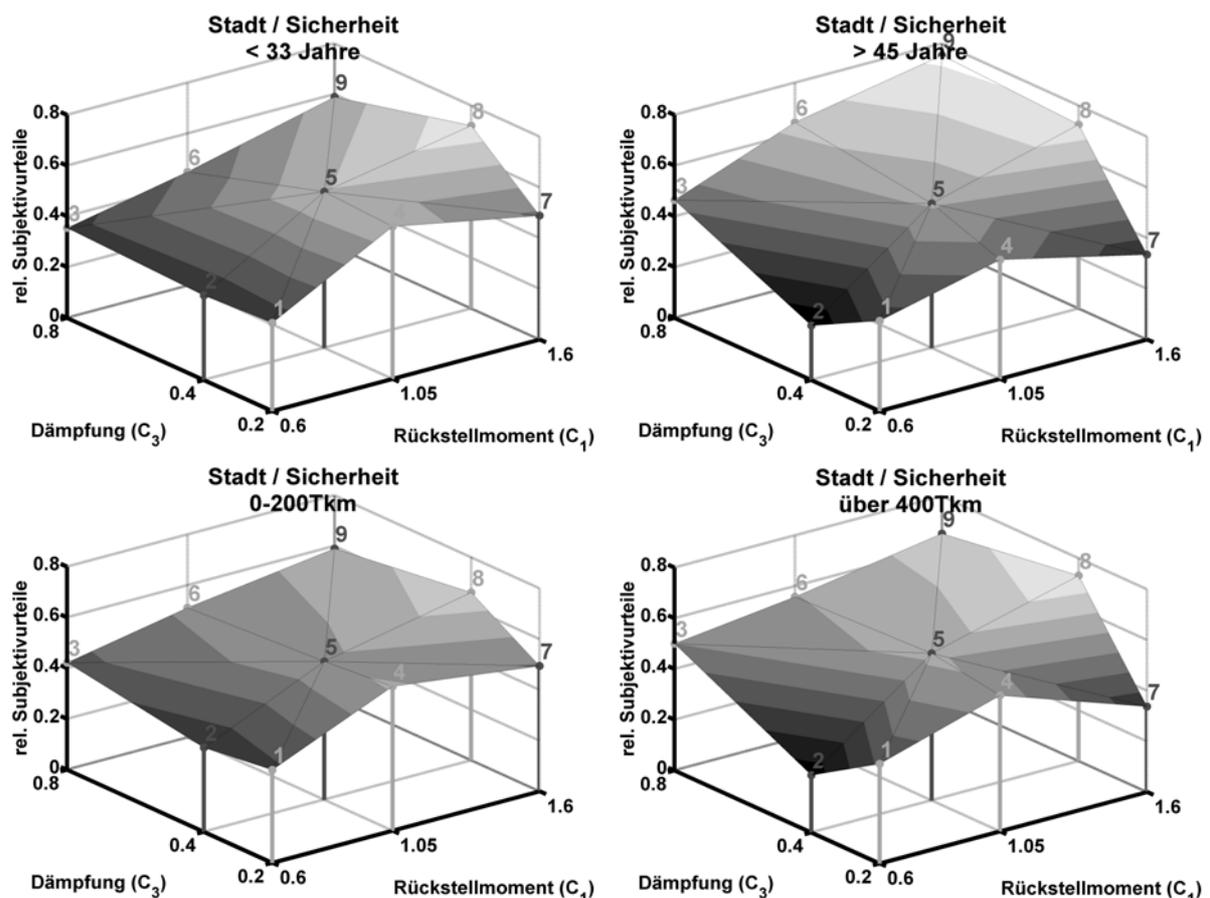


Bild 4–1: Vergleich der empfundenen Sicherheit bei der Unterteilung in Teilkollektive nach dem Alter und der Fahrerfahrung auf dem Stadtparcours.

Die beiden Kategorien „0-200.000 km“ und „mehr als 400.000 km“ sind ausgewählt worden um in etwa gleich große Teilkollektive beurteilen zu können (**Bild 4–2**). Betrachtet man nun lediglich die beiden kleinsten Kategorien (0-50.000 km und 50.001-100.000 km) so ergeben sich widersprüchliche Beurteilungen zu den bisher gemachten Erfahrungen (**Bild 4–3**). Hierbei ist jedoch folgendes zu berücksichtigen: Zum einen liegen die Altersangaben im Gegensatz zur Bildung von Fahrleistungskategorien kontinuierlich vor. Zum anderen kann eine Aussage über das Alter als gesichert angenommen werden, wo hingegen die Lebensfahrleistung in km eine mit Unsicherheiten behaftete Schätzangabe sein dürfte.

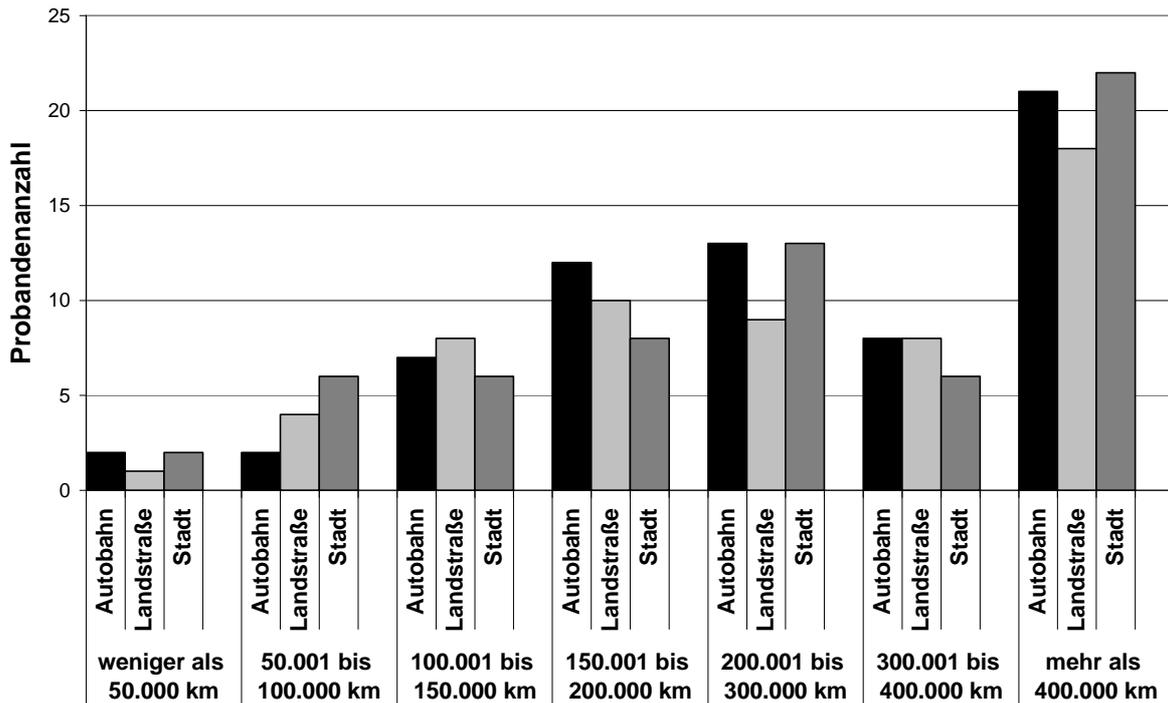


Bild 4–2: Zusammensetzung des Probandenkollektivs (Lebensfahrleistung unterteilt nach Parcours).

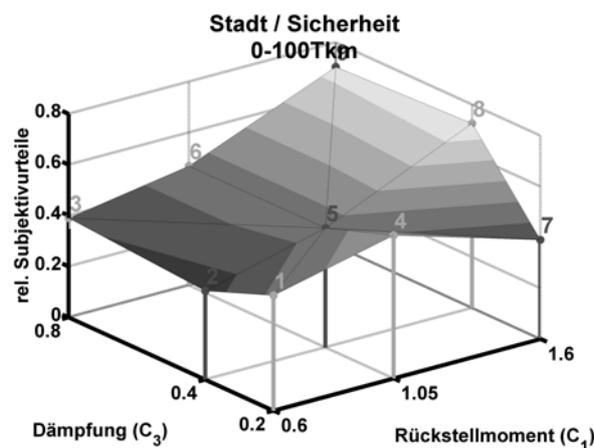


Bild 4–3: Vergleich der empfundenen Sicherheit auf dem Stadtparcours für das Teilkollektiv „0-100.000 km“ Lebensfahrleistung.

Dieses Ergebnis ist nicht überraschend, wenn man sich noch einmal **Bild 2–32** vor Augen führt. Man erkennt, dass bei den vorliegenden Fahrleistungskategorien der angenommene Zusammenhang zwischen Fahrleistungsstufe und Alter nicht vorhanden ist.

Betrachtet man die stark unterschiedlichen Aussagen bezüglich der „empfundene Sportlichkeit/Fahrspaß“ der Teilkollektive „weiblich“ und „männlich“, so stellt sich auch hier die Frage nach der Ursache für die gegensätzlichen Bewertungen.

Im zur Verfügung gestandenen Versuchspersonenkollektiv lässt sich keine eindeutige Entkopplung zwischen Geschlecht und Jahresfahrleistung vornehmen (**Bild 4–4**).

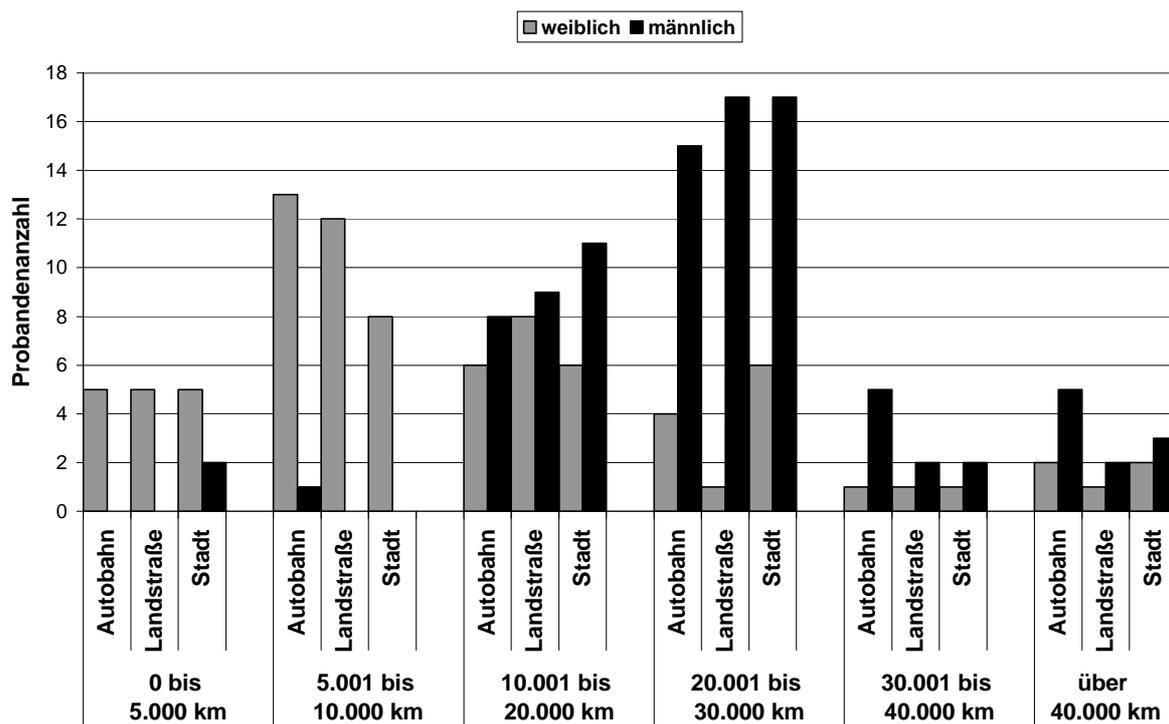


Bild 4–4: Zusammensetzung des Probandenkollektivs
(Jahresfahrleistung unterteilt nach Parcours und Geschlecht).

Betrachtet man nur die Ergebnisse der Kategorie „10.001 bis 20.000 km“ (**Bild 4–5**), die in etwa eine gleichmäßige Verteilung der beiden Geschlechter aufweist, so zeigt sich, dass die bereits bekannte Beurteilung der weiblichen Probanden eindeutig wieder zu erkennen ist. Die Beurteilung der männlichen Probanden weicht zwar von dem zuvor gefundenen Schema etwas ab, zeigt jedoch immer noch eindeutige Unterschiede im Vergleich zur Beurteilung der Varianten durch die Frauen.

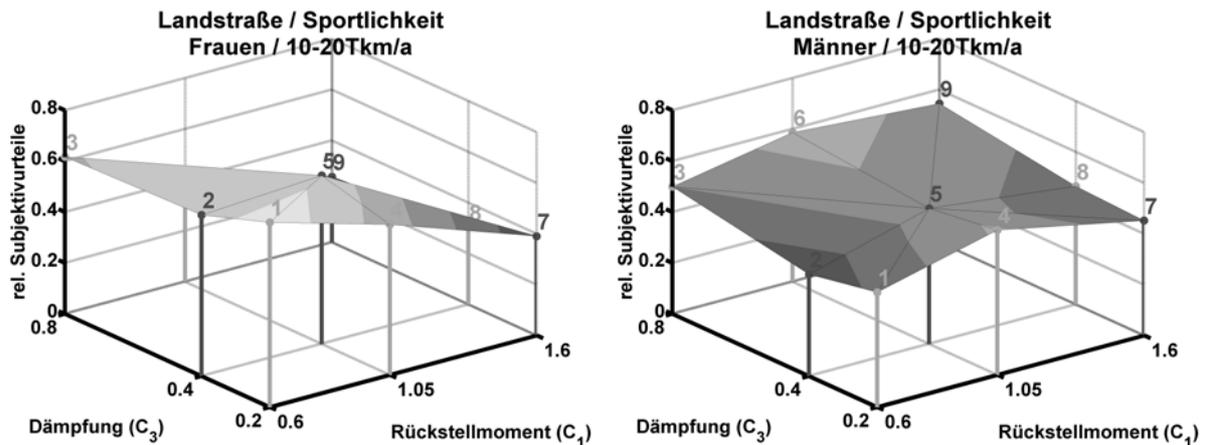


Bild 4–5: Vergleich des empfundenen Fahrspaßes/Sportlichkeit zwischen weiblichen und männlichen Probanden auf dem Landstraßenparcours der Fahrleistungskategorie 10.001 bis 20.000 km/a.

Die separierte Betrachtung der Antworten männlicher Probanden mit niedriger Jahresfahrleistung (< 10.000 km) und weiblicher Probanden mit hoher Jahresfahrleistung (> 40.000 km) wäre für den Landstraßenparcours nicht und für den Autobahnparcours nur in einem einzigen Fall durchführbar. Auch wenn die Ergebnisse dieser beiden Probanden nicht den bisherigen Erkenntnissen widersprechen, dürfen aufgrund der geringen Anzahl der vergleichbaren Fahrten hieraus keine Schlüsse abgeleitet werden.

Frauen beurteilen niedrige Lenkradmomente als sportlich, Männer hingegen empfinden bei hohen Lenkradmomenten mehr Fahrspaß. Dies gibt Anlass zu der Annahme, dass Frauen „Sportlichkeit“ bzw. „Fahrspaß“ anders definieren als Männer. Es wird vermutet, dass das Verständnis dieser Begriffe bei Frauen sich eher als Agilität widerspiegelt, wohingegen von den männlichen Probanden der Sport mehr mit körperlicher Betätigung in Verbindung gebracht wird.

Die Übertragbarkeit der in dieser Arbeit gefundenen Ergebnisse auf die Gesamtheit aller Autofahrer ist schon aufgrund des sehr speziellen Fahrerkollektives begrenzt. Dies betrifft zum einen die begrenzte Anzahl von Autofahrern und zum andern die regional begrenzte Herkunft der Probanden.

Ebenfalls ist die Übertragbarkeit der Ergebnisse bei veränderten Fahrzeugparametern unklar. Hier ist bezüglich einer Beeinflussung des Lenkgefühls in erster Linie die Lenkübersetzung zu nennen. Aber auch zahlreiche andere Fahrzeugparameter (Masse, Reifenbauart, Reifenluftdruck, Reibbeiwert, ...) beeinflussen das Lenkradmoment und somit eventuell auch die Lenkradmomentbeurteilung durch Normalfahrer.

4.2.2 Relevanz

Die zu Beginn der Arbeit im Kapitel 1.1 erwähnten Probleme und Ziele bei der Erhöhung des Kundennutzens durch eine Individualisierung der Produkte können nun an den gefundenen Ergebnissen reflektiert werden.

Die bereits auf dem Markt befindlichen EPS-Systeme könnten auf einfache Weise unterschiedliche Lenkradmomentkennlinien realisieren. Erste Hersteller beginnen dieses Potenzial zu nutzen [9]. Jedoch fehlen im Allgemeinen die Richtlinien für eine zielgruppenorientierte Auslegung des HMI. Die Untersuchung zeigt auf, wie sich die Beurteilungen der Lenkradmomente zwischen einzelnen Teilkollektiven unterscheiden. Die dargestellten Ergebnisse bieten somit die Grundlage für eine Anpassung des Lenkradmoments an die unterschiedlichen Bedürfnisse einzelner Gruppen. Da auch komplett gegensätzliche Beurteilungen von Teilkollektiven vorliegen, ist von einem entsprechend großen Kundennutzen auszugehen.

Weiterhin kann das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Modell zur Generierung von synthetischen Lenkradmomenten gerade im Hinblick auf zukünftige SbW-Systeme als Ausgangsbasis für seriennahe Modelle dienen. Insbesondere die hohe, in Versuchen bestätigte Abbildungsqualität des Modells sollte diese Aussage rechtfertigen. Insbesondere ist auch die Aussage über für Normalfahrer im Normalfahrbereich relevante und weniger relevante Anteile des Lenkradmoments für die Entwicklung seriennaher Modelle von großer Bedeutung, da diese die Komplexität eines solchen Systems maßgeblich beeinflussen.

Die entwickelte Methodik (Kapitel 2) zur Ermittlung von bevorzugten Lenkradmomenten kann auch als Ausgangsbasis für Untersuchungen zur Auslegung der anderen Betätigungseinheiten im Fahrzeug dienen. In zukünftigen X-by-Wire-Systemen ist somit eine Anpassung aller primären Stellglieder an Personengruppen und Fahrsituationen denkbar. Allerdings wird die Anzahl der zu untersuchenden Auslegungsvarianten begrenzt sein. Im Rahmen dieser Untersuchung erwiesen sich mehr als neun unterschiedliche Lenkradmomentvarianten unter versuchsökonomischen Gesichtspunkten als nicht mehr sinnvoll.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Durch den vermehrten Einzug von mechatronischen Systemen in das Fahrzeug (z.B. elektromechanische Lenkkraftunterstützung) ist der Fahrzeughersteller in der Lage, durch Veränderung der Software den Charakter seiner Fahrzeuge zu beschreiben. Eine Anpassung von Parametersätzen ermöglicht eine gezielte Reaktion auf Kundenwünsche. Es ist daher wünschenswert, den späteren Kunden in den Entwicklungsprozess solcher Systeme mit einzubeziehen, um dessen Bedürfnisse zu identifizieren. Bezogen auf die Lenkung eines Fahrzeugs resultiert dies in einer fahrertyp- und fahrsituationsspezifischen Gestaltung der haptischen Rückmeldung des HMI „Lenkrads“. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde das Lenkradmoment betrachtet.

Um die individuellen Vorlieben der einzelnen Kundengruppen zu definieren, sind subjektive Beurteilungen der Lenkung durch eben diese Kunden notwendig. Aufgrund der geringeren Beurteilungsleistung von Normalfahrern ist für solch eine Untersuchung ein angepasstes Versuchsdesign notwendig. Es wurde unter versuchsökonomisch vertretbarem Aufwand der Zielkonflikt zwischen den zahlreichen Freiheitsgraden einer Lenkradmomentgestaltung und der fehlenden Möglichkeit des Normalfahrers, eine Absolutbeurteilung bezüglich des Lenkradmoments abgeben zu können, aufgelöst.

Durch eine Identifikation von auf dem Markt vorhandenen Lenkradmomentcharakteristiken konnte ein Lenkradmomentmodell mit nur drei Freiheitsgraden (Rückstellmoment, Dämpfung, Reibung) entwickelt werden, welches eine für den Normalfahrer ausreichende Abbildungsqualität besitzt. Auf Basis dieses Modells wurden neun Varianten gestaltet, die schließlich von insgesamt 197 Probanden auf drei Parcours (Autobahn, Landstraße, Stadt) hinsichtlich der Kriterien „Komfort“, „Sportlichkeit/Fahrspaß“, „Sicherheit“ und „Allgemeine Bevorzugung“ subjektiv beurteilt wurden. Bei der Auswertung wurden hinsichtlich einer Individualisierung des HMI auf bestimmte Kundengruppen die Teilkollektive „weiblich / männlich“ und „< 33 Jahre / > 45 Jahre“ betrachtet.

Für das Kriterium „empfundene Sicherheit“ konnte auf dem Landstraßenparcours und dem Autobahnparcours eine durchgängige von allen Teilkollektiven gestützte Aussage zu präferierten Lenkradmomentvarianten gemacht werden. Es zeigte sich jedoch, dass auf dem Stadtparcours eine widersprüchliche Beurteilung der Teilkollektive „< 33 Jahre / > 45 Jahre“ vorhanden war. Während die Gruppe der jüngeren Fahrer höhere Dämpfungsanteile am Lenkradmoment wünschte, bevorzugte die Gruppe der älteren Fahrer niedrigere Dämpfungsanteile am Lenkradmoment.

Bei der Betrachtung der Teilkollektive „weiblich / männlich“ ergaben sich gegensätzliche Beurteilungen des Kriteriums „empfundener Fahrspaß/Sportlichkeit“ insbesondere auf dem Landstraßenparcours. Während weibliche Probanden bei den Varianten mit niedrigen Lenkmomenten mehr Fahrspaß empfinden, beurteilen die männlichen Probanden diejenigen mit hohen Lenkradmomenten als sportlicher.

Weiterhin wurde gezeigt, dass eine Unterscheidung der Teilkollektive durch fahrdynamische Kennwerte mit statistischen Methoden möglich ist.

Die gefundenen Optimierungspotentiale lassen sich in den bereits auf dem Markt verbreiteten EPS-Systemen, aber auch in zukünftigen Steer-by-Wire-Systemen implementieren. Obwohl im vorliegenden Fall die Teilkollektive durch Kennwerte unterschieden werden konnten, sind aufgrund der geringen Unterschiede der Mittelwerte und den hohen Standardabweichungen die Kennwerte für die Umsetzung einer adaptiven Lenkradmomentgestaltung als ungünstig zu betrachten. Eine Umsetzung der Individualisierung ist jedoch auch durch die aktive Wahl einer Lenkradmomentvariante durch den Fahrer denkbar, wie es heute z.B. bereits bei der Wahl der Charakteristik des Schaltprogramms eines Automatikgetriebes oder des Übertragungsverhaltens der Schwingungsdämpfer im Fahrwerk verbreitet ist.

Ein Problem bleibt die Klärung der Frage nach der Interaktion verschiedener Parameter auf ein Lenkgefühl. Dies betrifft sowohl Lenksystem inhärente Parameter (Lenkübersetzung, Lenkraddurchmesser, ...) als auch Parameter anderer Fahrzeugbereiche (Fahrwerk, Akustik, Klima, Design, ...). Eine gesamtheitliche Betrachtung des HMI im Fahrzeug wäre zwar wünschenswert, ist jedoch aufgrund des notwendigen enormen Versuchsaufwands derzeit nicht erkennbar. Mit dieser Arbeit wurden die Grenzen einer Probandenstudie erreicht. Weitergehende grundlegende Untersuchungen zum Lenkgefühl sind unter vertretbarem Aufwand nicht mehr darstellbar. Es werden daher zunächst Teilaspekte betrachtet werden müssen, die nach und nach das Verständnis über den Zusammenhang der einzelnen Parameter aufbauen. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte am Beispiel der Lenkradmomentauslegung gezeigt werden, dass fahrertyp- und fahrsituationsspezifische Unterschiede existieren und somit die Gestaltung des HMI „Lenkung“ ein bisher nicht genutztes Potenzial zur Erhöhung der Kundenzufriedenheit bietet.

6 Anhang

6.1 Parameteridentifikation

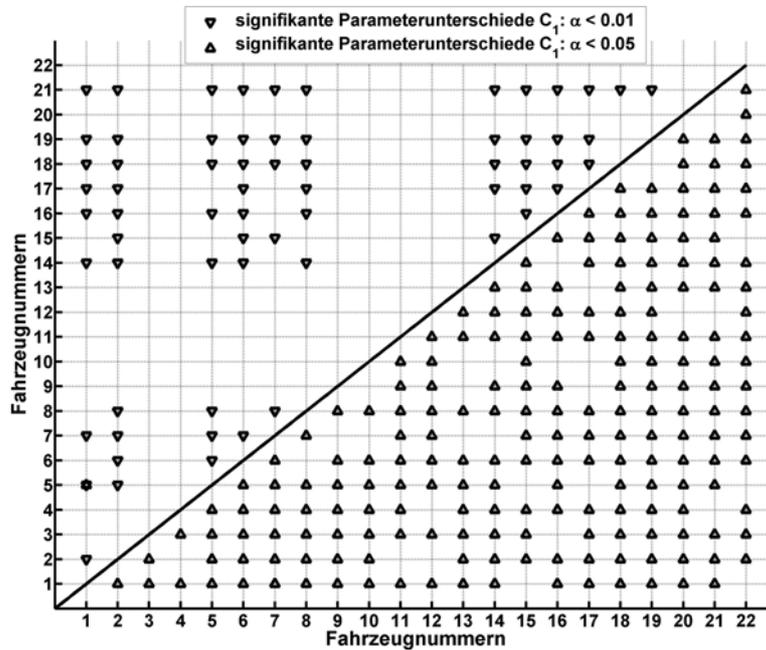


Bild 6–1: Darstellung signifikanter Unterschiede des Parameters C_1 (Rückstellmoment) auf den Niveaus $\alpha = 0,01$ und $\alpha = 0,05$ für alle 22 vermessenen Fahrzeuge.

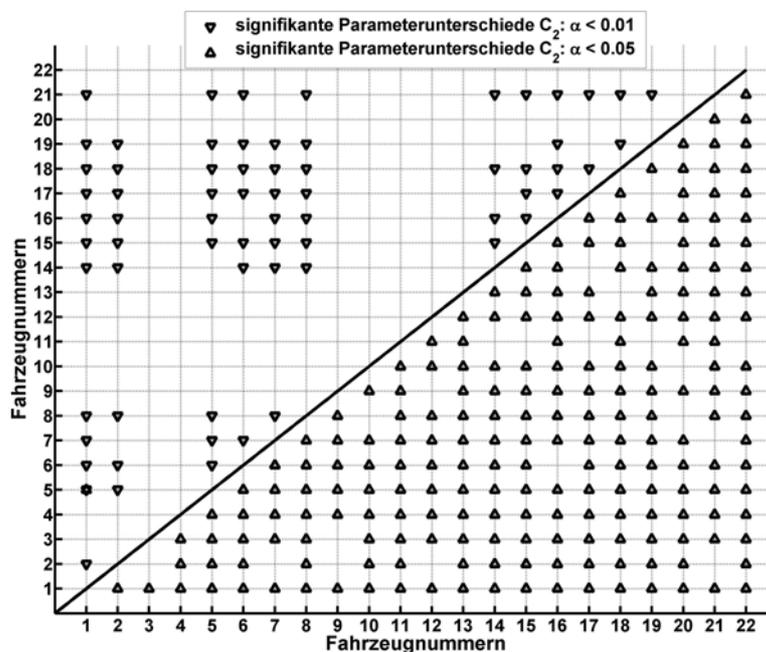


Bild 6–2: Darstellung signifikanter Unterschiede des Parameters C_2 (Sättigung des Rückstellmoments / Cut) auf den Niveaus $\alpha = 0,01$ und $\alpha = 0,05$ für alle 22 vermessenen Fahrzeuge.

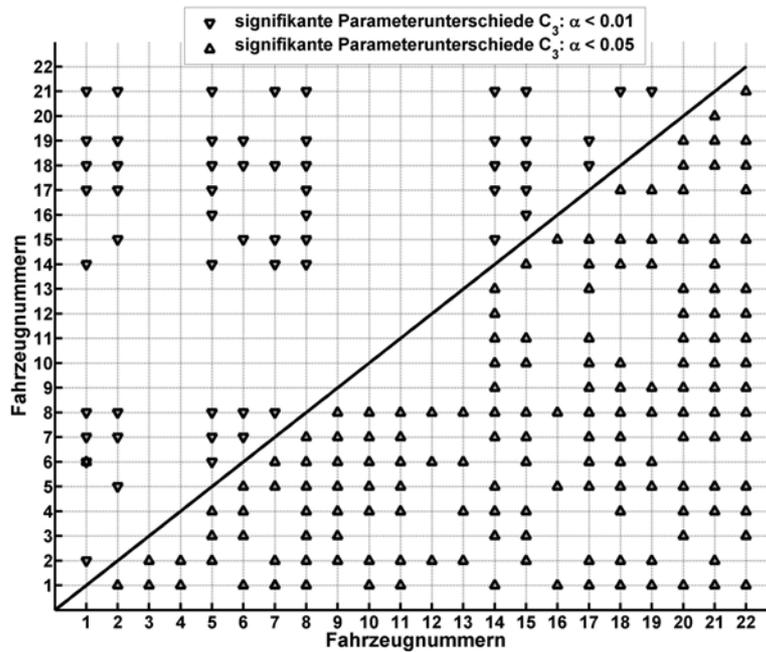


Bild 6–3: Darstellung signifikanter Unterschiede des Parameters C_3 (Dämpfungsmoment) auf den Niveaus $\alpha = 0,01$ und $\alpha = 0,05$ für alle 22 vermessenen Fahrzeuge.

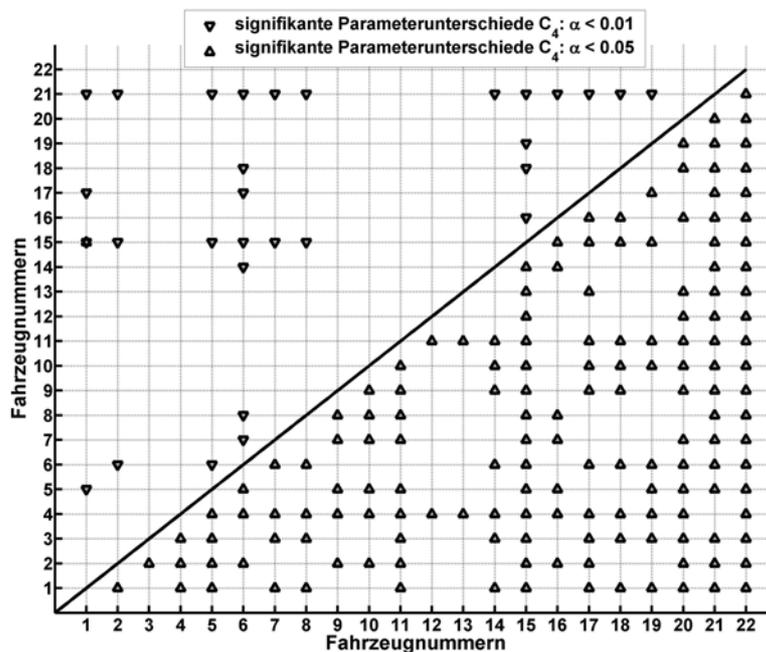


Bild 6–4: Darstellung signifikanter Unterschiede des Parameters C_4 (Reibmoment) auf den Niveaus $\alpha = 0,01$ und $\alpha = 0,05$ für alle 22 vermessenen Fahrzeuge.

Tabelle 6–1: Bezeichnung und Baujahr der 22 zur Lenkradmomentidentifikation vermessenen Fahrzeuge.

Fahrzeugnummer	Fahrzeugbezeichnung	Baujahr
1	BMW 735i	2002
2	BMW X5 3.0i	2001
3	Jaguar X-Type V6	2001
4	Mercedes S500	1998
5	Audi A8 4.2 quattro	1998
6	Passat W8 4motion	2001
7	Audi A4	2000
8	Honda S2000	2001
9	Mini Cooper	2002
10	Porsche Carrera 996	2001
11	Audi 100 2,8	1991
12	VW Golf VR6	2002
13	Toyota Corolla	2002
14	Hyundai ATOZ	1997
15	Hyundai Coupe 2.7	2001
16	Opel Omega 2,5 DTI	2002
17	Jaguar XJ 8	2002
18	Opel Astra 1,6 Caravan	1997
19	Chrysler Voyager	2002
20	Citroen C5 HDI	2001
21	BMW 328Ci	2000
22	Citroen XM	1997

6.2 Vorversuche

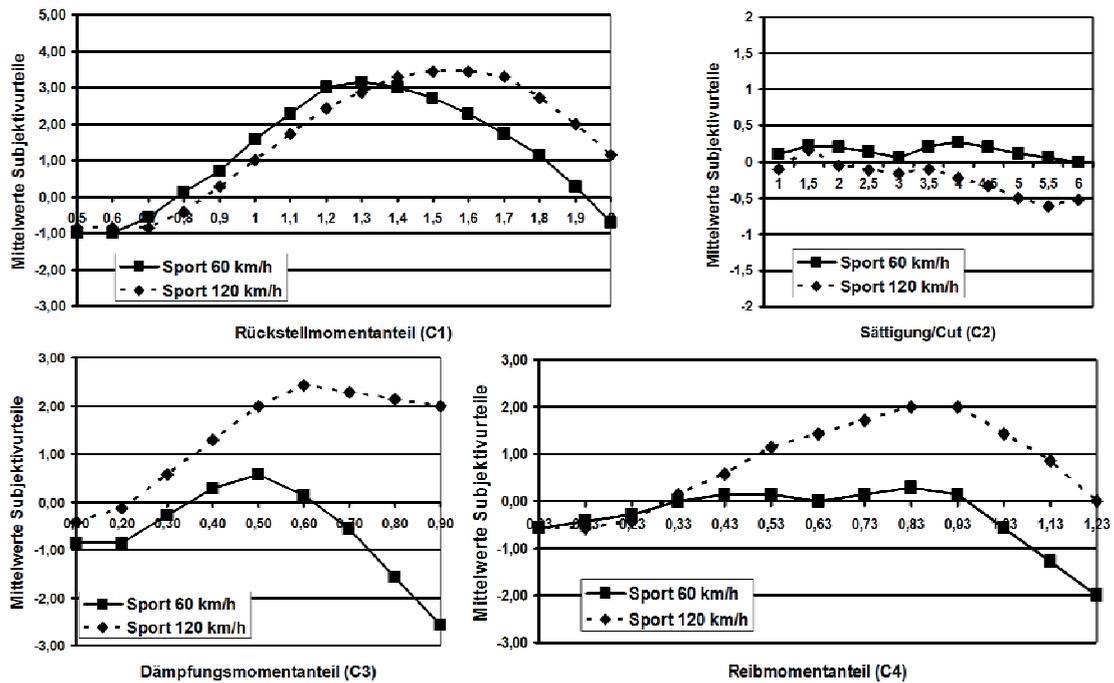


Bild 6–5: Darstellung der Vorversuchsergebnisse zur Beurteilung der Veränderung der Parameter C_1 (Rückstellmoment), C_2 (Sättigung/Cut), C_3 (Dämpfung) und C_4 (Reibung) für das Kriterium „empfundene Sportlichkeit/Fahrspaß“.

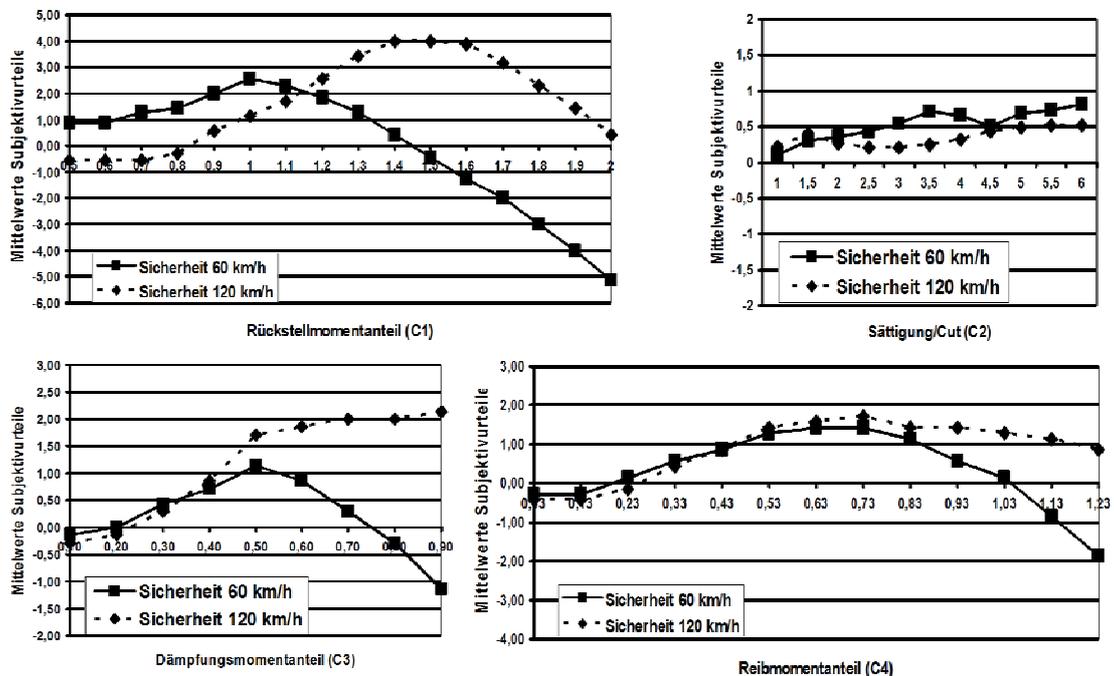


Bild 6–6: Darstellung der Vorversuchsergebnisse zur Beurteilung der Veränderung der Parameter C_1 (Rückstellmoment), C_2 (Sättigung/Cut), C_3 (Dämpfung) und C_4 (Reibung) für das Kriterium „empfundene Sicherheit“.

6.3 Korrelationskoeffizienten

Tabelle 6–2: Korrelationskoeffizienten der Verteilungen der rel. Subjektivurteile der vier Beurteilungskriterien auf den drei Parcours des Teilkollektivs „< 33 Jahre“ (Korrelationskoeffizienten $|r| \geq 0,8$: fett gedruckt und grau hinterlegt).

		Autobahn				Landstraße				Stadt			
		Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung
Autobahn	Komfort												
	Sportlichkeit	-0,12											
	Sicherheit	-0,30	0,66										
	Bevorzugung	0,16	0,87	0,73									
Landstraße	Komfort	0,56	-0,41	-0,23	-0,26								
	Sportlichkeit	0,64	0,37	0,33	0,71	0,16							
	Sicherheit	-0,38	0,30	0,89	0,41	0,00	0,20						
	Bevorzugung	-0,07	0,38	0,87	0,57	0,16	0,48	0,91					
Stadt	Komfort	0,55	0,03	-0,03	0,31	-0,06	0,48	-0,17	0,03				
	Sportlichkeit	0,31	0,37	0,31	0,55	-0,21	0,36	0,04	0,22	0,86			
	Sicherheit	0,10	0,47	0,80	0,73	-0,27	0,58	0,64	0,71	0,50	0,64		
	Bevorzugung	0,36	0,35	0,38	0,58	-0,27	0,52	0,15	0,32	0,89	0,93	0,80	

Tabelle 6–3: Korrelationskoeffizienten der Verteilungen der rel. Subjektivurteile der vier Beurteilungskriterien auf den drei Parcours des Teilkollektivs „> 45 Jahre“ (Korrelationskoeffizienten $|r| \geq 0,8$: fett gedruckt und grau hinterlegt).

		Autobahn				Landstraße				Stadt			
		Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung
Autobahn	Komfort												
	Sportlichkeit	0,40											
	Sicherheit	0,99	0,43										
	Bevorzugung	0,98	0,51	0,99									
Landstraße	Komfort	0,56	0,09	0,53	0,52								
	Sportlichkeit	0,35	0,27	0,32	0,34	0,81							
	Sicherheit	0,82	0,10	0,78	0,75	0,90	0,68						
	Bevorzugung	0,61	0,09	0,58	0,55	0,98	0,84	0,93					
Stadt	Komfort	0,76	0,26	0,81	0,78	0,20	0,14	0,50	0,29				
	Sportlichkeit	0,81	0,26	0,82	0,79	0,48	0,36	0,73	0,58	0,89			
	Sicherheit	0,84	0,21	0,82	0,80	0,44	0,43	0,75	0,57	0,88	0,93		
	Bevorzugung	0,83	0,24	0,85	0,83	0,34	0,31	0,66	0,44	0,96	0,93	0,97	

Tabelle 6–4: Korrelationskoeffizienten der Verteilungen der rel. Subjektivurteile der vier Beurteilungskriterien auf den drei Parcours des Teilkollektivs „weiblich“ (Korrelationskoeffizienten $|r| \geq 0,8$: fett gedruckt und grau hinterlegt).

	Autobahn				Landstraße				Stadt			
	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung
Autobahn	Komfort											
	Sportlichkeit	-0,72										
	Sicherheit	0,96	-0,76									
	Bevorzugung	0,94	-0,59	0,93								
Landstraße	Komfort	0,42	-0,72	0,39	0,16							
	Sportlichkeit	-0,73	0,75	-0,86	-0,72	-0,26						
	Sicherheit	0,68	-0,90	0,70	0,47	0,91	-0,59					
	Bevorzugung	0,55	-0,76	0,51	0,30	0,96	-0,30	0,94				
Stadt	Komfort	0,55	-0,23	0,47	0,71	-0,24	-0,23	-0,01	-0,04			
	Sportlichkeit	0,42	-0,22	0,33	0,58	-0,29	-0,18	-0,09	-0,14	0,95		
	Sicherheit	0,94	-0,73	0,91	0,91	0,27	-0,81	0,57	0,37	0,59	0,52	
	Bevorzugung	0,74	-0,47	0,69	0,84	-0,12	-0,57	0,19	0,04	0,90	0,88	0,85

Tabelle 6–5: Korrelationskoeffizienten der Verteilungen der rel. Subjektivurteile der vier Beurteilungskriterien auf den drei Parcours des Teilkollektivs „männlich“ (Korrelationskoeffizienten $|r| \geq 0,8$: fett gedruckt und grau hinterlegt).

		Autobahn				Landstraße				Stadt			
		Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung	Komfort	Sportlichkeit	Sicherheit	Bevorzugung
Autobahn	Komfort												
	Sportlichkeit	0,62											
	Sicherheit	0,59	0,93										
	Bevorzugung	0,69	0,94	0,97									
Landstraße	Komfort	0,37	0,30	0,24	0,21								
	Sportlichkeit	0,58	0,93	0,96	0,92	0,43							
	Sicherheit	0,36	0,81	0,84	0,78	0,58	0,92						
	Bevorzugung	0,46	0,82	0,86	0,81	0,63	0,95	0,98					
Stadt	Komfort	0,22	0,37	0,24	0,17	0,01	0,29	0,05	0,10				
	Sportlichkeit	0,35	0,83	0,90	0,80	0,22	0,84	0,77	0,79	0,34			
	Sicherheit	0,44	0,89	0,89	0,80	0,41	0,91	0,87	0,85	0,40	0,92		
	Bevorzugung	0,41	0,81	0,83	0,71	0,23	0,81	0,67	0,68	0,64	0,91	0,94	

7 Literatur

- [1] Abe, M., Shibahta, Y., Shimizu, Y.: Analysis on Steering Gain and Vehicle Handling Performance with Variable Gear-ratio Steering System (VGS). In: Proceedings of 28th Fisita World Congress (2000), Seoul, Korea, 12.-15.6.2000, F2000G349
- [2] Abe, M.: A Theoretical Prediction of Subjective Handling Evaluation. In: VDI-Berichte 368, 261-266. Düsseldorf: VDI, 1980
- [3] Abendroth, B.: Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandsregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen. Schriftenreihe Ergonomie, Stuttgart: ergonomia Verlag, 2001
- [4] Ackert, H.: Ergonomische Beurteilung von Kriterien des Lenkgefühls anhand objektiv meßbarer Regel- und Fahrleistungen. Dissertation, Technische Universität Darmstadt – in Bearbeitung
- [5] Adams, F.-J.: Power Steering “Road Feel”. SAE Technical Paper Series 830998. Warrendale: SAE, 1981
- [6] Ahring, E.: Fahrerorientierte Auslegung einer Allradlenkung. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1994
- [7] Allen, R.: Stability and Performance Analysis of Automobile Driver Steering Control. SAE Technical Paper Series 820303. Warrendale: SAE, 1982
- [8] Audi: Der neue Audi A8. Ingolstadt: Audi AG, Pressemappe, 9/2002
- [9] Ayoubi, M., Ruck, G.: EPS – Electric Power Steering im BMW Z4. In: Tagungsband Fahrwerktechnik – Haus der Technik e.V., München, Deutschland, 2.-4.6.2003
- [10] Bachmann, V.: Berechnung des Radrückstellmoments zur Erzeugung des Lenkgefühls bei einem Steer-by-Wire Fahrzeug. In: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, 437, 92-112. Düsseldorf: VDI, 2000
- [11] Badawy, A. et al.: Modeling and Analysis of An Electric Power Steering System. SAE Technical Paper Series 1999-01-0399. Warrendale: SAE, 1999
- [12] Baxter, J.: Analysis of Stiffness and Feel for a Power-assisted rack and pinion steering gear. SAE Technical Paper Series 880706. Warrendale: SAE, 1988
- [13] Beermann, H.-J.: Experimentelle Untersuchungen über Fahrzeugauslegung und Lenkverhalten von Kraftfahrzeugen. Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik (D.K.S.), Heft 209. Düsseldorf: VDI, 1971
- [14] Bellmann, M. et. Al.: Wirkung von Sitz- und Lenkradvibrationen auf den Komfort im Fahrzeug. In: Tagungsband Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.12.-4.12.01. Renningen: expert, 2002
- [15] Bernotat, B.: Ergonomische Kriterien und Bewertungsmethoden zur Gestaltung und Anordnung von Bedienelementen im Kraftfahrzeug. In: Tagungsband Arbeitsplatz Auto: 5. Symposium Verkehrsmedizin des ADAC, Baden-Baden, Deutschland, 25.-26.11.1983, 199-210
- [16] Bertollini, G., Johnston, C.: Driving Simulation at General Motors. In: Automotive Engineering, 102 / 9, 14-19. Warrendale: SAE, 1994
- [17] Bertollini, G.-P.; Hogan, R. M.: Applying Driving Simulation to Quantify Steering Effort Preference as a Function of Vehicle Speed. SAE Technical Paper Series 1999-01-0394. Warrendale: SAE, 1999

- [18] Bielaczek, C.: Auswirkungen einer aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit von PKW im realen Straßenverkehr. In: Tagungsband PKW Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen (2001) – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.-4.4.01
- [19] Bielaczek, C.: Untersuchungen zur Auswirkung einer aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit beim Pkw-Fahren im realen Straßenverkehr. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, 357. Düsseldorf: VDI, 1998
- [20] Bill, K.: Fallstudienuntersuchung von ABS-Pedalvibrationen bei Kurvenbremsungen. In: Tagungsband Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.12.-4.12.01. Renningen: expert, 2002
- [21] Bill, K.-H.; Semsch, M.; Breuer, B.: A New Approach to Investigate the Vehicle Interface Driver/Brake Pedal under Real Road Conditions in View of oncoming Brake-by-Wire-Systems. SAE Technical Paper Series 1999-01-2949. Warrendale: SAE, 1999
- [22] Binfet-Kull, M.: Entwicklung einer Steer-by-wire-Architektur nach zuverlässigkeits- und sicherheitstechnischen Vorgaben. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Mainz, 2001
- [23] Birshing, J.: Two Dimensional Modeling of a Rotary Power Steering Valve. SAE Technical Paper Series 1999-01-0396. Warrendale: SAE, 1999.
- [24] BMW: Das neue BMW 6er Coupé. München: Bayerische Motoren Werke AG, Produktkatalog, 12/2003
- [25] BMW: Die neue BMW 5er Limousine. München: Bayerische Motoren Werke AG, Produktkatalog, 12/2003
- [26] BMW: Dimensions of 7. München: Bayerische Motoren Werke AG, Pressemappe, 07/2001
- [27] Boller H.-E., Krüger, W.: Untersuchung eines Bedienelementes mit Kraftergänzung und Wegrückmeldung zur Lenkung von Unterwasserfahrzeugen. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft (1978), 32/4, 254-260. Stuttgart: ergonomia
- [28] Bolte, U., Bubb, H.: Regelungstechnische Simulation der Schnittstelle Mensch-Maschine. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft (1990), 44/1, 6-13. Stuttgart: ergonomia
- [29] Bolte, U.: Das aktive Stellteil. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 17, 75. Düsseldorf: VDI, 1991
- [30] Bolte, U.: Systemergonomische Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle. In: VDI-Berichte, 948, 157-174. Düsseldorf: VDI, 1992.
- [31] Bornemann, H., Fleischmann, O., Marx, W.: Die elektrische Servolenkung im OPEL Corsa. In: Tagungsband PKW Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen (2001) – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.-4.4.01
- [32] Bortz, J.: Statistik für Sozialwissenschaftler. 5. Aufl. Berlin: Springer, 1999
- [33] Braess, H.-H.: Beitrag zur Stabilität des Lenkverhaltens von Kraftfahrzeugen. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1967) 3, 81-84. Wiesbaden: Vieweg
- [34] Braess, H.-H.: Lenkung und Lenkverhalten von Personenkraftwagen – Was haben die letzten 50 Jahre gebracht, was kann und muß noch getan werden? In: VDI-Berichte, 1632, 13-55. Düsseldorf: VDI, 2001.
- [35] Braess, H.-H.: Steuerung und Regelung im Kfz – eine systematische Betrachtung. In: VDI-Berichte 612, 539-546. Düsseldorf: VDI, 1986.

-
- [36] Braess, H.-H.: Steuerung und Regelung im Kfz – eine systematische Betrachtung. In: Automobil Industrie (1987) 5, 492-500. Würzburg: Vogel Auto Medien
- [37] Brenner, P., Bieber, J., Ottenstein, A.: Dual Pinion – Vorteile einer Elektrolenkungsvariante. In: Tagungsband PKW Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen (2001) – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.-4.4.01
- [38] Breuer, J.: Beurteilung des Fahrverhaltens am Daimler-Benz Fahr Simulator und in realen Fahrzeugen. In: Tagungsband Subjektive Fahrindrücke sichtbar machen – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 30.11.-1.12.98
- [39] Bubb, H.: Arbeitsplatz Fahrer – Eine ergonomische Studie. In: Automobil Industrie (1985) 3, 265-275. Würzburg: Vogel Auto Medien
- [40] Bubb, H.: Chancen von Drive-by-Wire? Vortrag im Rahmen des Fahrzeug- und Motortechnisches Seminars an der Technischen Universität Darmstadt (2001), Darmstadt, Deutschland, 29.11.2001
- [41] Bubb, H.: Haptik im Kraftfahrzeug. In: Kraftfahrzeugführung. Berlin: Springer, 2001
- [42] Bubb, H.: Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen? In: Fahrversuche mit Probanden – Nutzwert und Risiko. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, 557, 26-39. Düsseldorf: VDI, 2003
- [43] Bünte, T.: Beiträge zur robusten Lenkregelung von Pkw. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, 366. Düsseldorf: VDI, 1998
- [44] Burkhart, H.: Untersuchungen zur fahrerrelevanten Reifenbeurteilung bei benetzten Fahrbahnoberflächen. Dissertation, Technische Universität Karlsruhe, 1990
- [45] Buschardt, B.: Synthetische Lenkmomente. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 22, 12. Düsseldorf: VDI, 2003
- [46] Cai, B.: Neural Networks, Fuzzy Logic, and Optimal Control for Vehicle Active Systems with Four-Wheel Steering and Active Suspension. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, 196. Düsseldorf: VDI, 1993
- [47] Carpenter, P.-N.: Steering gear developments. In: Automotive Technology International (1986), 127-128. London: Sterling
- [48] Caviasso, G. et al.: Four Wheel Steering Potentiality to Customize Simple Suspension Vehicle Handling. SAE Technical Paper Series 2003-01-0579. Warrendale: SAE, 2003.
- [49] Caviasso, G. et al.: Improving Vehicle Handling and Comfort Performance Using 4WS. SAE Technical Paper Series 2003-01-0961. Warrendale: SAE, 2003.
- [50] Chenchanna, P.: Untersuchungen über das Lenkverhalten von Fahrzeugen bei verschiedenen Modellen für den Fahrer. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1966
- [51] Clark, B., Steward, J. D.: Perception of Angular Acceleration about the Yaw Axis of a Flight Simulator. In: Aerospace Medicine (1962), 33. Springfield, USA: NTIS
- [52] Continental: Zielkonflikt zwischen Komfort und Handling entschärft. Hannover: Continental AG, Pressemitteilung, 5/2002
- [53] Crolla, D. A.; Chen, D. C.; Whitehead, J. P.: Vehicle Handling Behaviour: Subjective v. Objective Comparisons. In: Proceedings of 27th Fisita World Congress (1998), Paris, Frankreich, 27.9.-1.10.1998, F98T210

- [54] Crolla, D.; King, R.; Ash, H.: Subjective and Objective Assessment of Vehicle Handling Performance. In: Proceedings of 28th Fisita World Congress (2000), Seoul, Korea, 12.-15.6.2000, F2000G346
- [55] Data, S., Frigerio, F.: Objective evaluation of handling quality. In: Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers (2002), 216, D, 297-305
- [56] Deppermann, K. H.: Fahrversuche und Berechnungen zum Geradeauslauf von Personenkraftwagen. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, 133. Düsseldorf: VDI, 1989
- [57] Deppermann, K. H.: Geradeauslauf von Pkw – Fahrversuche und Berechnungen. In: Automobil Industrie (1989) 3, 261-274. Würzburg: Vogel Auto Medien
- [58] Dettki, F.: A test method for the quantification of on-centre handling with respect to cross-wind. In: Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers (2002), 216, D, 259-266
- [59] Dettki, F.: Methoden zur Bewertung des Geradeauslaufs von Pkw. In: VDI-Berichte 1335, 385-405. Düsseldorf: VDI, 1997
- [60] Dibbern, K.; Laermann, F.-J.; Matheis, A.: Zur Relevanz eines Fahrermodells bei der Analyse von Fahrzeugkonzepten. Beschreibung der Modellannahmen und Vergleich von Open-Loop und Closed-Loop-Simulationen – Teil 1 (IPG-Driver). In: Automobil Industrie (1992) 2, 97-102. Würzburg: Vogel Auto Medien
- [61] Dick, W., Gies, S.: Zukünftige Lenksysteme – Anforderungen an die Entwicklung. In: Tagungsband Aachener Kolloquium (2002), Aachen, Deutschland, 7.-9.10.2002, 1069-1080
- [62] DIN 70020-1, Ausgabe:1993-02, Straßenfahrzeuge; Kraftfahrzeugbau; Begriffe von Abmessungen
- [63] Dobbeck, R.; Lincke, W.: Der VW-Fahrsimulator. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1974) 2, 37-41. Wiesbaden: Vieweg
- [64] Donges, E.: A Two Level Model of Driver Steering Behaviour. In: Human Factors (1978), 20(6), 691-707. New York: Human Factors Society
- [65] Donges, E.: Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit (1978) 24/3, 98-112. Köln: TÜV Rheinland
- [66] Donges, E.: Ein Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug. Bericht 27. Meckenheim: Forschungsinstitut für Anthropotechnik, 1977
- [67] Donges, E.: Experimentelle Untersuchungen des menschlichen Lenkverhaltens bei simulierter Straßenfahrt – Teil 1. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1975) 5, 141-146. Wiesbaden: Vieweg
- [68] Donges, E.: Experimentelle Untersuchungen des menschlichen Lenkverhaltens bei simulierter Straßenfahrt – Teil 2. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1975) 6, 185-190. Wiesbaden: Vieweg
- [69] Dorey, A.-D.; Good, M.-C.: A Variable Free Control Characteristic Vehicle. In: Vehicle System Dynamics (1980), 9/1, 19-44. Amsterdam: Swets & Zeitlinger
- [70] Dorsch, F.: Psychologisches Wörterbuch. Ed. 10. Bern: Huber, 1982
- [71] Drosdol, J.; Panik, F.: The Daimler-Benz Driving Simulator. A Tool for Vehicle Development. SAE Technical Paper Series, 850334. Warrendale: SAE, 1985
- [72] Dürr, R., Schiehlen, W., Zamow, J.: Simulationsmodelle für Servolenkungen. In: VDI Berichte 1283, 601-620. Düsseldorf: VDI, 1996

-
- [73] Durth, W.: Der Mensch als maßgebliche Größe im Straßenentwurf. In: Der Mensch als maßgebliche Größe für Entwurf und Betrieb der Straße. RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Mitteilung Nr. 15, 1985
- [74] Durth, W.: Ein Beitrag zur Erweiterung des Modells für Fahrer, Fahrzeug und Straße in der Straßenplanung. In: Straßenplanung und Straßenverkehrstechnik (1974), 163. Bonn : Bundesmin. f. Verkehr, Abt. Strassenbau
- [75] ECE Regelung Nr. 79; Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Lenkanlage; Revision 1 einschließlich der Ergänzung 1 zu dieser Regelung in ihrer ursprünglichen Fassung, Ausgabe:1994-12-14
- [76] Eckrich, M. et al.: Aktivlenkung – Anforderungen an Sicherheitstechnik und Entwicklungsprozess. In: Tagungsband Aachener Kolloquium (2002), Aachen, Deutschland, 7.-9.10.2002, 1169-1184
- [77] Eckstein, L.: Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeugs mit aktiven Sidesticks. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, 471. Düsseldorf: VDI, 2001
- [78] Eidam, D.-U.: In: Tagungsband Stand und zukünftige Entwicklung von Lenksystemen – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 20.11.2000
- [79] Engels, A.: Geradeauslaufkriterien für Pkw und deren Bewertung. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1994
- [80] Engels, A.: Geradeauslaufkriterien für Pkw und deren Bewertung. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1995) 6, 384-391. Wiesbaden: Vieweg
- [81] Farrer, D.-G.: An Objective Measurement Technique for the Quantification of On-Centre Handling Quality. SAE Technical Paper Series, 930827. Warrendale: SAE, 1993
- [82] Fiala, E.: Die Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Fahrer. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1967) 10, 345-348. Wiesbaden: Vieweg
- [83] Fiala, E.: Lenken von Fahrzeugen als kybernetische Aufgabe. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1966) 5, 156-162. Wiesbaden: Vieweg
- [84] Fiala, E.: Reifen, Fahrer, Lenkverhalten. In: VDI Berichte 778, 397-423. Düsseldorf: VDI, 1989
- [85] Fleck, R., Hennecke, D., Pauly, A.: Active Front Steering (AFS) – Das Steer-by-Wire System der BMW-Group zur Optimierung von Lenkkomfort, Fahrzeugagilität und –stabilität. In: Tagungsband PKW Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen (2001) – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.-4.4.01
- [86] Forbes, J. E.; Baird, S. M.; Weisgerber, T. W.: Electrohydraulic Power Steering – an Advanced System for Unique Applications. SAE Technical Paper Series, 870574. Warrendale: SAE, 1987
- [87] Förster, H.-J.: Automobiltechnik, Technik nach menschlichen Maß. In: VDI-Berichte 595, 335-371. Düsseldorf: VDI, 1986
- [88] Förster, H.-J.: Der Fahrzeugführer als Bindeglied zwischen Reifen, Fahrwerk und Fahrbahn. In: VDI-Berichte, 916, 1-50. Düsseldorf: VDI, 1991
- [89] Förster, H.-J.: Der Fahrzeugführer, ein Homo Instrumentalis. In: VDI-Berichte, 948, 379-443. Düsseldorf: VDI, 1992

- [90] Förster, H.-J.: Der Mensch als maßgebliche Größe der Fahrzeugtechnik. In: Der Mensch als maßgebliche Größe für Entwurf und Betrieb der Straße. RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbau, Mitteilung Nr. 15, 1985
- [91] Förster, H.-J.: Mercedes-Benz Lenkungen, Teil 1. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1978) 3, 91-94. Wiesbaden: Vieweg
- [92] Frank, P., Reichelt, W.: Funktion, Wirksamkeit und Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen. In: Forschungsinstrument Fahr Simulator, 69-72. Düsseldorf: VDI, 1990
- [93] Freter, H.: Marktsegmentierung. Stuttgart: Kohlhammer, 1983
- [94] Friedrich, H. et al.: Auf dem Weg zum intelligenten Auto – Steer-by-Wire als Basis zukünftiger Assistenzfunktionen. In: VDI-Berichte, 1613, 277-296. Düsseldorf: VDI, 2001.
- [95] Furukawa, Y. et al.: Effects of Active Steering Control on Closed Loop Control Performance. In: Proceedings of 23th Fisita World Congress (1990), Turin, Italien, 7.-11.5.1990, 905036
- [96] Gärtner, K.-P.; Stein, W.: Bewertung von Mensch-Maschine-Systemen – Einführung und Übersicht. In: Tagungsband Bewertung von Mensch-Maschine-Systemen: Methoden und Problematik, Bonn, Deutschland, 14.-15.11.1985, 2-9
- [97] Gies, S., Marusic, Z.: Das Lenkgefühl – Merkmale der subjektiven und objektiven Beschreibung. In: Tagungsband Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 30.11.-1.12.98
- [98] Godthelp, H., Käppler, W.-D.: Effects of Vehicle Handling Characteristics on Driving Strategy. In: Human Factors (1988), 30(2), 219-229. New York: Human Factors Society
- [99] Godthelp, H.: Vehicle Control During Curve Driving. In: Human Factors (1986), 28(2), 211-221. New York: Human Factors
- [100] Godthelp, J.: Precognition Control: Open- and Closed-Loop Steering in a Lane-Change Manoeuvre. In: Ergonomics Abstracts (1985) 28/10, 1419-1438. London: Taylor & Francis
- [101] Good, M. C., Dorey, A. D., Joubert, P. N.: Evaluation of Automobile Handling Test Procedures Using a Variable Characteristic Car. In: Proceedings of 19th Fisita World Congress (1982), Melbourne, Australien, 8.-12.11.1982, 2, 108.1-108.7, (82108)
- [102] Good, M. C.: Effects of Free-Control Variables on Automobile Handling. In: Vehicle System Dynamics (1979), 8, 253-285. Amsterdam: Swets & Zeitlinger
- [103] Green, P., Gillespie, T., Reifeis, S.: Subjective Evaluation of Steering Effort Levels. Report: UMTRI-84-39. Dearborn: Ford Motor Co., 1984
- [104] Hackenberg, U., Heißing, B.: Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1982) 7/8, 341-345. Wiesbaden: Vieweg
- [105] Hackenberg, U.: The Steering System of the UNI-CAR under Aspects of Manual Control. In: Proceedings of the Third European Annual Conference on Human Decision Making (1983), Roskilde, Dänemark, 30.5.-1.6.1983, 409-417
- [106] Hajos, A.: Sinnesleistungen und Sinneswahrnehmung. In: Ergonomie, 3., 59-75 München: Hanser, 1993
- [107] Harnett, P.: Objective Methods for the Assessment of Passenger Car Steering Quality. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, 506. Düsseldorf: VDI, 2002
- [108] Hartung, J.: Statistik. München. 10. Aufl. München: Oldenbourg, 1995

-
- [109] Harty, D.: "Brand-by-Wire™" – Possibility. In: Tagungsband Aachener Kolloquium (2002), Aachen, Deutschland, 7.-9.10.2002, 1009-1024
- [110] Hayes, G.-G. et al.: Driver-Vehicle Performance in Closed-Loop Tests. SAE Technical Paper Series, 750964. Warrendale: SAE, 1975
- [111] Heathershaw, A., Baxter, J.: Bedeutung der Mittencharakteristik bei Hochgeschwindigkeitsfahrt. In: Tagungsband Aachener Kolloquium (2002), Aachen, Deutschland, 7.-9.10.2002, 1053-1068
- [112] Heathershaw, A.: Optimizing Variable Ratio Steering for Improved On-Center Sensitivity and Cornering Control. SAE Technical Paper Series, 2000-01-0821. Warrendale: SAE, 2000
- [113] Heise, G.: Internationale Marktsegmentierung im Automobilmarketing. Dissertation, Universität Kassel, 1993
- [114] Heißing, B.: Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens. Würzburg: Vogel, 2002
- [115] Heitzer, D.: Entwicklung eines fehlertoleranten Steer-by-Wire Lenksystems. In: Tagungsband Aachener Kolloquium (2002), Aachen, Deutschland, 7.-9.10.2002, 1081-1092
- [116] Heitzer, H.-D.: Evolution auf dem Gebiet der Lenksysteme. In: Tagungsband PKW Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen (2001) – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.-4.4.01
- [117] Helander, M.: Drivers' Steering Behavior During Traffic Events: a Case of Perceptual Tropism? In: Human Factors (1978), 20(6), 681-690. New York: Human Factors Society
- [118] Helm, H.-J.: Zur Untersuchung von Fahrer und Kraftfahrzeug bei Straßenfahrt. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1978
- [119] Henke, R.: Hydraulic System Trends: Part X Power Steering Systems. In: Diesel Progress North American (1988) 54, 28-34. Milwaukee, Diesel Engines
- [120] Higuchi, A., Sakai, H.: Objective Evaluation Method of On-Center Handling Characteristics. SAE Technical Paper Series, 2001-01-0481. Warrendale: SAE, 2001
- [121] Hiramatsu, K., Inoue, S., Iwamoto, S.: Quantification Analysis of Driver's Feeling on Manual Steering Vehicle. In: VDI-Berichte, 368, 255-259. Düsseldorf: VDI, 1980
- [122] Hisaoka, Y.; Yamamoto, M.; Fujinami, H.: A Study Desirable Steering Response and Steering Torque for Driver's Feeling. In: Proceedings International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC) (1996), Aachen, Deutschland, 24.-28.6.1996, 295-305
- [123] Hoffmann, E.-R., Joubert, P.-N.: Just Noticeable Differences in Some Vehicle Handling Variables. In: Human Factors (1986), 10(3), 263-272. New York: Human Factors Society.
- [124] Hoffmann, E.-R., Joubert, P.-N.: The Effect of Changes in Some Handling Variables on Driver Steering Performance. In: Human Factors (1966), 8(6), 245-263. New York: Human Factors Society
- [125] Hoffmann, J.: Korrelation objektives Messen – subjektives Empfinden am Beispiel des Lastwechselschlages im Pkw. In: Tagungsband Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 30.11.-1.12.98
- [126] Hong, Y.-S., Cho, S.-H.: Entwicklung einer Servolenkung mit elektro-hydraulischer Steuerung der Betätigungskraft. In: 9. Aachener Fluidtechnisches Kolloquium (1990), Aachen, Deutschland, 3/1990, 1, 257-275

- [127] Horwath, J., Hofmann, B., Lechner, D.: Elektronische Lenksysteme am Beispiel des ersten straßenzugelassenen Steer-by-Wire-Systems im Unimog. In: Tagungsband Fahrwerktechnik – Haus der Technik e.V., München, Deutschland, 2.-4.6.2003
- [128] Howe, J. G. et al.: Improving Steering Feel for the National Advanced Driving Simulator. SAE Technical Paper Series, 970567. Warrendale: SAE, 1997
- [129] Iga, S., Sakazaki, A., Shibata, N.: Motor Driven Power Steering – for the Maximum Steering Sensation in Every Driving Situation. SAE Technical Paper Series, 880705. Warrendale: SAE, 1988
- [130] Isermann, R.: Identifikation dynamischer Systeme. Bd. I + II. Berlin: Springer, 1988
- [131] ISO 8855 / DIN 70000, Ausgabe 1991, modifiziert: Straßenfahrzeuge – Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten.
- [132] Jaguar: The new Jaguar XJ. Schwalbach: JAGUAR Deutschland GmbH, Pressemitteilung, 3/2003
- [133] Jaksch, F.-O.: Driver-Vehicle Interaction with Respect to Steering Controllability. SAE Technical Paper Series, 790740. Warrendale: SAE, 1979
- [134] Jaksch, F.-O.: Vehicle Characteristics Describing the Steering Control Quality of Cars. In: Proceedings of 7th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles (1979), 5.-8.6.1979, 815-846
- [135] Jaksch, F.-O.: Vehicle Parameter Influence on Steering Control Characteristic. In: International Journal of Vehicle Design (1983), 171-194. Genf: Interscience
- [136] Johannsen, G.: Mensch-Maschine-Systeme. Berlin: Springer, 1993
- [137] Junker, H.: Electronically Enhanced Steering Systems. In: Proceedings of 25th International Symposium on Automotive Technology and Automation (1992), Florenz, Italien, 1.-5.6.1992, 385-391, (920848)
- [138] Junker, H.: Evolution in der Lenkungstechnologie – Ein Beitrag zur Steigerung der aktiven Sicherheit, Teil 1. In: Automobil Industrie (1991) 4/5, 315-321. Würzburg: Vogel Auto Medien
- [139] Junker, H.: Evolution in der Lenkungstechnologie – Ein Beitrag zur Steigerung der aktiven Sicherheit, Teil 2. In: Automobil Industrie (1992) 1, 17-21. Würzburg: Vogel Auto Medien
- [140] Junker, H.: Moderne Lenkungstechnologie – Von den Anforderungen zur technischen Realisierung. In: Automobil Industrie (1990) 4, 379-389. Würzburg: Vogel Auto Medien
- [141] Jürgensohn, T., Jung, R., Willumeit, H.-P.: Die „Handschrift“ des Lenkens. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1997) 4, 216-219. Wiesbaden: Vieweg
- [142] Jürgensohn, T.: Kraftfahrzeugführung. Berlin: Springer, 2001
- [143] Kako, H., Sato, H., Okamura, H.: Development of New Progressive Power Steering System. In: Proceedings of 23th Fisita World Congress (1990), Turin, Italien, 7.-11.5.1990, 527-532, (905186)
- [144] Käppler, W.-D., Godthelp, H.: Effects of Vehicle Handling Characteristics on Straight Lane Driving. In: Proceedings of the 4th European Annual Conference on Human Decision Making (1984), Zeist, Niederlande, 28.-30.5.1984, 157-172
- [145] Kaufmann, T. et al.: Development Experience With Steer-By-Wire. SAE Technical Paper Series, 2001-01-2479. Warrendale: SAE, 2001
- [146] Kawai, T. et al.: Improvement in Driver-Vehicle System Performance by VGS. In: Tagungsband PKW Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen (2001) – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.-4.4.01

-
- [147] Kendzia, R.: Der Einfluß verschiedener Variablen auf das Kurvenfahren von Pkw-Fahrern. In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit (1972) 18/2, 110-115. Köln: TÜV Rheinland
- [148] Kilgenstein, P.: Heutige und zukünftige Lenksysteme. In: Tagungsband Tag des Fahrwerks, Aachen, Deutschland, 7.10.2002
- [149] Kirchner, J.-H.: Grundkonzept für die Bewertung von Mensch-Maschine-Systemen. In: Tagungsband Bewertung von Mensch-Maschine-Systemen: Methoden und Problematik, Bonn, Deutschland, 14.-15.11.1985, 200-212
- [150] Köhn, P. et al.: Die Aktivlenkung – Das neue Fahrdynamische Lenksystem von BMW. In: Tagungsband Aachener Kolloquium (2002), Aachen, Deutschland, 7.-9.10.2002, 1093-1109
- [151] Köhn, P. et al.: Aufbau und Funktion der Aktivlenkung von BMW. In: Tagungsband Fahrwerktechnik – Haus der Technik e.V., München, Deutschland, 2.-4.6.2003
- [152] Koide, M.; Kawakami, S.: Analysis of ‘Steering Feel’ Evaluation in Vehicles with Power Steering. In: JSAE Review (1988), 9/3, 36-42. Tokyo: JSAE
- [153] Koziara, B., Fauser, J.: Optimierung des dynamischen Verhaltens von Lenksystemen durch Kopplung von Simulation und Versuch. In: VDI-Berichte 1153, 317-328. Düsseldorf: VDI, 1994
- [154] Kramer, U., Bubb, H., Mayer, A.: Neue Konzepte zur Entwicklung integrierter Assistenz- und Informationssysteme für den Fahrer. In: VDI-Berichte 612, 61-75. Düsseldorf: VDI, 1986
- [155] Krüger, W.: Zur Optimierung von Feder-, Dämpfungs- und Masseanteilen beim Bewegungswiderstand eines Lenknippels. Bericht 37. Meckenheim: Forschungsinstitut für Anthropotechnik, 1978
- [156] Kudritzki, D.: Lenkstrategie eines Fahrzeugführers bei vorgegebener Fahraufgabe. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1992) 7/8, 406-409. Wiesbaden: Vieweg
- [157] Kudritzki, D.: Möglichkeiten der Objektivierung subjektiver Beurteilungen des Fahrzeugverhaltens. In: Tagungsband Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 30.11.-1.12.98
- [158] Kudritzki, D.: Neue Erkenntnisse über das zeitabhängige Beurteilungsverhalten des Fahrers. In: Tagungsband Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.12.-4.12.01. Renningen: expert, 2002
- [159] Kudritzki, D.: Zum Einfluß querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, 132. Düsseldorf: VDI, 1989
- [160] Kurishige, M. et al.: A Control Strategy to Reduce Steering Torque for Stationary Vehicles Equipped with EPS. SAE Technical Paper Series, 1999-01-0403. Warrendale: SAE, 1999
- [161] Kurishige, M. et al.: A New EPS Control Strategy to Improve Steering Wheel Returnability. SAE Technical Paper Series, 2000-01-0815. Warrendale: SAE, 2000
- [162] Landau, K., Luczak, H., Laurig, W.: Ergonomie der Sensumotorik. Festschrift anlässlich der Emeritierung von Herrn Prof. Dr.-Ing. W. Rohmert. München: Hanser, 1996
- [163] Landau, K., Winner, H.: Fahrversuche mit Probanden – Nutzwert und Risiko. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, 557. Düsseldorf: VDI, 2003
- [164] Laurence, P.: Lateral Vehicle Behaviour: Comparison of Subjective/Objective Assessment Using the Choquet Integral. In: Vehicle System Dynamics (2000), 34/5, 357-379. Amsterdam: Swets & Zeitlinger
- [165] Lehmann, E.: Nonparametrics: Statistical Methods Based on Ranks. New York: McGraw Hill, 1974

- [166] Lienert, G. A., Raatz, U.: Testaufbau und Testanalyse. Weinheim: Beltz, Psychologie-Verlags-Union, 1998
- [167] Lozia, Z., Zardecki, D.: Vehicle Dynamics Simulation With Inclusion of Freeplay and Dry Friction in Steering System. SAE Technical Paper Series, 2002-01-0619. Warrendale: SAE, 2002
- [168] Macdonald, W.-A., Hoffmann, E.-R.: Review of Relationship Between Steering Wheel Reversal Rate and Driving Task Demand. In: Human Factors (1980), 22(6), 733-739. New York: Human Factors Society
- [169] Mariott, A. T., Griffin, D. C., Lee, A. Y.: A Variable Stability Test Vehicle for IST Applications. SAE Technical Paper Series, 961685. Warrendale: SAE, 1996
- [170] Matsushita, A. et al.: Subjective Evaluation and Vehicle Behaviour in Lane Change Manoeuvres. SAE Technical Paper Series, 800845. Warrendale: SAE, 1980
- [171] Mayer, A.: Untersuchung über den Einfluß eines Aktiven Bedienelementes auf die menschliche Regelleistung. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 17, 37. Düsseldorf: VDI, 1987
- [172] McCann, R.: Variable Effort Steering for Vehicle Stability Enhancement Using An Electric Power Steering System. SAE Technical Paper Series, 2000-01-0817. Warrendale: SAE, 2000
- [173] McConnell, W. A.: Motion Sensitivity as a Guide to Road Design. SAE Technical Paper Series, 570041. Warrendale: SAE, 1957
- [174] McLean, J.-R., Hoffmann, E.-R.: Analysis of Drivers' Control Movements. In: Human Factors (1971), 13(5), 407-418. New York: Human Factors Society
- [175] McLean, J.-R., Hoffmann, E.-R.: Steering Reversals as a Measure of Driver Performance and Task Difficulty. In: Human Factors (1975), 17(3), 248-256. New York: Human Factors Society
- [176] McRuer, D. et al.: New Results in Driver Steering Control Models. In: Human Factors (1977), 19(4), 381-397. New York: Human Factors Society
- [177] McRuer, D., Klein, R.: Effects of Automobile Steering Characteristics on Driver/Vehicle Performance for Regulation Tasks. SAE Technical Paper Series, 760778. Warrendale: SAE, 1976
- [178] Mercedes-Benz: Die neue Mercedes-Benz E-Klasse. Stuttgart: DaimlerChrysler AG, Pressemappe, 1/2002
- [179] Metz, L.-D., Alter, D.-M.: Transient and Steady State Performance Comparison of a Two-Wheel Steer and Four-Wheel Steer Vehicle Handling Model. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Vehicle Dynamics and Powertrain Engineering (1991), Straßburg, Frankreich, 11.-13.6.1991, 295-300
- [180] Mitschke, M., Niemann, K.: Die Regeltätigkeit des Autofahrers bei Kursabweichungen. Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik, Heft 221. Düsseldorf: VDI, 1972
- [181] Mitschke, M.: Antizipatorische Steuerung im Regelkreis Fahrer-Fahrzeug. In: Automobil Industrie (1988) 5, 485-492. Würzburg: Vogel Auto Medien
- [182] Mitschke, M.: Dynamik der Kraftfahrzeuge – Band C, Fahrverhalten. Ed. 2. Berlin: Springer, 1990
- [183] Mitschke, M.: Experimentelle Bestimmung des Geradeauslaufs von Pkw und dessen Bewertung. IFF-Bericht 270. Braunschweig: Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, 1993
- [184] Mitschke, M.: Fahrtrichtungshaltung – Analyse der Theorien. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1968) 5, 157-162. Wiesbaden: Vieweg

-
- [185] Mitschke, M.: Regelkreis Fahrer-Fahrzeug bei Störung durch schiefziehende Bremsen. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1974) 3, 67-72. Wiesbaden: Vieweg
- [186] Mitschke, M.: Zur Kurshaltung von Personenkraftwagen. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1973), 9, 330-334. Wiesbaden: Vieweg
- [187] Mummendey, H. D.: Die Fragebogen-Methode. Ed. 2. Göttingen: Hogrefe, 1995
- [188] Nagai, M., Takeuchi, Y., Teranushi, K.: Handling and Stability Evaluation of Four-Wheel-Steered Vehicles Considering Steering Torque – Angle Relation. In: JSAE Review (1992), 13/3, 46-52. Tokyo: JSAE
- [189] Nagai, M.: Analysis and Estimation of Closed-Loop Characteristics of Driver-Car Systems by Adaptive Steering. In: JSAE Review (1987), 8/1, 40-47. Tokyo: JSAE
- [190] Nagai, M.; Mitschke, M.: Adaptive Behavior of Driver-Car-Systems in Critical Situations: Analysis by Adaptive Model. In: JSAE Review (1985), 6/12, 82-89. Tokyo: JSAE
- [191] Nagai, M.; Mitschke, M.: An Adaptive Model of Car-Driver and Computer Simulation of the Closed-Loop System. In: Proceedings of the 10th IAVSD-Symposium – The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks (1987), Prag, Tschechoslowakei, 24.-28.8.1987, 275-286
- [192] Nagiri, S., Doi, S., Matsushima, S.: Generating Method of Steering Reaction Torque on Driving Simulator. In: JSAE Review (1994), 15/1, 76-78. Tokyo: JSAE
- [193] Nakahara, M., Momiyama, F., Shirai, Y.: Control of Steering Effort and Response for Power Steering of Commercial Vehicles. SAE Technical Paper Series 852250. Warrendale: SAE, 1985
- [194] Nakahara, M., Momiyama, F.: Giving Trucks and Buses Power Steering “Feel”. In: JSAE Review (1985), 17/8, 32-42. Tokyo: JSAE
- [195] Nakamura, K. et al.: Power Steering System with Travelling Condition Judgement Function. SAE Technical Paper Series 891980. Warrendale: SAE, 1989
- [196] Nakaya, H. et al.: Effects of Vehicles’ Yaw and Lateral Acceleration Responses on Drivers Control Performance. In: Proceedings of 19th Fisita World Congress (1982), Melbourne, Australien, 8.-12.11.1982, 2, 109.1-109.6 (82109)
- [197] Nakaya, H.; Oguchi, Y.: Characteristics of the Four-Wheel Steering Vehicle and its Future Prospects. In: International Journal of Vehicle Design (1987), 8/3, 314-325. Genf: Interscience
- [198] Nakayama, T., Suda, E.: The Present and Future of Electric Power Steering. In: International Journal of Vehicle Design (1994), 15/3-4-5, 243-254. Genf: Interscience
- [199] Neculau, M.: Modellierung des Fahrerverhaltens: Regel- und Steuerstrategien. VDI-Berichte 948, 211-225. Düsseldorf: VDI, 1992
- [200] Neukum, A., Krüger, H.-P., Schuller, J.: Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften? In: VDI-Berichte 1613, 13-32. Düsseldorf: VDI, 2002
- [201] Neukum, A., Krüger, H.-P.: Kriterien und Methodik zur Bewertung von Kurshaltungsstörungen. In: Tagungsband Fahrwerktechnik – Haus der Technik e.V., München, Deutschland, 2.-4.6.2003
- [202] Neukum, A.: Bewertung des Fahrverhaltens im Closed-Loop – Zur Brauchbarkeit des korrelativen Ansatzes. In: Tagungsband Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.12.-4.12.01. Renningen: expert, 2002

- [203] Neureder, U.: Untersuchungen zur Übertragung von Radkraftschwankungen auf die Lenkung von Pkw mit Federbeinvorderachse und Zahnstangenlenkung. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, 518. Düsseldorf: VDI, 2002
- [204] Niemann, K., Richter, K.-H., Weiger, G., Wulf, H.: Entwicklungsmöglichkeiten an Lenksystemen für Kraftfahrzeuge und ihr Einfluß auf die Kurshaltung. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1980) 10, 525-532. Wiesbaden: Vieweg
- [205] Nishikawa, M., Toshimitsu, Y.: A Speed Sensitive Variable Assistance Power Steering System. SAE Technical Paper Series 790738. Warrendale: SAE, 1979
- [206] Norman, K.-D.: Objective Evaluation of On-Center Handling Performance. SAE Technical Paper Series 840069. Warrendale: SAE, 1984
- [207] Odenthal, D. et. al.: Übertragung eines Lenkgefühls einer Servo-Lenkung auf Steer-by-Wire. In: VDI-Berichte 1672, 499-510. Düsseldorf: VDI, 2002
- [208] Okamoto, K., Chikuma, I., Saito, N.: Improvement of Drivers Feel for Electric Power Steering. SAE Technical Paper Series 890079. Warrendale: SAE, 1989
- [209] Olson, P.-L., Thompson, R.-R.: The Effect of Variable-Ratio-Steering Gears on Driver Preference and Performance. In: Human Factors (1970), 12(6), 553-558. New York: Human Factors Society
- [210] Park, J., Niravesh, P.-E.: Effect of Steering-Housing Rubber Bushings on the Handling Responses of a Vehicle. SAE Technical Paper Series 970103. Warrendale: SAE, 1997
- [211] Peitsmeier, K., Patzelt, K.: Die Lenkanlage der neuen Mercedes-Benz-S-Klasse. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1991) 7/8, 416-425. Wiesbaden: Vieweg
- [212] Penka, A.: Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen. Dissertation, Technische Universität München, 2001
- [213] Pepler, S.: Steering System Effects on On-Center Handling and Performance. SAE Technical Paper Series 1999-01-3765. Warrendale: SAE, 1999
- [214] Perret, W.: Lenkkräfte und Lenkwege am Lenkrad von Kraftfahrzeugen und ihr Einfluß auf die Lenksicherheit. Dissertation, Technische Hochschule Stuttgart, 1964
- [215] Pfendler, C.: Bewertung der Brauchbarkeit von Methoden zur Messung der mentalen Beanspruchung bei Kfz-Lenkaufgaben. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft (1982), 36/2, 170-174. Stuttgart: ergonomia
- [216] Poestgens, U.: Servolenksysteme für Pkw und Nutzfahrzeuge: leicht und sicher lenken. Die Bibliothek der Technik 217. Landsberg: Moderne Industrie, 2001
- [217] Popp, K., Schiehlen, W.: Fahrzeugdynamik. Stuttgart: Teubner, 1993
- [218] Rasmussen, J.: Information Processing and Human Machine Interaction. New York: North-Holland, 1986
- [219] Rasmussen, J.: Skills, Rules and Knowledge: Signals, Signs and Symbols and 'Other Distinctions in Human Performance Models. IEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, SMC-13 (1983) 3, 2578-266
- [220] Redlich, P.: Objektive und subjektive Beurteilung aktiver Vierradlenkstrategien. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Shaker, 1994
- [221] Reid, L.-D., Graf, W.-O., Billing, A.-M.: The Fitting of Linear Models to Driver Response Records. SAE Technical Paper Series 820304. Warrendale: SAE, 1982

-
- [222] Reid, L.-D., Solowka, E.-N., Billing, A.-M.: A Systematic Study of Driver Steering Behaviour. In: Ergonomics Abstracts (1981) 24/6, 447-462. London: Taylor & Francis
- [223] Richter, B.: Unterschiedliches Lenkverhalten verschiedener Versuchspersonen. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1969) 8, 255-257. Wiesbaden: Vieweg
- [224] Riedel, A., Arbinger, R.: Ergänzende Auswertungen zur subjektiven und objektiven Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw. FAT-Schriftenreihe, 161. Frankfurt: VDA, 2000
- [225] Riedel, A., Arbinger, R.: Subjektive und objektive Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw. FAT-Schriftenreihe, 139. Frankfurt: VDA, 1997
- [226] Riedel, A., Gnadler, R.: Subjektive und objektive Fahrverhaltensbeurteilung von Pkw. In: Sonderausgabe Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) – 25 Jahre FAT (Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.) (1996), 32-36. Wiesbaden: Vieweg
- [227] Riedel, A.: Subjektive und objektive Beurteilung des Handling von Pkw. In: Tagungsband Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 30.11.-1.12.98
- [228] Riedel, A.: Subjektive und objektive Beurteilung des Handling von Pkw. In: Tagungsband Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.12.-4.12.01. Renningen: expert, 2002
- [229] Rieger, W.: Hydraulische Servolenkungen – Konzept ohne Zukunft? In: Tagungsband PKW Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen (2001) – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.-4.4.01
- [230] Rill, G.: Simulation von Kraftfahrzeugen. Wiesbaden. Vieweg, 1994
- [231] Risse, H.-J.: Das Fahrverhalten bei normaler Fahrzeugführung. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, 160. Düsseldorf: VDI, 1991
- [232] Rompe, K., Donges, E.: Variationsbereiche der Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen. In: Automobil Industrie (1982) 2, 203-211. Würzburg: Vogel Auto Medien
- [233] Rompe, K.: Technologie für die Sicherheit im Straßenverkehr. Bundesministerium für Forschung und Technik, Verlag TÜV Rheinland, ISBN 3-524-10015-5, 1976
- [234] Rothbauer, G.: Zum Problem des Bewegungswiderstandes bei einfachen und komplexen Stellbewegungen des Armes. Bericht 45. Meckenheim: Forschungsinstitut für Anthropotechnik, 1978
- [235] Rühmann, H.: Schnittstellen in Mensch-Maschine-Systemen. In: Ergonomie, 3., 420-445. München: Hanser, 1993
- [236] Sachs, L.: Angewandte Statistik. 10. Aufl. Berlin: Springer, 2002
- [237] Sailer, U.: Aussagen zum Pedalgefühl im rechnergestützten Auslegungsprozess und in der Applikation von Pkw-Bremsanlagen. In: Tagungsband Brems.Tech (2002), München, Deutschland, 12.-13.12.2002
- [238] Salaani, M. K., Heydinger, G., Grygier, P.: Modeling and Implementation of Steering System Feedback for the National Advanced Driving Simulator. SAE Technical Paper Series 2002-01-1573. Warrendale: SAE, 2002
- [239] Sano, S. et al.: Influence of Vehicle Response Parameters on Driver Control Performance. In: VDI-Berichte 368, 229-235. Düsseldorf: VDI, 1980
- [240] Sato, H., Osawa, H., Haraguchi, T.: The Quantitative Analysis of Steering Feel. In: JSAE Review (1991), 12/2, 85-87. Tokyo: JSAE

- [241] Sawada, T., Oguchi, Y., Satoh, C.: Basic Study on the Influence of Aging on Steering Control. SAE Technical Paper Series 905099. Warrendale: SAE, 1990
- [242] Schalz, J.-P., Duhr, A., Marusic, Z.: Subjektiv-objektiv Korrelation fahrdynamischer Größen in der Praxis. In: Tagungsband Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.12.-4.12.01. Renningen: expert, 2002
- [243] Schmidtke, H.: Ergonomie, 3. Ed. München: Hanser, 1993
- [244] Schneider, B.: Konzipierung einer marktgerechten Stelleinheit als Aktuator einer aktiven Hinterradlenkung für Personenkraftwagen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1996
- [245] Schnugg, R., Thews, I.; Das elektrohydraulische Lenksystem des Audi A2. In: Tagungsband PKW Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen (2001) – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.-4.4.01
- [246] Schöggel, P.: Objektivierung und Optimierung der Fahrbarkeit im Fahrzeug und am dynamischen Prüfstand. In: Tagungsband Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 30.11.-1.12.98
- [247] Schumann, J.: On the use of discrete proprioceptive tactile warning signals during manual control: the steering wheel as an active control device. Dissertation, Hochschule der Bundeswehr Hamburg, 1994
- [248] Schütte, M.: Befragungstechniken bei der Bewertung von Mensch-Maschine-Systemen. In: Tagungsband Bewertung von Mensch-Maschine-Systemen: Methoden und Problematik, Bonn, Deutschland, 14.-15.11.1985, 213-228
- [249] Schwarz, R. et. al.: ESP II – Das erste ESP mit aktivem Lenkeingriff. In: Tagungsband Fahrwerktechnik – Haus der Technik e.V., München, Deutschland, 2.-4.6.2003
- [250] Seewald, A.: Die Lenkung als Teil eines „intelligenten Fahrzeugs“. In: Tagungsband PKW Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen (2001) – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.-4.4.01
- [251] Seewald, A.: Einführungsvortrag – Entwicklungstrends Lenksysteme. In: Tagungsband PKW Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen (2001) – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.-4.4.01
- [252] Segel, L.: An Investigation of Automobile Handling as Implemented by a Variable-Steering Automobile. In: Human Factors (1964), 6(8), 331-341. New York: Human Factors Society
- [253] Segel, L.: The Variable Stability Automobile Concept and Design. SAE Technical Paper Series 275. Warrendale: SAE, 1965
- [254] Setright, L. J. K.: Steering Feel is a Myth and the Steering Wheel Should be Ditched in Favour of the Joystick. In: Automotive Engineer (1999), 6, 88. London: Professional Engineering Publ.
- [255] Setright, L. J. K.: The Mythology of Steering Feel. In: Automotive Engineer (1999), 5, 76-78. London: Professional Engineering Publ.
- [256] Shimakage, M. et al.: Design of Lane-Keeping Control With Steering Torque Input for a Lane-Keeping Support System. SAE Technical Paper Series 2001-01-0480. Warrendale: SAE, 2001
- [257] Shimizu, Y., Kawai, T., Yuzuriha, J.: Improvement in Driver-Vehicle System Performance by Varying Steering Gain with Vehicle Speed and Steering Angle: VGS (Variable Gear-Ratio Steering System). SAE Technical Paper Series 1999-01-0395. Warrendale: SAE, 1999

-
- [258] Shimizu, Y., Kawai, T.: Development of Electric Power Steering. SAE Technical Paper Series 910014. Warrendale: SAE, 1991
- [259] Shimomura, H., Haraguchi, T.: Simulation Analysis on the Influence of Vehicle Specifications upon Steering Characteristics. In: International Journal of Vehicle Design (1991) 12/2, 197-207. Genf: Interscience
- [260] Shoemaker, N.-E., Dell'Amico, F., Chwalek, R.-J.: A Pilot Experiment on Driver Task Performance with Fixed and Variable Steering Ratio. SAE Technical Paper Series 670508. Warrendale: SAE, 1967
- [261] Stamer, N.: Ermittlung optimaler PKW-Querdynamik und ihre Realisierung durch Allradlenkung. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, 302. Düsseldorf: VDI, 1996
- [262] Stecklein, G., Bishop, J.: Technical Evaluation of Power Center Steering Systems. SAE Technical Paper Series 2003-01-0583. Warrendale: SAE, 2003
- [263] Steeb, R.: Von der Elektronik das Gefühl – von der Hydraulik die Kraft. In: Fluid – Zeitung für Hydraulik und Pneumatik (1982), 16/4, 28-29. Landsberg: Moderne Industrie
- [264] Stoll, H.: Fahrwerktechnik: Lenkanlagen und Hilfskraftlenkungen. Würzburg: Vogel, 1992
- [265] Straub, T., Suginaka, R.: Bremspedalgefühl – Gegenüberstellung von objektiven Messwerten, subjektiven Fahreindrücken eines konventionellen Bremssystems und einer Brake-by-Wire Bremsanlage. In: Tagungsband Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 3.12.-4.12.01. Renningen: expert, 2002
- [266] Sugasawa, F., Irie, N., Kuroki J.: Development of Simulator-Vehicle for Conducting Vehicle Dynamics Research. In: JSAE Review (1990), 11/2, 46-50. Tokyo: JSAE
- [267] Suzuki, H., Harara, M., Kumakara, H.: Study on Suitable Steering Feeling for Various Driving Conditions – by Controlling Power Steering Assist Characteristics. In: Proceedings International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC) (1994), Tokyo, Japan, 24.-28.10.1994, 55-60 (9438024)
- [268] Sweatman, P., Joubert, P.-N.: Detecting of Changes in Automobile Steering Sensitivity. In: Human Factors (1974), 16(1), 29-36. New York: Human Factors Society
- [269] Tajima, J. et al.: Effects of Steering System Characteristics on Control Performance from the Viewpoint of Steer-by-Wire System Design. SAE Technical Paper Series 1999-01-0821. Warrendale: SAE, 1999
- [270] Tanaka, T. et al.: An Advanced Electrical Power Steering Motor. SAE Technical Paper Series 2001-01-0483. Warrendale: SAE, 2001
- [271] Terlinden, M., Doedelbacher, G.: Parametereinflüsse auf das Lenkradüberschwingen von Frontantriebsfahrzeugen. In: VDI-Berichte 537, 377-393. Düsseldorf: VDI, 1984
- [272] Theis, I.: Das Steer-by-Wire-System im Kraftfahrzeug: Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit. Dissertation, Technische Universität München, 2002
- [273] Tiesler, G.: Bewegungswahrnehmung in Fahrzeugsimulatoren. Bericht 12. Meckenheim: Forschungsinstitut für Anthropotechnik, 1973
- [274] TNS EMNID: Das "Traumauto" der Deutschen. Bielefeld: TNS EMNID Automotive-Umfrage, 2001
- [275] Tomaske, W.: Einfluß der Bewegungsinformation auf das Lenkregelverhalten des Fahrers sowie Folgerungen für die Auslegung von Fahrsimulatoren. Dissertation, Hochschule der Bundeswehr Hamburg, 1983

- [276] Tran, V.-T.: Handling Control with Additional Rear Wheel Steering. In: Proceedings of 24th Fisita World Congress (1992), London, England, 7.-11.6.1992, 1, 75-86, (925050)
- [277] Ugo, A., Data, S.: Objective Evaluation of Steering System Quality. In: Proceedings of 26th Fisita World Congress (1996), Prag, Tschechei, 17.-21.6.1996, 1606
- [278] United States Patent: Vehicle Control System Adjustable in Accordance with Driver's Age and Characteristic. Patent Number: 5,172,785, Date of Patent: 12-22-1992
- [279] Van Zanten, A., Erhardt, R.: Korrelation zwischen Simulation und Fahrversuch bei der Entwicklung der Fahrdynamikregelung. In: Tagungsband Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 30.11.-1.12.98
- [280] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Daten zur Automobilwirtschaft 2003. Frankfurt: VDA, 2003
- [281] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Daten zur Automobilwirtschaft 1999. Frankfurt: VDA, 1999
- [282] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Daten zur Automobilwirtschaft 1998. Frankfurt: VDA, 1998
- [283] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA): Jahresbericht Auto 2003. Frankfurt: VDA, 2002
- [284] Wagner, A., Wiedemann, J.: Die Bewertung der Fahrer-Fahrzeug Interaktion als Auslegungskriterium in der Fahrwerkentwicklung. In: Tagungsband Fahrwerktechnik – Haus der Technik e.V., München, Deutschland, 2.-4.6.2003
- [285] Waldmann, D.: Beitrag zum Verhalten des Systems Fahrer-Fahrzeug unter besonderer Berücksichtigung von Lenkübersetzung und Lenkmoment. Dissertation, Technische Universität München, 1974
- [286] Waldmann, D.: Untersuchungen zum Einfluss der Eigenschaften des Lenksystems auf das Verhalten des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug. Deutsche Kraftfahrtforschung und Strassenverkehrstechnik, Heft 247. Düsseldorf: VDI, 1975
- [287] Waldmann, D.: Untersuchungen zum Lenkverhalten von Kraftfahrzeugen. Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik, Heft 218. Düsseldorf: VDI, 1971
- [288] Wallentowitz, H.: Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung. In: Tagungsband Tag des Fahrwerks, Aachen, Deutschland, 7.10.2002
- [289] Wallner, F.: Untersuchungen am System Fahrzeug-Fahrer-Straße bei simuliertem Fahrzeug und simulierter Straße. Über den Einfluß unkonventioneller Lenksysteme auf die Lenkbarkeit des Fahrzeugs. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1972
- [290] Wargo, M.-J.: Human Operator Response Speed, Frequency, and Flexibility, A Review and Analysis. In: Human Factors (1967), 9(3), 221-238. New York: Human Factors Society
- [291] Weinberger, M.: Der Einfluß von Adaptive Cruise Control Systemen auf das Fahrverhalten. Dissertation, Technische Universität München, 2001
- [292] Weir, D.-H., DiMarco, R.-J.: Correlation and Evaluation of Driver/Vehicle Directional Handling Data. SAE Technical Paper Series 780010. Warrendale: SAE, 1978
- [293] Weir, D.-H., McRuer, D.-T.: A Theory for Driver Steering Control of Motor Vehicles. In: Highway Research Record 247, 7-28. Washington: National Research Council, 1968.
- [294] Weir, D.-H., McRuer, D.-T.: Measurement and Interpretation of Driver Steering Behaviour and Performance. SAE Technical Paper Series 730098. Warrendale: SAE, 1973

-
- [295] Weir, D.-H., McRuer, D.-T.: Measurement and Interpretation of Driver/Vehicle System Dynamic Response. In: Human Factors (1973), 15(4), 367-378. New York: Human Factors Society
- [296] Weir, D.-H., Wojcik, C.-K.: Simulator Studies of the Driver's Dynamic Response in Steering Control Tasks. In: Highway Research Record 364, 1-15. Washington: National Research Council, 1971
- [297] Weißbrich, A.: Elektrischer Antrieb zur Lenkunterstützung im Personenkraftwagen. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12, 144. Düsseldorf: VDI, 1990
- [298] Wenninger, G.: Lexikon der Psychologie - in fünf Bänden. Heidelberg: Spektrum, 2000-2002
- [299] Whitehead, J.-C.: Stabilizing the Steering Weave Mode. SAE Technical Paper Series 881136. Warrendale: SAE, 1988
- [300] Willumeit, H.-P., Jürgensohn, T.: Fahrermodelle – ein kritischer Überblick Teil 1. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1997) 7/8, 424-428. Wiesbaden: Vieweg
- [301] Willumeit, H.-P., Jürgensohn, T.: Fahrermodelle – ein kritischer Überblick Teil 2. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1997) 9, 552-560. Wiesbaden: Vieweg
- [302] Winner, H., Breuer, B.: Skriptum zur Vorlesung Kraftfahrzeuge I / II. Fachgebiet Fahrzeugtechnik, Technische Universität Darmstadt, 2003
- [303] Wohnhaas, A.: Simulation von Kraftfahrzeug-Lenkungen unter besonderer Berücksichtigung von Reibung und Spiel. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994
- [304] Yuhara, N., Tajima, J.: Advanced Steering System Adaptable to Lateral Control Task and Driver's Intention. In: Vehicle System Dynamics (2001), 36/2-3, 119-158. Amsterdam: Swets & Zeitlinger
- [305] Zaremba, A.-T., Liubakka, M.-K., Stuntz, R.-M.: Control and Steering Feel Issues in the Design of an Electric Power Steering System. In: Proceedings of the 1998 American Control Conference (ACC) (1998), Philadelphia, USA, 24.-26.6.1998, 36-40
- [306] Zeyada, Y., et al.: A Combined Active-Steering Differential-Braking Yaw Rate Control Strategy for Emergency Maneuvers. SAE Technical Paper Series 980230. Warrendale: SAE, 1998
- [307] ZF Lenksysteme: Produktinformationen, Broschüre, 2001
- [308] ZF Sachs: Kompromisse ja. Aber nicht im Fahrwerk. CDC – Continuous Damping Control. Schweinfurt: ZF Sachs AG, Pressemitteilung, 10/2003
- [309] Zomotor, A., Braess, H.-H., Rönitz, R.: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen – Teil 1. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1997) 12, 780-786. Wiesbaden: Vieweg
- [310] Zomotor, A., Braess, H.-H., Rönitz, R.: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen – Teil 2. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1998) 3, 236-243. Wiesbaden: Vieweg
- [311] Zomotor, A.: Fahrwerktechnik, Fahrverhalten. Würzburg: Vogel, 1987
- [312] Zomotor, A.: Historische Entwicklung der Beurteilungsmethoden für das Fahrverhalten. In: Tagungsband Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen – Haus der Technik e.V., Essen, Deutschland, 30.11.-1.12.98
- [313] Zomotor, A.: Rechenverfahren zur Ermittlung der Rückstellmomente am Achsschenkel von Kraftfahrzeugen – Teil 1. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1963) 2, 42-48. Wiesbaden: Vieweg

- [314] Zomotor, A.: Rechenverfahren zur Ermittlung der Rückstellmomente am Achsschenkel von Kraftfahrzeugen – Teil 2. In: Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) (1963) 4, 101-106. Wiesbaden: Vieweg