

Alexander K. Zschocke

**Ein Beitrag zur objektiven und subjektiven
Evaluierung des Lenkkomforts von Kraftfahr-
zeugen**

A contribution to the objective and subjective
steering comfort evaluation of automobiles

Band 34

Herausgeber: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Copyright: Institut für Produktentwicklung
Universität Karlsruhe (TH), 2009

Alle Rechte vorbehalten

Druck: E&B printware Digital- und Schnelldruck GmbH, Karlsruhe
Tel.: 0721/9 62 26-900

ISSN 1615-8113

Ein Beitrag zur objektiven und subjektiven Evaluierung des Lenkkomforts von Kraft- fahrzeugen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe

genehmigte
Dissertation
von

Dipl.-Ing. Alexander K. Zschocke
aus Tegernau

Tag der mündlichen Prüfung: 28. April 2009

Hauptreferent: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers

Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. F. Gauterin

Vorwort des Herausgebers

Wissen ist einer der entscheidenden Faktoren in den Volkswirtschaften unserer Zeit. Der Unternehmenserfolg wird in der Zukunft mehr denn je davon abhängen, wie schnell ein Unternehmen neues Wissen aufnehmen, zugänglich machen und verwerten kann. Die Aufgabe eines Universitätsinstitutes ist es, hier einen wesentlichen Beitrag zu leisten. In den Forschungsarbeiten wird ständig Wissen generiert. Dieses kann aber nur wirksam und für die Gemeinschaft nutzbar werden, wenn es in geeigneter Form kommuniziert wird. Diese Schriftenreihe dient als eine Plattform zum Transfer und macht damit das Wissenspotenzial aus aktuellen Forschungsarbeiten am IPEK Institut für Produktentwicklung Karlsruhe (ehemals: Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau) verfügbar.

Die Forschungsfelder des Institutes sind die methodische Entwicklung und das Entwicklungsmanagement, die rechnergestützte Optimierung von hochbelasteten Strukturen und Systemen, die Antriebstechnik mit einem Schwerpunkt auf den Gebieten Antriebsstrang-Engineering und Tribologie von Lager- und Funktionsreibsystemen, die Mikrosystemtechnik mit dem Focus auf die zugehörigen Entwicklungsprozesse sowie die Mechatronik. Die Forschungsberichte werden aus allen diesen Gebieten Beiträge zur wissenschaftlichen Fortentwicklung des Wissens und der zugehörigen Anwendung – sowohl den auf diesen Gebieten tätigen Forschern als auch ganz besonders der anwendenden Industrie – zur Verfügung stellen. Ziel ist es, qualifizierte Beiträge zum Produktentwicklungsprozess zu leisten.

Albert Albers

Vorwort zu Band 34

In den zunehmend gesättigten Kraftfahrzeugmärkten für PKWs in den Industrieländern kommt der gelungenen Abstimmung des Gesamtsystems Kraftfahrzeug auf die vom Kunden gewünschten Komfort- und NVH-Eigenschaften eine hohe Bedeutung bei der Kaufentscheidung zu. Das Problem im Entwicklungsprozess besteht hierbei in der möglichst frühzeitigen Evaluierung sowie der Verknüpfung und Beschreibung des Kundenwunsches hinsichtlich der Fahrzeugeigenschaften durch geeignete Methoden und Verfahren. Im NVH-Bereich ist hier das Forschungsgebiet der Komfort-Objektivierung wesentlich. Hierbei wird versucht, durch die Korrelation von subjektiven Eindrücken bei Fahrern und objektiv gemessenen Kennwerten einen Zusammenhang zwischen diesen beiden, den Komfort beschreibenden, Größen herzustellen. Damit soll es ermöglicht werden, über Modelle bereits in den frühen Entwicklungsphasen die zu entwickelnden technischen Systeme unter dem Gesichtspunkt Komfort zu beschreiben. Moderne Entwicklungsprozesse nutzen verstärkt rechnerbasierte Methoden und eine starke Interaktion zwischen virtueller und physikalischer Validation mit speziell ausgestalteten Versuchsträgern. Mit einem solchen ganzheitlichen Ansatz können die notwendigen Erkenntnisse zur Umsetzung der Zielsysteme der Fahrzeugentwicklung in erfolgreiche Produkte nachhaltig unterstützt werden. Das IPEK - Institut für Produktentwicklung der Universität Karlsruhe forscht auf dem Gebiet der Entwicklungsprozesse seit vielen Jahren und fokussiert dies insbesondere auf die Fahrzeugentwicklung. Im Rahmen dieser Forschungsansätze ist die Dissertation von Herrn Dr.-Ing. Alexander Zschocke angeordnet. Eine wichtige, die Kaufentscheidung beeinflussende Größe ist der Lenkkomforteindruck. Heute üblich ist die Ermittlung des Lenkkomforts durch die subjektive Beurteilung mittels besonders ausgebildeter Versuchsfahrer in Prototypen und Serienfahrzeugen. Eine große Herausforderung ist es, eine für den Lenkkomfort gültige Methode zur Validierung dieser Kenngröße zu ermitteln und hierbei insbesondere subjektive und objektive Beurteilungen zu korrelieren. An dieser Stelle setzt die Dissertation von Herrn Dr.-Ing. Zschocke an. Er hat sich in seiner Arbeit das Ziel gesetzt, objektive Fahrdynamik-Kenngrößen zu bestimmen, die den subjektiven Fahreindruck beschreiben. Dazu sollen die subjektiven Eindrücke zu objektiven Parametern korreliert werden, die messtechnisch und simulativ erfasst, bewertet und im Zielsystem des Fahrzeuges festgeschrieben werden können. Damit kann für den Produktentstehungsprozess von Fahrzeugen durch die erarbeiteten Kennwerte der Aspekt Querdynamik und hier insbesondere der Lenkkomfort als steuernde Größe genutzt werden. Die zentrale Hypothese der Arbeit ist hierbei, dass definierte Zusammenhänge zwischen dem subjektiven Eindruck und objektiven Kenngrößen des Kraftfahrzeugs bestehen. Die Überprüfung dieser Hypothese für den Aspekt der Querdynamik und hier im Besonderen des Lenkkomforts ist der zentrale Handlungsstrang der Arbeit von Herrn

Zschocke. Die von Ihm entwickelte Methode leistet einen wichtigen Beitrag für die zukünftige Fahrzeugentwicklung unter dem Gesichtspunkt Lenkkomfort.

Mai 2009

Albert Albers

Kurzfassung

Im Produktentwicklungsprozeß eines Automobils nimmt das objektive Fahrverhalten eine wichtige Stellung ein. Denn der Fahrzeuglenker nimmt es subjektiv wahr, evaluiert es und lässt die Meinung darüber in sein Urteil über das Fahrzeug mit einfließen. Um diese subjektiven Eindrücke in den verschiedenen Phasen der Automobilentwicklung durchgängig zu verankern und die Reifegrade mit einer Referenz abzugleichen, bedarf es objektiver Methoden der Validierung, mit deren Erforschung und Entwicklung sich das IPEK - Institut für Produktentwicklung der Universität Karlsruhe (TH) einging und gesamthaft beschäftigt.

In der Praxis wird die Ausprägung des Fahrverhaltens allerdings noch immer hauptsächlich subjektiv gestaltet. Um den monetären, qualitativen und zeitlichen Herausforderungen in der Entwicklung zu begegnen, erfordert es vielmehr objektiver Parameter, die sowohl experimentell als auch simulativ und somit in vorgelagerten Stadien bestimmt werden können. Die vorliegende Arbeit trägt zu neuen objektiven Kenngrößen bei, die den subjektiven, querdynamischen Gesamteindruck mit Fokus auf die fahrdynamische Größe Lenkmoment beschreiben.

Zu Beginn der Ausarbeitung wird nach den einleitenden Überlegungen die Thematik anhand objektiver und subjektiver Gesichtspunkte der Fahreigenschaftsbeschreibung getrennt betrachtet bzw. bisherige Korrelationsanalyseergebnisse zwischen den beiden Aspekten präsentiert. Daraus werden Forderungen für diese Arbeit abgeleitet und mit Hilfe von experimentellen und modellbasierten Methoden auf Basis eines statistischen Auswerteverfahrens beantwortet.

Am Beispiel von zehn realen Fahrzeugen spiegeln die objektiven Prüfmanöver mit den daraus extrahierten Kenngrößen den subjektiven Lenkkomfort-Eindruck des Gesamtfahrzeugs im Eigenlenken, Schwimmen, Gieren, Querschleunigen und Wanken sehr gut wider. Aufgeworfene Fragestellungen wie nach der Rolle des Lenkmoments in Spurwechseln und beim Hochgeschwindigkeitsgeradeauslauf werden im nächsten Schritt mit einer Basisanforderung der Lenkmomenthysterese aufgeklärt. Zur notwendigen stationären Grundabstimmung des Lenkmoments wird eine modellbasierte Methode vorgestellt, mit deren Hilfe das Lenkmoment eindeutig als Lenkcharakter-Größe identifiziert und die Brücke zwischen experimenteller und virtueller Produktentwicklung geschlagen werden kann. Darüber hinaus werden an einem weiteren Beispiel interkulturelle Unterschiede und Gemeinsamkeiten in der Evaluierung von Lenkmomenten aufgedeckt. Infolge der Analysen kann der subjektive Lenkcharakter hinsichtlich der Größe Lenkmoment in objektive Kenngrößen in Form von Beträgen, Steigungen und Hysterese Maße überführt werden.

Abstract

Objective handling performance of an automobile plays a key role within the product development process. Since drivers subjectively perceive the vehicle dynamics, they evaluate it and incorporate their opinion into the integral assessment of a car. Its validation requires objective methods, which allow for continuous anchorage of these subjective impressions within different phases of the vehicle development and for matching particular degrees of maturity with a specific reference. The IPEK - Institute of Product Development, University of Karlsruhe, is engaged on this field of research in a neat and holistic way.

However, in practice, shaping the vehicle handling is still mainly accomplished in a subjective way. Meeting the monetary, qualitative and time challenges necessitates objective parameters, which can be determined both experimentally and virtually, and for this reason in front-loaded stages. The work at hand contributes to new objective measures that describe the subjective lateral overall picture with a main focus on the driving dynamics quantity steering torque.

At the beginning of the thesis, this topic is considered separately for objective and subjective aspects of handling characteristics. Moreover, hitherto correlation analyses results of previous research on these two aspects are presented. Hence, demands for this work are derived from and answered with the help of experimental and model-based methods based on a statistical analysis procedure.

Exemplified by ten real cars, measures extracted from objective test manoeuvres reflect very well the subjective steering comfort regarding vehicle steer, slip, yaw, lateral acceleration and roll. Questions posed related to the role of steering torque in lane-changes and high-speed driving are clarified in subsequent steps with the property of steering torque hysteresis. A model-based method is introduced for the purpose of a basic stationary steering torque set-up. Thus, steering torque can be identified as a steering character quantity and the gap between experimental and virtual product development can be bridged. Furthermore, based on another example, intercultural differences and similarities in steering torque evaluations can be disclosed. In consequence of the analyses, it is now possible to transfer subjective steering character concerning the quantity steering torque into objective measures in the form of magnitudes, gradients and hysteresis parameters.

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt dem Leiter des IPEK - Institut für Produktentwicklung Karlsruhe, meinem Doktorvater Herrn o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers, der durch seine Beratung wichtige Impulse setzte bzw. mir die notwendige wissenschaftliche Freiheit gewährte. Für die Übernahme des Koreferats und sein Interesse an der wissenschaftlichen Arbeit bin ich Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin sehr dankbar.

Die vorliegende Ausarbeitung resultiert aus meiner Tätigkeit als Doktorand in der Mercedes-Benz Cars Entwicklungsabteilung „Fahrndynamik, Versuch und Analyse“ der Daimler AG, Sindelfingen. Meinen Vorgesetzten, den Herren Ingenieuren Dr. Rüdiger Rutz, Dr. Christian Olfens und Wolfgang Schindler fühle ich mich für die Chance, die sie mir mit der Übertragung dieser Aufgabe gegeben hatten, zu großem Dank verpflichtet. Insbesondere Herrn Wolfgang Schindler danke ich für die wertvollen fachlichen Beiträge, die diese Arbeit mitgeprägt haben. Ich schätze zudem die Diskussionen und Arbeitsatmosphäre im Kollegenkreis; die namentliche Liste würde den Umfang an dieser Stelle überschreiten, stellvertretend seien die Kollegen Frau Dr. Heike Schönerstedt und Herr Luc Diebold genannt.

Für den fruchtbaren interdisziplinären Austausch danke ich den Herren Dipl.-Ing. Björn Stehle und Simon Dylla bzw. für die Reflektion und Begleitung der Arbeit dem Oberingenieur der IPEK-Forschungsabteilung 1 Herrn Sascha Ott.

Sindelfingen, September 2008

A. K. Zschocke

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Stand der Forschung und Technik..... | 5 |
| 2.1 | Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen..... | 5 |
| 2.1.1 | Die Modellvorstellung: das Einspurfahrzeug | 6 |
| 2.1.2 | Der „Weg“ über das Gesamtfahrwerk von der Fahrbahn zum Fahrer..... | 8 |
| 2.1.3 | Das Teilsystem Hilfskraftlenkung | 10 |
| 2.1.4 | Die subjektiven Eindrücke der Fahreigenschaften | 12 |
| 2.1.5 | Die objektive Beschreibung des Fahrverhaltens | 16 |
| 2.2 | Arbeiten über die Objektivierung des subjektiven Fahreindrucks | 24 |
| 2.2.1 | Objektivierungsarbeiten in Bezug auf querdynamische Fahrmanöver..... | 26 |
| 2.2.2 | Objektivierungsarbeiten mit Hilfe von Modellansätzen..... | 33 |
| 2.3 | Modellbasierte Systemanalyse und Simulation..... | 38 |
| 2.3.1 | Modellbasierte Fahrdynamikanalyse durch ein Erweitertes Einspurmodell..... | 39 |
| 2.3.2 | Lenkungsmodelle | 40 |
| 2.4 | Werkzeuge zur Analyse von potentiellen Korrelationen..... | 48 |
| 2.4.1 | Das subjektive „Meßinstrument“: der Fragebogen | 48 |
| 2.4.2 | Meßtechnik im objektiven Fahrdynamikversuch | 52 |
| 2.4.3 | Statistische Auswertemethoden | 53 |
| 2.4.4 | Anmerkungen zu den Versuchsbedingungen | 59 |
| 3 | Ziele der Arbeit..... | 63 |
| 4 | Suche nach subjektiv-objektiv Zusammenhängen des Lenkkomforts auf Basis realer Fahrzeuge | 67 |
| 4.1 | Objektive Aspekte | 67 |
| 4.1.1 | Durchführung der Open-Loop Fahrdynamiktestmanöver..... | 67 |
| 4.1.2 | Versuchsergebnisse und extrahierte Kenngrößen | 68 |
| 4.2 | Subjektive Aspekte..... | 86 |
| 4.2.1 | Fahrprofile und Fahrerfeld..... | 86 |
| 4.2.2 | Kriterien- und Fragebogenentwicklung..... | 88 |
| 4.3 | Auswertemethoden und Auswerteablauf | 93 |
| 4.3.1 | Deskriptive Statistik und Hypothesentests: z-Transformation, Verteilungs- und Ausreißertests, Reliabilität und Varianzanalyse..... | 93 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 4.3.2 | Redundanz- und Korrelationsbetrachtung innerhalb der subjektiven Daten | 98 |
| 4.3.3 | Redundanzbetrachtung innerhalb der objektiven Daten | 103 |
| 4.3.4 | Korrelationsanalyse zwischen den objektiven und subjektiven Daten | 106 |
| 4.4 | Hauptfunde der Einzelverknüpfungen zwischen subjektiver Bewertung und objektiver Kenngröße | 112 |
| 4.4.1 | Im Stadtverkehr | 112 |
| 4.4.2 | Auf der Landstraße | 113 |
| 4.4.3 | Auf der Autobahn | 115 |
| 4.4.4 | Im ISO-Spurwechsel | 117 |
| 4.5 | Multivariate Betrachtung der Zusammenhänge zwischen subjektiver Bewertung und objektiven Kenngrößen | 119 |
| 5 | Modellbasierte Ansätze zur Untersuchung des Lenkcharakters | 127 |
| 5.1 | Entwicklungswerkzeug Lenkmomentensteller | 128 |
| 5.2 | Rolle des Lenkmoments im dynamischen Fall eines Fahrspurwechsels | 129 |
| 5.2.1 | Hintergrund und Modellbildung | 129 |
| 5.2.2 | Versuchsplan | 132 |
| 5.2.3 | Versuchsergebnisse | 136 |
| 5.3 | Rolle des Lenkmoments bei Hochgeschwindigkeitsfahrt..... | 140 |
| 5.3.1 | Abhängigkeit der Lenkmomenthysterese von Fahrgeschwindigkeit und Querbeschleunigung | 140 |
| 5.3.2 | Versuchsplan zur Untersuchung des Geradeauslaufs im Zusammenhang mit der Lenkmomenthysterese..... | 142 |
| 5.3.3 | Versuchsergebnisse | 145 |
| 5.4 | Verknüpfung des virtuellen und realen Fahrversuchs über parameteridentifizierte Lenkmomentencharakteristika am Beispiel einer Landstraßenfahrt | 147 |
| 5.4.1 | Methode zum Erfahrbarmachen modellbasierter Lenkmomente | 148 |
| 5.4.2 | Variantengenerierung durch Modellparametrierungen | 154 |
| 5.4.3 | Versuchsplan | 156 |
| 5.4.4 | Versuchsergebnisse | 161 |
| 5.4.5 | Rekapitulation der Methode zur Objektivierung | 167 |
| 5.5 | Ausprägung des Lenkcharakters in Bezug auf US-amerikanische Fahrer..... | 169 |
| 5.5.1 | Versuchsplan | 169 |
| 5.5.2 | Versuchsergebnisse | 174 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 179 |

| | | |
|----------|----------------------------------|------------|
| 7 | Literaturverzeichnis..... | 183 |
| | 7.1 Referenzen..... | 183 |
| | 7.2 Bibliographie | 194 |
| | Anhang..... | 198 |
| | Lebenslauf | 202 |

Formelzeichen, Abkürzungen, Indizes

| | | |
|------------|-------------|--|
| a | | Vektor der Achsenabschnitte von Regressionsgeraden |
| a_c | m/s^2 | Querbeschleunigung in Richtung des Bahnradius |
| a_y | m/s^2 | Querbeschleunigung |
| A | mm^2 | Kolbenfläche |
| α | $^\circ$ | Schräglaufwinkel |
| α_V | $^\circ$ | Schräglaufwinkel an der Vorderachse |
| α_H | $^\circ$ | Schräglaufwinkel an der Hinterachse |
| b | | Vektor der Steigungskoeffizienten |
| β | $^\circ$ | Schwimmwinkel |
| β_F | Pa | Kompressionsmodul des Hydraulikfluids |
| C_{prim} | $Nm/^\circ$ | Primärsteifigkeit |
| C_{SV} | $N/^\circ$ | Vorderachsschräglaufsteifigkeit |
| C_{SH} | $N/^\circ$ | Hinterachsschräglaufsteifigkeit |
| C_a | Nm | primärseitiges Reibmoment |
| C_b | Nm | Moment am Torsionsstab |
| C_{qA} | | Dynamikkoeffizient |
| C_R | $Nm.^\circ$ | Steifigkeitskoeffizient des Reibelements |
| CAN | | (engl.) Controller Area Network |
| C_{SW} | Nm | Lenkmoment |
| C_W | N/mm | Wanksteifigkeit |
| $C_{1..5}$ | | Skalierungsfaktoren |

| | | |
|-------------------------|----------------|---|
| γ | $^\circ$ | Sturz |
| d_{iS} | | differentielle Lenkübersetzung |
| d_R | s^2/Nm° | Dämpfungskoeffizient des Reibelements |
| d_{LD} | Ns^2 | Lenkungs­dämpfungskoeffizient |
| d_{TT} | Ns | primärseitige Dämpfungskonstante |
| d_W | Ns | Wankdämpfung |
| $\bar{\delta}_F$ | $^\circ$ | Radwinkel |
| $\bar{\delta}_H$ | $^\circ$ | Lenkradwinkel, Lenkwinkel |
| $\dot{\bar{\delta}}_H$ | $^\circ/s$ | Lenkradwinkelgeschwindigkeit, Lenkgeschwindigkeit |
| $\ddot{\bar{\delta}}_H$ | $^\circ/s^2$ | Lenkradwinkelbeschleunigung |
| $\bar{\delta}_{Pi}$ | $^\circ$ | Ritzelwinkel |
| $\bar{\delta}_S$ | $^\circ$ | Lenkradwinkel, Lenkwinkel |
| $\bar{\delta}_V$ | $^\circ$ | Radwinkel an der Vorderachse |
| $\ddot{\bar{\delta}}_V$ | $^\circ/s^2$ | Radwinkelbeschleunigung |
| ECU | | (engl.) Electronic Control Unit |
| EHPS | | (engl.) Electro-Hydraulic Power Steering |
| EPS | | (engl.) Electric Power Steering |
| f | Hz | Lenkfrequenz |
| FFT | | Fast Fourier Transformation |
| F_a | N | sekundärseitige Reibkraft |
| F_C | N | im Fahrzeugschwerpunkt resultierende Zentralkraft |
| $F_{D, \text{lim}}$ | N | Begrenzungswert des Dämpfungsanteils im Reibelement |

| | | |
|--------------------------|------------------|---|
| $F_{R \text{ prim/sek}}$ | N | Primär-/sekundärseitige Reibkraft |
| $F_{R, \text{an}}$ | N | analysierter Wert der Reibkraft |
| F_{KSF} | N | Radaufhängungsquerkraft |
| F_{PR} | N | auf die Kolbenfläche wirkende Kraft |
| F_r | N | an der Zahnstange wirkende Seitenkraft |
| F_R | N | Zahnstangenkraft |
| F_S | N | Lenkunterstützungskraft |
| F_{SF} | N | Seitenkraft |
| F_{SV} | N | Seitenkraft |
| h_{SP} | mm | Abstand Radaufstandsfläche zu Schwerpunkt |
| h_{WP} | mm | Abstand Radaufstandsfläche zu Wankpol |
| HPS | | (engl.) Hydraulic Power Steering |
| θ | ° | Nicken |
| i_K | | Kardanikübersetzung |
| I_{SW} | Ns^2 | Lenkradmassenträgheitsmoment |
| J_H | $kg \text{ m}^2$ | Lenkradträgheitsmoment |
| J_R | $kg \text{ m}^2$ | Radträgheitsmoment |
| J_{uF} | $kg \text{ m}^2$ | Radträgheitsmoment |
| J_X | $kg \text{ m}^2$ | Wankträgheitsmoment |
| J_Z | $kg \text{ m}^2$ | Gierträgheitsmoment |
| k_{TT} | N/mm | primärseitige Steifigkeit |

| | | |
|------------------------|----|---|
| l | mm | Radstand |
| l_v | mm | Längsabstand zwischen Schwerpunkt und Vorderachse |
| l_H | mm | Längsabstand zwischen Schwerpunkt und Hinterachse |
| m | | Anzahl der Prädiktoren |
| m_g | kg | Fahrzeugmasse |
| m_{uF} | kg | ungefederte Radmasse |
| M | kg | Masse der Sekundärseite |
| MbT | | (engl.) Model-based Testing |
| M_D | Nm | Dämpfungsmoment |
| M_ϵ | Nm | Gewichtsrückstellmoment |
| M_H | Nm | Lenkradmoment, Lenkmoment |
| M_{hyd} | Nm | Unterstützungsmoment |
| M_L | Nm | Reifenrückstellmoment |
| MP | Nm | Momentanpol |
| M_{PML} | Nm | fahrgeschwindigkeitsabhängiges Lenkmoment |
| M_R | Nm | Rückstellmoment |
| $M_{R, prim}$ | Nm | Primärreibung |
| $M_{R, sek}$ | Nm | Sekundärreibung |
| $M_{R, prim/sek, an}$ | Nm | Analysegrenzwert des Winkelanteils im Reibelement |
| $M_{D, prim/sek, lim}$ | Nm | optimierter Grenzwert des Dämpfungsteils im Reibelement |
| M_{Reib} | Nm | Reibungsmoment |
| M_S | Nm | Lenkmoment |
| M_{SC} | Nm | Achsrückstellmoment |
| M_T | Nm | Trägheitsmoment |

| | | |
|---------------------|--------------------|--|
| n | | Stichprobengröße |
| n_K | mm | konstruktiver Nachlauf |
| n_R | mm | pneumatischer Reifennachlauf |
| NVH | | (engl.) Noise Vibration Harshness |
| Δp | Pa | Druckdifferenz zwischen den Hydraulikkammern |
| p_L, p_R | Pa | Hydraulikdruck in linker und rechter Kammer |
| Q_L, Q_R | cm ³ /s | Hydraulikvolumenstrom in linkem und rechtem Zweig |
| r | mm | Ritzelradius |
| r_K | m | Kurvenradius |
| r_L | mm | Spurhebellänge |
| r_S | mm | Lenkrollhalbmesser |
| R | | Korrelationskoeffizient |
| R^2 | | Determinationskoeffizient, Bestimmtheitsmaß |
| R^2_{korr} | | korrigiertes Bestimmtheitsmaß |
| R_{yx} | | Korrelationskoeffizient zwischen Variable y und x |
| R_{xz} | | Korrelationskoeffizient zwischen Variable x und z |
| R_{yz} | | Korrelationskoeffizient zwischen Variable y und z |
| R_{yxz} | | partieller Korrelationskoeffizient zwischen Variable y, x, z |
| ρ | g/cm ³ | Fluidichte |
| s_R | mm | Zahnstangenweg |
| S | N | Seitenkraft |

| | | |
|-------------------|------------------|---|
| S_V | N | Seitenkraft an der Vorderachse |
| S_H | N | Seitenkraft an der Hinterachse |
| SP | | Schwerpunkt |
| SUV | | (engl.) Sports Utility Vehicle |
| σ | ° | Spreizung |
| σ_x | | Standardabweichung der unabhängigen Variablenwerte |
| σ_y | | Standardabweichung der abhängigen Variablenwerte |
| $\sigma_{y, ind}$ | | Standardabw. der individuellen Noten eines Kriteriums |
| t | | t-Prüfgröße der Statistik |
| τ | ° | Nachlaufwinkel |
| τ_{DS} | ° | Torsionsstabverdrehwinkel |
| U_A | N | Antriebsumfangskraft |
| U_B | N | Bremsumfangskraft |
| v | km/h | Fahrgeschwindigkeit |
| v_V | m/s | Radschwerpunktsgeschwindigkeit an der Vorderachse |
| v_H | m/s | Radschwerpunktsgeschwindigkeit an der Hinterachse |
| v_{max} | km/h | Fahrzeughöchstgeschwindigkeit |
| V | mm ³ | Fluidvolumen |
| φ | ° | Wankwinkel |
| $\dot{\varphi}$ | °/s | Wankwinkelgeschwindigkeit, Wankgeschwindigkeit |
| $\ddot{\varphi}$ | °/s ² | Wankwinkelbeschleunigung, Wankbeschleunigung |

| | | |
|-----------------|------------------|---|
| WP | | Wankpol |
| x | | Fahrzeuglängsachse |
| x_i | | Einzelwert einer unabh. Variablen aus der Stichprobe |
| x_P | | Matrix der Prädiktorvariablen |
| \bar{x} | | Mittelwert aller Ausprägungen einer unabh. Variablen |
| y | | Fahrzeugquerachse |
| \hat{y} | | durch Regression vorhergesagter Kriteriumsvektor |
| \bar{y} | | Mittelwert aller Ausprägungen einer abhängigen Variablen |
| y_i | | Einzelwert einer abhängigen Variablen aus der Stichprobe |
| \hat{y}_i | | durch Regression vorhergesagter abh. Variablenwert |
| y_{ind} | | individuelle subjektive Bewertungs- oder Beurteilungsnote |
| $y_{ind, z}$ | | Z-transformiertes individuelles Urteil |
| \bar{y}_{ind} | | Mittelwert aller individueller Noten zu einem Kriterium |
| y_w | mm | Radquerweg |
| ψ | ° | Gierwinkel |
| $\dot{\psi}$ | °/s | Gierwinkelgeschwindigkeit, Giergeschwindigkeit, Gierrate |
| $\ddot{\psi}$ | °/s ² | Gierwinkelbeschleunigung |
| z | | Fahrzeughochachse |

1 Einleitung

Fahrer heutiger Kraftwagen erfahren zahlreiche, vielfältige Impressionen während sie ihre Fahrzeugführungsaufgabe erfüllen und bilden sich so eine integrale Meinung über den Charakter eines Fahrzeugs. Die Herausforderung für die Automobilentwickler ist es, jeden einzelnen Aspekt, den die Kunden wahrnehmen, zu befriedigen. Hierbei unterliegen sie im Produktentwicklungsprozeß zeitlichen und monetären Randbedingungen. Im Hinblick auf die Querdynamik von Kraftfahrzeugen bzw. ihrer Lenkeigenschaften, dem „Handling“, wird nach wie vor überwiegend ein Ansatz verfolgt, bei dem verschiedene Fahrwerks- und Lenkungs-komponenten an Prototypen umgebaut und danach im Fahrbetrieb subjektiv beurteilt werden. Diese Herangehensweise schließt Schwächen wie mangelnde Reproduzierbarkeit oder Reliabilität mit ein. Demgegenüber stehen kurze und kürzer werdende Produktlebenszyklen, die eine Verlagerung von Entwicklungsinhalten in die frühe, virtuelle Phase des Produktentstehungsprozesses (PEP) bedingen („Front-loading“), welche die Ingenieure nur mit Hilfe objektiver Werkzeuge bewältigen können.

Produktentstehungsprozesse sind zwar phasenspezifisch ähnlich, aber situations- und umfeldbezogen je nach Sparte individuell angepaßt. In der Produktentwicklung wird ein Zielsystem über den Zeitstrahl hinweg innerhalb eines Handlungssystems konkretisiert und so in das Objektsystem, das Produkt, überführt¹. Für das Produkt Kraftfahrzeug bedeutet das eine Überführung im Prozeßmodell von einer Phase der Profilierung meistens in Anlehnung an eine Vorgängerbaureihe oder als Derivat bis zum Recycling, siehe Abb. 1.1. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die Konzept- und Gestaltrealisierungsphase, die Validierungen beinhaltet². Zur Zieldefinition und zur Zielüberwachung des Systems bedarf es Kriterien; bezogen auf die Fahrwerks- und Lenkungsabstimmung des Fahrzeugs werden diese Kriterien durch Kenngrößen ausgedrückt. Die einzelnen Prozeßschritte sind vernetzt und laufen teilweise simultan ab. Einzelne Problemlösungs-

¹ Albers / Meboldt 2006

² Albers et al. 2006

prozesse sind über den Lebenszyklus hinweg und innerhalb der einzelnen Phasen des Referenzmodells kaskadiert, die wiederum phasenübergreifend interagieren. Übertragen auf die Fahrzeugentwicklung werden die Entwicklungsziele in Konzept- und Lastenheften dokumentiert, in der virtuellen Umgebung simuliert, mit Prototypenteilen in Aggregateträgern erstmals real erprobt, mit Prototypfahrzeugen gesamthaft entwickelt und mit Vorserienfahrzeugen feinabgestimmt. Die verschiedenen Fachbereiche, die diese Entwicklungsphasen bearbeiten und verantworten, können sich dabei immer wiederum auf die Zieldefinitionen berufen.

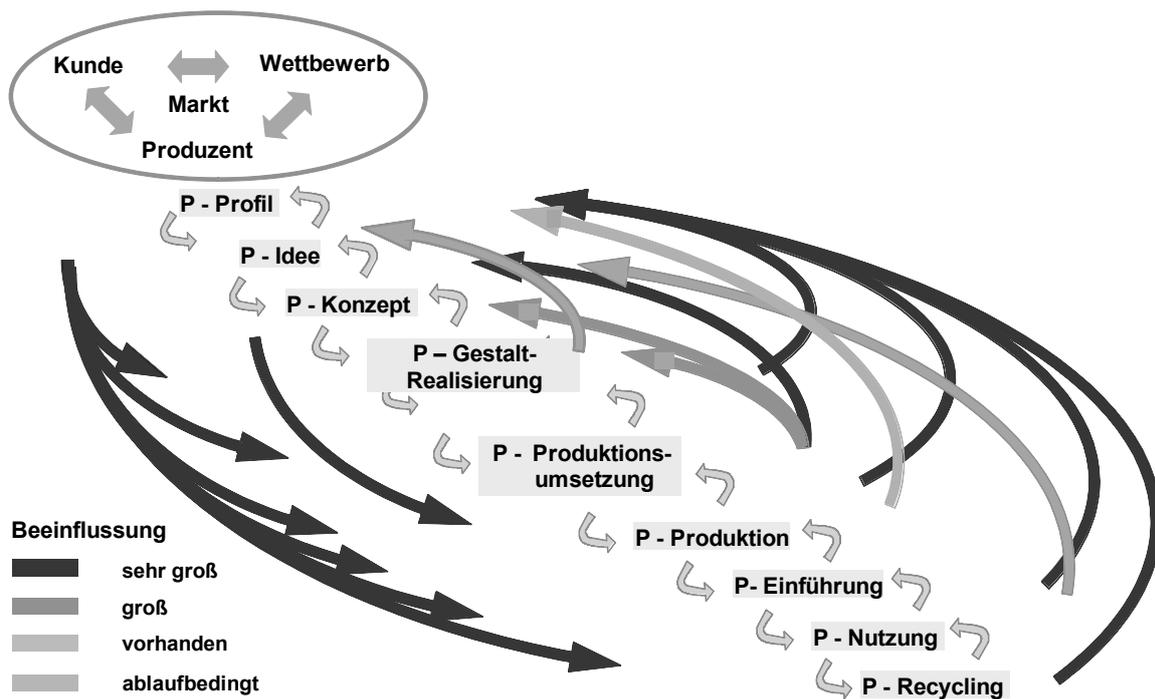


Abb. 1.1: Phasenmodell der Produktentstehung³.

Wie kann, den gesamten Produktentstehungsprozeß hindurch, der subjektive, querdynamische Fahreindruck objektiv in Zieldefinitionen verankert werden? Dieser Frage wird hier nachgegangen, womit der vorliegende Beitrag das IEPK-Forschungsgebiet der Längsdynamik-Komfortobjektivierung⁴ ergänzt.

Die Arbeit beinhaltet zwei Hauptteile; zum einen wird in Kapitel 4 ein Ansatz verfolgt, bei dem mehrere auf dem Markt befindliche Fahrzeuge sowohl objektiv in Open-Loop Fahrdynamikmanövern als auch subjektiv in alltäglichen Fahrprofilen vermessen werden. Die vorgestellten Fahrmanöver liefern objektive Kennwerte,

³ aus Albers 2008

⁴ Albers / Albrecht 2002, Albers / Albrecht 2003, Albers / Albrecht 2004a, Albers / Albrecht 2004b, Albers et al. 2007, Albers et al. 2008a, Albers et al. 2008c

die auf Zusammenhänge mit den subjektiven Fahreindrücken untersucht werden. Zum anderen stehen in Kapitel 5 demgegenüber modellbasierte Ansätze und ein reales Entwicklungswerkzeug, mit Hilfe derer Einzelaspekte der Lenkmomentcharakteristik in einem Versuchsträger betrachtet werden. Die Untersuchungsthemen zur Rolle des Lenkmoments reichen von einfachen Spurwechseln über den Hochgeschwindigkeitsgeradeauslauf bis zur Verknüpfung (durch virtuelle Bauteilveränderungen) von gezielt variierten Kennwerten mit den subjektiven Haupteindrücken über das Lenkmoment. Dazu werden im Einzelnen das Entwicklungswerkzeug, die jeweiligen Modelle, die Kennwerte aus den Manövern, die subjektiven „Meßinstrumente“ Fragebögen und die Korrelationsergebnisse aufgeführt. Diesen beiden Hauptteilen ist im nachfolgenden Kapitel 2 eine Literaturrecherche zum Stand der Forschung und Technik der Fahreigenschaften, Objektivierung und Modellbildung bzw. sind in Kapitel 3 die Ziele der Arbeit vorgelagert. Eine Zusammenfassung mit Ausblick bildet den Abschluß.

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen

Während der Fahrer versucht, seine primären Fahraufgaben⁵ zu erfüllen, befindet er sich in einem Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt, siehe Abb. 2.1. Auf der primären Ebene der Navigation, Führung und Stabilisierung eines Kurses gibt der Fahrer zum einen Lenkinputs in Form des Lenkwinkels und -moments in das Gesamtsystem ein und erhält zum anderen fortwährend Rückmeldungen des Fahrzeugs über den Fahrzustand durch das Lenkmoment und Gesamtfahrzeuggrößen wie der Querbesehleunigung etc. Diese Rückmeldungen und Informationen aus dem Umfeld wie z.B. über die Witterung nimmt er durch mehrere Wahrnehmungskanäle auf. Den theoretischen Grund-

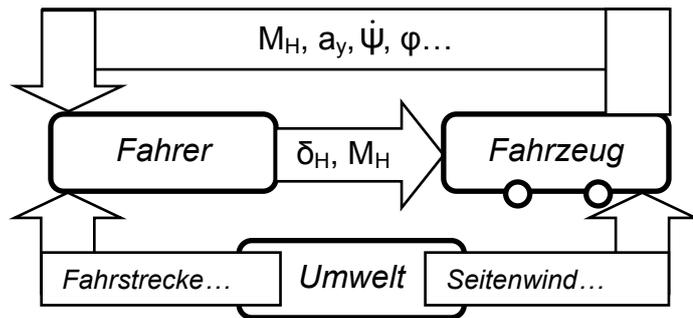


Abb. 2.1: Der Regelkreis Fahrer-Fahrzeug-Umwelt.

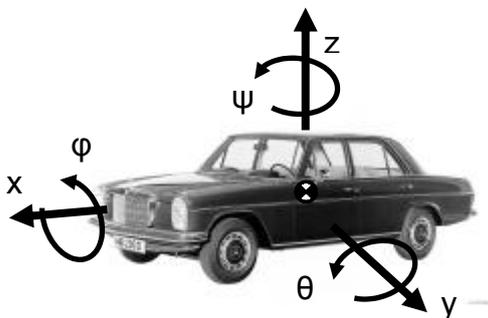


Abb. 2.2: Das Fahrzeugkoordinatensystem.

lagen der Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen und der Frage nach dem „Zustandekommen“ der Größen, die objektiv bestimmt und von denen subjektive Eindrücke gewonnen werden können, gehen die nächsten Unterkapitel nach.

Doch zuvor ist das Koordinatensystem zu definieren, in dem die Fahrzeugbewegungen referenziert sind. In Anlehnung an DIN

⁵ Wolf / Bubb 2005

70000⁶ sind die Fahrzeuglängsachse mit x, -querachse mit y und -hochachse mit z bzw. die Drehungen um diese Achsen mit Wanken φ , Nicken θ und Gieren ψ zeichnet, vergleiche Abb. 2.2.

2.1.1 Die Modellvorstellung: das Einspurfahrzeug

Die Modellvorstellung über das querdynamische Fahrverhalten geht auf die Arbeiten von Riekert und Schunck bzw. Olley⁷ im angelsächsischen Raum aus den vierziger Jahren des letzten Jahrhunderts zurück. Das Einspurmodell, (engl.) „single-track model“, bildet die Basis für die Fahrdynamik-Theorie in heutigen Standardwerken von Zomotor, Mitschke, Wallentowitz oder Milliken jr., sen.⁸ und findet für den linearen Fahrbereich Gültigkeit.

Die Abbildung Abb. 2.3 illustriert das Ersatzmodell, bei dem die vier Achshälften auf zwei Räder reduziert sind. Bei langsamer und so quasi-seitenkraftfreier Fahrt gilt die Ackermann-Bedingung, wobei sich das Fahrzeug um einen Drehpol bewegt und der eingeschlagene Vorderachsraddwinkel dem sog. Ackermannwinkel entspricht. Auf die Lenkeingabe antwortet das Fahrzeug durch Gieren. Unter schnellerer Kurvenfahrt wandert der Momentanpol MP, da die Fliehkraft F_C durch die Achsseitenkräfte, S_V und S_H , abgestützt wird, was wiederum Schräglaufwinkel, α_V und α_H , an den Rädern bedingt. Das Fahrzeug und seine Insassen erfahren eine Querbeschleunigung (a_C in Gl. [2] ist die Beschleunigung in Richtung MP).

Das Aufstellen des Drallsatzes und Kräftegleichgewichts in Querrichtung führt mit der Fahrzeugmasse m_g und dem Gierträgheitsmoment J_Z unter Vernachlässigung der Fahrbahnquerneigung und Aerodynamik zu den rotatorischen und translatorischen Beschleunigungen im Schwerpunkt SP:

$$J_Z \cdot \ddot{\psi} = l_V \cdot S_V \cdot \cos \delta_V - l_H \cdot S_H \quad [1]$$

$$m_g \cdot a_C \cdot \cos \beta = S_V \cdot \cos \delta_V + S_H \quad [2].$$

Die Seitenkräfte können im linearen Fahrbereich und für kleine Winkel als Produkt aus Achsschräglaufsteifigkeit, c_{SV} und c_{SH} , und den Schräglaufwinkeln ausgedrückt werden. Die Schräglaufwinkel wiederum lassen sich mit Hilfe der Achsabstände, l_V und l_H , durch die Zustandsgrößen Schwimmwinkel β , Radwinkel δ_V , Fahrgeschwindigkeit v und Giergeschwindigkeit $\dot{\psi}$ substituieren:

⁶ Norm DIN 70000

⁷ Riekert / Schunck 1940, Olley 1947

⁸ Zomotor 1991, Mitschke / Wallentowitz 2004, Milliken / Milliken 1995

$$\alpha_V = \delta_V - \beta - \frac{\dot{\psi} \cdot l_V}{v} \quad [3]$$

$$\alpha_H = -\beta + \frac{\dot{\psi} \cdot l_H}{v} \quad [4].$$

Somit ergeben sich die Bewegungsgleichungen wie folgt:

$$\ddot{\psi} + \frac{c_{SV} \cdot l_V^2 + c_{SH} \cdot l_H^2}{J_Z \cdot v} \dot{\psi} - \frac{c_{SH} \cdot l_H - c_{SV} \cdot l_V}{J_Z} \beta = \frac{c_{SV} \cdot l_V}{J_Z} \cdot \delta_V \quad [5]$$

$$\ddot{\beta} + \frac{c_{SV} + c_{SH}}{m_g \cdot v} \dot{\beta} + \left(1 + \frac{c_{SV} \cdot l_V - c_{SH} \cdot l_H}{m_g \cdot v^2} \right) \beta = \frac{c_{SV}}{m_g \cdot v} \delta_V \quad [6].$$

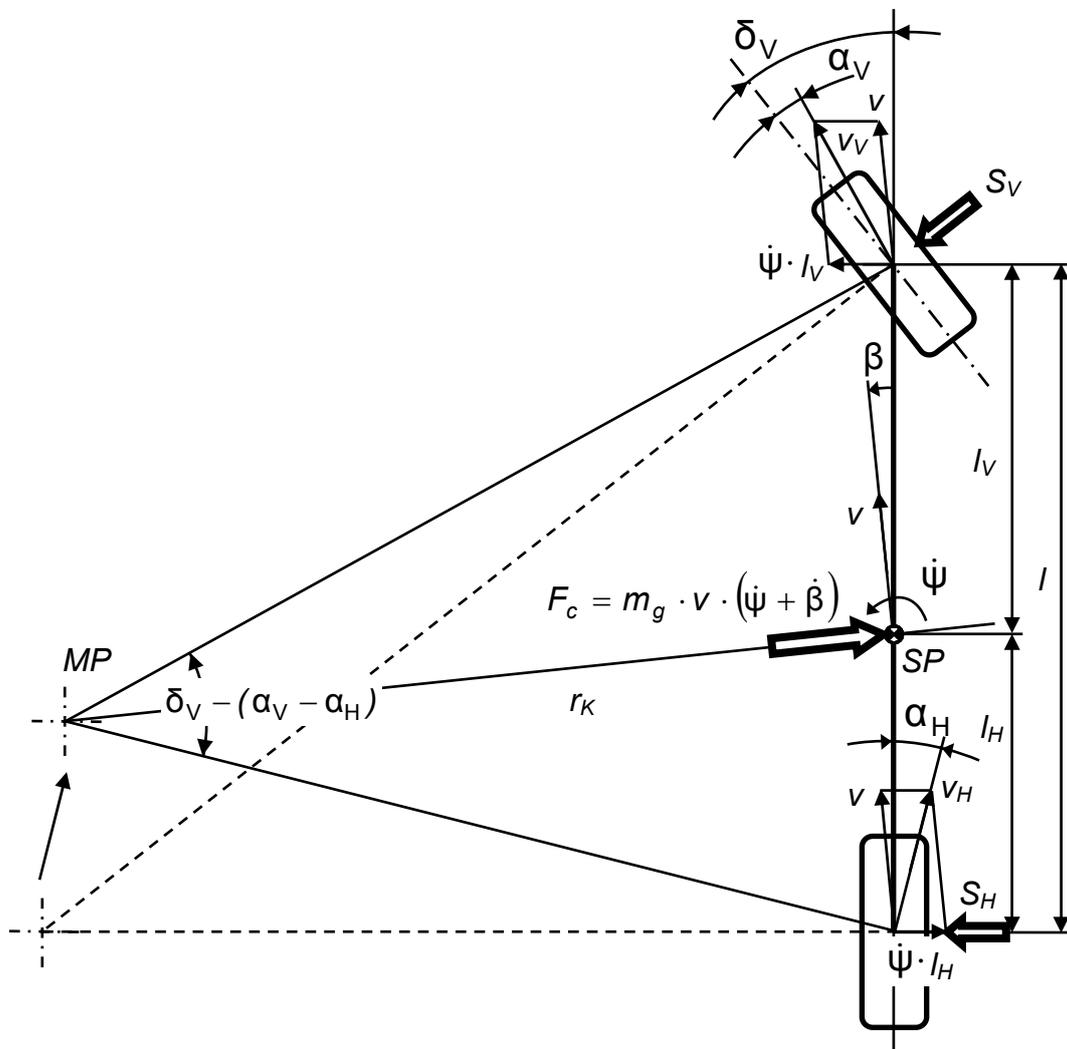


Abb. 2.3: Draufsicht des Einspurmodells bei seitenkraftbehafteter Fahrt.

Unter Berücksichtigung der Schwerpunktshöhe erweitert sich das ebene Einspurmodell zu den Freiheitsgraden Gieren und Schwimmen um das Wanken φ , das

durch die auf den Schwerpunkt wirkende Querbeschleunigung induziert wird. Das Verhalten kann durch ein stehendes Pendel⁹ abgebildet werden, das sich um den Wankpol WP dreht (Abb. 2.4). Der Schwerpunkt ist hierbei über eine Wanksteifigkeit c_W , -dämpfung d_W und -trägheit J_X an den Wankpol angebunden.

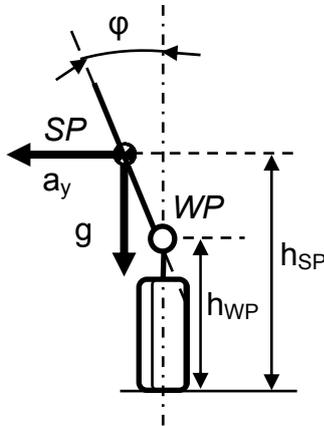


Abb. 2.4: Vorderansicht des Einspurmodells mit Wankfreiheitsgrad.

Die Gewichtsrückstellung kann in erster Näherung zur Wanksteifigkeit subsumiert werden. Das Momentengleichgewicht lautet für den stationären Fall der Rotation um die Fahrzeuglängsachse:

$$\ddot{\varphi} + \frac{d_W}{J_X} \cdot \dot{\varphi} + \frac{c_W}{J_X} \cdot \varphi = \frac{m_g \cdot (h_{SP} - h_{WP})}{J_X} \cdot a_y \quad [7]$$

Zu bemerken ist an dieser Stelle, daß die Wankbewegung wiederum einen Querbeschleunigungsanteil impliziert.

2.1.2 Der „Weg“ über das Gesamtfahrwerk von der Fahrbahn zum Fahrer

Die Lenkeigenschaften eines Kraftfahrzeugs sind abhängig von der räumlichen Lage der Raddrehachse, die sich durch geometrische Größen beschreiben lässt¹⁰, welche wiederum durch Fahrwerksbauteile verkörpert sind. Diese Lenkachse wird auch als Spreizachse bezeichnet. Die aufgrund des Lenkeinschlags hervorgerufene Seitenkraft greift im Reifenlatsch nicht in der Radmittelebene an, sondern exzentrisch, d.h. zwischen Radaufstands- und Fahrbahndurchstoßpunkt der Lenkachse besteht ein Nachlauf. Das ist begründet in der Neigung, dem Nachlaufwinkel τ , und in der außerradmittigen Position der Lenkachse, dem Nachlaufversatz, siehe Abb. 2.5. Die eigentliche Nachlaufstrecke ist somit die Summe aus dem konstruktivem n_K und pneumatischem Nachlauf, dem Reifennachlauf n_R , der aus der Pressungsverteilung im Reifenlatsch hervorgerufen wird¹¹. Das Produkt aus Seitenkraft S und Nachlauf bildet das Rückstellmoment. Der Lenkrollradius r_S ist der Hebelarm der Umfangskräfte, im Fall Antreiben U_A , Bremsen U_B , um die Spreizachse. Diese ist in der y - z -Fahrzeugebene um den Winkel σ angestellt, wobei der eigentliche Radsturz γ enthalten ist. Der sog. Radlasthebelarm ist ungleich

⁹ Kobetz 2004

¹⁰ Reimpell 1988

¹¹ Reimpell / Sponagel 1988

Null, da Spreizungs- und Nachlaufwinkel ungleich Null sind. Die Radlast wirkt sich über diesen Hebelarm als Hubbewegung des Rades und Aufbaus aus, d.h. das Fahrzeug verrichtet auf Lenkbewegungen hin eine Niveauänderung¹². Das zu-/abgeführte Potential hat so über die Lenkkinematik Einfluß auf das Lenkmoment.

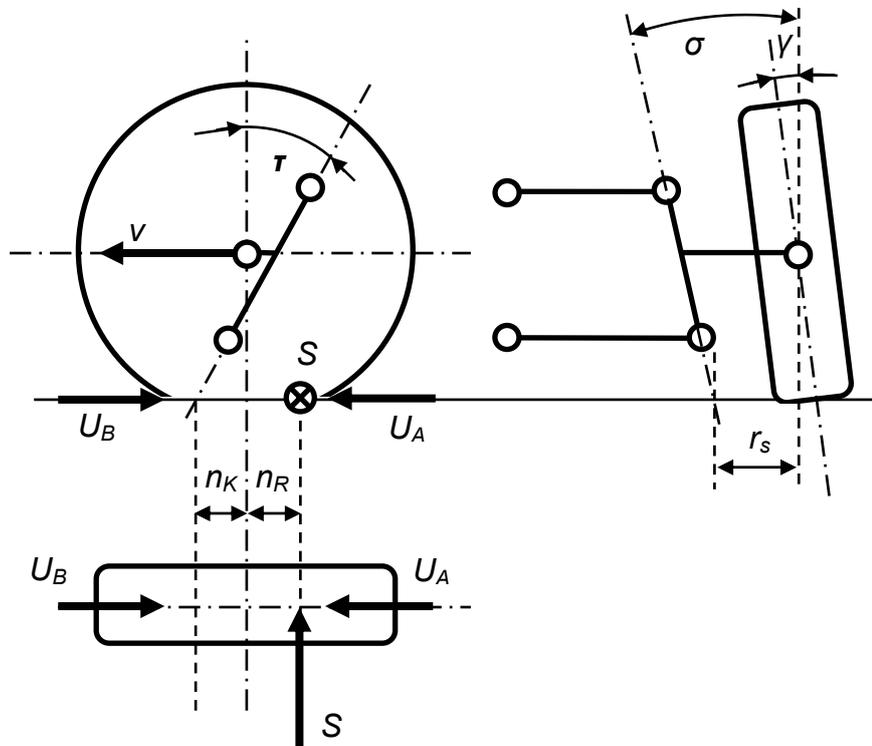


Abb. 2.5: Prinzipskizze der Lenkkinematik mit Hebeln und Kräften am Rad.

Die rotative Bewegung um die Lenkachse wird über die Spurhebel und Spurstangen in eine translative umgesetzt. Hierbei findet bei heutigen Zahnstangenlenkungen eine Translation der Zahnstange im Lenkgetriebe statt, die wiederum über den Verbund Zahnstange-Ritzel in eine finale Drehbewegung des Lenkrades umgesetzt wird. Der Radwinkel wird also in einem bestimmten Verhältnis, bei heutigen Personenkraftwagen zwischen ca. 11 und 20, in einen Lenkradwinkel übersetzt. Die Schnittstelle Zahnstange-Ritzel bildet die Definitionsgrenze für den primären und sekundären Teil des Lenksystems. Letzterer umfaßt im Lenkstrang die Spurstangen, Lenkungslager und Zahnstange mit Gehäuse, ersterer Ritzel, Ventilturm¹³, Lenkspindel, Mantelrohrmodul und Lenkrad, siehe Abb. 2.6.

¹² Braess / Seiffert 2003

¹³ Die aus Expertengesprächen übliche Bezeichnung „Ventilturm“ stammt von hydraulischen Lenksystemen, ist aber auch für elektrische gebräuchlich.

Die natürliche „Rückmeldung“ über den aktuellen Fahrzustand aus der Wirkfläche Reifenlatsch unterliegt bis zur Lenkmomentwahrnehmung durch den Fahrer in Betrag und Phase verschiedenen Einflüssen. Diese sind Elastizitäten, Reibungen und Dämpfungen des Reifens, der Achslenkerlager und des Lenkstranges bzw. die Übersetzungsverhältnisse. Hinzu kommt die Lenkunterstützung mit ihrer Charakteristik, die heute in nahezu allen Fahrzeugen vorhanden ist.

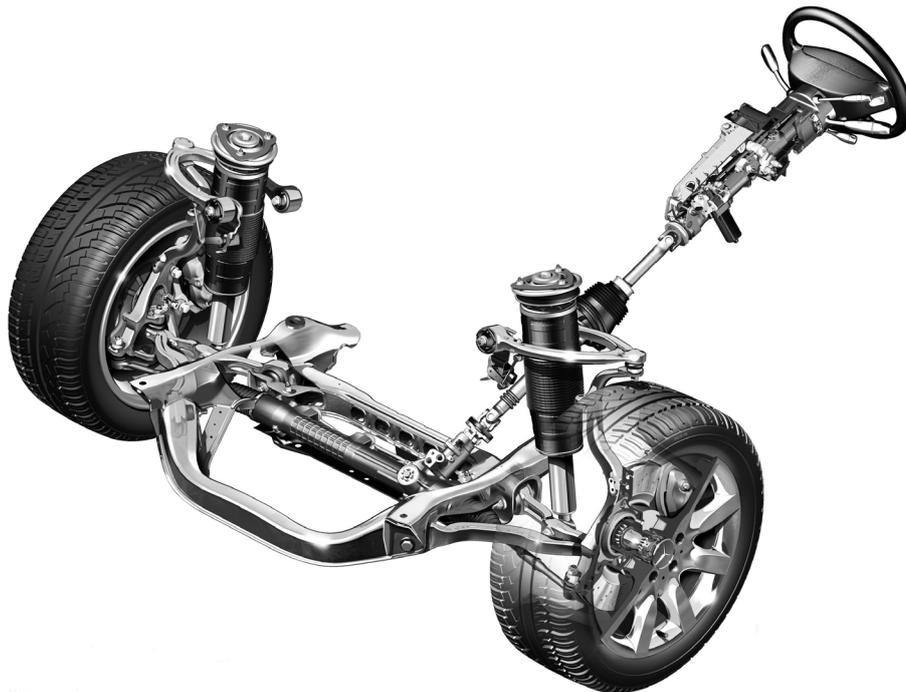


Abb. 2.6: Eine Pkw-Vorderachse mit Rad-Reifen-Verbund, Radaufhängungslenkern, Feder-Dämpferbein, Fahrschemel und Lenkstrang.

Das Prinzip von achsschenkelgelenkten Vorderrädern, die von einem Lenkrad über das Lenkgetriebe betätigt werden, ist so seit Jahrzehnten beibehalten und stetig weiterentwickelt worden¹⁴.

2.1.3 Das Teilsystem Hilfskraftlenkung

Pötzl et al. formulieren Anforderungen an zukünftige Lenksysteme bezüglich Sicherheit, „Fahrspaß“, Assistenzfunktionen, Kosten und Verbrauch¹⁵. Moderne

¹⁴ Braess 2001

¹⁵ Pötzl et al. 2005

Hilfskraftlenkungen sind klassiert nach der Unterstützungsart. Überwiegend im Einsatz befinden sich noch hydraulische Lenkungen (HPS), die aber in Zukunft durch elektrohydraulische (EHPS) und elektromechanische (EPS) Systeme abgelöst werden¹⁶. Die Lenkhilfpumpe der HPS wird vom Verbrennungsmotor angetrieben und stellt einen hydraulischen Volumenstrom und Druck bereit, der die Verschiebung der Zahnstange über die Kolbenwirkfläche des Lenkzylinders unterstützt. Die Steuerung geschieht bei Lenkradbetätigung im Ventilturm über die Verdrehung eines Torsionsstabes, so daß sich Ventilsteuerkanten öffnen bzw. schließen. Der mechanische Schliff dieser Steuerkanten bestimmt die Form der Unterstützungskennlinie. Eine fahrgeschwindigkeitsabhängige Veränderung der Unterstützung wird über die Regelung des Hydraulikvolumenstroms oder Versteifung des Torsionsstabes erzielt. Nachteile der HPS sind die NVH-Einträge in den Fahrgastraum¹⁷ und die Blindleistung.

Als Zwischenstufe zur EPS kann die EHPS betrachtet werden, bei der die Lenkhilfpumpe elektrisch angetrieben wird. Dieses System ermöglicht eine Kraftstoffverbrauchsminderung um bis zu 0,3 l / 100 km¹⁸ und durch die Drehzahl- bzw. Volumenstromvariabilität einen zusätzlichen Freiheitsgrad für die Gestaltung der Unterstützung. Die EPS demgegenüber unterstützt das Fahrerlenkmoment mittels eines Elektromotors¹⁹, der entweder primär- oder sekundärseitig angeflanscht ist²⁰. Nach wie vor ist ein Torsionsstab vorhanden, der allerdings nicht als Steuer- sondern als Meßglied²¹ benutzt wird, das das Lenkmoment bestimmt, um eine Momentenregelung²² aufbauen zu können. Der EPS-Regler kann als Sollvorgabe entweder ein synthetisches, frei parametrierbares Lenkmoment oder eine Unterstützungskennlinie ausgeben. Die Vorteile einer EPS gegenüber den anderen Bauarten ist neben dem verminderten Verbrauch die Vernetzung mit anderen Fahrdynamikregelsystemen (z.B. zur Schätzung der Kraftschlußreserve²³) und mit Fahrwerksystemen (z.B. der Wankstabilisierung).

¹⁶ Frost & Sullivan 2005

¹⁷ Kende et al. 2006, Fernholz / Nessler 2006, Fankhauser et al. 2005

¹⁸ Nissing et al. 2007

¹⁹ Fehlings / Liesenfeld 2005

²⁰ Stoll 1992, Bröcker 2006

²¹ Angleviel et al. 2006

²² Chen / Chen 2006, Karch / Grüner 2007, Chen et al. 2005

²³ Ono et al. 2004

HPS-Lenkungen ermöglichen maximal eine fahrgeschwindigkeitsabhängige Lenkmomentabstimmung. Mittels der EPS lassen sich weitere Regelparameter wie Querbeschleunigung und Giergeschwindigkeit²⁴ einführen, oder auch Lenkradschwingungsprobleme²⁵ reduzieren. Für Lastkraftwagen existieren Hybridlenkungen²⁶, d.h. Zweikreislenkungen, wobei die HPS hierbei die Grundlenkfunktion der hohen Zahnstangenkräfte und die EPS die Assistenzfunktionen übernimmt. Diese Fahrerassistenzsysteme stellen einen weiteren Mehrwert einer EPS dar; die Vielfalt reicht von der Pkw-Einparkhilfe²⁷ über eine Erleichterung der Rückwärtsfahrt mit Gespannen²⁸ bis zur Spurverlassenswarnung²⁹. Die Systeme bedingen zum Teil nicht nur eine Momenten- sondern auch eine Lenkwinkelmodulation, die zur Zeit von verschiedenen Automobilherstellern angeboten wird. Hierfür ist zusätzlich ein Überlagerungsgetriebe im Lenksystem integriert, das die Übersetzung zwischen Lenkrad- und Radwinkel veränderlich einstellt³⁰. Aktuelle Entwicklungen betreffen außerdem Allradlenkungen³¹ bzw. Hinterachsspurwinkelverstellungssysteme³².

Steer-by-Wire Systeme, die über keine mechanische Kopplung zwischen Rad und Lenkrad verfügen (so jedoch in ihrer Lenkcharakteristik frei parametrierbar sind), haben bisher, u.a. aus verkehrsgesetzlichen Gründen, noch nicht auf dem Markt Einzug gehalten. Zum Stand der Forschung und Technik in Hard- und Software sei auf die entsprechende Literatur³³ verwiesen.

2.1.4 Die subjektiven Eindrücke der Fahreigenschaften

Lenkvorgänge implizieren, den vorherigen Ausführungen zufolge, Gesamtfahrzeugbewegungsreaktionen wie Gieren, Beschleunigen in Querrichtung, Schwim-

²⁴ Zhao et al. 2006

²⁵ Sugiyama et al. 2006

²⁶ Nutsch / Braun 2007

²⁷ Schöning et al. 2006

²⁸ Lundquist et al. 2006

²⁹ Weilkes et al. 2006

³⁰ Krenn / Richter 2004, Schuller et al. 2007

³¹ Mareis 2006

³² Continental 2005

³³ Silberbauer / Plankensteiner 2006, Gies / Schachner 2004, Yao 2006, Bajcinca 2006, Winner / Heuss 2005, Kodaira et al. 2007

men und Wanken bzw. Lenkmomente. Diese physikalischen Größen werden über verschiedene Wahrnehmungskanäle sensiert, wobei für alle Wahrnehmungs-(änderungs-)schwellen existieren. Die Querbeschleunigung wird haptisch durch Sitzdruck und anliegende Körperteile bzw. kinästhetisch durch den Gleichgewichtssinn (Maculaorgane) wahrgenommen. Die Maculaorgane und die Bogengänge ermöglichen die Erfassung von Betrag und Richtung der Translations- und Rotationsbeschleunigungen³⁴, d.h. die Gierbeschleunigung wird ebenfalls über die Vestibularorgane aufgenommen. Der Gierwinkel bzw. seine Änderung wird über das Bildverschiebungsvektorenfeld (das auf dem Augenhintergrund projizierte Bild) bestimmt. Die Seitenabweichung wirkt ebenfalls optisch ein.

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle Lenkrad wirkt über den Haptik-Kanal, wobei der Lenkwinkel teilweise auch optisch bemerkt werden kann. Grundsätzlich sensiert der Mensch die Lennkraft und nicht das Lenkmoment. Muskelspindeln und Gelenkrezeptoren erfassen auf das Skelettsystem wirkende Kräfte sowie die Mechanorezeptoren der Haut Druck und Druckänderungen. Die haptische Wahrnehmung ist also unterteilt in Oberflächensensibilität und Tiefenwahrnehmung und zudem der schnellste Übertragungskanal. Die Lenkung liefert im Gegensatz zu Gas- und Bremspedal unmittelbare Rückmeldung über die Wirkung der Fahrerhandlung. Der Lenkradwinkel bzw. eine spürbare Fahrzeugantwort wird bis ca. 50 km/h vornehmlich über den optischen, denn den kinästhetischen Kanal wahrgenommen. Oberhalb dieser Geschwindigkeit ist es umgekehrt³⁵. Diese unterschiedlichen Wahrnehmungen werden im realen Fahrbetrieb in einem weiten Parameterraum gemacht.

Im üblichen Betriebsraum von Personenkraftwagen werden Querbeschleunigungen von 4..5 m/s² erreicht³⁶; ambitioniertere Fahrer nähern sich punktuell der Kraftschlußgrenze, siehe Abb. 2.7. Dies gilt für Fahrgeschwindigkeiten bis ca. 100 km/h; darüber hinaus liegen die maximalen Querbeschleunigungen je nach Fahrertyp zwischen 2..4 m/s². Die erzielte Querbeschleunigung eines Fahrers in verschiedenen Fahrzeugen ist annähernd gleich³⁷. Diese Tatsachen haben zum einen Konsequenzen für die die Fahrzustände beschreibenden, objektiven Manöver und bestätigen zum anderen die Validität des linearen Einspurmodells. Hinsichtlich der Lenkfrequenzen liegt die übliche Aktivität zwischen 0,1 und 0,5 Hz³⁸,

³⁴ Bubb 2001

³⁵ Wolf / Bubb 2005

³⁶ Harrer 2005, Mitschke / Wallentowitz 2004

³⁷ Weiss 1988

³⁸ Hackenberg / Heißing 1982

was sich in Übereinstimmung mit der optischen Erfassung von Gierwinkel, -geschwindigkeit und Schwimmwinkel befindet³⁹.

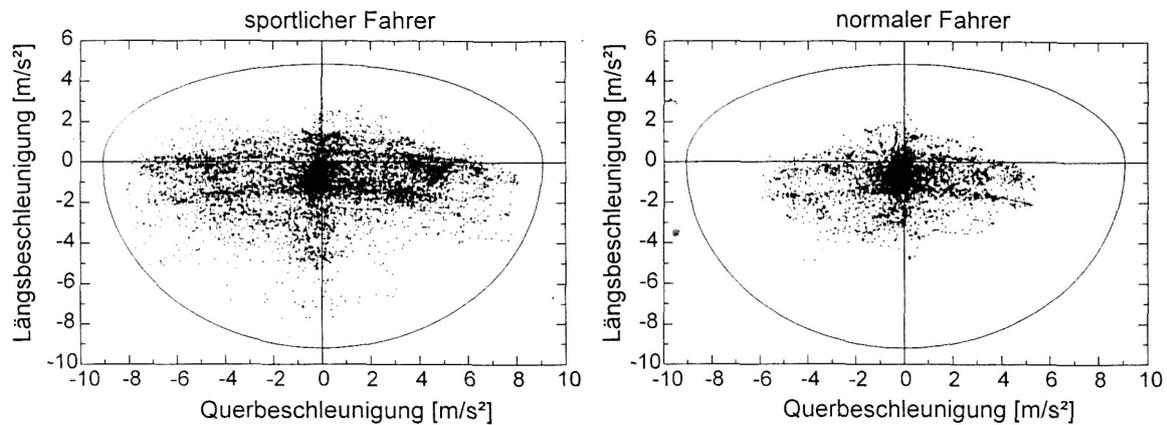


Abb. 2.7: Von unterschiedlichen Fahrertypen im realen Fahrbetrieb erreichte Längs- und Querbeschleunigungen⁴⁰.

Die in diesem Parameterraum gesammelten subjektiven Fahreindrücke werden durch Bewertungskriterien verbalisiert und können so durch die Fahrer zum Ausdruck gebracht werden. Stoll z.B. nennt die Lenkungswelligkeit⁴¹, das Ansprechen, das Lenkgefühl im Mittenbereich, das Grabengefühl und den Fahrbahnkontakt als Lenkungskriterien⁴². Gies und Marusic trennen die Kriterien nach unterschiedlichen Fahrzuständen auf:

- Lenkkorrekturen: Präzision, Ansprechen in Betrag und Zeitverzug, Linearität, Mittengefühl,
- Kurvenfahrt: Ein-/ Lenkaufwand, Lenkpräzision, Fahrbahnkontakt, Auslenkverhalten (Lenkungsrückstellung und -dämpfung),
- Parkieren / Manövrieren: Lenkmoment und -gradient, Lenkwinkelbedarf, Wendigkeit,
- Geradeausfahrt: Reibung, Rückstellung, Elastizität, Lenkmomentanstieg, Linearität⁴³.

³⁹ Wagner 2003

⁴⁰ Bachmann et al. 1995

⁴¹ Die Lenkungswelligkeit ist Folge der Kardanungleichförmigkeit der Lenkspindel im Primär lenkstrang; sie schlägt sich über dem Lenkwinkel als Pulsation des Lenkmoments nieder.

⁴² Stoll 1992

⁴³ Gies / Marusic 2000

Heißing und Brandl postulieren Anforderungen an die Fahreigenschaften von Personenkraftwagen. Das Lenkverhalten umfaßt ihres Erachtens die fahrdynamischen Auswirkungen des Fahrzeugs, das Lenkgefühl, die Rückmeldung und Lenkarbeit⁴⁴. Bewertungskriterien werden unterteilt in Lenkverhalten bei Geradeausfahrt, Kurvenfahrt, Lenkkraftverhalten, Lenkschwingungen; dazu gehören im Einzelnen:

- Anlenkverhalten, Ansprechverhalten,
- Grabeneffekt, Mittengefühl,
- Lenkkraftniveau beim Parkieren, in Mittellage und im Proportionalbereich,
- Lenkungsüberholen, Überschwingen bei Lenkungsrücklauf,
- Nachschwingen nach Richtungswechseln bei Geradeausfahrt,
- Nachlenken nach Kurvenfahrt, Zielgenauigkeit, Fahrbahnkontakt,
- Handlichkeit, Lenkungsrücklauf.

Bereits diese verschiedenen Definitionen und Beschreibungen für den subjektiven Fahreindruck des Lenkens eines Automobils machen die Vielfalt und Komplexität dieses Themas deutlich; gemein ist den Autoren der Begriff „Lenkgefühl“, (engl.) „steering feel“. Koide und Kawakami evaluieren 60 qualitative Ausdrücke zur Beschreibung des Lenkgefühls und kategorisieren sie in „smoothness“, „effort“, „centering“, „solidity“ und „reluctance“⁴⁵, z.T. also in „weiche“, weniger technische Termini, bzw. gewichten ihre relative Bedeutung bei niedrigen und höheren Geschwindigkeiten. Nach Sato et al. schließt das Lenkgefühl den Lenkaufwand, im Sinne des Lenkmomentniveaus, nicht Lenkwinkelbedarfs, Lenkungsrücklauf und Lenkmomentphasenverzug⁴⁶ ein. Salaani et al. trennen in On- und Off-Centre⁴⁷ Handling mit einer möglichst kleinen notwendigen Lenkaktivität, dem eigentlichen „feel“ und der Fahrzeugantwort sowie außermittig dem Lenkmomentniveau und dem dynamischen Wechselwirken zwischen In- und Output. Das Fahrzeug sollte dem Fahrer einen Korrekturbedarf anzeigen und die Eingaben angemessen umsetzen⁴⁸.

⁴⁴ Heißing / Brandl 2002

⁴⁵ Koide / Kawakami 1988

⁴⁶ Sato et al. 1991

⁴⁷ On- und Off-Centre Fahrzustände differenzieren sich durch den Querschleunigungsbereich $\langle \rangle 1..2 \text{ m/s}^2$.

⁴⁸ Salaani et al. 2004

Wolf und Bubb interpretieren das Lenkgefühl in einem engeren und weiteren Sinne⁴⁹. Ersterer umfaßt nur die eigentlichen Lenkgrößen Lenkwinkel und -moment, letzterer zusätzlich den Fahrzeugoutput. Für Siegler und Regan dagegen bezeichnet das Lenkgefühl solitär die Fahrzeugreaktion auf Lenkeingaben⁵⁰. Im Gegensatz hierzu involviert das Lenkgefühl laut Buschardt alle Eindrücke im Zusammenhang mit der Größe Lenkmoment⁵¹. Demnach sind die Kriterien Rückstellmoment in Betrag und Phase bzw. das Zentriergefühl vornehmlich geprägt von Komponentenauslegungen wie der Lenkübersetzung, Reibung, Dämpfung, Elastizitäten, Lenkträgheitsmoment und Unterstützungscharakteristik. Braess bewertet das Lenkgefühl hinsichtlich Lenkpräzision, Lenkkomfort und Störungen⁵².

Harnett spricht von „steering feel“ als subjektives Maß für die Qualität, „quality“⁵³, der Lenkung und des gesamthaften Handlings. Der Fahrzeugführer fungiert als Regler, der die Übertragungsfunktion des Kreises Fahrer-Fahrzeug versucht zu identifizieren, um so zu lernen und Routine in der Führungsaufgabe zu gewinnen. Das Fahrzeug sollte dem Bediener diesen Lernprozeß so leicht wie möglich machen; eine gute „learnability“, „Erlernfähigkeit“, wird assoziiert mit positivem „steering feel“. Barthenheier unterstreicht mit seiner Arbeit, daß das Lenkgefühl als subjektiver Fahreindruck enormen inter-individuellen Streuungen in Abhängigkeit des Geschlechts, der Fahrsituation, des Alters und Fahrstils unterliegt⁵⁴.

2.1.5 Die objektive Beschreibung des Fahrverhaltens

Das Closed-Loop System Fahrer-Fahrzeug-Umwelt zeigt nach den vorgenannten Überlegungen multifaktorielle Interdependenzen. Um hiervon ein Gesamtbild zu erhalten, muß deren objektive Beschreibung Informationen von vielen Tests enthalten, wobei diese jeweils nur Ausschnitte des ganzen Betriebsparameter-raumes quantifizieren. Da das Fahrverhalten integraler Bestandteil der aktiven Sicherheit⁵⁵ ist, haben sich standardisierte Prüfverfahren etabliert; ein Überblick findet sich in Zomotor et al., siehe Abb. 2.8. Die Manöver sind in Abhängigkeit der

⁴⁹ Wolf / Bubb 2005

⁵⁰ Siegler / Regan 2006

⁵¹ Buschardt 2003

⁵² Braess 2001

⁵³ Harnett 2002

⁵⁴ Barthenheier 2004

⁵⁵ Norm ISO/TS 20119

zu untersuchenden Fahrsituationen in Geradeaus-, Übergangs-, Wechselkurven- und Kurvenverhalten⁵⁶ eingeteilt. Die indizierten Vorzeichen um den Mittelpunkt der Übersicht geben an, ob die Manöver für die Durchführung im offenen oder/und geschlossenen Regelkreis prädestiniert sind. Der allgemeine Konsens geht unter den Prüfverfahren zu Open-Loop gegenüber Closed-Loop Tests⁵⁷, weil der Fahrereinfluß auf die Untersuchungsergebnisse signifikant ist⁵⁸. Gies und Marusic z.B. zeigen auf, daß der Doppelte Spurwechsel zur Lenkeigenschaftsbewertung wenig geeignet ist⁵⁹.

Im offenen Regelkreis stellt der Versuchsdurchführende zumeist einen bestimmten, festen Lenkradwinkelverlauf ein, während die Meßgrößen erfaßt werden. Im Folgenden wird näher auf die in Abb. 2.8 enthaltenen Hauptmanöver ohne Lastwechselreaktionen eingegangen, die in der vorliegenden Arbeit zur Anwendung gelangen und aus denen nicht nur konventionell Gesamtfahrzeug-, sondern auch unkonventionell Lenkungsgrößen extrahiert werden können. Die meisten Fahrmanöver sind in Normen standardisiert, enthalten allerdings nur die Durchführungsanweisungen nebst Aufzählungen von einigen Kenngrößen, allerdings keine Zielbereiche. Zahlreiche Fahrdynamikmanöver sind klassischen Testprozeduren aus der Elektro-/ Regelungstechnik entlehnt. Inputgröße ist hier nicht der elektrische Strom, die elektrische Spannung o.ä., sondern der Lenkradwinkel. In Bezug auf diese Eingabegröße werden die Fahrzeugantwortgrößen wie z.B. Lenkmoment, Giergeschwindigkeit, Querbefleunigung, Wank- und Schwimmwinkel bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten objektiv betrachtet. Im Folgenden werden die gefahrenen Meßmanöver in ihrer Durchführungsweise vorgestellt und die Schemata der Steuervorgabe, überwiegend des Lenkwinkelinputs, illustriert. Die Manöver mit nicht-sinusförmiger Lenkradwinkeleingabe werden abwechselnd jeweils in die linke und rechte Richtung gefahren und aus Meßdatenbesetzungsgründen mehrmals wiederholt.

⁵⁶ Zomotor et al. 1997, Zomotor et al. 1998

⁵⁷ Metz 2004

⁵⁸ Harrer et al. 2006, Neukum 2002

⁵⁹ Gies / Marusic 2000

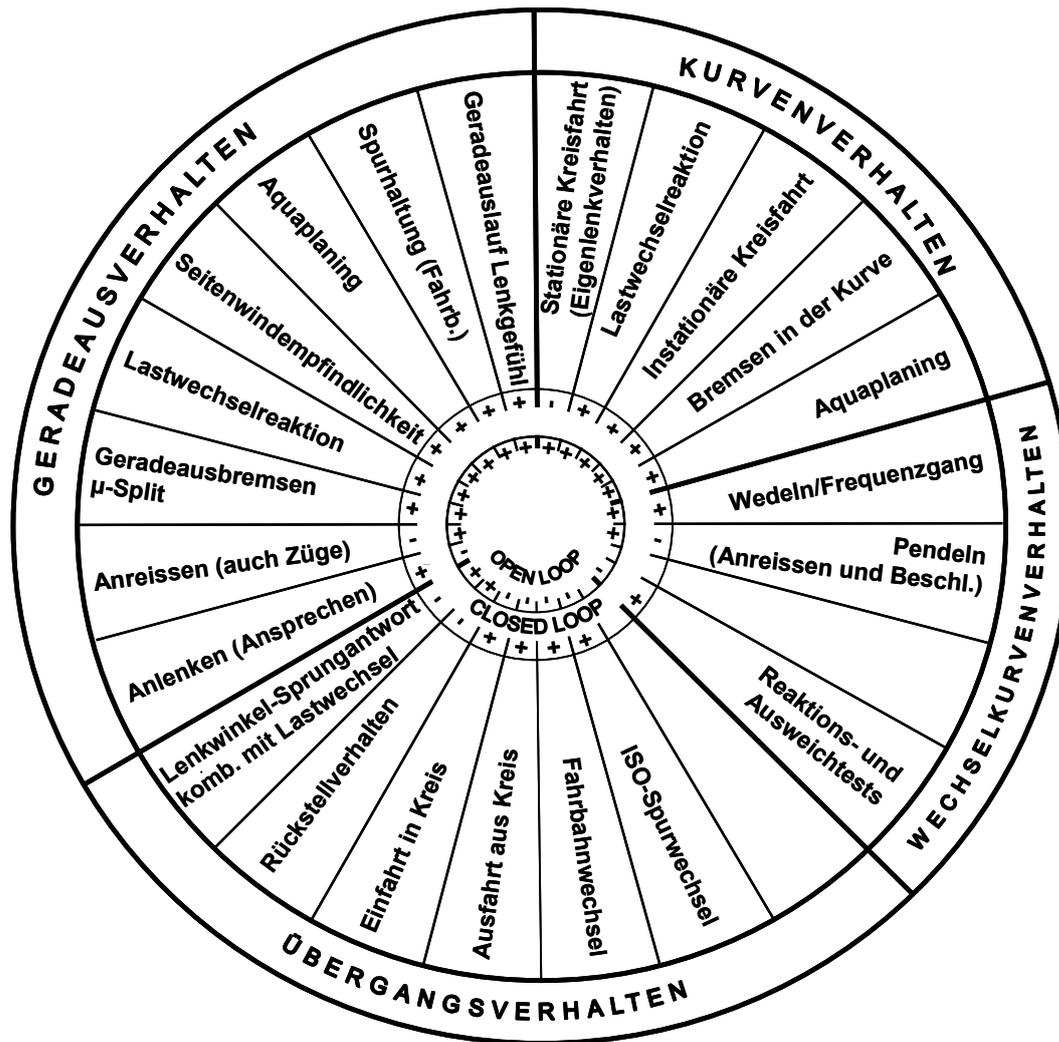


Abb. 2.8: Objektive Testverfahren des Fahrverhaltens⁶⁰.

Die Stationäre Kreisfahrt⁶¹ ist das Basismanöver der Fahrdynamikanalyse. Aus quasi-seitenkraftfreiem Rollen beginnend wird die Fahrgeschwindigkeit auf einem fahrbahnmarkierten Kreis mit Radius $R = 40$ m langsam und stetig erhöht, ohne eine Gierbeschleunigungsgrenze von $1 \text{ }^\circ/\text{s}^2$ zu überschreiten. Die Kreisbahn zu halten, erfordert eine Anpassung des Lenkradwinkels, siehe Abb. 2.9. Das Versuchsende ist durch die maximale Querschleunigung des Fahrzeugs bedingt. Untersuchungsgegenstand ist das stationäre Eigenlenk-, Schwimm- und Wankverhalten des Fahrzeugs. Es wäre theoretisch ebenso möglich, das Lenkmoment mit Hilfe dieses Manövers zu analysieren; jedoch wird der Lenkradwinkel und damit der Torsionsstabverdrehwinkel im Versuchsverlauf inkremental erhöht, so daß aufgrund der Lenkhysterese undefinierte Lenkmomentschwankungen auftreten.

⁶⁰ nach Zomotor et al. 1997

⁶¹ Norm ISO 4138

Zudem liegt die maximale Fahrgeschwindigkeit im Manöver fahrzeugspezifisch zwischen 60 und 75 km/h, wobei fahrgeschwindigkeitsparametrierte Lenkungen die Lenkunterstützung durchaus bis weit über 100 km/h variieren.

| <i>Stationäre Kreisfahrt, Stationary Circle Test, ISO 4138</i> | | |
|--|------------------|------------------|
| v | 0.. \approx 75 | km/h |
| a_y | 0.. \approx 9 | m/s ² |
| $\dot{\delta}_H$ | \approx 1 | °/s |



Abb. 2.9: Versuchsrandbedingungen der Stationären Kreisfahrt.

Drittens bildet die Stationäre Kreisfahrt nicht den Mittenbereich ab, da sie vom Ackermannwinkel beginnend durchgeführt wird. Zur objektiven Bewertung der Lenkmomentcharakteristik wird deshalb das sog. „Lenkungszuziehen“ eingesetzt, vgl. weiter unten.

Zusätzlich zur Stationären Kreisfahrt werden die realen Lenkübersetzungsverläufe, d.h. Lenkradwinkelverlauf über dem mittleren Radwinkel, der Fahrzeuge auf reibungsarmen Drehplatten bestimmt. Das ermöglicht, neben der Berechnung der Eigenlenkengrößen mit Hilfe des konstanten Mittenlenkübersetzungswerts eine genauere Bestimmung mittels des realen, über dem Lenkradwinkel veränderlichen, Lenkübersetzungsverlaufs.

Das Gierverhalten von Kraftfahrzeugen lässt sich mit dem Manöver Gierverstärkung beschreiben. Innerhalb einer Spanne zwischen 30 km/h und v_{\max} mit inkrementalen Zwischenschritten von 10 bzw. 20 km/h wird bei jeweils konstanter Fahrgeschwindigkeit eine sinusförmige Lenkwinkleingabe gelenkt (Abb. 2.10). Die maximale Lenkwinkelamplitude bei einer Frequenz von $f = 0,15$ Hz entspricht einer Querbeschleunigung von 4 m/s². Zur Auswertung lässt sich ein Verhältnis aus Gierreaktion und Lenkwinkel, die sog. Gierverstärkung, in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit errechnen.

| <i>Gierverstärkung, Yaw Gain</i> | | |
|----------------------------------|-------------|------------------|
| v | 30.. 250 | km/h |
| a_y | 4 | m/s ² |
| f | 0,15 | Hz |

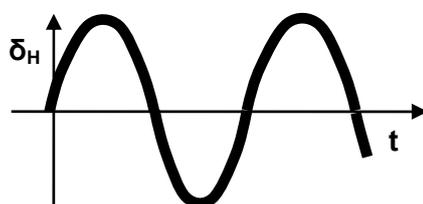


Abb. 2.10: Versuchsrandbedingungen der Gierverstärkung (aus Expertengesprächen).

Das Parkieren stellt die einfachste Meßvorschrift zur eigentlichen Lenkmomentenbewertung, hier der Parkiermomente, dar. Dabei wird bei stehendem Fahrzeug aus der Lenkwinkelmitte mit quasi-stationärer Lenkwinkelgeschwindigkeit von $< 40 \text{ }^\circ/\text{s}$ von mechanischem Lenkungsanschlag zu Anschlag und wieder in Ausgangslage zurück gelenkt, vergleiche Abb. 2.11.

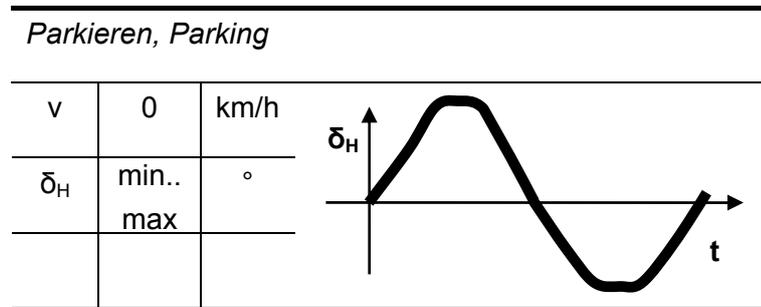


Abb. 2.11: Versuchsrandbedingungen des Parkierens (Expertengesprächen entnommen).

Ein weiteres Manöver, das einen Aspekt einer Stadtfahrt charakterisiert, ist der Lenkungsrücklauf. Hierbei wird mit verschiedenen konstanten Fahrgeschwindigkeiten beginnend ab Schritttempo eine halbkreisförmige Pylonengasse mit Radius 7,5 m durchfahren, so daß sich ein bestimmter stationärer Lenkradwinkel und eine stationäre Querbearschleunigung einstellt, siehe Abb. 2.12. Am Ende des Halbkreises wird das Lenkrad sodann los- und freigelassen bis die Rückstellbewegung abgeschlossen ist; von Interesse ist der verbleibende Restwinkel.

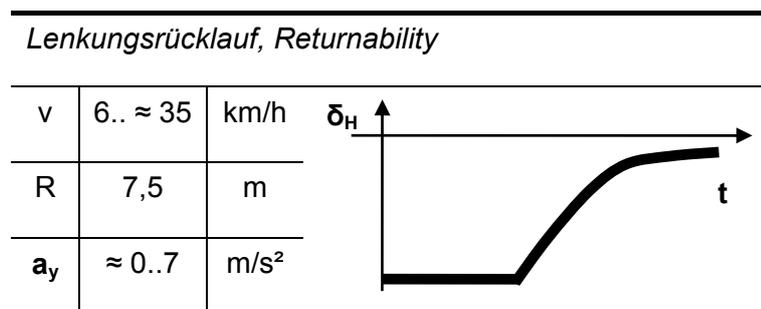


Abb. 2.12: Versuchsdurchführungsparameter des Lenkungsrücklaufs (aus Expertengesprächen).

Der Lenkmittelnbereich im Normalfahrbetrieb lässt sich mit Hilfe des Weave⁶² Tests abbilden, der auf der Grundsatzarbeit von Norman zu sinusförmigem Lenkwinkelinput mit konstanter Frequenz⁶³ basiert. Er definiert Kenngrößen über die entstehenden Hystereseschleifen aus den verschiedenen Ergebnisplots (z.B. M_H vs. δ_H und a_y). Wiederum sinusförmig eingeschwungen, ähnlich der Gierverstär-

⁶² Norm ISO 13674-1

⁶³ Norman 1984

kung, werden mehrere Perioden pro Messung vorgegeben. Der Hauptunterschied liegt in der leicht veränderten Frequenz $f = 0,2$ Hz und der erreichten Querbesehleunigung von 2 m/s^2 . Diese Versuchsparameter sind beim Durchwedeln einer Pylonengasse mit einem Pylonenabstand von $69,4 \text{ m}$ und einer Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h gegeben, siehe Abb. 2.13.

| Weave Test, ISO 13674-1 | | |
|-------------------------|-----|----------------|
| v | 100 | km/h |
| a_y | 2 | m/s^2 |
| f | 0,2 | Hz |

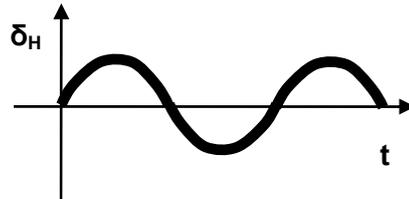


Abb. 2.13: Versuchsrandbedingungen des Weave Tests.

Aus Geradeausfahrt wird beim Lenkungsziehen mittels eines Lenkwinkelrampeninputs durch den Übergangsbereich hin zum Off-Centre Weiterlenkbereich bis zur maximalen Querbesehleunigung „gezogen“. Dadurch repräsentiert das Manöver eine Fahrt durch einen im Straßenbau eingesetzten klothoidischen Kurvenverlauf. Heutige Straßen werden mit Übergangsbögen, sog. Klothoiden, versehen, damit kein Einlenksprung im Übergangsverhalten notwendig ist⁶⁴. Werden neben der Standardfahrgeschwindigkeit 100 km/h weitere de- und inkrementierte konstante Fahrgeschwindigkeiten gemessen, so lässt sich die Parametrierungsfunktion von geschwindigkeitsabhängigen Lenksystemen bestimmen. Es gilt die quasistationäre Lenkgeschwindigkeitsanweisung $< 20 \text{ }^\circ/\text{s}$. Das Lenkungsziehen greift Elemente der bestehenden, normierten Stationären Kreisfahrt⁶⁵ und des vorgeschlagenen Transition Tests⁶⁶ auf und verknüpft sie⁶⁷, siehe Abb. 2.14. Ausgewertet wird das Lenkmoment in Bezug auf den Lenkwinkel und die Querbesehleunigung, um das Gesamtfahrzeugverhalten mit einzubeziehen.

⁶⁴ Mitschke / Wallentowitz 2004

⁶⁵ Norm ISO 4138

⁶⁶ Norm ISO CD 13674-2

⁶⁷ Zschocke / Albers 2008a

Lenkungsziehen, Slowly Increasing Steer Test

| | | | |
|------------------|--------------------------|------------------|--|
| v | 30/50/70/ 100/120/140 | km/h | |
| a_y | 0.. \approx 9 | m/s ² | |
| $\dot{\delta}_H$ | < 20 | °/s | |

Abb. 2.14: Versuchsrandbedingungen des Lenkungsziehens⁶⁸.

Die Manöver Weave und Lenkungsziehen erfassen den Mittenbereich also unterschiedlich: zum einen wird durch die Mitte, zum anderen aus der Mitte gelenkt⁶⁹.

Als dynamisches Manöver zur Beschreibung des Übergangverhaltens dient der Lenkwinkelsprung⁷⁰: aus Geradeausfahrt mit 80 km/h wird sprunghaft gegen einen mechanischen Anschlag gelenkt und ca. 3 s lang gehalten, wobei stationäre Endquerbeschleunigungen von 2 / 4 / 7 m/s² erreicht werden (Abb. 2.15). In Anlehnung an die Regelungstechnik finden hier Antwortzeiten, Verstärkungen und Überschwingweiten Beachtung.

Lenkwinkelsprung, Step Input Test, ISO 7401

| | | | |
|------------------|-----------|------------------|--|
| v | 80 | km/h | |
| a_y | 2 / 4 / 7 | m/s ² | |
| $\dot{\delta}_H$ | max | °/s | |

Abb. 2.15: Versuchsrandbedingungen des Lenkwinkelsprungs.

Der ISO-Frequenzgang⁷¹ ist ein weiteres dynamisches Manöver. Dieselbe Fahrgeschwindigkeit des Lenkwinkelsprungs wird gefahren, während mit sinusförmigen Schwingungen eine konstante Lenkwinkelamplitude in einem Frequenzbereich zwischen 0,1 Hz und ca. 3 Hz durchgelenkt, „durchsweept“ wird (Abb. 2.16). Diese Lenkwinkelamplitude ergibt mit 80 km/h stationär 4 m/s² und liegt bei realen Fahrzeugen zwischen ca. 35 und 45°. Die Resultate bilden Ampli-

⁶⁸ Zschocke / Albers 2008a

⁶⁹ Heathershaw 2006

⁷⁰ Norm ISO 7401

⁷¹ Norm ISO 8726

tuden- und Phasenkurven der Übertragungsfunktionen zwischen Lenkwinkelinput und Lenkmoment- bzw. Gesamtfahrzeugoutputgrößen. Die Transferfunktion zwischen Lenkmoment und -winkel gibt nach der Modellvorstellung von Salaani et al. die Lenksystemsteifigkeit im Frequenzbereich an. Das Manöver dient zur Analyse von Ausweichmanövern und Spurwechseln⁷².

Frequenzgang, Frequency Response Test, ISO 8726

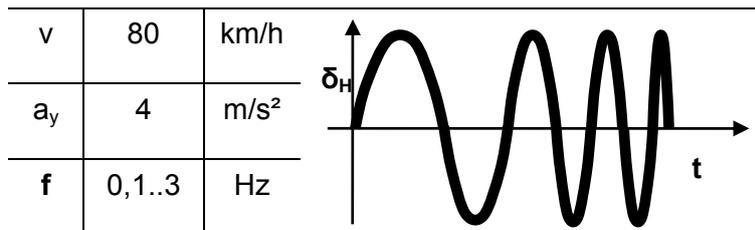


Abb. 2.16: Versuchsrandbedingungen des Frequenzgangs.

In Abbildung Abb. 2.17 sind alle Testmanöver nochmals zusammenfassend illustriert, um aufzuzeigen, daß der quasistationäre, lineare Normalfahrbereich im Hinblick auf das On- und Off-Centre Lenken vollständig abgebildet ist. Der dynamische Frequenzbereich ist für zwei Geschwindigkeiten im betreffenden Querbereichen, einer Landstraßen- und einer Autobahnfahrt, abgedeckt.

⁷² Salaani et al. 2004

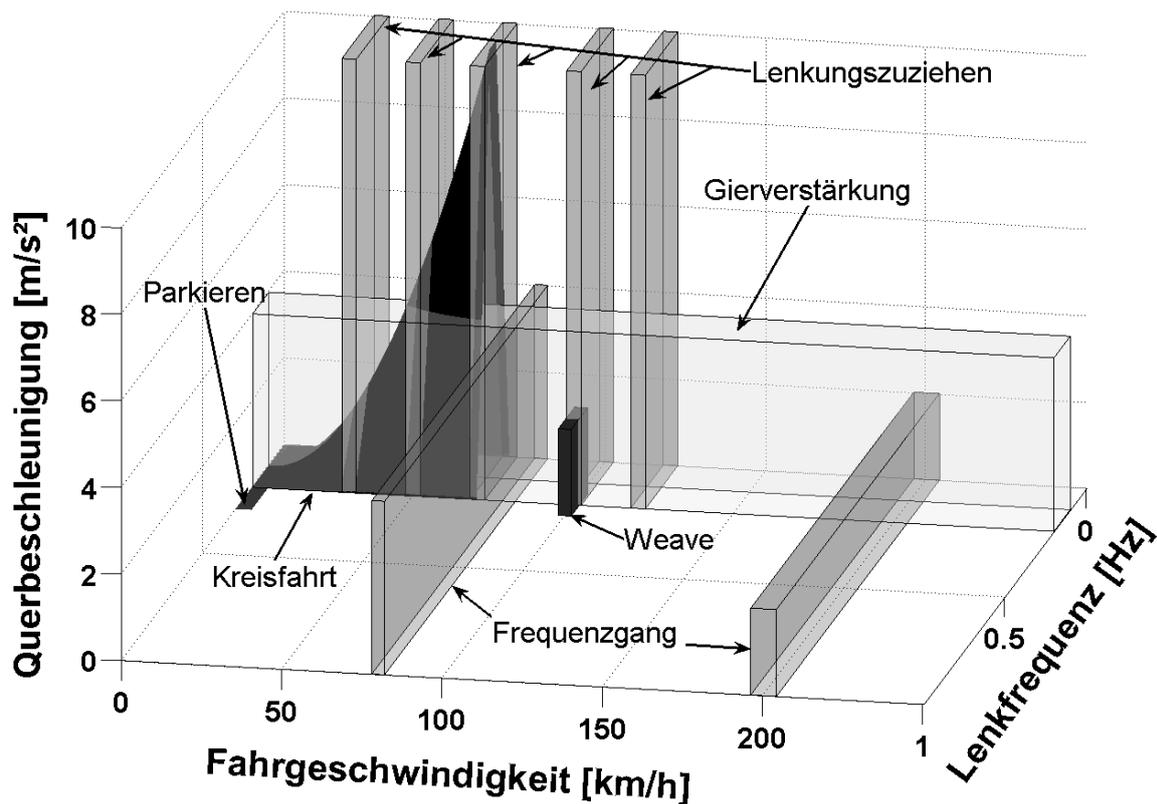


Abb. 2.17: Abdeckung des Fahrbetriebsraumes, aufgespannt von Fahrgeschwindigkeit, Querbeschleunigung und Lenkfrequenz, durch die jeweiligen Prüfmanöver (ausschließlich Lenkwinkelsprung).

2.2 Arbeiten über die Objektivierung des subjektiven Fahreindrucks

Zu Beginn sei hier auf einige Arbeiten auf dem Feld der Längsdynamik verwiesen, deren zusätzliches Studium zu einem ganzheitlichen objektiven Verständnis des subjektiven Fahreindrucks führt. In der Vertikaldynamik objektiviert Bitter das Ride-Empfinden auf einem Sitzprüfstand⁷³, wohingegen Barnstorf aus Fahrversuchen Aufbaubeschleunigungseffektivwerte für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten, Fahrzeugvarianten und Fahrbahnen den subjektiven Noten gegenübergestellt⁷⁴. Augsburg et al. untersuchen verschiedene Bremspedalcharakteristika und deren Auswirkung in Bremsmanövern⁷⁵. Die Gesamtfahrzeugreaktion bleibt hierbei im

⁷³ Bitter 2005

⁷⁴ Barnstorf 2003

⁷⁵ Augsburg et al. 2005

Ergebnis vergleichsweise konstant, denn der Fahrer adaptiert sich an die Pedalkennlinie; seine Zielgröße ist die Längsverzögerung. Simon verknüpft den Längsbeschleunigungsverlauf beim Anfahren mit der Gas- und Kupplungspedalkennlinie⁷⁶.

Die IPEK-Forschungsgruppen Antriebstechnik und NVH/Driveability unternehmen zahlreiche Aktivitäten zur Objektivierung der subjektiven Komfortwahrnehmung von Fahrern. Das gemeinsame Ziel bildet in den frühen Phasen des Produktentwicklungsprozesses die Entwicklung von systematischen Methoden zur Identifikation der für die Fahrer prägenden Fahrzeugeigenschaften. Auf dem Gebiet des Antriebsstrangs modellieren Albers und Albrecht die Beurteilung des automatisierten Anfahrens aus Normalfahrersicht mit Hilfe von Künstlichen Neuronalen Netzen (KNN); die Validierung geschieht über die Vorhersage von subjektiven Komfortnoten, wobei objektive Kennwerte für einzelne, reale Anfahrvorgänge mit der subjektiven Wahrnehmung erfolgreich korreliert werden können. Teilergebnisse zeigen außerdem, daß die Netzwerk-Topologie, die Art der Aktivierungsfunktionen und Trainingsalgorithmen die Effizienz der KNN verschiedenartig beeinflussen⁷⁷. Diese Erkenntnisse werden aufgegriffen und die Netzstruktur optimiert, indem Signifikanzen der Netzknoten errechnet und so Redundanzen bereinigt werden⁷⁸. So werden am Beispiel des automatisierten Anfahrens Komfortbewertungsfunktionen identifiziert, mit Hilfe dieser wiederum aus simulierten Antriebssträngen potentielle subjektive Beurteilungen des Systems prognostiziert werden noch bevor die Antriebsstrangkomponenten real entwickelt sind⁷⁹. Daneben beschäftigt sich Stehle mit der Objektivierung des automatisierten Schaltens, Dylla bzw. Dylla und Albers mit dem Kraft-Weg-Verlauf am Schalthebel beim manuellen Schalten⁸⁰.

Diese Objektivierungsergebnisse können in einen am IPEK implementierten X-in-the-loop Ansatz als eine integrierte Entwicklungs- und Validierungsumgebung von komplexen Antriebssystemen einfließen zur z.B. Entwicklung von energieeffizienten Fahrstrategien, um den aktuellen und zukünftigen Herausforderungen der Mobilität zu begegnen. Der Ansatz koppelt Simulation und Prüfstandserprobung von der Komponenten- bis zur Gesamtfahrzeugebene. Ein Fokus liegt hierbei auf der Validierung am IPEK Akustikrollenprüfstand, wobei klassische Hardware-in-

⁷⁶ Simon 2009

⁷⁷ Albers / Albrecht 2002, Albers / Albrecht 2003, Albers / Albrecht 2004a, Albers / Albrecht 2004b, Albrecht 2005

⁷⁸ Albers et al. 2008a

⁷⁹ Albers et al. 2007, Albers et al. 2008c

⁸⁰ als Basis Stehle 2002, Dylla 2006, Dylla / Albers 2006

the-Loop Systeme aus der Steuergeräteentwicklung mit dem Rollenprüfstand zum Vehicle-in-the-loop Prüfstand gekoppelt sind. Dies ermöglicht die Erprobung des realen Fahrzeuges closed-loop in einer virtuellen Umgebung und Umwelt (Straßentopologie und Verkehrssituationen) mit virtuellen Fahrern⁸¹. Aufgrund des modularen Aufbaus kann die Umgebung zum einen auf die Systemebene und Elementebene übertragen werden, zum anderen eröffnet eine Schnittstelle die Möglichkeit einer Ergänzung und Erweiterung des IPEK-Forschungsfeldes um Querdynamik-Aspekte, wofür es wiederum Objektivierungsmethoden und –systeme bedarf.

2.2.1 Objektivierungsarbeiten in Bezug auf querdynamische Fahrmanöver

Arbeiten, die nach Zusammenhängen zwischen subjektiven und objektiven querdynamischen Fahrverhaltensbeschreibungen suchen, verfolgen hierfür unterschiedliche Ansätze. Zum einen wird eine Varianz in objektiven Fahrmanöverkennwerten über Veränderungen an einem Versuchsträger oder über mehrere Versuchsträger erzielt, zum anderen werden Modellgrößen, die eine Änderung des Fahrzeugverhaltens bewirken, ohne Bezug auf standardisierte Fahrdynamikprüfverfahren variiert. Im Folgenden werden die Untersuchungen nach On- und Off-Centre Bereich bzw. stationären und dynamischen Fahrzuständen und dem Manöverbezug klassiert. Gleichwohl kommt dieser Ansatz nur einem Versuch gleich, da die einzelnen Arbeiten Schnittmengen mit mehreren dieser Klassen aufweisen.

Harnett bemängelt, daß die Fahrzeugentwicklung ohne ausreichende Integration der subjektiven und objektiven Aspekte geschieht. Er verfolgt den Ansatz, einen Versuchsträger objektiv fahrdynamisch in der Stationären Kreisfahrt, dem Weave- und Transition Test zu vermessen und zu simulieren. Die Versuchsvariation besteht darin, daß Lenksystemeigenschaften wie die Zahnstangen-, Mantelrohrreibung oder Lenkunterstützung einzeln im Bauteil modifiziert werden. Die Varianten werden sodann durch einen Testfahrer hinsichtlich lenkungsspezifischer Kriterien wie *Lenkwinkelbedarf* und *Lenkmomentniveau* subjektiv bewertet und mit den objektiven Ergebnissen korreliert. Das Ziel ist hierbei, Schlußfolgerungen für Lenkungsauslegungen treffen zu können⁸².

Crolla et al. gehen davon aus, daß Basisanforderungen wie Stabilität heute von fast allen Fahrzeugen erfüllt werden; Sekundäraspekte differenzieren Fahrzeuge

⁸¹ Albers et al. 2008b, Albers et al. 2008d

⁸² Harnett 2002

und machen schließlich den Markterfolg aus. Die Vielzahl von kleinen Faktoren ergibt in Kombination das subjektive Gesamtgefühl, was nicht ausreichend verstanden ist. Die Abstimmung wird immer noch subjektiv erzielt, was bei den hochentwickelten Werkzeugen heutiger Fahrzeugentwicklung als unangebracht angesehen wird; der subjektive Ansatz entspricht eher dem Prinzip „Versuch und Irrtum“ als „Ursache-Wirkung“. Standards existieren nur über Versuchsdurchführung und Ergebnispräsentation, nicht über Zielbereiche. Bisherige Korrelationsarbeiten konzentrieren sich auf Spurwechsel oder Geradeausfahrt und nicht auf das Gesamthandling. In ihrer Untersuchung bewerten acht Fahrer 46 Parameter in freier, ca. einstündiger Fahrt; zuerst im Basisfahrzeug, dann im Versuchsträger, bei dem Reifen, Dämpfer, Rollsteifigkeit und Gierträgheitsmoment verändert sind⁸³. Die Versuchsvarianten werden objektiv in der Kreisfahrt, dem Lenkwinkelsprung und Impulstest⁸⁴ vermessen. Drei Analysewege werden für die beiden Datenmengen gewählt:

- Korrelation mit Mittelwerten;
- gibt es Kriterien, für die unter den Probanden einhellige Zustimmung herrscht?
- Existieren Kenngrößen, die für alle Probanden korrelieren?

Sie rechnen multiple Regressionen mit den subjektiven Kriterien:

- Der subjektiven *Kurvenfahrt*,
- dem *Ansprech-* und *Ausweichverhalten* und
- der *Geradeauslaufstabilität*,

und finden eindeutige Korrelationen mit den objektiven Werten aus dem:

- *Gier-* bzw. *Querbeschleunigungsamplitudengang bis 0,7 Hz* und der
- *quasistationären Lenkmomentverstärkung* bzw. *-phase*.

Mittlere Korrelationen resultieren für die *Antwortzeiten* der Gesamtfahrzeuggrößen aus der Sprungfunktion mit dem Kriterium des *Ansprech-* und *Ausweichverhaltens*⁸³.

In einer Folgeanalyse⁸⁵ werden die Daten einer Korrelationsanalyse mit Neuronalen Netzen unterzogen, womit ein weites Feld nichtlinearer Verknüpfungen ge-

⁸³ Crolla et al. 1998

⁸⁴ Im Unterschied zum Frequenzgang werden beim Impulstest (oder auch Pulse-Input Test) Lenkwinkelstoßfunktionen gelenkt, aus denen wiederum Frequenzspektren errechnet werden können.

⁸⁵ King et al. 2002

funden werden kann. Die Stichprobengröße $n = 16$ erweist sich jedoch als bedenklich klein, um das Neuronale Netz zu trainieren und zu testen. Es gelingt, die Kenngrößen aus der ersten Untersuchung zu bestätigen bzw. weitere zu validieren:

- Aus den Frequenzspektren die *Giereigenfrequenz*, die *stationäre Gierverstärkung* bzw. die *Werte bis 0,7 Hz*, die *Querbeschleunigungsverstärkung bei 1 Hz*, die *Querbeschleunigungsphase bei 1 Hz* und die *Giergeschwindigkeitsphase bei 0,4 Hz*.
- Aus dem Lenkwinkelsprung sind es die *TB-Werte*⁸⁶ bei *0,2 und 0,6 g*, das *Peak-Lenkmoment (0,2 g)*, die *Peak-Gierrate (0,2 g)* und die *Peak Response Zeit der Wankrate*.
- Die Stationäre Kreisfahrt liefert den *Eigenlenkgradient* und das *Lenkmoment bei 0,3 g*, was auf einem 33 m Kreisradius eine sehr kleine Fahrgeschwindigkeit von unter 40 km/h impliziert.

Das Lenkmoment ist in diesen Untersuchungen⁸⁷ nur nebensächliche Analysegröße.

Data und Frigerio errechnen einen „Handling-Index“ über sieben Fahrzeuge aus den subjektiven Noten von je zehn Normal- und Expertenfahrern mittels einer multiplen Regression, da keine validen Einzelkorrelationen aufgestellt werden können. Zu den subjektiven Kriterien *Lenkaktivität*, *Ansprechzeitverzögerung*, *Wankwinkel*, *Wankgeschwindigkeit* und *Zielgenauigkeit* lassen sich aus dem Lenkwinkelsprung objektiv die *Ansprechzeiten* und *Verstärkungen des Wankwinkels* bzw. der *Querbeschleunigung* und aus der Kreisfahrt die *Lenkübersetzung* gegenüberstellen⁸⁸. Weir und di Marco definieren einen Bereich bei 80 km/h für ein befriedigendes Handling-Empfinden und Kontrollierbarkeit aus dem Frequenzgang. Dafür setzen sie die *quasi-stationäre Gieramplitudenverstärkung* in Bezug zu einer sog. *äquivalenten Verzögerungszeit T_{eq}* . Diese Verzögerungszeit errechnet sich aus der Frequenz, bei der der Phasengang zwischen Gierrate und Lenkradwinkel 45°-Phasenwinkel entspricht⁸⁹.

Kushiro und Yamomoto ziehen den Lenkwinkelsprung ebenfalls zur objektiven Querdynamik- und einen sinusförmigen Lenkmomentinput zur On-Centre Bewer-

⁸⁶ Der TB-Wert ist definiert als Produkt aus der Verzögerungszeit des Giergeschwindigkeitsmaximums und dem stationären Schwimmwinkel, vergleiche Richter 1974.

⁸⁷ Crolla et al. 1998, King et al. 2002

⁸⁸ Data / Frigerio 2002

⁸⁹ Weir / di Marco 1978

tung heran. Sie nutzen einen Lenkroboter zusätzlich zur Fahrzeug-EPS, mit Hilfe derer sowohl Lenkwinkel- als auch Lenkmomenteingaben getätigt werden können. Die Autoren stellen so heraus, daß die Fahrzeugantwort auf Lenkmomenteingaben durch die Lenksystemdynamik beeinflusst ist. Die Fahrzeugreaktion zeigt Hochfrequenzanteile und ist nichtlinear, da der Lenkwinkel unbestimmt ist. Ein Lenkwinkel stellt sich solange nicht ein, wie die Systemreibung nicht überwunden ist. Im Frequenzbereich zeigt sich, daß das Lenkmoment im Bereich von 1 Hz aufgrund des Schwimmwinkels abnimmt. Hauptsächlich der Imaginärteil wird zu höheren Geschwindigkeiten negativ. Das Lenkmoment ist zum Lenkwinkel verzögert, was die Lenksystemdämpfung und die Fahrzeugstabilität reduziert. Größere Lenksystemträgheiten macht die Fahrzeugreaktion nichtlinearer, erhöhte Dämpfung macht sie „gleichmäßiger“. Das Lenkgefühl könnte auch mit dem Parameter Eigenfrequenz des Lenksystems verändert werden. Kushiro und Yamomoto erläutern zwei Fallbeispiele, bei denen die Dämpfung und Unterstützung während Fahrten mit dem Versuchsträger variiert werden. Daraus schlußfolgern sie, daß Menschen auch Lenkmoment-geregelt fahren müssen, da die Probanden ansonsten die beiden Varianten nicht unterschiedlich bewerten könnten. Allerdings werden keine Rückschlüsse auf Kenngrößen aus standardisierten Manövern gezogen⁹⁰.

Nach Riedel und Arbinger ist das Subjektivurteil von Experten- und Normalfahrern über das Fahrverhalten durch die *Größe des Schwimmwinkels* und die *Zeitverzögerungen zwischen Lenkwinkel, Giergeschwindigkeit und Wankwinkel* geprägt. Diese Zeitverzögerungen sind im Lenkwinkelsprung durch den *TB-Wert*, die *Reaktionszeiten der Giergeschwindigkeit* und des *Wankwinkels* dokumentiert. Die Kreisfahrt liefert den *Schwimmwinkelgradient* bzw. den *Schwimmwinkel bei 7 m/s²*. Insbesondere der subjektive *Stabilitätseindruck* hinsichtlich *Wank- und Querdynamik* weist die häufigsten signifikanten Korrelationen mit den vorgenannten Größen auf. Außerdem beurteilen Experten die verschiedenen Reifen, -luftdruck -und Beladungsvarianten während Landstraßenfahrten und im doppelten Spurwechsel durchgängig kritischer, wenngleich tendenziell in die gleiche Richtung wie Normalfahrer. Da die Zeitverzögerungen zwischen Lenkradwinkel und Fahrzeugreaktionen von Lenkradwinkelamplitude und -geschwindigkeit abhängig sind, sollte eine potentielle Streckenführung für eine Beurteilung mit kurzen, definierten Übergangsbögen ausgestattet sein⁹¹.

Harrer und Pfeffer charakterisieren das Lenkgefühl durch subjektiv-objektive Frequenzgang-, Weave- und Lenkwinkelsprung-Untersuchungen von 25 Fahrzeu-

⁹⁰ Kushiro / Yamomoto 2006

⁹¹ Riedel / Arbinger 1997, Riedel / Arbinger 2000

gen, die fünf verschiedenen Marktsegmenten angehören. So identifizieren sie, daß die Kriterien *Lenkmoment*, *Zentriergefühl*, *Lenkpräzision* und *Lenkungsreibung* fahrzeugklassenunabhängig und das *Lenkungsansprechen* bzw. der *Lenkwinkelbedarf* fahrzeugklassenabhängig sind⁹². Harrer et al. stellen fest, daß der *Lenkmomentgradient* und die *Fahrzeugreaktion über dem Lenkradwinkel*, beschrieben durch die Querbewegung oder Gierrate, bei einem Weave-Test in einem kleinen Lenkwinkelbereich Schlüsselparameter für die Definition des On-Centre Lenkgefühls sind⁹³. Sato et al. präsentieren neben Open-Loop Frequenzgangkenngrößen charakteristische Werte aus Slalomfahrten, die objektiv Lenkmomentvarianten aus einer zugehörigen Subjektivbeurteilung beschreiben. Die Probanden bevorzugen fahrgeschwindigkeitsunabhängig niedrige Lenkmomente; jedoch gilt nicht, je niedriger, desto besser⁹⁴. Siegler und Regan verändern an einem Fahrzeug Reifenluftdrücke und die Hinterachskinematik, was das Eigenlenkverhalten sowie die transienten *Ansprechzeiten der Querbewegung* bzw. die *Zeitverzögerungen zwischen Gierrate und Querbewegung* verändert. Die dazugehörigen subjektiven Noten dienen ihnen nur zur Interpretation der objektiven Messungen⁹⁵.

Mimuro et al. ziehen ebenfalls den Pulse-Input-Test heran und werten vier Kenngrößen im Amplituden- und Phasengang des Frequenzgangs aus:

- die *stationäre Verstärkung*,
- die *Eigenfrequenz* und das *Dämpfungsmaß der Gierrate*
- sowie den *Zeitverzug der Querbewegung bei 1 Hz*.

Die vier Größen werden auf zwei Achsen angeordnet und spannen so einen Rhombus auf. Dessen Fläche ist ein Maß für das „Handlingpotential“, die Verzerrung für die „Handlingtendenz“. Die Autoren postulieren hinsichtlich der „heading easiness“, daß die stationäre Gierverstärkung groß, für die „heading responsiveness“ die Eigenfrequenz hoch, für „directional damping“ das Dämpfungsmaß groß und für die „following controllability“ die Phase klein sein sollte. Diese Empfehlungen werden nicht durch eine explizite Korrelationsanalyse mit subjektiven Daten belegt⁹⁶.

⁹² Harrer / Pfeffer 2007

⁹³ Harrer et al. 2006

⁹⁴ Sato et al. 1991

⁹⁵ Siegler / Regan 2006

⁹⁶ Mimuro et al. 1990

Farrer validiert auf Basis der objektiven Weave Manöver Definition nach Norman⁹⁷ Parameter aus sinusförmigem Lenken mit 0,2 Hz und bis zu 1 m/s²⁹⁸, die die On-Centre „Qualität“ beschreiben sollen. Insbesondere Höhe und Breite der Größenhysterese in Bezug auf den Lenkradwinkel korrelieren mit dem subjektiven Empfinden:

- Das *Reibungsmaß* (Hysteresehöhe Lenkmoment vs. Lenkradwinkel) mit der subjektiven *Reibung* in der Lenkung,
- der Abszissenabschnitt *Hysteresebreite der Giergeschwindigkeit* („response deadband“).
- Die Steigung des Lenkmoments über dem Lenkradwinkel wird als „steering stiffness“, *Lenkungssteifigkeit*, bezeichnet und korreliert mit dem *Lenkgefühl*.
- Die Steigung der Giergeschwindigkeit ist ein Maß für das *Ansprechen der Lenkung* bzw. des *Fahrzeuges* und heißt *Lenkungsansprechen*.

Gleichwohl würde der Transition Test laut Farrer die meisten Weave Kenngrößen implizit enthalten und das Geradeauslaufempfinden besser beschreiben; es gelingt jedoch nicht, Korrelationen aufzustellen, was mit dem ungenauen Auswerteverfahren der objektiven Transition-Testdaten begründet wird.

Dettki verfeinert die Validierung der *Lenkungssteifigkeit* als Maß für die *Lenkungs-zentrierung* beim Geradeauslauf mit Zielbereichen aus Erfahrungswerten: 0,3..0,35 Nm/° für als sportlich, 0,22..0,3 Nm/° für als komfortabel eingestufte Fahrzeuge. Das *Reibungsmaß* sollte sich für eine gute Bewertung der *Lenkreibung* zwischen 0,5 und 1,5 Nm bewegen. Die *Rücklaufwilligkeit beim Lenken* um die Mittellage wird beschrieben durch den *Restwinkel*, d.h. den Abszissenabschnitt im Diagramm Lenkmoment über Lenkradwinkel (1,5..5°). Die zweite Ableitung des Lenkmoments nach dem Lenkradwinkel gibt die *Eckigkeit* an (<0,05 Nm/°.²). Dettki bezeichnet das *Lenkungsansprechen* als die Gierverstärkung um die Lenkradmitteinstellung und nennt für sportliche Fahrzeuge 0,22..0,28 1/s bzw. komfortable 0,18..0,22 1/s als Zielbereiche. Der Phasenverzug, d.h. der zeitliche Zusammenhang, zwischen Giergeschwindigkeit und Lenkradwinkel sollte im Hinblick auf positiven Geradeauslauf zwischen 0..55 ms bzw. 55..80 ms rangieren⁹⁹.

⁹⁷ Norman 1984

⁹⁸ Farrer 1993

⁹⁹ Dettki 2005

Die vorgenannten subjektiv-objektiv Arbeiten konzentrieren sich primär auf die querdynamischen Gesamtfahrzeugbewegungsgrößen und sekundär auf die Lenkmoment-Analyse des quasi-stationären On-Centre Bereiches. Die aus den betreffenden Testverfahren resultierenden objektiven Kenngrößen sind in Tab. 2.1 mit Referenzen kondensiert. Die Größe Lenkmoment wird kaum im Off-Centre Bereich und dynamisch betrachtet. Darüber hinaus finden bisher die Parkiermanöver keine Erwähnung.

| Prüfverfahren | objektive Kenngrößen | Referenzen |
|-----------------------|---|------------------------|
| Stationäre Kreisfahrt | Schwimmwinkel (7 m/s^2) | Riedel / Arbinger 1997 |
| | Gesamtlenkübersetzung | Data / Frigerio 2002 |
| | Eigenlenkgradient Lenkmoment (0,3g) Schwimmwinkelgradient (0,4g) | King et al. 2002 |
| | Qualitativer Verlauf des Lenkwinkels und Lenkmoments über der Querb beschleunigung | Harnett 2002 |
| Weave | Reibungsmaß Lenkmoment-Restmaß (M_H vs. a_y) Restquerbeschleunigung (M_H vs. a_y) | Sato et al. 1991 |
| | Compliance effect Yaw rate ratio Response deadband Road feel ratio Steering stiffness ratio | Harnett 2002 |
| | Lenkungssteifigkeit Lenkungsansprechen | Dettki 2005 |
| | Lineare Verläufe der Querb beschleunigung und Giergeschwindigkeit über Lenkwinkel und Lenkmoment, bzw. Lenkwinkel über Lenkmo- | Harnett 2002 |
| | TB-Wert (4 m/s^2) Ansprechzeiten der Giergeschwindigkeit, Querb beschleunigung und des Wankens | Riedel / Arbinger 1997 |
| | TB-Wert (0,2g) TB-Wert (0,6g) Peak Lenkmoment (0,2g) Peak Giergeschwindigkeit (0,2g) Peak Wankgeschwindigkeit Ansprechzeit (0,2g) | King et al. 2002 |
| Lenkwinkelsprung | Wankwinkelverstärkung als $f(a_y)$ Wankwinkel Ansprechzeit Giergeschwindigkeit Ansprechzeit | Data / Frigerio 2002 |

| | | |
|--------------------------------|---|------------------|
| Frequenzgang | Giergeschwindigkeitseigenfrequenz | Sato et al. 1991 |
| | Querbeschleunigungsphasenverzug | |
| | Giergeschwindigkeitsdämpfungsmaß | King et al. 2002 |
| | Stationäre Gierverstärkung | |
| | Gierverstärkung (0,7 Hz) | |
| | Giergeschwindigkeitsphasenverzug (0,4 Hz) | |
| | Querbeschleunigungsphasenverzug (1 Hz) | |
| | Querbeschleunigungsverstärkung (1 Hz) | |
| Radwinkelverstärkung (1 Hz) | King et al. 2002 | |
| Radwinkelphasenverzug (0,4 Hz) | | |

Tab. 2.1: Kurzfassung der Objektivierungsarbeiten in Bezug auf standardisierte Fahrmanöver und daraus extrahierte Kenngrößen, keine Mehrfachnennungen.

2.2.2 Objektivierungsarbeiten mit Hilfe von Modellansätzen

Die folgenden Untersuchungen ziehen keine Rückschlüsse auf die Kenngrößen aus Fahrdynamik-Prüfverfahren, sondern entwickeln Modelle zur Beschreibung des Fahrverhaltens. Hisaoka et al. untersuchen den Einfluß der Zeitverzögerungen zwischen Lenkwinkel und den Fahrzeugantwortgrößen Giergeschwindigkeit, Querbeschleunigung und Schwimmwinkel bzw. dem Lenkmoment mit Hilfe eines Experimentalfahrzeugs in konventionellen Spurwechseln. In Bezug auf den Lenkwinkel kann das Systemverhalten repräsentiert werden durch ein PT1-Glied für die Gierrate und Querbeschleunigung und ein voreilendes Glied 1. Ordnung für das Lenkmoment. Falls die Zeitkonstanten der Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung beide in einem Bereich zwischen 0,05 und 0,1s liegen, wird ein gutes „Gefühl“ attestiert; dazu muß die Zeitkonstante des Lenkmoments passen¹⁰⁰.

Barthenheier untersucht den Einfluß der Fahrsituation und des Fahrertyps auf die Lenkmomentgestaltung mit Hilfe eines synthetischen Modells, wobei er virtuell die Rückstellung, Reibung und Dämpfung variiert, vergleiche Abb. 2.18:

¹⁰⁰ Hisaoka et al. 1996

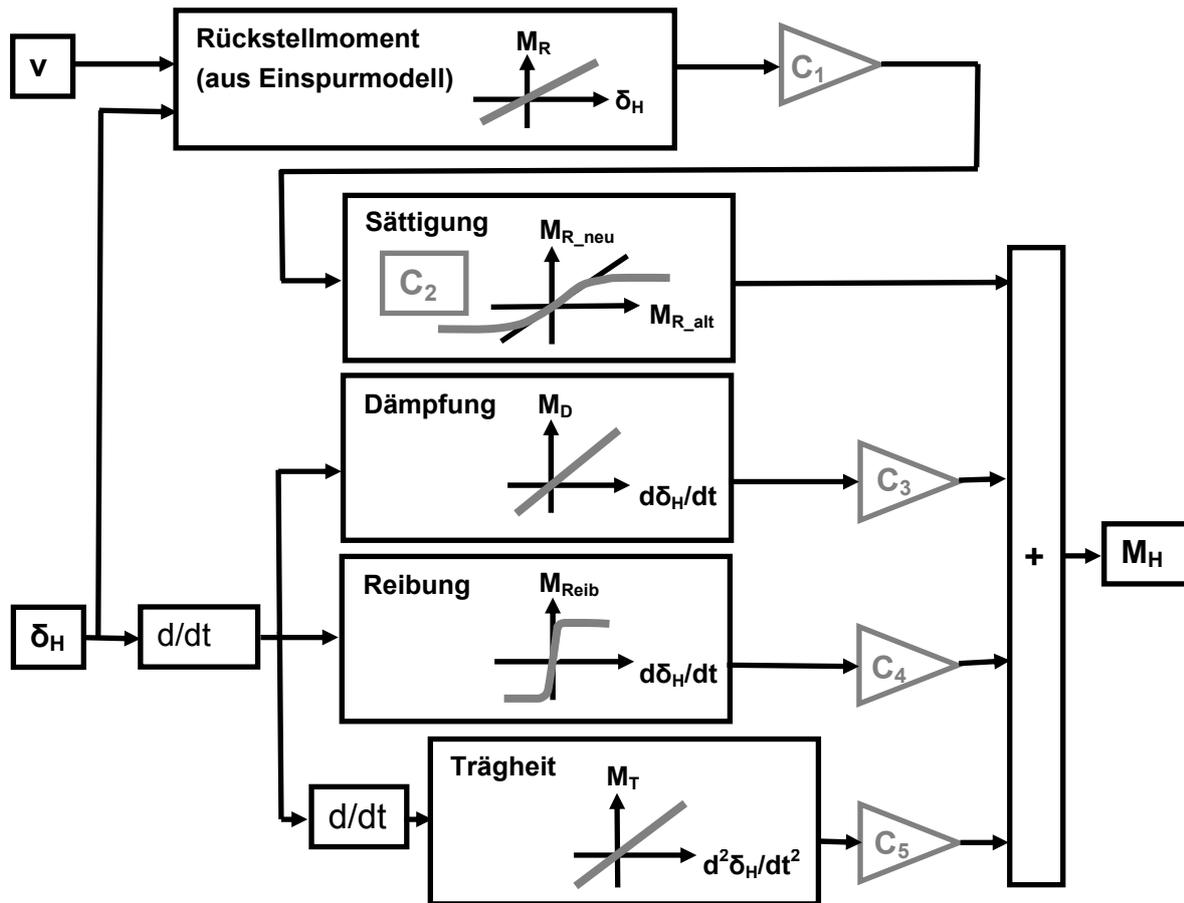


Abb. 2.18: Schema eines synthetischen Lenkungsmodells¹⁰¹.

Ein Versuchsträger ist hierfür primärseitig mit einem Torquemotor im Motorraum ausgerüstet, der die Aufprägung der gewünschten Kennlinien ermöglicht. Barthenheier geht davon aus, daß der Lenkmomentgradient, die Dämpfung und unter Vorbehalt die Reibung ein globales Maximum im subjektiven Urteil zeigen. Anhaltswerte bzw. deren Spannweite für die Modellparameter erhält er durch die objektive Vermessung von Fahrzeugen verschiedener Klassen. Normalfahrer bewerten den Versuchsträger auf Stadt- (30..50 km/h), Landstraßen- (50..90 km/h) und Autobahnparcours (130 km/h, Geradeausfahrt und Spurwechsel) mit synthetischen Dämpfungs- und Rückstellmomentanteilen. Die Probanden werden zu den neun Varianten nach Kriterien wie *Komfort*, *Sportlichkeit/Fahrspaß*, *Sicherheit* und *Allgemeine Bevorzugung* gefragt. Das Aufzeichnen aller Bewertungsfahrten zur Ermittlung eines repräsentativen Lenkprofils ergibt einen durchschnittlichen Lenkradwinkelwert von 10° auf der Autobahn, 25° auf der Landstraße und 55° im Stadtverkehr bei einer betragsmäßig gemittelten Lenkradwinkelgeschwindigkeit von $20\text{ }^\circ/\text{s}$ (Autobahn), $10\text{ }^\circ/\text{s}$ (Land) und $55\text{ }^\circ/\text{s}$ (Stadt). Die durchschnittliche

¹⁰¹ nach Barthenheier 2004

Querbeschleunigung beträgt $1,6 \text{ m/s}^2$ (Autobahn), $1,8 \text{ m/s}^2$ (Land) und $1,7 \text{ m/s}^2$ (Stadt), woraus wiederum abzuleiten ist, daß sich die Normalfahrer im linearen Bereich bewegen. Als Teilergebnis widerlegt er die Hypothese, daß das Lenkmoment eine Abhängigkeit über der Fahrgeschwindigkeit aufweisen sollte, d.h. je höher die Fahrgeschwindigkeit, desto größer das Lenkmoment. Es gelingt jedoch, statistisch zu belegen, daß ein reales mit einem synthetischen Lenkmoment ohne Verschlechterung der subjektiven Urteile ersetzbar ist. Die Korrelation der Subjektivurteile zwischen z.B. den Altersgruppen belegt, daß jüngere Probanden (< 33 Jahre) niedrigere Dämpfungsanteile, ältere (> 45 Jahren) höhere bevorzugen; weibliche Testpersonen präferieren im Gegensatz zu Männern niedrigere Lenkmomente. Zudem lassen sich die Teilkollektive durch fahrdynamische Größen wie der Fahrgeschwindigkeit, Querbeschleunigung, Lenkradwinkel und -geschwindigkeit differenzieren¹⁰².

Mouri et al. betrachten das Zusammenspiel zwischen Lenk- und Gesamtsystem im Frequenzbereich und berichten im Zuge dessen von geringerer Dämpfung der Transferfunktion Lenkmoment/Lenkradwinkel bei Hochgeschwindigkeit. Als Hypothese verfolgen sie, daß Fahrer das Lenkmoment bei höheren und den Lenkwinkel bei niedrigen Geschwindigkeiten zur Führungsaufgabe nutzen. Da die stationäre Verstärkung Lenkmoment/Querbeschleunigung über der Fahrgeschwindigkeit konstant ist, sich aber Lenkmoment/Lenkradwinkel scharf ändert, sind heftige Lenkbewegungen bei niedriger Fahrgeschwindigkeit unkritisch. Bei Hochgeschwindigkeit sind jedoch präzise Lenkeingaben erforderlich. Fahrer geben üblicherweise Lenkmoment als Feedback zur Reaktionskraft der Lenkung ein, d.h. es ist herausfordernd, das exakte Lenkmoment einzugeben. In ihrer Modellvorstellung betrachten die Autoren die Lenkung in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit und Lenkfrequenz als Schwingungssystem mit einem an das Gesamtfahrzeugverhalten gekoppelten Federelement. Die Kopplung der beiden Systeme erfolgt über das Rückstellmoment: sinkt die Gierdämpfung, fällt die Lenkungsdämpfung. Dieses Phänomen wird verursacht durch den Einfluß der Fahrzeugfrequenzcharakteristik auf den Eigenfrequenzbereich der Lenkung bei hohen Geschwindigkeiten. Die Gesamtsystemdämpfung kann durch Reduktion der Wechselwirkung zwischen den beiden Teilsystemen, also z.B. durch eine Rückführung der Giergeschwindigkeit und des Schwimmwinkels im Lenkmoment erhöht werden. Da der Giergeschwindigkeitsanteil geringen Einfluß hat, besteht die Alternative in der Reduktion der Schwimmwinkel. Um diese Abhilfemaßnahmen zu validieren, wird exemplarisch ein EPS Controller modifiziert, der mit erhöhter Frequenz die Lenkunterstützung entgegen gerichtet zum Lenkmoment aufbringt; derselbe Effekt kann bei ho-

¹⁰² Barthenheier 2004

hen Frequenzen durch einen Zeitverzug oder eine Betragreduktion des Unterstützungsmoments erzielt werden. Die Leistung des Systems Fahrer-Fahrzeug und der Einfluß des Dämpfungsverhaltens auf den subjektiven Eindruck werden so dann in einem Fahrsimulator ohne Bewegungssystem überprüft. Der Versuchsplan beinhaltet Änderungen in der Dämpfung und Eigenfrequenz des Lenkmoments während die Fahrerlenkstrategie in Spurwechseln beobachtet wird. Die objektiven Ergebnisse sind, daß mit erhöhter Dämpfung der Korrekturbedarf in der 1. Gasse bzw. die Überschwingweite am Ende reduziert und dadurch unnötige Fahrzeugreaktionen unterdrückt werden. Eine erhöhte Eigenfrequenz führt ebenfalls zu geringeren Korrekturen. Die subjektiven Aussagen demgegenüber sprechen bei hoher Eigenfrequenz von „luftigem“ und „leichterem“ *Lenkgefühl*, bei niedrigerer Eigenfrequenz von „straff, schwergängiger, massiv“; erhöhte Dämpfung resultiert in „sicherem, aber schwergängigerem“ Gefühl, reduzierte Dämpfung sei „sehr unsicher“¹⁰³.

Buschardt nutzt ebenfalls ein synthetisches Modell zur Analyse eines reibwert- und gesamtfahrzeuggrößenabhängigen Lenkmoments. Vorgeschaltet sind dem eine psychophysische Untersuchung zur Wahrnehmung von Lenkmomentänderungen an einem Laborprüfstand und eine umfangreiche Literaturrecherche zu menschlichen Wahrnehmungsschwellen. Kleine und mittlere Ausgangslenkmomente zeigen keinen Einfluß auf die Wahrnehmung der Lenkmomentänderung, Lenkmomentdifferenzen um ca. 0,4 Nm bis, in feinfühligem Einzelfällen, 0,2 Nm werden aufgelöst. Bei größeren Ausgangslenkmomenten geht die Sensitivität zurück. Die Lenkmomentdifferenz wird um so früher wahrgenommen, je schneller die Änderung erfolgt. Bei unbewegtem Lenkrad werden Lenkmomentenerhöhungen anders wahrgenommen als -reduktionen. Diese Erkenntnisse finden Anwendung in einer Probandenuntersuchung, bei der Fahrbahnreibwertsprünge über ein synthetisches Lenkmoment signalisiert werden. Der Phasenverzug der Seitenkraft zum Rückstellmoment als Funktion des Schräglaufwinkels gibt Informationen über den Fahrzustand. Der Straßenzustand, d.h. die Reibungssituation zwischen Reifen und Fahrbahn, bzw. eine Änderung desselben impliziert eine geschwindigkeitsabhängige Rückstellmomentänderung. Diese ist schneller als z.B. die Erfassung der Kursänderung durch visuelle Wahrnehmung, da ein sensomotorischer Kurzschluß zwischen Rezeptor und Effektor (Reiz-Reaktions-Mechanismus) stattfindet; außerdem verbessert ein vorhandenes Lenkmoment die Stellgenauigkeit, indem Fahrerkörperschwankungen ausgeglichen werden. Die synthetische Grundstellgröße im Versuch ist modelliert als ein lenkwinkelabhängiges Rückstellmoment, unterstützt so die haptische Wahrnehmung der Lenkradstellung und erleichtert das

¹⁰³ Mouri et al. 2007

Auffinden der Geradeausstellung. Zudem ist ein Reibungs- und Dämpfungsanteil sowie eine Giergeschwindigkeits- und Querbeschleunigungsrückmeldung enthalten. Als objektive Kenngrößen dienen das *Lenkarbeitsintegral*, *Effektivwerte* und *Betragsmaxima* des *Lenkmoments*, *Lenkradwinkels* und *-geschwindigkeit* bzw. die *Richtungsänderungen der Lenkgeschwindigkeit* zur Beschreibung der *Fahrerbeanspruchung*. Die objektive Leistungsbewertung ist im *Effektivwert* und *Betragsmaximum* von *Giergeschwindigkeit*, *-beschleunigung* und *Querbeschleunigung* ausgedrückt.

Die Probanden sind in der Subjektivbeurteilung während des Straßenversuchs, der in einem Versuchsträger mit Torquemotor bewerkstelligt wird, im Gegensatz zum Prüfstandsversuch weniger als Sensoren denn als Bewerter eingesetzt. Die Fahrer sind während des Spurwechsels, welcher einen Reibwertsprung enthält, nach ihrem subjektiven *Beanspruchungsempfinden* gefragt. Zusammenfassend ist festzuhalten, daß sich sowohl die subjektive als auch objektive Bewertung durch reibwert- und giergeschwindigkeitsabhängige Lenkmomente verbessert. Der Querbeschleunigungsanteil führt nochmals zu positiveren, subjektiven Bewertungen; objektiv bleibt das Verhalten jedoch konstant. Die Erkenntnisse münden im Modell in einer degressiven Federkennlinie der Lenkradwinkelfunktion, d.h. die zusätzlichen Rückstellmomente sind nur für sehr kleine Lenkradwinkel im Hinblick auf das Zentriergefühl ansteigend. Zusätzlich sind die Rückstellmomente sowie Reibung und Dämpfung noch fahrgeschwindigkeitsabhängig degressiv modelliert. Der Reibungsanteil verdeckt zwar den subjektiven Fahrbahnkontakt, wirkt sich aber positiv gegen Lenkraddrehschwingungen aus¹⁰⁴.

In einem nächsten Schritt wird die Lenkungsreibung aktiv ohne Beeinflussung des Rückstellmomentanteils reduziert, um die Information über den Fahrbahnzustand bei Steer-by-Wire-Systemen im Vergleich zu konventionellen Lenkungen zu optimieren. Ein Fahrversuch zeigt auf, daß die Lenkmomentänderung beim Übergang von trockener auf schneeglatter Fahrbahn durch diesen Ansatz deutlicher über der menschlichen Änderungswahrnehmungsschwelle liegt¹⁰⁵.

Im Gegensatz zu den ersten Erkenntnissen von Buschardt stellen Chai et al. fest, daß Lenkmomente, die in Abhängigkeit der Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung aufgeschaltet werden, keinen Mehrwert in der Güte eines Spurwechsels offenbaren. Sie ändern bei einem Steer-by-Wire Fahrzeug die Lenkübersetzung und das Lenkmoment in Betrag und Zeitverzug. Während einfachen Spurwechseln bei 60 km/h zeigen sich die zwei Probanden sensitiv gegenüber

¹⁰⁴ Buschardt 2003

¹⁰⁵ Buschardt 2004

dem Lenkmomentniveau und dem Zeitverzug, der möglichst klein sein sollte, d.h. der Lenkaufwand und die mentale Fahrerbeanspruchung sollten klein sein. Wird die Lenkübersetzung halbiert, sollte das Lenkmoment für eine gute Beurteilung konstant bleiben, d.h. das Lenkmoment sollte auf die Fahrzeugbewegung und weniger auf die Fahrerlenkeingabe abgestimmt werden. Die Autoren empfehlen, den optimalen Zielbereichen für die drei Parameter in zukünftigen Untersuchungen nachzugehen¹⁰⁶.

Toffin et al. gehen in einem Fahrsimulatorversuch der Frage nach, ob Fahrer die Rückmeldung über der Querschleunigung in der Lenkmomentwahrnehmung für ihr „internes Modell“ zur Fahraufgabe nutzen oder ob das Lenkmoment nur dazu dient, die Lenkradposition zu stabilisieren. Normalfahrern werden während der Fahraufgabe unbemerkt die Lenkmomentkennlinien verändert, wobei sich eine große Adaptionfähigkeit offenbart. Die Lenkmomentvarianten sind jedoch nicht durch objektive Prüfverfahren oder Kenngrößen beschrieben. Die Ergebnisse werden auf ein Fahrermodell übertragen, das indiziert, daß die Adaption eher auf der haptischen Ebene als durch Trainieren des antizipatorischen Modells von staten geht¹⁰⁷.

2.3 Modellbasierte Systemanalyse und Simulation

Ein weiterer Weg, ein technisches System objektiv zu beschreiben, ist ein modellbasierter Ansatz. Hierbei wird das Systemverhalten mathematisch-physikalisch formuliert und modelliert. Objektive Messungen dienen als Eingangsgrößen für ein Optimierungsverfahren, das die Modellparameter anpaßt, bis der Fehler zwischen Realität und Simulation minimal ist, d.h. die Ausprägung des Modells, der „Fingerabdruck“ der Realität, wird durch die Parameteridentifikation bestimmt. Mit Hilfe des parametrisierten Modells können im Nachgang Simulationen zu Phänomenen durchgeführt werden, die im ersten Schritt nicht durch die objektiven Messungen abgedeckt sind bzw. Komponenteneigenschaften analysiert werden, die anderenfalls durch Prüfstandsversuche ermittelt werden müßten. Fahrzeugeigenschaften werden mit dem Fahrverhalten verknüpft und dessen Beeinflussung kann über Sensitivitätsanalysen untersucht werden. Der modellgestützte Versuch verbindet also die Vorteile des Fahrversuchs und reiner MKS-Modelle.

¹⁰⁶ Chai et al. 2004

¹⁰⁷ Toffin et al. 2007

Der vorliegende Beitrag greift auf die Arbeit von Diebold et al.¹⁰⁸ zurück, die auf Basis von Zomotor, Meljnikov und Kobetz die Parameter eines Fahrzeugmodells mit Hilfe von Prüfstand- und Fahrmanövern identifizieren¹⁰⁹. Über die Vorstellung von Lenkungsmodellen und deren Verknüpfung mit dem Gesamtfahrzeug wird das Rüstzeug bereitgestellt, um für die modellgestützte Objektivierung in Kapitel 5 den weiteren Mehrwert herauszuarbeiten und anzuwenden. Allgemeines Identifikations- und Optimierungswissen findet sich in Isermann¹¹⁰ bzw. Modellierungsgrundlagen in Rill und Willumeit¹¹¹.

2.3.1 Modellbasierte Fahrdynamikanalyse durch ein Erweitertes Einspurmodell

Das betrachtete Fahrdynamikmodell ist wiederum unterteilt in ein Lenkungs-, Achs-, Erweitertes Einspurmodell, vergleiche Kap. 2.1.1, und Umweltmodell mit den Eingangsgrößen Lenkradwinkel, -geschwindigkeit, -beschleunigung und Fahrgeschwindigkeit. Die Ausgangsgrößen sind neben den vorgenannten Radwinkel, Querbewegung, Wankwinkel, -geschwindigkeit, Gierwinkel, -geschwindigkeit und Schwimmwinkel. Die Teilblöcke interagieren, indem Ausgangsgrößen wiederum Eingangsgrößen anderer Einheiten darstellen. Das Lenkungsmodell ist im Detail in Kap. 2.3.2 beschrieben.

Das Umweltmodell liefert Näherungen für die Fahrwiderstände, um die Längs- und Quergeschwindigkeit des Fahrzeugs genauer berechnen zu können, und berücksichtigt eine potentielle Fahrbahnquerneigung, die eine Querbewegung induzieren würde. Das Achsmodell errechnet die Umfangs- und Seitenkräfte am Rad für das Einspurmodell und die Reifenrückstellmomente. Dies geschieht über kinematische Beziehungen aus den Fahrbahnquerneigungskomponenten und dem Roll- bzw. Luftwiderstand für die Umfangskräfte. Die Seitenkraft und das Reifenrückstellmoment sind in stationäre und dynamische Komponenten gegliedert, wodurch sich die Identifikation partiell auf Parameter aus den zugehörigen Fahrmanövern beschränken kann. Die stationären Komponenten resultieren aus den Seitenkraft- und Rückstellmomentkennlinien in Anlehnung an Pacejka und Besselink¹¹² unter Berücksichtigung ihrer Abnahme durch den Umfangskrafteinfluß über

¹⁰⁸ Diebold et al. 2006

¹⁰⁹ Zomotor 2002, Meljnikov 2003, Kobetz 2004

¹¹⁰ Isermann 1992, Isermann 1999

¹¹¹ Rill 1994, Willumeit 1998

¹¹² Pacejka / Besselink 1997

den Kammschen Kreis¹¹³. Die dynamischen Anteile sind sowohl abhängig von den stationären Werten als auch von Quer- und Schräglaufsteifigkeit als Funktion des Schräglaufwinkels und der Längsgeschwindigkeit aus dem Einspurmodell. Seitenkraft und Rückstellmoment an der Vorderachse bilden den Input für das Lenkungsmodell. Die Kräfte am Rad werden des weiteren zu Fahrzeugkräften transformiert, wodurch ermöglicht wird, aus Masse und Massenträgheitsmoment auf die Giergrößen und Quereschleunigung zurückzuschließen. Zusammen mit der Fahrgeschwindigkeit werden die Wankbewegungsgrößen ermittelt und mit Hilfe der fahrzeugkinematischen Längen- und Massenverhältnisse lassen sich die übrigen Größen Fahrzeugquergeschwindigkeit, Achsquergeschwindigkeiten sowie -längsgeschwindigkeiten im radfesten Koordinatensystem, Schräglaufwinkel, Schwimmwinkel und -geschwindigkeit ermitteln.

Auf der Basis dieses Modellgerüsts kann ein Optimierungsverfahren getrennt die stationären (aus der Kreisfahrt) und die dynamischen Fahrzeugmeßsignale (aus dem Frequenzgang), die die Modelleingangsgrößen darstellen, „nachfahren“ und die Modellausgangsgrößen bestimmen. Durch Vergleich mit den real gemessenen Fahrzeugmeßdaten der betreffenden Größen errechnet sich ein Fehler, der durch Anpassung der Modellparameter mit einem Abbruchkriterium iterativ minimiert wird. Kobetz weist darauf hin, daß Meßsignallaufzeitunterschiede der verschiedenen Sensoren im Hinblick auf einen Phasenvergleich zwischen Simulation und Messung beachtet werden müssen und, falls die betreffende Größe nicht im Bezugspunkt gemessen ist, sich auch Amplitudendifferenzen ergeben. Die Meßdaten müssen demzufolge vor Eingabe in die Optimierung lauffzeitkorrigiert und in die x-y-Koordinaten des Schwerpunkts transformiert werden¹¹⁴. Lediglich mit den Informationen über die Achslasten, den Radstand und die Lenkübersetzung eines Fahrzeugs lassen sich das Gier-, das Wankträgheitsmoment, das Wankdämpfungsmaß, die ungedämpfte Wankeigenfrequenz, die Einlauflängen, der Wankhebelarm, die Schwerpunktshöhe und die Achsseitenkraft-Schräglaufkennlinien identifizieren.

2.3.2 Lenkungsmodelle

Nachfolgende Ausführungen dienen einem Überblick des Technikstandes in der Modellierung von Lenksystemen, um Rückschlüsse auf die Modellanforderungen

¹¹³ Der Kammsche Kreis beschreibt graphisch den idealisierten Zusammenhang zwischen Umfangs- und Seitenkraft am Rad.

¹¹⁴ Kobetz 2004

für die vorliegende Arbeit ziehen zu können. Das Modell von Data et al., vergleiche Abb. 2.19, wird zur Identifikation der Systemparameter einer Lenkung ausschließlich mittels experimenteller Daten von einem Gesamtfahrzeuglenkungsprüfstand¹¹⁵ eingesetzt.

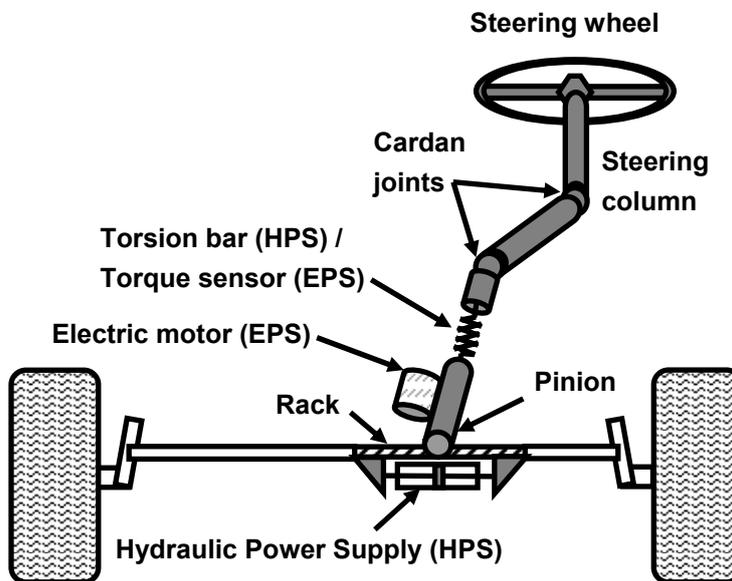


Abb. 2.19:

EPS/HPS Lenkungsmodell mit Kardangelenken, (engl.) „cardan joints“, und Torsionsstab als Steuer- oder Meßglied¹¹⁵.

Eine Besonderheit ist hierbei, daß sowohl HPS als auch EPS abgebildet bzw. daß die primärseitigen Kardangelenke der Lenkspindel berücksichtigt sind. Beide Lenksysteme sind funktional ähnlich. Der Hauptunterschied besteht in der Rolle des Torsionsstabes, der bei einer EPS als Meßglied wirkt, mit Hilfe dessen Signals die ECU den Sollstrom für den Unterstützungsmotor vorgibt. Das für beide Lenkungsarten formal gleiche Modell lässt sich durch zwei Bewegungsgleichungen ausformulieren:

$$I_{SW} \cdot \ddot{\delta}_{SW} = C_{SW} - C_b - C_a \quad [8],$$

$$M \cdot \ddot{x} = \frac{C_b}{r} + F_s - F_a - F_r \quad [9],$$

wobei $\ddot{\delta}_{SW}$ = Lenkwinkelbeschleunigung,

\ddot{x} = Zahnstangenbeschleunigung.

Die Lenkwinkelbeschleunigung multipliziert mit dem Lenkradmassenträgheitsmoment I_{SW} entspricht demzufolge dem Lenkmoment C_{SW} am Lenkrad abzüglich des primärseitigen Reibungsmoments C_a und des Moments am Drehstab C_b . Die

¹¹⁵ Data et al. 2004

Schnittstelle zur Kräftebilanz [9] bildet der Torsionsstab, wobei das Produkt aus Zahnstangenbeschleunigung und -masse M mit der Kraft am Torsionsstab (Quotient aus Torsionsstabmoment und Ritzelradius r), und der Unterstützungskraft F_S abzüglich der sekundärseitigen Reibkraft F_a und der an der Zahnstange wirkenden Seitenkraft F_r im Gleichgewicht stehen. Der Reibungsmodellierung kommt hier ein besonderes Augenmerk zu, indem die Reibungsterme nochmals in trockene, viskose und lastabhängige Anteile unterteilt sind.

Mit Hilfe des Modells und Messungen auf reibungsarmen Drehplatten bzw. fixierten Riffelplatten mit und ohne Lenkunterstützung können die Bauteileigenschaften identifiziert werden. Die Prüfmanöver bestehen aus stationärem und dynamischem Lenken mit verschiedenen Frequenzen über den gesamten Lenkwinkelbereich hinweg (0,01; 0,5 und 1 Hz). Hierbei werden die Größen Lenkradwinkel, -moment, Radwinkel und -momente als Input für die Optimierung erfaßt. Ein konstanter Wert für die Lenkübersetzung, die Torsionsstabsteifigkeit, Mantelrohr- bzw. Zahnstangenreibung, ein lastabhängiger Reibungsfaktor und die Koeffizienten des exponentiellen Reibungsmodells werden so identifiziert. Im Vergleich zur HPS wird die Funktion der EPS-Unterstützungskennlinie in zwei Geschwindigkeitsbereichen angegeben (das EPS-Steuergerät erhält auf dem Prüfstand ein fiktives Fahrgeschwindigkeitssignal). Darüber hinaus wird eine aktive Dämpfung eingeführt, die in Abhängigkeit der Lenkgeschwindigkeit einen Lenkmomentanteil stellt. Elektrische Größen oder Eigenschaften werden nicht identifiziert.

Wenn für ein HPS-Fahrzeug auf Komponentendatenblätter zurückgegriffen werden kann, ist es sinnvoll, auch die Hydraulik der Lenkung darzustellen¹¹⁶. Darin ist das Lenkungsmodell zur Simulation zusätzlich mit einem Fahrzeugquerdynamikmodell verbunden. Laut Pfeffer ist die Modellierung von Reibung und Dämpfung essentiell für eine sehr gute simulative Vorhersage von Lenkmomenten. Reibung tritt an mehreren Stellen in der Achse und im Lenksystem auf, so z.B. an den Zahnstangen- und Lenkventildichtungen. Wie Neureder zeigt, verhält sich das Lenksystem nicht der Coulomb-Reibung zufolge, sondern bereits kleinste Auslenkungen werden übertragen¹¹⁷. Aus Mangel an Standardreibmodellen verfolgt Pfeffer eigene empirische Modelle: ein geschwindigkeitsunabhängiges Feder-Reibelement, eine über eine exponentielle Feder angebundene last- und hydraulikdruckabhängige Reibstelle und ein exponentielles Federreibelement in Parallelschaltung zu einem Maxwell-Element¹¹⁶.

¹¹⁶ Pfeffer 2006

¹¹⁷ Neureder 2002

Die Abbildung Abb. 2.20 illustriert das mechanische Lenkungsmodell mit zwei Freiheitsgraden und die an den einzelnen Komponenten angreifenden Steifigkeiten, Dämpfungen und Reibungen.

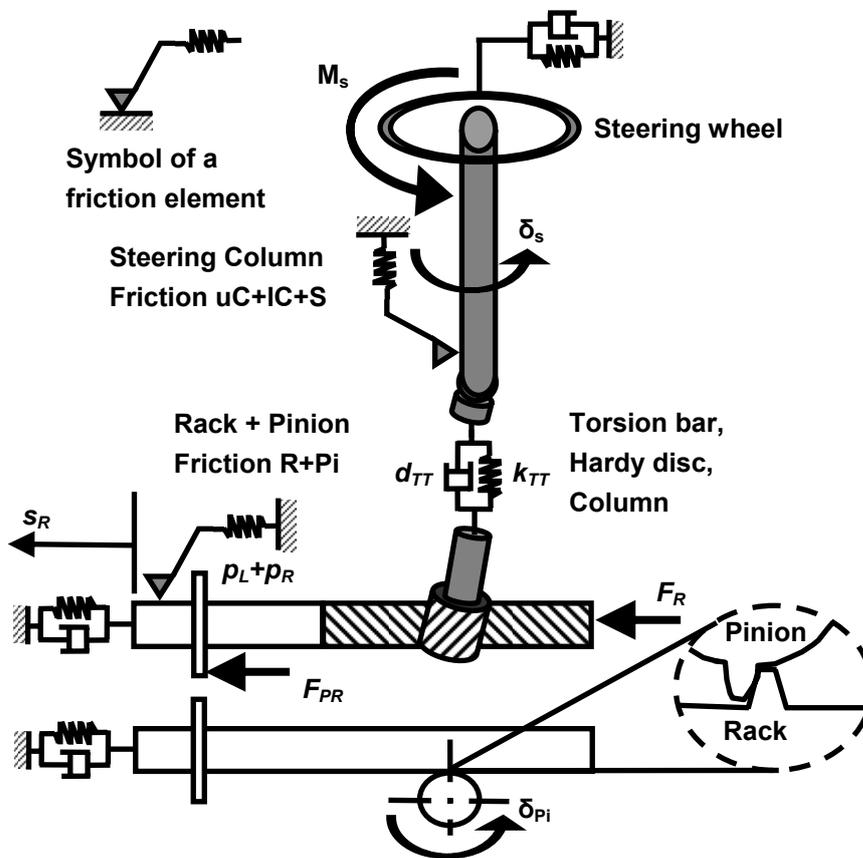


Abb. 2.20:

Mechanisches Lenkungsmodell¹¹⁹.

Die beiden Trägheiten sind wiederum am Torsionsstab aufgetrennt. Die Gesamtnachgiebigkeit, die durch den Torsionsstab, die Hardyscheibe¹¹⁸, Mantelrohr und Verzahnung hervorgerufen wird, ist durch einen linearen Feder-Dämpfer, k_{TT} parallel zu d_{TT} , ersetzt. Primärseitig ist ein Reibgleiter $uC+IC+S$ in Serie mit einer exponentiellen Feder nachgebildet. Sekundärseitig, $R+Pi$, ist in Anlehnung an Neureder¹¹⁹ dasselbe Element lastabhängig, als Funktion der Lenkgeschwindigkeit und des Hydraulikdrucks, in Parallelschaltung mit einem Maxwell-Element¹²⁰ integriert. Für das hydraulische Teilmodell wird eine Volumenstrombilanz nach Abb. 2.21 aufgestellt; dabei wird die Unterstützungskennlinie als bekannt vorausgesetzt, d.h. sie muß konventionell gemessen werden.

¹¹⁸ Als Hardyscheibe wird eine Gummigelenkscheibe im primärseitigen Lenkstrang bezeichnet.

¹¹⁹ Neureder 2002

¹²⁰ Hier ist das Maxwell-Element eine Reihenschaltung aus linearer Feder und exponentiellem Dämpfer.

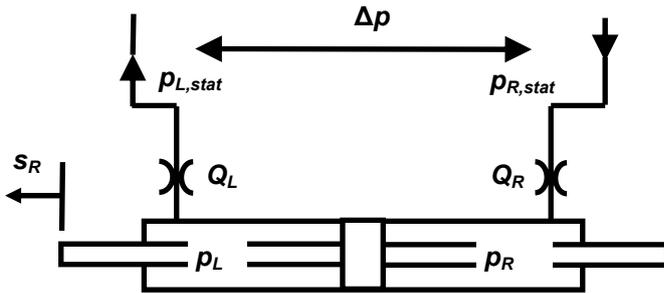


Abb. 2.21: Hydraulisches Modell mit Zahnstangenweg s_R und Kammern-druckdifferenz Δp ¹²¹.

Die dazugehörige Gleichung lautet exemplarisch für die rechte Kammer, zusammengesetzt aus der Druck- und Volumenstrombilanz zwischen kammerinternem und -externem Zustand:

$$\frac{V}{\beta_F} \cdot \frac{dp_R}{dt} = C_{qA} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho}} (p_{R,stat} - p_R) - \dot{s}_R \cdot A \quad [10],$$

- mit ρ = Fluiddichte,
 β_F = Kompressionsmodul,
 V = Fluidvolumen,
 C_{qA} = Dynamikkoeffizient,
 A = Kolbenfläche.

Bei der zusammenhängenden Betrachtung der beiden Teilsysteme für die Simulation von Open-Loop Manövern, dient der Lenkwinkel als Eingabegröße, aus der das Lenkmoment berechnet wird; die beiden anderen Freiheitsgrade sind dann der Zahnstangenweg und die -kraft F_R . Der Torsionsstabverdrehwinkel und die Zahnstangengeschwindigkeit können aus dem mechanischen Modell abgeleitet und in die Hydraulik eingegeben werden. Der Torsionsstabverdrehwinkel ist über seine Steifigkeit proportional zum Lenkmoment und bestimmt die Öffnungsquerschnitte des Lenkventils. Durch die Integration der Zahnstangengeschwindigkeit ist die Kolbenposition und sind somit die Hydraulikölvolumina bekannt, woraus die Kammerdruckdifferenz dem mechanischen Teilsystem über ein PT1-Verhalten (um die Fluidynamik zu approximieren) rückgeführt werden kann. Um das Verhalten gesamthaft im virtuellen Fahrversuch analysieren zu können, ist dieses Lenkungsmodell mit einem Gesamtfahrzeugmodell gekoppelt.

Das hierzu genutzte Querdynamikmodell ist ein um Radlastverschiebung, Wanken, Reifen-, (Elasto-)Kinematikennlinien und Aerodynamik erweitertes Einspurmodell. Unter Vernachlässigung der Umfangskräfte errechnen sich aus den Sei-

¹²¹ nach Pfeffer 2006

tenkräften getrennt über den Hebelarm des Nachlaufs die beiden Reifenrückstellmomente. Die Gewichtsrückstellung ist ebenfalls aus Prüfstandsmessungen bekannt und ergibt mit der Achsreibung ein Achsrückstellmoment M_{SC} . Die Spurstangensteifigkeit wird ebenfalls vernachlässigt, so daß die Zahnstangenkraft die Schnittgröße repräsentiert. Differenziert zwischen translatorischer und rotatorischer Bewegung der Räder lauten die Bewegungsgleichungen wie folgt für eine Achshälfte:

$$m_{uF} \cdot \ddot{y}_W = -F_{KSF} + F_R + F_{SF} \quad [11]$$

$$J_{uF} \cdot \ddot{\delta}_F = M_L + F_R \cdot r_L - M_{SC} \quad [12]$$

mit m_{uF} = ungedeferte Radmasse, J_{uF} = Radträgheitsmoment.

Ein Radquerweg y_W wird durch die Summe der Zahnstangenkraft F_R der Radaufhängungsquerkraft F_{KSF} und der Seitenkraft F_{SF} erzeugt. Die Summe des Reifenrückstellmoments M_L mit dem Achsrückstellmoment und dem Produkt aus Zahnstangenkraft und Spurhebellänge r_L führt zu einem Radwinkel δ_F . Dieses kombinierte Modell wird mittels der Open-Loop Manöver Transition und Weave Test, Lenkwinkelsprung und einer Closed-Loop Geradeausfahrt validiert, so daß es zu Parameterstudien genutzt werden kann.

Das von Däsch¹²² entwickelte Lenkungsmodell basiert auf Mitschke und Wallentowitz¹²³, die es zur Simulation des Lenkungspendelns¹²⁴ einsetzen. Diebold et al.¹²⁵ integrieren es in deren Einspurmodell zur Identifikation von Bauteileigenschaften aus Prüfstands- und Straßenmessungen. Es enthält eine Lenkungssteifigkeit und -verstärkung, ohne Hysterese und Spiel, und legt über die Lenkübersetzung das Verhältnis zwischen Lenk- und Radwinkel fest. Das Fahrzeugverhalten ist über ein Rückstellmoment und Aufbaugierschwingungsmoment berücksichtigt. Däsch übergibt dem Teilsystem der Sekundärseite aus dem Einspurmodell als Eingangsgrößen die Seitenkraft F_{SV} und das Rückstellmoment M_R , siehe Abb. 2.22. In der Momentenbilanz um den Achsschenkelbolzen stehen diese zusammen mit der Radträgheit, die auf die Sekundärseite bezogen ist, und der Gewichtsrückstellung M_ε im Gleichgewicht zu den Lenkungsparametern der rechten Seite in Gl. [13]. Da die Übersetzungsverhältnisse der Winkel absolut und die der

¹²² Däsch 2004

¹²³ Mitschke / Wallentowitz 2004

¹²⁴ Das Lenkungspendeln ist eine Lenkraddrehschwingung großer Amplitude, nach Mitschke / Wallentowitz 2004.

¹²⁵ Diebold et al. 2006

Momente differentiell ausgedrückt sind, können die primärseitigen Momentenanteile aus der Primärsteifigkeit c_{prim} und der Parameterlenkungsfunktion M_{PML} über die differentielle Lenkübersetzung di_S auf die Sekundärseite umgerechnet werden. Der Torsionsstabverdrehwinkel τ_{DS} ist hierbei die Differenz zwischen Lenkradwinkel und Verdrehwinkel am Lenkgetriebeeingang, dem Ritzelwinkel. Die Primärsteifigkeit setzt sich aus einer Reihenschaltung zwischen Mantelrohr- und Torsionsstabssteifigkeit zusammen.

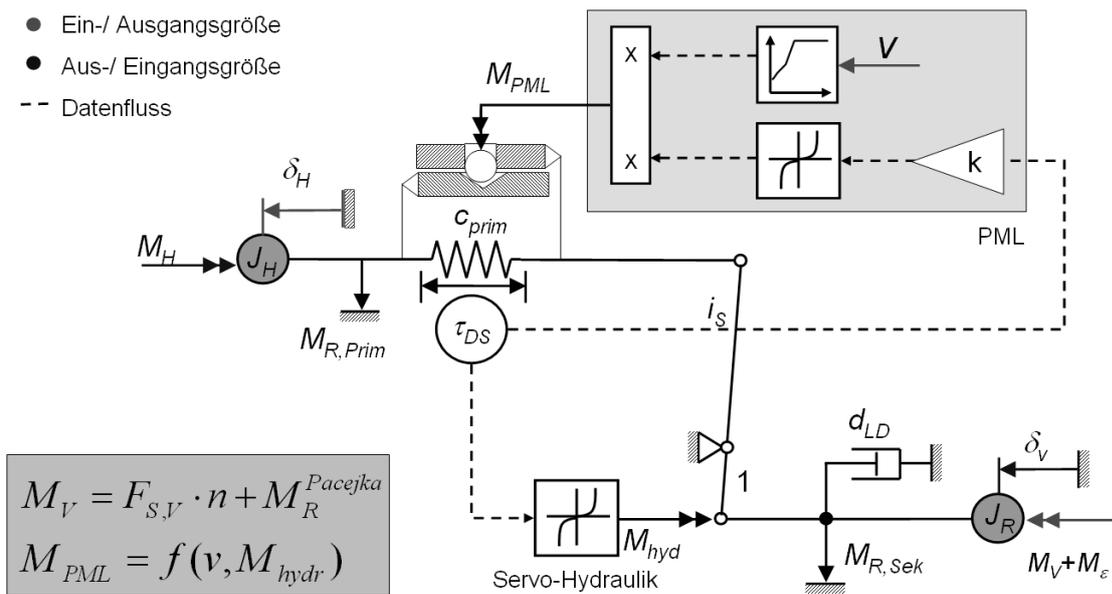


Abb. 2.22: Lenkungsmodell nach Däsch¹²⁶.

$$F_{\text{SV}} \cdot n_K + M_R + M_\varepsilon + J_R \cdot \ddot{\delta}_V = (c_{\text{prim}} \cdot \tau_{\text{DS}} + M_{\text{PML}}(v, M_{\text{hyd}})) di_S + M_{\text{hyd}} - M_{\text{R,sek}} - d_{\text{LD}} \cdot \dot{\delta}_V \quad [13],$$

$$M_H - J_H \cdot \ddot{\delta}_H = c_{\text{prim}} \cdot \tau_{\text{DS}} + M_{\text{R,prim}} + M_{\text{PML}}(v, M_{\text{hyd}}) \quad [14],$$

wobei die Vorzeichen von M_{PML} , $M_{\text{R,prim}}$ und $M_{\text{R,sek}}$ drehrichtungsabhängig sind.

Dem torsionsstabverdrehwinkelabhängigen Unterstützungsmoment M_{hyd} und primärseitigen Anteil wirken die Sekundärreibung $M_{\text{R,sek}}$ sowie das Moment verursacht durch den Lenkungsdämpfer mit dem Koeffizienten d_{LD} entgegen. Das aus der Hydraulikkennlinie resultierende Unterstützungsmoment wird nach einer An-

¹²⁶ Däsch 2004, aus Diebold et al. 2006

satzfunktion dritter Ordnung in Abhängigkeit der Ventilöffnungsquerschnitte approximiert¹²⁷.

Die Primärseite umfaßt den Lenkstrang vom Lenkrad bis zum Ventilturm. In diesem Zweig beeinflussen ausschließlich die Komponenten des Mantelrohrs und der Manschette bzw. optional eine fahrgeschwindigkeitsabhängige Unterstützungsfunktion das Lenkmoment. Referenz für die primärseitige Momentengleichung ist der Torsionsstab, der als Schnittstelle zur Sekundärseite das Maß der hydraulischen Unterstützung steuert. Wird die Lenkradträgheit in erster Näherung für quasi-stationäres Lenken vernachlässigt, muß der Fahrer laut Gl. [14] das Handmoment entsprechend der Summe aus mechanischem Lenken, der Mantelrohrreibung $M_{R, \text{prim}}$ und je nach Lenksystemtyp einem Parameterlenkanteil M_{PML} aufbringen. Dieser Parameterlenkanteil ist als fahrgeschwindigkeitsabhängiger Faktor modelliert, der die Hydraulikkennlinie skaliert. Die Hydraulikkennlinie ist im Modell implizit primär- und explizit sekundärseitig hinterlegt; allerdings nur dann primärseitig wirksam, wenn auch der Parameterlenkfaktor aktiv ist. Im Übrigen sind die Primär- und Sekundärreibstellen elastisch/dämpfend angebunden.

Der Identifikationsablauf der Parameter besteht aus drei Prüfstandsmessungen. Erstens wird auf reibungsfreien Drehplatten die Lenkübersetzung zwischen Lenk- und Radwinkel bestimmt. Zweitens kann die Primärsteifigkeit und -reibung durch Lenken in die Anschläge hinein und aus den Anschlägen heraus analysiert werden; bei der Betrachtung des Lenkmoments über dem Lenkradwinkel im Anschlagbereich ist die Steigung der Kennlinie ein Maß für die Steifigkeit, die Hysteresehöhe entspricht der Reibung. Drittens wird ohne Lenkhilfe über den gesamten Winkelbereich hinweg gelenkt. Die Steigung bzw. die Höhe der resultierenden Hysterese bildet die Gewichtsrückstellung und Sekundärreibung ab. Mit diesen Angaben kann die Hydraulikkennlinie optimiert werden.

Das gekoppelte Lenkungs- und Gesamtfahrzeugmodell ermöglicht eine ganzheitliche Analyse des Fahrverhaltens. Die erfaßten Nichtlinearitäten zwischen Lenkrad und Rad sind für das Eigenlenkverhalten¹²⁸ und nicht zuletzt für den subjektiven Fahreindruck im On-Centre Bereich prägend. Daneben erfüllt das Lenkungsmodell seine Funktion, den Radwinkelinput für das Einspurmodell bereitzustellen. Auch sind modulare Analysen denkbar, indem z.B. das Fahrzeug A mit der Lenkung B virtuell ausgerüstet und fahrdynamisch betrachtet wird.

¹²⁷ Ammon et al. 2006

¹²⁸ Berkefeld 1983

2.4 Werkzeuge zur Analyse von potentiellen Korrelationen

2.4.1 Das subjektive „Meßinstrument“: der Fragebogen

Das Instrument, um subjektive Einschätzungen zu „messen“, ist in den Sozialwissenschaften der Fragebogen; in einer umfangreichen Literaturrecherche¹²⁹ zu Fragebögen über das Fahrverhalten lassen sich Beispiele studieren. Nachfolgend werden drei Fragebögen mit ihren Skalen stellvertretend für Beurteilungen durch Normal- und Expertenfahrer vorgestellt. Grundsätzlich sind die Fragebögen nach der Art ihrer zur Bewertung zur Verfügung stehenden Skalen eingeteilt: die offene und geschlossene Skala.

Zomotor verweist als Standard für die offene Variante¹³⁰ auf die SAE-Handling-Skala¹³¹, siehe Abb. 2.23, die aus der SAE-NVH und Ride-Skala¹³² abgeleitet ist, vergleiche Abb. 2.24, die wiederum auch deutschsprachig industrieweit als „ATZ-Skala“ Einzug gehalten hat¹³³. Die offene Skala wird als uni-polar bezeichnet, da kein Vorzeichenwechsel in der Bewertung involviert ist. Im Falle von Abb. 2.23 und Abb. 2.24 handelt es sich um kontinuierliche Skalen mit zehn Stufen, die durch Zahlen codiert sind und teilweise verbale Attribute als Anker enthalten, die die subjektiven Assoziationen unterstützen sollen.

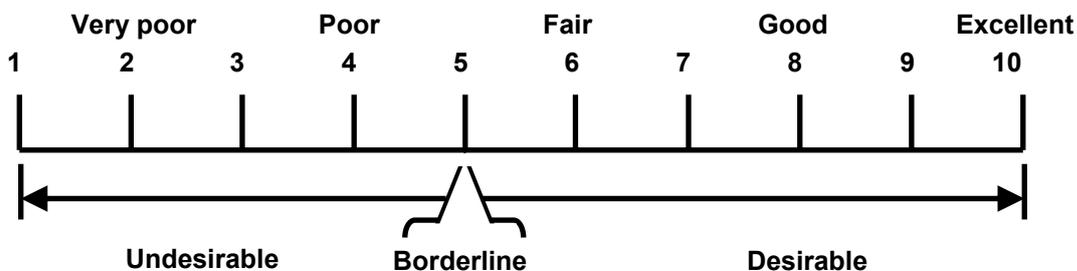


Abb. 2.23: Subjektives Benotungssystem für das Fahrzeug-Handling¹³¹.

¹²⁹ Buschardt 2003

¹³⁰ Zomotor 1991

¹³¹ Norm J1441

¹³² Norm J0160

¹³³ Aigner 1982

| | | | | | | | | | |
|--------------------|--------|----------------|------|---------------|--------------------|------|-------------------|-----------|--------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| UNACCEPTABLE | | | | BORDER LINE | ACCEPTABLE | | | | |
| CONDITION NOTED BY | | | | | | | | | |
| ALL OBSERVERS | | MOST OBSERVERS | | SOME OBSERVER | CRITICAL OBSERVERS | | TRAINED OBSERVERS | | NOT OBSERVED |
| INTOLERABLE | SEVERE | VERY POOR | POOR | MARGINAL | BARELY ACCEPTABLE | FAIR | GOOD | VERY GOOD | EXCELLENT |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |

Abb. 2.24: Subjektives Benotungssystem für Fahrzeugbewertungen von NVH- und Ride-Kriterien in Bezug auf Reifen¹³⁴.

Außerdem sind die Skalen in nicht akzeptables und akzeptables Fahrzeugverhalten zweigeteilt bzw. ist eine zusätzliche Abschätzung enthalten, inwieweit die Störung wahrgenommen wird. Zomotor nennt als Vorteile dieses Skalentyps die Einfachheit für den Anwender und die Möglichkeit, statistische Kenngrößen wie einen Mittelwert zu berechnen, wenn mehrere Urteile zu einem Kriterium vorliegen¹³⁵.

Die geschlossene oder bipolare Skala ist ein relatives Bewertungsschema, wobei die beiden Pole zwei subjektive Extremwerte mit einer als „unverändert“ oder „optimal“ definierten Mitte darstellen. Die Bewertung erfolgt als Vergleich zwischen zwei Varianten, die sich in einer Eigenschaft entweder gleichen oder relativ verbessern bzw. verschlechtern, vergleiche Abb. 2.25. Ist die Skala zu feingeteilt, können die Stufen u.U. nicht differenziert werden (wie auch bei der offenen Variante).

| | |
|----|------------------------------------|
| -3 | sehr viel schlechter als die Basis |
| -2 | deutlich schlechter als die Basis |
| -1 | spürbar schlechter als die Basis |
| 0 | wie Basis |
| 1 | spürbar besser als die Basis |
| 2 | deutlich besser als die Basis |
| 3 | sehr viel besser als die Basis |

Abb. 2.25: Beispiel einer geschlossenen Bewertungsskala¹³⁶.

Aus Voruntersuchungen von Albers und Albrecht zur Beurteilung des Anfahrkomforts mit Laienbewertern offenbart sich eine stufenlose Skala mit zwei Endat-

¹³⁴ Norm J0160

¹³⁵ Zomotor 1991

¹³⁶ Botev 2008

tributen „schlecht“ und „hervorragend“ als zielführend¹³⁷. Daraus entwickelt sich eine Beurteilungsmethode, die aus einer einfachen zweistufigen eine kontinuierliche Skala auf einer zweiten Ebene ableitet¹³⁸. Auf der ersten Ebene wird eine Vorentscheidung bezüglich der Kaufpräferenz des Produktes getroffen. Die Zweite ermöglicht ein Ausdifferenzieren der Beurteilung mittels eines gleitenden Schiebereglers, der zwischen den Ankern (mit „0“ und „1“ bzw. „absolut inakzeptabel“ und „keine weitere Verbesserung erforderlich“ codiert) bewegt werden kann, siehe Abb. 2.26:

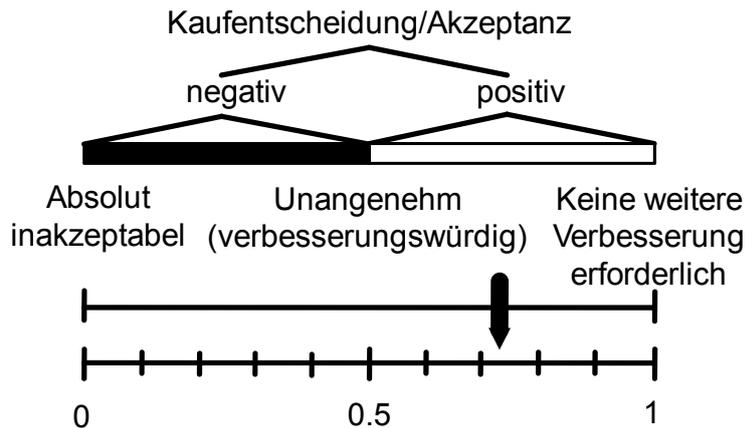


Abb. 2.26: Zwei-Ebenen Beurteilungsverfahren des subjektiven Anfahrkomforts¹³⁸.

Riedel und Arbinger entwickeln einen zielgruppengerecht formulierten Fragebogen über das querdynamische Fahrverhalten für Normalfahrer. Kern des Fragebogens ist die adjektivische Charakterisierung des Fahrverhaltens in Bezug auf das *Empfinden der Sicherheit* und des *Fahrvergnügens*, der *Sportlichkeit*. Mit Hilfe einer Vier-Stufen-Skala werden mehrere Items aus den Kategorien *Lenkung und Ansprechen des Fahrzeugs auf Lenkeinschlag*, *Gefühl für Fahrbahnkontakt*, *Stabilität*, *Leichtigkeit der Eingewöhnung* sowie *Gefühl von Kontrolle und Sicherheit* beschrieben¹³⁹, vergleiche Abb. 2.27.

¹³⁷ Albers / Albrecht 2002

¹³⁸ Albrecht 2005

¹³⁹ Riedel / Arbinger 1997

| 1. Lenkung | LK | trifft nicht zu | trifft kaum zu | trifft eher zu | trifft genau zu |
|--|-----|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| Das Fahrzeug reagierte direkt auf die Lenkung. | LK1 | | | | |
| Bei der Lenkung hatte ich unmittelbar ein Gefühl für die Reifen. | LK2 | | | | |
| Die Lenkung ging schwer. | LK3 | | | | |
| Die Lenkung hatte viel Spiel. | LK4 | | | | |
| Die Lenkung war schwerfällig. | LK5 | | | | |
| Die Lenkung war exakt. | LK6 | | | | |
| Die Lenkung war genau. | LK7 | | | | |

Abb. 2.27: Auszug des Fragebogens zur Subjektivbewertung der Lenkung durch Normalfahrer¹⁴⁰.

In ihrer Analyse des Lenkgefühls und des Handlings integrieren Harrer et al. beide Skalentypen zur subjektiven Evaluierung durch Expertenfahrer, siehe Abb. 2.28. Die Kriterien *On-Centre und Off-Centre Lenkmoment, Zentriergefühl, Lenkungsreibung, Lenkungsansprechen, Lenkpräzision* und *Lenkwinkelbedarf* sind u.a. bei 80 und 120 km/h zu bewerten. Ein "Assessment Index" ist auf der offenen Skala von 1 bis 10 zu vergeben; er indiziert, inwieweit das Optimum für ein Bewertungskriterium erreicht ist. Mittels eines „Statements“ auf einer geschlossenen Skala kann der Bewerter zusätzlich angeben, ob die Eigenschaft zu hoch, niedrig, langsam, schnell etc. ausgeprägt ist, wodurch eine optimale Note verhindert wird. Über eine Lineartransformation wird die zweigipflige Verteilung im Nachgang in eine eingipflige konvertiert¹⁴¹. Im Kontrast der beiden Fragebögen nach Abb. 2.27 und 2.28 werden der unterschiedliche Detaillierungsgrad der Kriterien und deren Definitionen für die Experten- und Normalfahrer sehr deutlich.

¹⁴⁰ Riedel / Arbinger 1997

¹⁴¹ Harrer et al. 2006

| Criterion | Statement | | Assessment index |
|-----------------------|-----------|-------------------------------|------------------|
| | | Optimum | |
| Steering torque | 1 | Low speed (80 km/h) +/- 15° | too low |
| On-centre | 2 | High speed (120 km/h) +/- 10° | too low |
| Steering toque | 3 | Low speed (80 km/h) +/- 50° | too flat |
| off-centre | 4 | High speed (120 km/h) +/- 30° | too flat |
| Centre feel | 5 | at 80km/h < 5° | too weak |
| | 6 | at 120 km/h < 5° | too weak |
| Steering friction | 7 | | too low |
| Steering response | 8 | From the middle (80 km/h) | too slow |
| Steering precision | 9 | | imprecise |
| Steering angle demand | 10 | Low speed (80 km/h) | too small |
| (lane charge) | 11 | High speed (120 km/h) | too small |

Abb. 2.28: Extrakt eines Experten-Fragebogens¹⁴².

2.4.2 Meßtechnik im objektiven Fahrdynamikversuch

Die Aufgaben im Fahrdynamikversuch umfassen das Messen der Gesamtfahrzeugbewegungs- und Lenkungsgrößen während der Durchführung der Prüfmanöver. Inertiale Meßsysteme sind für die erstgenannten Größen „state-of-the-art“¹⁴³. Sogenannte „Strap-down“¹⁴⁴ Plattformen messen Beschleunigungen und Winkelgeschwindigkeiten, (Nick-, Wank- und Gierrate) mit Hilfe von Servo-Beschleunigungsaufnehmern und faser-optischen Gyroskopen. Es ist von überragender Bedeutung für die subjektiv-objektiv Korrelationen, daß dieselben physikalischen Quantitäten erfaßt werden, die vom Fahrer sensiert werden. Deshalb ist die beschleunigungsmessende Plattform anstelle des Beifahrersitzes montiert, d.h. spiegelbildlich zur Hüftregion des Fahrers, siehe Abb. 2.29 (links).

Die Longitudinal- und Quergeschwindigkeit des Fahrzeugs wird durch einen berührungslosen optischen Sensor bestimmt. Die Fahrbahnoberfläche wird auf einem optischen Gitter bzw. einer Zelle abgebildet, wodurch die Frequenz der Lichtintensität ein Maß für die Geschwindigkeiten ist. Das Verhältnis daraus entspricht einem Schwimmwinkel am Meßort. Da der Sensor an der Stoßstange befestigt ist, siehe Abb. 2.29 (rechts), muß das Signal in den Schwerpunkt koordinatentransformiert werden. Anstelle des Originalenkrades ist im Versuch eine spezielle Meßnabe auf der Lenkspindel fixiert, die einen optischen Inkrementalgeber und

¹⁴² Harrer et al. 2006

¹⁴³ Hinüber 2002

¹⁴⁴ Im Fahrzeug „strapped-down“ bedeutet, die Meßeinrichtung ist fahrzeug- „festgeschallt“.

Dehnungsmeßstreifen zur Erfassung des Lenkradwinkels und Lenkmoments beherbergt. Die Signale der verschiedenen Sensoren werden mit einer Frequenz von 200 Hz an verschiedenen Fahrzeugpositionen während den Manövern abgetastet.

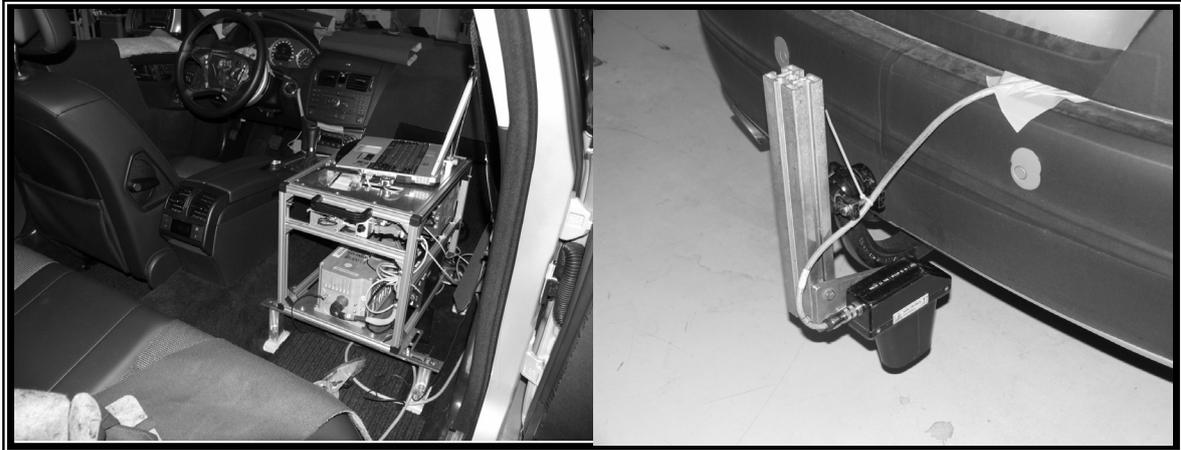


Abb. 2.29: Fahrdynamikmeßtechnik mit Meßlenkrad und Kreiselpattform (links), sowie optischem Sensor am Einsatzort (rechts).

Durch die physikalischen Entfernungen, Filterungen und Verstärkungen etc. weisen die verschiedenen Sensoren unterschiedliche Laufzeiten in der Erfassung auf ¹⁴⁵. Falls diese Zeitverzögerungen berücksichtigt sind, können insbesondere in den dynamischen Manövern Phasenverzögerungen zwischen den Größen, z.B. die Differenz zwischen *Lenkmoment* – *Gierrate bei einer bestimmten Frequenz*, objektiv analysiert werden. Aufgrund der Reproduzierbarkeit und Meßdatenbesetzung für die späteren Auswertungen werden immer mehrere Testläufe pro Prüfmanöver gefahren.

2.4.3 Statistische Auswertemethoden

In der vorliegenden Arbeit gilt es zu prüfen, ob und in welchem Maß die objektiven Charakteristika eine quantifizierte subjektive Bewertung und Beurteilung beeinflussen. Um dies valide zu bewerkstelligen, werden Methoden aus der Statistik nachfolgend präsentiert und im Weiteren implementiert. Auf die gesammelten objektiven und subjektiven Daten bezogen müssen zunächst Unterschiedshypothesen überprüft werden, um sicherzustellen, daß sich die objektiven Fahrzeugeigenschaften und subjektiven Einschätzungen untereinander differenzieren. Denn nur

¹⁴⁵ Kobetz 2004

falls sich zu bewertende Fahrzeuge oder Fahrzeugvarianten untereinander unterscheiden, besteht die Möglichkeit diese auch subjektiv getrennt aufzulösen.

In der Deskriptiven Statistik bedeutet das Messen einer Variablen das Zuordnen von Zahlen zu einzelnen Fällen¹⁴⁶. Sogenannte Ordinalniveaus geben Ordnungsrelationen wieder. Ihre empirische Relevanz bezieht sich allerdings, im Gegensatz zur Intervallskala, nicht auf die Differenz zweier Codezahlen. Die Übergänge zwischen den beiden Skalen sind fließend. Die Klassifikation der Skalen hat Konsequenzen für die Wahl des späteren Korrelationsansatzes.

Krüger und Neukum berichten über Probleme aus der Urteilspsychologie, daß Probanden ihre jeweilige Skala komparativ bzw. einen bestimmten Ausschnitt aus einer Skala nutzen. Diese Ausschnitte müssen natürlich unter mehreren Testpersonen nicht notwendigerweise gleich sein, wodurch eine Korrelation verzerrt werden könnte. Hier bietet sich an, die individuellen Evaluierungsnoten zu transformieren: entweder wird die Differenz zum individuellen Urteilsmittelwert über eine Stichprobe gebildet oder die Noten werden individuell z-standardisiert¹⁴⁷. Die Z-Transformation $y_{ind,z}$ für einen individuellen Notenwert y_{ind} errechnet sich aus der Urteilsdifferenz zum Mittelwert geteilt durch die Standardabweichung $\sigma_{y,ind}$ aller individuellen Noten über ein subjektiv zu bewertendes Kriterium, vgl. Gl. [15]:

$$y_{ind,z} = \frac{y_{ind} - \bar{y}_{ind}}{\sigma_{y,ind}} \quad [15]$$

mit \bar{y}_{ind} = Mittelwert aller individuellen Noten über ein spezifisches Kriterium.

Die gemessenen Zufallsvariablen können nun diskret oder stetig auftreten. Diskret bedeutet, daß sie nur endlich viele oder abzählbar unendlich viele Werte annehmen kann. Eine Zufallsvariable heißt stetig, wenn sie zumindest in einem bestimmten Bereich jeden reellen Zahlenwert annehmen kann. Ordinalskalierte Variablen sind stets diskret, bei intervallskalierten Variablen entscheidet die Meßgenauigkeit, ob sie als diskret oder stetig einzuordnen sind. Eine entscheidende Rolle in der Statistik spielt bei intervallskalierten Variablen die Tatsache, ob deren Werte einer Normalverteilung folgen oder nicht. Die Überprüfung der Verteilungsform ist eine der Voraussetzungen für die Wahl des Korrelationsansatzes. Zur Prüfung auf Normalverteilung für kleine Fallzahlen wird der Kolmogorov-Smirnov-Test oder Lilliefors-Test¹⁴⁸ genutzt.

¹⁴⁶ Zöfel 2003

¹⁴⁷ Krüger / Neukum 2001

¹⁴⁸ Conover 1980

Der Schluß von den Kennwerten einer Stichprobe auf die Parameter der zugehörigen Grundgesamtheit erfolgt bei intervallskalierten und normalverteilten Variablen über Streubereiche und Konfidenzintervalle. Der Streubereich sagt den Bereich voraus, in dem sich die einzelnen Meßwerte bewegen. Die Konfidenzintervalle geben an, zwischen welchen Grenzen sich mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit Mittelwert und Standardabweichung der Grundgesamtheit bewegen. Unter der Maßgabe, daß ein Experiment mit einer Stichprobengröße n einen Auszug aus der Grundgesamtheit darstellt, wird der Mittelwert mit steigender Fallzahl, d.h. Stichprobengröße, der Grundgesamtheit immer besser angenähert. Wird auf Basis des Mittelwerts der Stichprobe auf den entsprechenden Parameter der Grundgesamtheit geschlossen, wird ein Konfidenzintervall angegeben, innerhalb dessen sich der Mittelwert der Grundgesamtheit mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit bewegt. Das Konfidenzintervall indiziert demzufolge, daß ein Wert aus dieser Stichprobe mit einer gewissen Irrtumswahrscheinlichkeit Teil der Grundgesamtheit ist. Der entsprechende wahre Wert liegt mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit im Intervall, im Vertrauensbereich, um den gezogenen Wert aus der Stichprobe.

In der Prüfstatistik liegen zwei oder mehr Stichproben vor, deren Kennwerte daraufhin überprüft werden sollen, ob sie zu der gleichen Grundgesamtheit gehören. Die Frage nach der Signifikanz ist das zentrale Thema der analytischen Statistik; arithmetische Mittelwerte, Standardabweichungen, Korrelations- und Regressionskoeffizienten können durch Hypothesen überprüft werden. Der t-Test nach Student dient dem Vergleich zweier Mittelwerte bei bekannten Standardabweichungen und bekannten Fallzahlen. Die Signifikanzstufen sind unterteilt in die Irrtumswahrscheinlichkeiten $p \leq 0,05$ signifikant, $\leq 0,01$ sehr signifikant, $\leq 0,001$ höchst signifikant¹⁴⁹. Eine t-verteilte Prüfgröße dient der Absicherung der nachfolgend eingeführten Kenngrößen wie des Produkt-Moment Korrelationskoeffizienten, der Rangkorrelation nach Spearman, der partiellen Korrelation und den Regressionskoeffizienten. Für die drei Signifikanzniveaus und verschiedene Anzahl von Freiheitsgraden (bestimmt aus der Fallzahl) sind kritische Tabellenwerte in einer t-Tabelle aufgeführt. Eine Signifikanz auf dem betreffenden Niveau liegt vor, wenn die berechnete Prüfgröße t den betreffenden kritischen Tabellenwert übersteigt.

F-verteilte Prüfgrößen werden für die verschiedenen Formen der Varianzanalyse berechnet. Für die drei Signifikanzniveaus und verschiedene Anzahl von Freiheitsgraden sind kritische Tabellenwerte in der F-Tabelle aufgeführt. Signifikanz auf dem betreffenden Niveau liegt vor, wenn die berechnete Prüfgröße F den be-

¹⁴⁹ Bortz 1985

treffenden kritischen Tabellenwert übersteigt. Zusammengefaßt, zum Vergleich zweier Stichprobenmittelwerte wird der t-Test, zum Vergleich zweier Varianzen der F-Test eingesetzt.

Die häufigste Testsituation in der analytischen Statistik ist die Untersuchung der Beziehung zwischen zwei Variablen. Im Vergleich von Mittelwerten oder Medianen von Stichproben existiert als Unterscheidungsmöglichkeit die Frage, ob Werte der beteiligten Stichproben intervallskaliert und normalverteilt sind oder nicht. Die Alternative sind entweder ordinalskalierte oder intervallskalierte, aber nicht normalverteilte Werte. Im letzteren Fall werden nicht parametrische, sondern parameterfreie Tests angewandt, deren Formeln nicht auf den Originalwerten aufbauen, sondern auf Rangplätzen, die diesen Werten zugeordnet sind. Als Effizienz eines parameterfreien Tests bezeichnet man dabei das Verhältnis der für den Signifikanznachweis erforderlichen Stichprobenumfänge beim entsprechenden parametrischen Test und dem parameterfreien Pendant. Die Effizienz eines solchen parameterfreien Tests beträgt dabei etwa 95% des entsprechenden parametrischen Tests¹⁵⁰.

Diese Tests dienen der Überprüfung von Zusammenhangshypothesen. Es handelt sich hier nicht um funktionale Zusammenhänge, wie z.B. die Masse zu einer Kraft, sondern in der Sozialwissenschaft auftretende stochastische Verknüpfungen¹⁴³. Die Enge einer Beziehung zwischen zwei Merkmalen gibt der Korrelationskoeffizient R an, vergleiche Gl. [16]; falls $R = \pm 1$, geht der stochastische Zustand in einen funktionalen über.

$$R_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{n \cdot \sigma_x \sigma_y} \quad [16]$$

Der Korrelationskoeffizient nach Pearson, siehe Gl. [16], errechnet sich als Quotient, wobei im Zähler die Differenzen zwischen den korrespondierenden Vektorkomponenten der Datenmengen, die auf einen Zusammenhang hin überprüft werden sollen, und den Erwartungswerten stehen. Der Nenner normiert auf die Stichproben- bzw. die Vektorgröße und die Standardabweichungen der Vektoren. Der Korrelationskoeffizient ist invariant gegenüber Maßstabsveränderungen der untersuchten Merkmale. Der quadrierte Korrelationskoeffizient wird als Determinationskoeffizient oder Bestimmtheitsmaß R^2 bezeichnet und ist ein Maß für die gemeinsame erklärte Varianz¹⁵¹.

¹⁵⁰ Zöfel 2003

¹⁵¹ Bortz 1985

Korrelationskoeffizienten können nur berechnet werden, wenn die beteiligten Variablen mindestens ordinalskaliert sind. Es handelt sich um Zusammenhänge der Art „je größer die eine Variable, desto größer/kleiner die andere“. Für die Stärke des Zusammenhangs ist allein der Betrag des Korrelationskoeffizienten R maßgeblich. Die Einstufung lautet wie folgt¹⁵²:

- $R \leq 0,2$ Sehr geringe Korrelation,
- $0,2 < R \leq 0,5$ Geringe Korrelation.
- $0,5 < R \leq 0,7$ Mittlere Korrelation,
- $0,7 < R \leq 0,9$ Hohe Korrelation,
- $0,9 < R \leq 1$ Sehr hohe Korrelation.

Kann zwischen einer abhängigen und unabhängigen Variablen unterschieden werden, dann wird die abhängige Variable auf der y-Achse und die unabhängige auf der x-Achse eines Streudiagramms aufgetragen.

Je nach Skalenniveau der beteiligten Variablen gibt es verschiedene Verfahren zur Berechnung des Korrelationskoeffizienten: Falls beide Variablen intervallskaliert und normalverteilt sind, kommt entweder die Produkt-Moment-Korrelation nach Pearson oder eine partielle Korrelation zur Anwendung. Ist mindestens eine Variable ordinalskaliert oder nicht normalverteilt, trifft eine Rangkorrelation nach Spearman zu¹⁴⁴.

Nun ist eine Beziehung nicht notwendigerweise zweidimensional. Die Berechnung von partiellen Korrelationen bietet die Möglichkeit, Störvariablen, die Scheinkorrelationen erzeugen, auszuschließen. Um die Bedeutung einer Variablen für den Zusammenhang zweier anderer zu erkennen, kann der Einfluß dieser dritten Variablen auspartialisiert werden (am Bsp. in Gl. [17] „z“). Der Partialkorrelationskoeffizient lässt sich aus den Einzelkorrelationskoeffizienten errechnen, siehe Gl. [17]:

$$R_{yxz} = \frac{R_{xy} - R_{xz} \cdot R_{yz}}{\sqrt{1 - R_{xz}^2} \cdot \sqrt{1 - R_{yz}^2}} \quad [17].$$

Korrelationen sind Koinzidenzen und Hinweise, daß Beziehungen bestehen könnten. Für eine Vorhersagbarkeit muß ein deterministischer Zusammenhang herrschen, wozu Regressionsgleichungen genutzt werden. Die Regressionsgleichung bildet die Funktion zwischen Kriteriums- und Prädiktorvariablen ab. Das Kriterium ist hierbei „abhängig“ von den „unabhängigen“ Prädiktoren, wobei diese

¹⁵² Zöfel 2003

Bezeichnungen eine Kausalbeziehung implizieren, d.h., daß der subjektive Bewertungsaspekt von einem oder mehreren objektiven Merkmalsausprägungen, die untereinander unabhängig sind, abhängt. Dabei wird unterschieden zwischen linearen und nichtlinearen Zusammenhängen.

Im linearen Falle ist die Gerade gesucht, für die die Summe der quadrierten Abweichungen der vorhergesagten Kriteriumswerte von den beobachteten y_i -Werten minimal wird; die Regressionsgerade ist somit diejenige Gerade, die die Summe der quadrierten Vorhersagefehler minimiert:

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \rightarrow \min \quad [18]$$

mit \hat{y}_i = Vektor der vorhergesagten Kriteriumsvariablen.

Die einfachste funktionale Beziehung ist die lineare Regressionsgerade. Hierfür wird nach Gl. [19] die Matrix x_p der Prädiktorvariablen zu einem Spaltenvektor der Größe der Stichprobe n , b zum Steigungsskalar und a zum Achsenabschnitt der Geradengleichung.

$$\hat{y} = b \cdot x_p + a \quad [19]$$

Der Parameter b wird auch Regressionskoeffizient genannt; er gibt den Tangens des Steigungswinkels der Regressionsgeraden an. Der Parameter a ist der Ordinatenabschnitt und gibt den Punkt wieder, an dem die Regressionsgerade die y -Achse schneidet.

Die unabhängigen Variablen sind in Gl. [19] in Matrixschreibweise ausgedrückt, um anzudeuten, daß in statistischen Untersuchungen nicht nur monokausale Beziehungen auftreten. Eine abhängige Variable kann auch von mehreren unabhängigen Parametern, also objektiven Eigenschaften, beeinflusst sein. Von multipler linearer Regression wird gesprochen, wenn die Verknüpfung einer abhängigen Variablen zu mehreren unabhängigen Variablen analysiert wird. Es existieren zwei prinzipielle Rechenwege: die Einschlußmethode, die alle unabhängigen Variablen in die Regressionsgleichung aufnimmt, und eine schrittweise Methode, die schließlich nur diejenigen unabhängigen Variablen berücksichtigt, die unter Beachtung von Wechselwirkungen einen signifikanten Einfluß auf die abhängigen Variablen ausüben. Die graphische Repräsentation einer multiplen linearen Regression entspricht einer Ebene.

Die anhand einer Stichprobe ermittelte multiple Korrelation überschätzt den wahren multiplen Zusammenhang; deshalb wird eine „Schrumpfungskorrektur“

durchgeführt, indem irrelevante Varianzen der Prädiktoren unterdrückt werden¹⁵³. Es resultiert das korrigierte Bestimmtheitsmaß R^2_{korrr} als Funktion der Stichprobengröße n und Anzahl der Einflußgrößen m :

$$R^2_{\text{korrr}} = 1 - \left[(1 - R^2) \frac{n}{n - m} \right] \quad [20].$$

Neben den vorgenannten linearen Regressionen können ebenso nichtlineare Verknüpfungen auftreten; im vorliegenden Falle werden die Daten auch auf quadratische Zusammenhänge hin untersucht, vgl. Gl. [21]. Auf einen subjektiv-objektiv Zusammenhang angewendet bedeutet dies, daß eine objektive Variable über einen gewissen Bereich hinweg z.B. subjektiv minimal bzw. darunter und darüber hinaus größer eingeschätzt wird.

$$\hat{y} = b_2 \cdot x_p^2 + b_1 \cdot x_p + a \quad [21]$$

2.4.4 Anmerkungen zu den Versuchsbedingungen

In diesem Unterkapitel findet sich eine Sammlung einiger allgemeiner Gedanken und Bemerkungen von Autoren zur Durchführung von Objektivierungsexperimenten nach denen auch hier vorgegangen wird. Schalz et al. z.B. heben als Problematik der Korrelation hervor, daß die zu beschreibenden Eigenschaften und Fahrzustände eindeutig definiert sein müssen¹⁵⁴. Barthenheier empfiehlt eine maximale Testzeit von einer Stunde für die Probanden, weil darüber hinaus die Konzentrationsfähigkeit absinke¹⁵⁵. Buschardt verweist auf die experimentellen Randbedingungen, um die versuchsfremde Varianz wie persönliche Vorurteile und Gewöhnungseffekte zu reduzieren und hinsichtlich der Reliabilität auf eine Bewertung zu einem Referenzfahrzeug¹⁵⁶. Gies und Marusic sprechen ähnliche Themen bei der subjektiven Bewertung an: Markenidentifikation über den optischen Reiz, Halo-Effekt und Favoritenbildung¹⁵⁷. Kudritzki führt als Werkzeug ebenfalls den konventionellen Korrelations- und Regressionsanalyseansatz an und gibt Hinweise, wie z.B., daß die Testreihenfolge den Probanden nicht bekannt sein sollte, und daß mit Hilfe von Mittelwerten nur unter der Voraussetzung gerechnet werden dürfe,

¹⁵³ Backhaus et al. 2003

¹⁵⁴ Schalz et al. 2002

¹⁵⁵ Barthenheier 2004

¹⁵⁶ Buschardt 2003

¹⁵⁷ Gies / Marusic 2000

falls entweder nur bei den objektiven oder nur bei den subjektiven Daten Streuungen auftreten. Grundsätzlich könnten objektive Messungen sehr wohl durch den subjektiven Eindruck interpretiert werden¹⁵⁸.

Kudritzki führt weiterhin aus, daß mit Hilfe mehrerer fahrdynamischer Situationen Variantenunterschiede auch mit heterogenem Kollektiv überprüft werden könnten. Die Korrelationsmethode führt aus Gründen der Stichprobenheterogenität, Heterogenitätskorrelation und der Bereichsabhängigkeit (z.B. ist eine hohe Gierstabilität schlecht für die Agilität, aber fahrsicher bei hohen Geschwindigkeiten) nur unter eingeschränkten Bedingungen zu sinnvollen Ergebnissen. Die Art und Richtung des Zusammenhangs zwischen subjektivem und objektivem Kennwert ändert sich in Abhängigkeit des untersuchten querdynamischen Bereichs und es ist unzulässig, die Urteilsgleichung einer linearen Regression zu extrapolieren, denn sie ist nur für einen kleinen Bereich der fahrdynamischen Werte linear. Das variantenspezifische Verhalten ist in einem bestimmten fahrdynamischen Bereich zu untersuchen, d.h. bereichsspezifische Optima sind zu finden, da „je-desto“ Zusammenhänge nicht existieren. Das Urteil ist eine funktionale Größe der Fahrdynamik¹⁵⁹.

Krüger und Neukum kommen eingangs ihrer Analysen auf Rönitz zurück, der fordert, die „offenen Regelkreisverfahren so lange zu nutzen bis bessere Erkenntnisse über den Fahrer vorliegen“¹⁶⁰. Notwendig für die Individualkorrelation sei, daß die Fahrer die Variantenunterschiede „herausfahren“, um sie dann auch beurteilen zu können. Entweder werden Korrelationen für jeden einzelnen Fahrer oder über alle subjektiv-objektiv Meßwertpaare gerechnet. Die Probanden verwenden ihre Bewertungsskala komparativ. Bei nichtlinearem Fahrzeugverhalten kann nicht mehr linear korreliert werden. Die Korrelation innerhalb von Varianten ist nicht geeignet, subjektiv-objektiv Beziehungen zu untersuchen. Ihre zusammenfassende Forderung an den korrelativen Ansatz lautet: je enger sich die individuellen Korrelationen um einen hohen Mittelwert gruppieren, desto besser ist der gefundene Zusammenhang. Die Korrelation der Mittelwerte über die Varianten darf aufgrund des Problems individueller Variantenrangreihen der einzelnen Probanden nicht als Prüfgröße benutzt werden¹⁶¹.

Bubb leitet die Formeln für die benötigte Probandenanzahl in technischen Experimenten ab. Die Größenordnung von 10^3 Probanden gilt es z.B. einzuplanen, um

¹⁵⁸ Kudritzki 2000

¹⁵⁹ Kudritzki 2002

¹⁶⁰ Rönitz 1986

¹⁶¹ Krüger / Neukum 2001

zu beantworten, welcher Anteil der Bevölkerung mit einer bestimmten technischen Lösung zufrieden ist. Eine Alternativhypothese ist: Unterscheidet sich die neue Auslegung im Urteil der Testpersonen? In einer verbundenen Stichprobe durchlaufen die Versuchspersonen zwei und mehr Varianten, um den Einfluß technischer Varianten auf das Urteil zu untersuchen. Die Formel für die benötigte Probandenanzahl in Experimenten mit verbundenen Stichproben lautet:

$$n = \frac{t \cdot \sigma_y^2}{\bar{y}} + 1 \quad [22].$$

Unter der exemplarischen Annahme, bei der Bewertung zweier Varianten tritt eine gemittelte individuelle Differenz von einer Notenstufe mit einer zugehörigen Standardabweichung von 2 auf, sind für ein Ergebnis auf 95%-Signifikanzniveau mindestens zehn Probanden von Nöten. Bei der unverbundenen Stichprobe handelt es sich um zwei Versuchspersonengruppen, deren Teilnehmer unabhängig voneinander sind; hier ist der Einfluß von Persönlichkeitsvariablen von Interesse. Die Probandenanzahl fällt noch höher aus, da zur intra- die interindividuelle Streuung hinzukommt¹⁶².

Riedel und Arbinger erwähnen in ihrer Arbeit eine Obergrenze von sieben Stufen einer Skala, damit die einzelnen Teilungen noch differenziert werden. Selbst implementieren sie eine vierstufige Skala mit jeweils zwei Teilungen in positiver und negativer Richtung, d.h. ohne mittlere, um eine Stellungnahme durch die Probanden zu erzwingen. Die beiden Autoren räumen den Probanden Zeit ein, um sich mit dem Fragebogen vertraut zu machen, und nehmen Daten wie Alter, die jährlich gefahrene und Gesamtkilometerleistung auf. Die statistischen Gütekriterien Objektivität, Reliabilität und Validität werden überprüft. Die Objektivität, d.h. die Unabhängigkeit von zufälligen oder systematischen Einflüssen in den drei Phasen der Durchführung, Auswertung und Interpretation, insbesondere der subjektiven Beeinflussung durch den Versuchsleiter, ist gewährleistet dadurch, daß:

- der Einsatzraum und die -zeit eindeutig vorgeschrieben sind,
- eindeutige Instruktionen wie der Fragebogen zu beantworten sind,
- eine einheitliche Skala integriert ist,
- die Antworten codiert sind und
- die Zuordnung der Items zu Inhaltsbereichen und Skalen eindeutig ist.

Die Reliabilität, Reproduzierbarkeit, wird über die interne Konsistenz kontrolliert. Eine Versuchsvariante wird jeweils doppelt gefahren, um die Wiederholzuverläss-

¹⁶² Bubb 2003

sigkeit durch eine Korrelationsanalyse analysieren zu können, mit dem Ergebnis, daß sie bei professionellen Fahrern und auf der Landstraße im Vergleich zum Spurwechsel erheblich höher ist. Die Validität beinhaltet über eine Varianzanalyse die Frage, ob die Fahrzeugvarianten auch differenziert werden. Die Frage kann positiv beantwortet werden, wobei die Normalfahrer die Varianten beim Spurwechsel stärker unterscheiden und kein Geschlechtseinfluß festzustellen ist¹⁶³.

Dylla und Albers zufolge basieren die meisten Untersuchungen (z.B. unter Zuhilfenahme der ATZ-Bewertungsskala) auf der 1-Kanal-Theorie und der Annahme, daß Komfort und Diskomfort entgegengesetzte Pole auf der alleinigen Achse des Empfindens sind¹⁶⁴. Sie verweisen auf Zhang et al. und die 2-Kanal-Theorie, nach der Komfort und Diskomfort auf zwei verschiedenen Wahrnehmungsachsen liegen und gleichzeitig auftreten können¹⁶⁵. Der Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung auf der Erleidensachse ist monoton; Störungen sind also zu minimieren. Die Mechanismen, die zu Gefallen führen, sind interdependent, individuell verschieden gelagert und somit komplexer. Komfort ist als Oberbegriff zu Gefallen und Erleiden definiert, so daß der Reiz des Gefallens den Charakter ausmacht¹⁶⁶. Wie der Lenkcharakter und Lenkdiskomfort subjektiv-objektiv zusammenhängen, gilt es nachfolgend aufzuklären.

¹⁶³ Riedel / Arbinger 1997

¹⁶⁴ Dylla / Albers 2006

¹⁶⁵ Zhang et al. 1996

¹⁶⁶ Dylla 2006

3 Ziele der Arbeit

Um im Fahrzeugentwicklungsprozeß die Lenkeigenschaften effizient und zielgenau ausgestalten und validieren zu können, bedarf es Methoden, die die Zusammenhänge zwischen subjektivem Fahreindruck und objektiven Charakteristika wiedergeben. Welche Aspekte konstituieren aber überhaupt das Fahrverhalten? Wie können diese Kriterien objektiv bestimmt werden? Wie können sie beschrieben werden? Sind diese Charakteristika valide? Wie treffen sie das subjektive Empfinden? Wie können die Fahrdynamik-Manöver mit einem modellbasierten Ansatz verknüpft werden, um verschiedenen Lenkmoment-Kennungen in einem Fahrzeug effizient evaluieren zu können? Welche Anforderungen stellt die korrekte Abbildung des Lenkkomforts in den Prüfmanövern an die Modellierung? In den beiden folgenden Kapiteln 4 und 5 werden Methoden für diesen Validierungsprozeß vorgestellt und angewandt, um stationäre und dynamische Aspekte der Lenkeigenschaften zu objektivieren.

Der Stand der Forschung und Technik in Bezug auf die Querdynamik-Objektivierung kennt teilweise validierte Handling- und Lenkgefühl-Kenngrößen, die jedoch zumindest noch nicht mit Gefällensarealen abgesteckt bzw. in manchen Betriebspunkten, wie Niedrig- und Hochgeschwindigkeiten und dynamischen Manövern, nicht beleuchtet sind. Dies gilt insbesondere für die fahrdynamische Größe *Lenkmoment*. In der Literatur sprechen z.B. Mitschke und Wallentowitz für den Lenkwinkelsprung davon, daß es „Grenzwerte oder gewünschte Bereiche“ noch nicht gäbe¹⁶⁷, und der Einfluß verschiedener gefahrener Lenk- und Fahrgeschwindigkeiten nicht analysiert sei. Bisher seien auch nur wenige Hinweise gefunden, welchen Frequenzgang ein dynamisch als positiv befundenes Auto haben sollte. Zomotor et al. empfehlen ebenso, das instationäre Lenkverhalten zu untersuchen¹⁶⁸. Auch im angelsächsischen Raum werden Lenkeigenschaften objektiv erfaßt; jedoch zur Interpretation der Fahrzeugergebnisse fehlende „human factor

¹⁶⁷ Mitschke / Wallentowitz 2004

¹⁶⁸ Zomotor et al. 1997

research“ Programme erst angeregt¹⁶⁹. Gar marktspezifische Unterschiede in den objektivierten Manöverkenngößen sind nicht herausgearbeitet. Wurden Objektivierungsexperimente bisher modellbasiert durchgeführt, so wurden sie vornehmlich mit synthetischen Modellen bewerkstelligt; eine Gesamtfahrzeugintegration fehlt.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, zu validen objektiven Fahrdynamikengrößen beizutragen, die den subjektiven querdynamischen Fahreindruck beschreiben. Die subjektiven Eindrücke sollten (unter der Maßgabe enger Korrelationen) in objektive Parameter überführt werden, welche reproduzierbar erfaßt, bewertet und verankert werden können. Damit stünden im Produktentstehungsprozeß durchgängig Kenngrößen (in Konzept- und Lastenheften o.ä.) zur Verfügung, mit Hilfe derer das jeweilige Zielsystem zum Objektsystem hin abgeglichen werden kann¹⁷⁰. Dieser Aufgabe stellt sich der vorliegende Beitrag, wodurch das IEPK-Forschungsgebiet der Längsdynamik-Komfortobjektivierung¹⁷¹ ergänzt wird. Die Untersuchung fokussiert sich im Kontrast zu bisherigen Arbeiten auf dem Gebiet der Querdynamikobjektivierung auf die Größe Lenkmoment, ohne den Lenkwinkel oder die Gesamtfahrzeugreaktion zu vernachlässigen.

Im Rahmen der Arbeit werden Handling- und Lenkgefühl-Faktoren zum gesamthaften „Lenkkomfort“¹⁷² als Oberbegriff zu „Lenkcharakter“ und „Lenkdiskomfort“¹⁷³ verbunden. Charakterfragen differenzieren sich von Diskomfort-Themen, wie z.B. Lenkungsshimmy, die störend sind, solange sie wahrgenommen werden. Lenkcharakterausprägungen unterliegen stark dem subjektiven individuellen Geschmack, so daß hier im ersten Schritt zu untersuchen ist, wie die objektive Varianz subjektiv sensiert und zweitens in einem Gefallenssinne beurteilt wird. Dies geschieht zum einen, indem aus Fahrdynamikmanövern mit realen Versuchsträgern objektiv ermittelte Kennwerte und zum anderen eine modellbasiert erzielte Varianz mit subjektiven Noten korreliert werden. Gelingt es, eine Beziehung zwischen der subjektiven Komfortbewertung und den validierten Kenngrößen herzustellen, können Ziel- bzw. Grenzbereiche für die Quantitäten abgeleitet werden.

Die Objektivierung geht von der zentralen Hypothese aus, daß Zusammenhänge zwischen dem subjektiven Eindruck und objektiv bestimmbaren Charakteristika

¹⁶⁹ Salaani et al. 2004

¹⁷⁰ Albers / Meboldt 2006

¹⁷¹ Albers / Albrecht 2002, Albers / Albrecht 2003, Albers / Albrecht 2004a, Albers / Albrecht 2004b, Albers et al. 2007, Albers et al. 2008a, Albers et al. 2008c

¹⁷² verwandt hierzu spricht Albrecht 2005 im Rahmen der Längsdynamik von „Anfahrkomfort“.

¹⁷³ Zschocke / Albers 2008a

des Gesamtfahrzeugverhaltens, insbesondere des Lenkmoments, bestehen. Mit Hilfe eines modellbasierten Ansatzes könnte die Lenkkomfort-Klassifikation der Aspekte eindeutig getroffen (durch eine große Spreizung der Versuchsvarianten vermutlich in die Sparte Lenkcharakter), der Einfluß von Bauteileigenschaften auf das Gesamtverhalten analysiert und grundsätzlich die Validierungsgüte erhöht werden.

In einer Grundsatzuntersuchung auf Basis mehrerer Fahrzeuge wird eine Bestandsaufnahme von validen objektiven Kenngrößen und den subjektiven Verknüpfungen des Lenkkomforts durchgeführt. Hierzu bedarf es objektiver Auswerteverfahren und subjektiver Fragebögen, die sowohl Normal- als auch Expertenfahrerbedürfnisse berücksichtigen, bzw. einer Korrelationsanalyse, die nach wissenschaftlich-statistischen Leitlinien handelt. Die dabei offen bleibenden Felder werden im Anschluß daran beispielhaft mit modellbasierten Methoden bearbeitet, die im ersten Schritt die Bias-Faktoren in der subjektiven Bewertung nach konventionellem Ansatz minimieren und im zweiten Schritt die Brücke zur virtuellen Welt und Bauteilebene schlagen.

Die systematische Bearbeitung der für die vorliegende Arbeit gesteckten Ziele führt zu den folgenden Einzelaufgaben, welche in den nächsten Kapiteln erfüllt werden:

- Im Suchprozeß nach subjektiv-objektiv Zusammenhängen die Auswahl der Prüfmanöver und Definition der Kenngrößen zur objektiven Beschreibung des Fahrzeugverhaltens treffen.
- Fahrprofile bestimmen und Fragebogenkriterien zur vollständigen Abdeckung des Fahrbereichs und -empfindens festlegen.
- Korrelationsanalyseprozeß entwickeln.
- Mittels Redundanzanalyse den Manöveraufwand und die Fragebogenumfänge reduzieren.
- Bi- und multivariate Ergebnisanalyse im Dreiklang zwischen subjektivem Lenkcharakter-, Lenkdiskomfort und objektiven Kenngrößen durchführen.
- Daraus abgeleitete Felder der subjektiv-objektiv Zusammenhänge abstecken.
- Die „weißen“ Felder mit Hilfe von Modellansätzen bearbeiten.
- Die Prüfmanöver mit einem Modellansatz verknüpfen und als Objektivierungsmethode nutzen.

4 Suche nach subjektiv-objektiv Zusammenhängen des Lenkkomforts auf Basis realer Fahrzeuge

Dieses Kapitel geht auf eine Untersuchung mit dem Ziel ein, subjektive Lenkkomfortkriterien in Diskomfort- und Charakteraspekte zu klassifizieren und Zusammenhänge mit objektiven Daten zu finden. Probanden evaluieren hierfür subjektiv mehrere Fahrzeuge auf verschiedenen Fahrprofilen; zudem werden zur Korrelationsanalyse für alle eingesetzten Fahrzeuge objektive Daten aus Prüfmanövern ermittelt. Die implementierte Analyseverfahren der subjektiven und objektiven Daten findet ebenso bei den modellbasierten Untersuchungen, die in Kap. 5 enthalten sind, Anwendung.

4.1 Objektive Aspekte

4.1.1 Durchführung der Open-Loop Fahrdynamiktestmanöver

Zu Beginn steht die Auswahl der Träger der objektiven Merkmalsausprägungen: die Fahrzeuge. Die Untersuchungsgegenstände bilden sechs Fahrzeuge aus der gehobenen Mittelklasse und vier Kompaktvans, um Versuchserkenntnisse segmentenspezifisch gewinnen zu können. Die beiden gewählten Segmente repräsentieren das objektive Fahrverhalten von Kleinwagen- bis Oberklassensegment und damit ein großes Marktvolumen, woraus sich umfassende Erkenntnisse ableiten lassen. Die Anzahl von zehn Fahrzeugen stellt, neben den finanziellen Randbedingungen der Beschaffung, einen Kompromiß aus einer ausreichenden Stützbasis für die statistische Analyse und einer zu vermeidenden Überanstrengung der Probanden durch die Evaluationen dar.

Alle auf dem Markt befindlichen Lenkungsstypen sind durch die Fahrzeuge vertreten. Fahrwerkseitig ist eines mit Luftfedern bzw. eines mit semi-adaptiven Dämpfern ausgerüstet. Da die Fahrdynamikmanöver zum Teil bis zur Querkraft-

schlußgrenze reichen und die Reifen im Allgemeinen über die Versuchsdauer unter Verschleiß leiden, wird eine feste chronologische Manöverreihenfolge eingehalten. Darüber hinaus kommt ein zweiter Reifensatz pro Fahrzeug aus derselben Produktionscharge und -woche für die subjektive Bewertung zum Einsatz. Beide Sätze werden einer definierten Einfahrprozedur einer Länge von ca. 150 km unterzogen. Davon werden zwei Drittel mit 150 und ein Drittel mit 200 km/h gefahren, je zur Hälfte in Geradeausfahrt und Normalfahrbereich-Spurwechseln.

Die zehn Pkw werden sodann in den Fahrmanövern, die in Kap. 2.1.5 eingeführt sind, vermessen. Zusätzlich zu 100 km/h wird der Weave-Test mit 50 und 150 km/h gefahren. Im Falle des Lenkwinkelsprungs werden zwei Versuchsvariationen implementiert: neben einer mindestens zu erreichenden Lenkgeschwindigkeit von $50 + a_y \text{ [m/s}^2] \times 50$ (z.B. bei einem Sprung auf stationäre 4 m/s^2 : $> 250 \text{ }^\circ/\text{s}$) im konventionellen Lenkwinkelsprung besteht der zweite Typ aus einer Rampe von $100 \pm 20 \text{ }^\circ/\text{s}$ für die „langsame“ Eingabe. Diese Lenkgeschwindigkeit entspricht vielmehr realen Einlenkgeschwindigkeiten in eine Kurve. Mit Hilfe der in Kap. 2.4.2 vorgestellten Fahrdynamikmeßtechnik werden während den Manöverdurchführungen die Pkw-Bewegungsgrößen und Lenkkanäle, die aus Gründen der Meßdatenbesetzung mehrmals zu wiederholen sind, erfaßt.

4.1.2 Versuchsergebnisse und extrahierte Kenngrößen

Der Zweck der Fahrdynamikvermessungen (durchgeführt nach den Prüfvorschriften aus Kap. 2.1.5) ist die objektive Beschreibung des Fahrverhaltens im gesamten relevanten Betriebsbereich, der subjektiv anhand von, im nächsten Kap. 4.1.3 entwickelten, Kriterien abgefragt wird. Im Folgenden wird die objektive Varianz der Versuchsfahrzeuge A bis J in den Manövern mit Hilfe exemplarischer Diagramme (falls aus Übersichtlichkeitsgründen Fahrzeuge nicht abgebildet sind, so sind mindestens die Versuchsextreme enthalten) aufgezeigt und die extrahierten Kenngrößen eingeführt. Die Vorstellung der Ergebnisse ist beginnend mit den Prüfverfahren für das Parkieren und den Stadtverkehr über das stationäre Gesamtfahrzeugverhalten bis zu den On- und Off-Centre und dynamischen Manövern strukturiert.

Wird im Stand von Anschlag zu Anschlag gelenkt, resultieren, wie in Abb. 4.1 illustriert, charakteristische Parkierkennlinien. Die Verläufe deuten auf die Fahrzeuge hin, die mit fahrgeschwindigkeitsabhängigen Lenkunterstützungen ausgerüstet sind (B, D (HPS) und G (EPS)), denn sie weisen relativ geringe Lenkmomente im Stand auf. Die Fahrzeuge C (HPS) und I (EHPS) dagegen verfügen wahrscheinlich über Standardlenkungen ohne fahrgeschwindigkeitsabhängig steuerbares Lenkventil. Finalen Aufschluß über diese Frage gibt das Manöver

Lenkungszuziehen, welches das Lenkmoment in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit analysiert. Zudem geben die Parkierkennlinien einen Anhaltspunkt über die Lenkübersetzung, die in I mutmaßlich direkt ausgelegt ist. Alternativ ist der relativ kleinere Lenkwinkelbereich mit verhältnismäßig geringen maximalen Radwinkeln zu erklären, die durch die Achskinematik und Radhäuser begrenzt sind. Für die Parkiermessungen resultieren folgende Kenngrößen:

- die Anzahl der Lenkradumdrehungen von Anschlag zu Anschlag¹⁷⁴ sowie
- das Lenkmoment beim Parkieren (das sog. Parkiermoment), siehe Abb. 4.1.

Die Kenngröße *Parkiermoment* ergibt sich aus der Mittelung des Lenkmoments für das Hin- und Rücklenken über einen Lenkradwinkelbereich zwischen $\pm 90^\circ$. Die Lenkradwinkelsumme zwischen den Anschlägen dividiert durch 360° führt zur Anzahl der Lenkradumdrehungen und folgt aus der Lenkübersetzung bzw. den maximalen Radwinkeln.

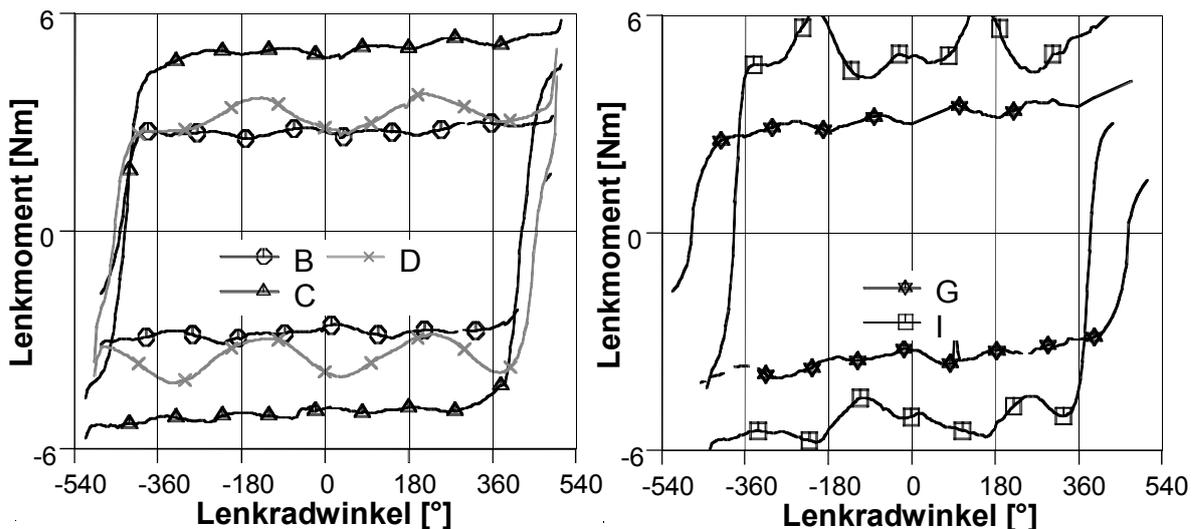


Abb. 4.1: Exemplarische Parkiermessungsergebnisse, Verlauf des Lenkmoments über dem Lenkradwinkel; Fahrzeuge B-D der gehobenen Mittelklasse (links), Kompaktvans G, I (rechts).

Insbesondere die Fahrzeuge D und I zeigen das Phänomen der sog. „Welligkeit“, also Lenkmomentschwankungen aus der Ungleichförmigkeit der Kardange-

¹⁷⁴ Kenngröße „Anzahl Lenkradumdrehungen von Anschlag zu Anschlag“ = (engl.) Turn-lock-to-lock.

lenke im Primär lenkstrang. Ist das Lenkmoment zu wellig, wird es als störend empfunden¹⁷⁵.

Das Manöver Lenkungsrücklauf liefert über die verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten Kenngrößen in Abhängigkeit der Querschleunigung. Nach Durchfahren der Halbkreisgasse und Loslassen des Lenkrads klingt der Lenkwinkel durch die Rückstellung asymptotisch gegen einen bestimmten Restlenkwinkel ab. Dieses Verhalten kann auch ausgedrückt werden durch das Verhältnis aus dem anliegenden Lenkradwinkel nach einer definierten Zeitdauer (vergleiche Abb. 4.2, hier z.B. nach 1s) und Ausgangswinkel aus der stationären Kurvenfahrt. Der

- *normierte Restlenkwinkel* und
- *die stationären Lenkmomentwerte*

werden für diskrete Querschleunigungen, z.B. 1 und 4 m/s², angegeben und decken so die Spanne unterschiedlicher Abbiegevorgänge ab.

Die Differenzierungen der Fahrzeuge im Lenkungsrücklauf ergeben sich durch die konstruktive Ausführung des Nachlaufs, der Gewichtsrückstellung und Achs- bzw. Lenkungsreibung und -dämpfung.

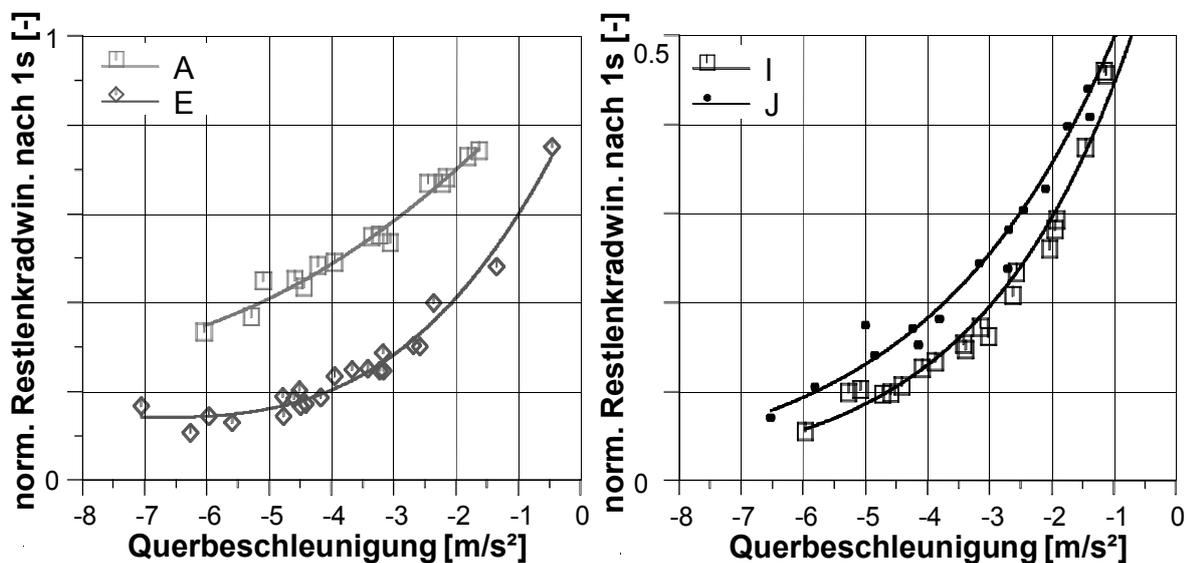


Abb. 4.2: Der Lenkungsrücklauf: in Bezug auf den Anfangslenkwinkel verbleibender Restlenkwinkel nach 1s über der Querschleunigung (Extreme des Versuchs).

Das Basismanöver der Kreisfahrt lässt eine Betrachtung der Größen Lenkwinkel, siehe Abb. 4.3, Schwimmwinkel und Wankwinkel über der Querschleunigung

¹⁷⁵ Balletshofer 1996

nigung stellvertretend für eine stationäre Kurvenfahrt zu. Klassischerweise werden Steigungen durch lineare Regression der drei Größen in bestimmten Abschnitten gebildet:

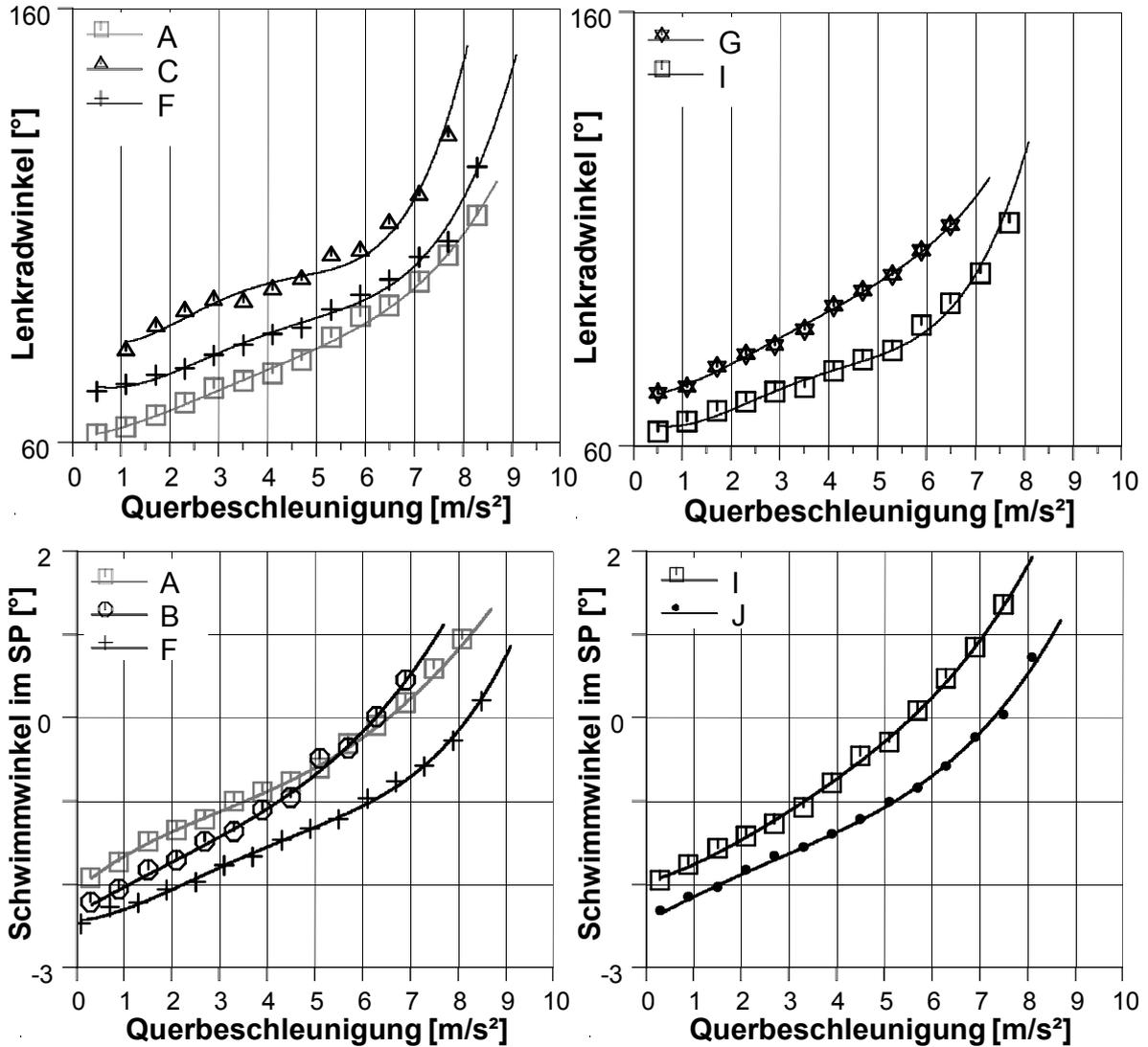


Abb. 4.3: Exemplarische Lenkrad- (oben) und Schwimmwinkelverläufe (unten) über der Querbeschleunigung im Linkskreis der Stationären Kreisfahrt.

- die *Gradienten zwischen 1 und 4 m/s²* im Normalfahrbereich und darüber hinaus im nichtlinearen Bereich für
 - den *Lenkradwinkel- und Eigenlenkgradient* um 6 m/s^2 bzw.
 - für den *Schwimmwinkel* um 7 m/s^2 .
 - *Lenkradwinkelbeträge*

werden zudem für diskrete Querbeschleunigungen extrahiert.

Daneben werden

- die *Mittenlenkübersetzung* und
- der *Ackermannwinkel*

aufgezeichnet. In Abb. 4.3 ist letzterer als Schnittpunkt des extrapolierten Kurvenverlaufs mit der Lenkradwinkelordinate zwischen ca. 59 und 79° zu entnehmen. Die Fahrzeuge A und G bilden in der Größe *Lenkradwinkelgradient bei 6 m/s²* die Extrema. Die *Eigenlenkgradienten* errechnen sich jeweils nach Norm¹⁷⁶ mit dem festen, konstanten Wert der *Mittenlenkübersetzung* und genauer als Funktion der Lenkübersetzung über dem Lenkwinkel. Weiterhin wird die unterschiedliche

- *maximal erreichte Quereschleunigung*

deutlich (vergleiche z.B. Fahrzeuge C und F), für die in erster Linie die Reifeneigenschaften verantwortlich sind.

Die *Gierverstärkungen* der Fahrzeuge, d.h. die Quotienten aus Gierreaktion und Lenkradwinkel, spreizen über der Fahrgeschwindigkeit unterschiedlich auf, siehe Abb. 4.4. Die Anfangssteigung der Kurven ist hierbei reziprok proportional zum Radstand. Die Gierreaktion ist eine Funktion der Lenkübersetzung im betreffenden Lenkradwinkelbereich: je direkter die Übersetzung, desto größer die Gierreaktion.

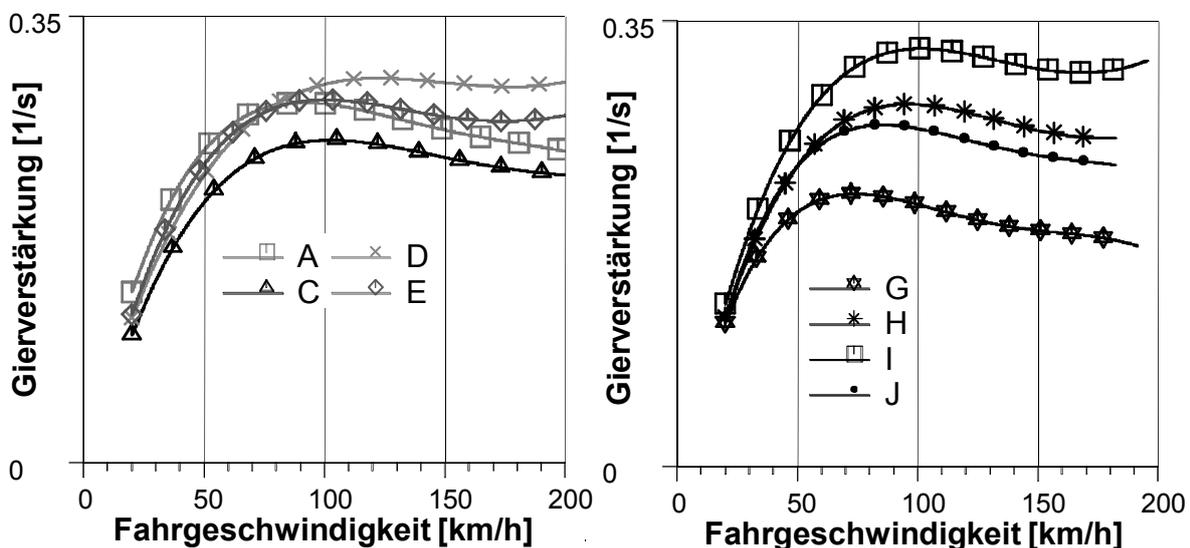


Abb. 4.4: Exemplarische Gierverstärkungsverläufe der Fahrzeuge (links Mittelklasse, rechts Kompaktvans) über der Fahrgeschwindigkeit.

¹⁷⁶ Norm ISO 4138

Die charakteristische Geschwindigkeit¹⁷⁷ ist abhängig vom Eigenlenkgradienten: je tendenziell übersteuernder, desto höher die Geschwindigkeit. Die untersuchten Fahrzeuge bewegen sich in einem maximalen Band zwischen 0,21 und 0,33 1/s. Danach sinkt die Gierreaktion, bevor sie wiederum bei manchen Fahrzeugen (E, I) zu höheren Fahrgeschwindigkeiten hin ansteigt. Dies wirkt sich negativ auf die Beherrschbarkeit bei sehr hohen Geschwindigkeiten aus.

Als objektive Kenngrößen für das Gierverhalten dienen

- die *diskreten Gierverstärkungswerte* bei Geschwindigkeiten zwischen 30 und 150 km/h,
- die *maximale Gierverstärkung*,
- die *charakteristische Geschwindigkeit* und
- die *Verhältnisse zwischen der maximalen Gierverstärkung und dem Wert bei 50 km/h bzw. 150 km/h.*

Diese Kenngrößen beschreiben die Verlaufssteigungen bzw. -abnahmen hin zu und weg von der *maximalen Gierverstärkung*.

Der Übersichtlichkeit willen sind in den Diagrammen der Weave Test-Ergebnisse (Abb. 4.5) nur Hystereseschleifen jeweils zweier Fahrzeuge illustriert. Die Darstellung der Hystereseschleifen ist in den Umkehrpunkten aus Auswertegründen, um die beiden Hystereseäste voneinander trennen zu können, nicht geschlossen. Aufgetragen ist das Lenkmoment über dem Lenkradwinkel und der Querschleunigung bzw. die Giergeschwindigkeit über dem Lenkradwinkel. Zusätzlich werden in der Auswertung die übrigen Kombinationen aus diesen Größen berücksichtigt. Als Maß für die Hysteresehöhe und -breite dienen Kenngrößen

- der *Ordinaten und Abszissenabschnitte*.

Der Ordinatenabschnitt im Diagramm Lenkmoment über Lenkradwinkel wird als *Reibungsmaß* sowie der Abszissenabschnitt als *Restwinkel* bezeichnet. In den übrigen Kombinationen lauten die Achsenabschnitt-Kenngrößen Rest-„Größe“, demzufolge z.B. im Diagramm Lenkmoment vs. Giergeschwindigkeit: *Rest-Giergeschwindigkeit* und *Rest-Lenkmoment*. Die Neigung der Hysterese wird beschrieben durch

- die mittige, *maximale Steigung um 0° Lenkwinkel* bzw. *0 m/s² Querschleunigung* der Hystereseschleifen und

¹⁷⁷ Das Maximum der Gierverstärkungskennlinie liegt bei der *charakteristischen Geschwindigkeit*.

- die außermittigen *Gradienten*, die zwischen 8° bzw. 1 m/s^2 und dem *maximalen Wert* der betreffenden Größe ermittelt werden.

Maße für die Linearität der Verläufe sind

- die *Quotienten aus diesen mittigen und außermittigen Steigungen*.

So ist das Verhältnis aus den Lenkmomentsteigungen in Bezug auf den Lenkwinkel, z.B. das sog. *Lenkungssteifigkeitsverhältnis*, charakteristisch für den Übergang von voll-manuellem zu unterstütztem Lenken¹⁷⁸.

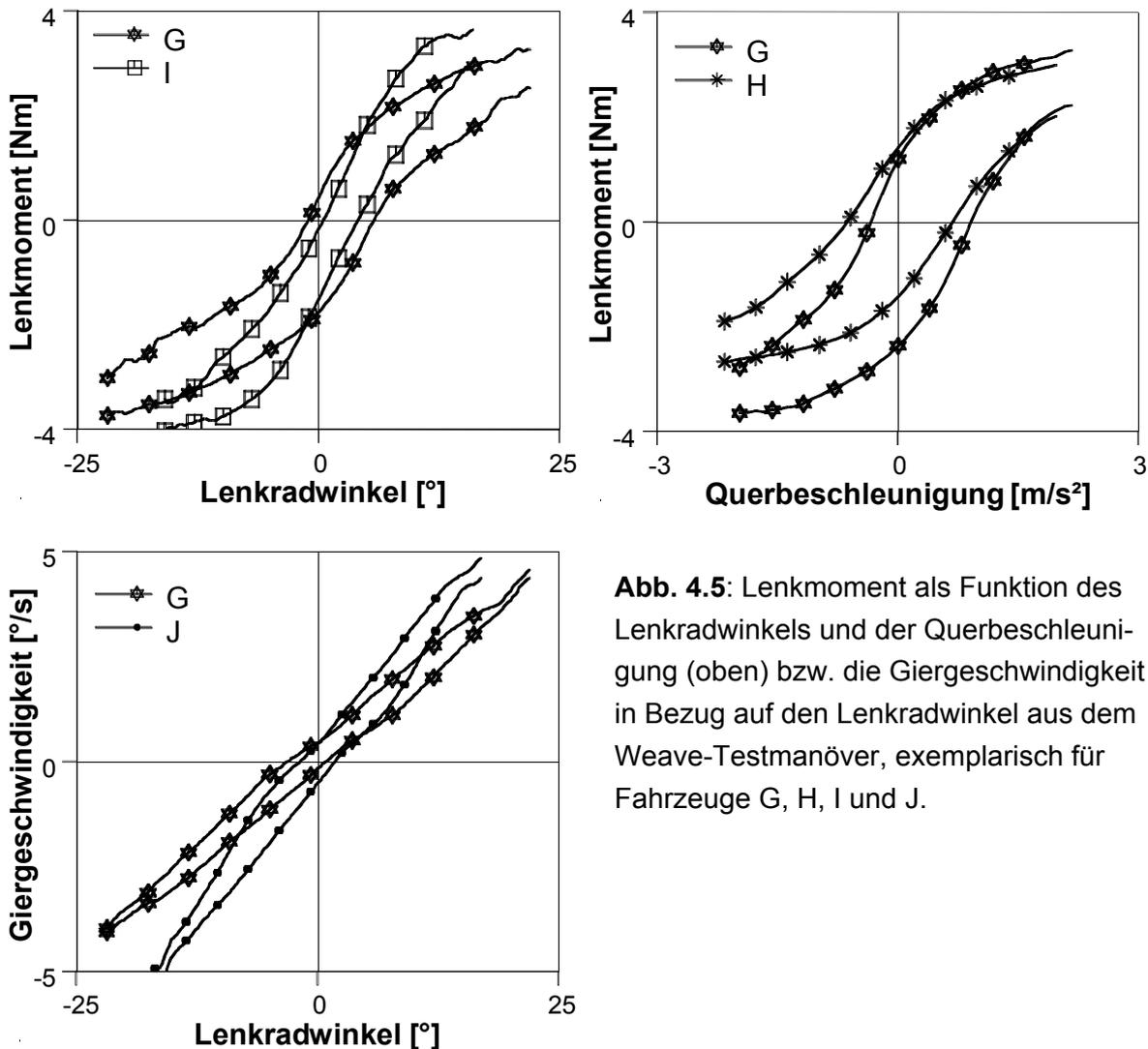


Abb. 4.5: Lenkmoment als Funktion des Lenkradwinkels und der Querbeschleunigung (oben) bzw. die Giergeschwindigkeit in Bezug auf den Lenkradwinkel aus dem Weave-Testmanöver, exemplarisch für Fahrzeuge G, H, I und J.

Der Mittengradient aus dem Zusammenhang zwischen Lenkmoment/ Giergeschwindigkeit/ Querbeschleunigung und Lenkradwinkel heißt *Lenkungssteifigkeit/ Lenkungsansprechen/ Lenkempfindlichkeit* bzw. zwischen Lenkmoment und

¹⁷⁸ Salaani et al. 2004

Querbeschleunigung *Lenkmomentgradient*. Die außermittig bestimmten Gradienten werden im Weiteren mit den Vorsilben „Weiterlenk“, so z.B. *Weiterlenksteifigkeit* bezeichnet (Gradient ermittelt zwischen dem Lenkmoment bei 8° Lenkwinkel und Maximalmoment).

Die *Gierverstärkung* wird, wie bereits in Kap. 2.1.5 beschrieben, im Betriebsraum bis 4 m/s² gemessen. Das *Lenkungsansprechen* als Mittensteigung der Gierrate in Bezug auf den Lenkradwinkel stellt im Bereich bis 2 m/s² ebenfalls eine Gierverstärkung dar. Die Differenz beider Amplitudenverstärkungen

■ *Gierverstärkung bei 100 km/h – Lenkungsansprechen*

repräsentiert also die Linearität der Gierreaktion gegenüber der Querbewegung. Um das Lenkmoment-Niveau der Hysterese ausdrücken zu können, werden zuletzt als Kenngrößen

■ die bei $\pm 0,5$ m/s² gemittelten *Lenkmomentbeträge*

extrahiert.

Die Hystereseschleifen der Weave-Ergebnisplots entstehen aus den Zeitverzügen zwischen den einzelnen Fahrzeuggrößen, vergleiche Abb. 4.6 am Beispiel des Lenkradwinkels und Lenkmoments. Das Lenkmoment eilt hierbei dem Lenkradwinkel vor, der von der Giergeschwindigkeit, Querbewegung, dem Schwimmwinkel und Wankwinkel gefolgt wird.

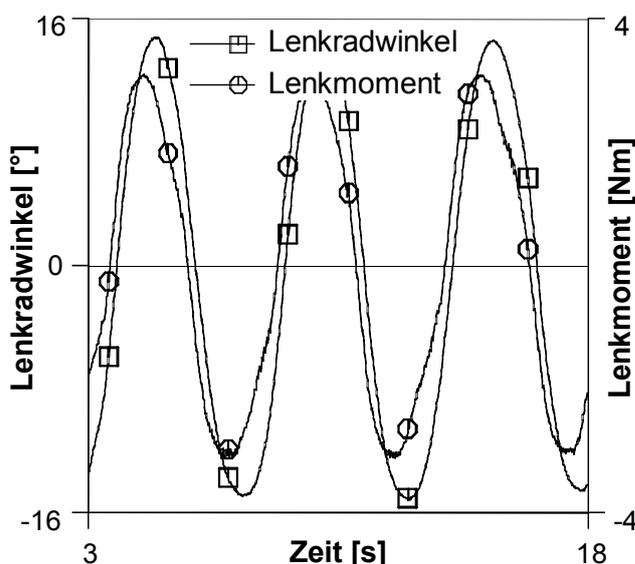


Abb. 4.6: Ein Zeitausschnitt des Lenkmoment- und -winkelsignals einer Messung für Fahrzeug A im Weave Test.

Als Kenngrößen zur Analyse dieses Verhaltens können so auch

- die *Phasenverzugwinkel* zwischen den Signalen genutzt werden, z.B. *Phasenverzug Lenkmoment – Wankwinkel*.

Ergänzend dazu werden

- die *Amplitudenverstärkungen* in Abhängigkeit des Lenkwinkels errechnet, so z.B. die *Wankwinkelverstärkung*.

Bei Approximation des Lenkmoments mit einer reinen Sinuswelle zur FFT-Analyse ist zu beachten, daß im Umkehrpunkt eine sprunghafte Abnahme der Amplitude aufgrund der Systemreibung stattfindet, vergleiche Abb. 4.6.

Die Lenkungsziehen-Messungen ergeben die Lenkmomentverläufe über der Querbeschleunigung für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten, siehe Abb. 4.7, und dem Lenkradwinkel (Abb. 4.8 (oben)).

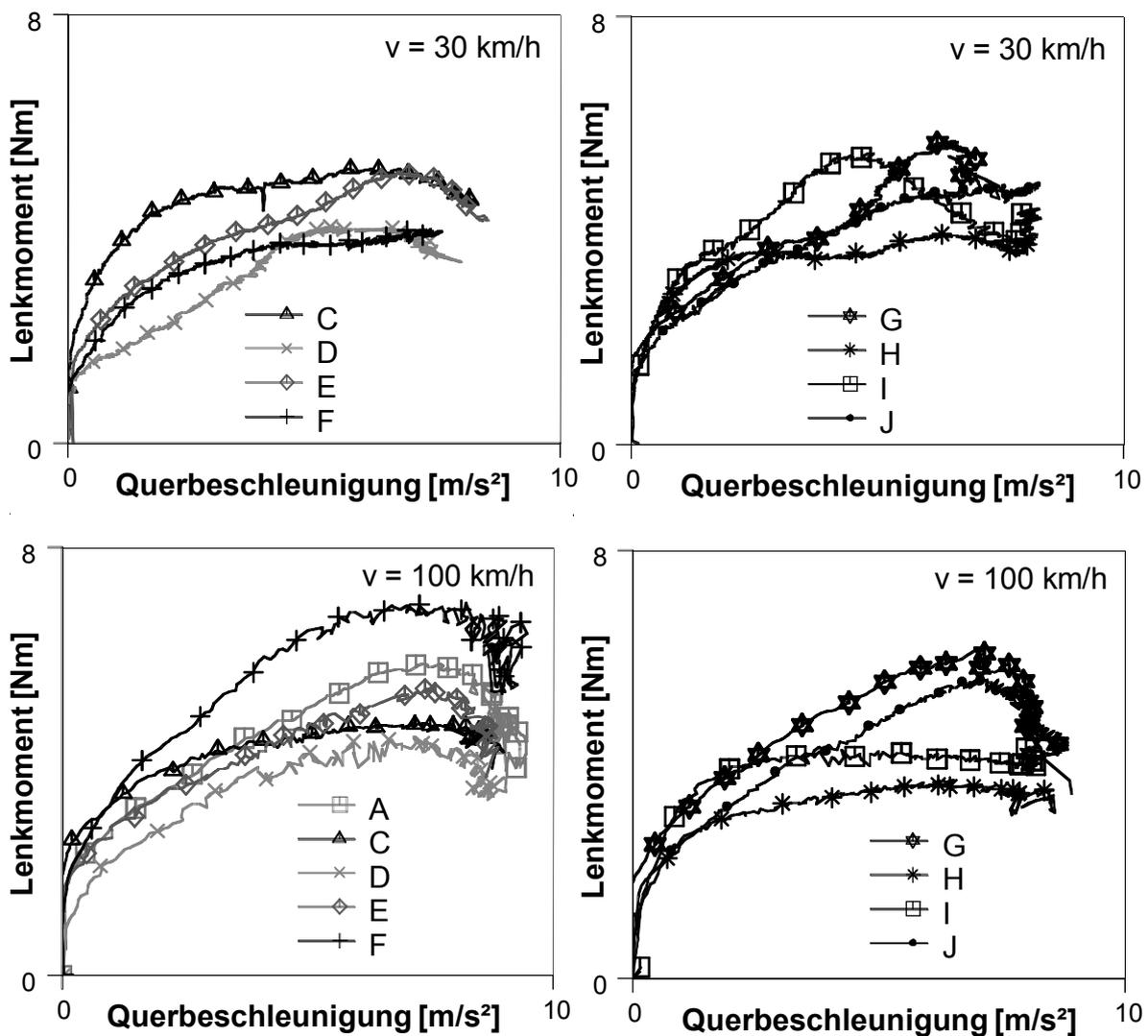


Abb. 4.7: Das Lenkmoment über der Querbeschleunigung für $v = 30$ km/h (oben) und 100 km/h (unten), aus Lenkungsziehen.

Die Kurven zeigen ähnliche charakteristische Verläufe, wobei das Rückstellmoment mit steigender Querbeschleunigung bzw. wachsendem Lenkradwinkel durch das Unterstützungsmoment degressiv bis zu einem Hochpunkt ansteigt. Im weiteren Verlauf fällt es bis zur Kraftschlußgrenze, da das Reifenrückstellmoment abnimmt. Die einzelnen Teilbereiche der Diagramme werden in Abhängigkeit der Querbeschleunigung als On-Centre- oder Mittenbereich ($0..1 \text{ m/s}^2$), Off-Centre-, Proportional- oder Weiterlenkbereich ($1..5 \text{ m/s}^2$), Übergangsbereich ($5..8 \text{ m/s}^2$) und Grenzbereich (Querbeschleunigung beim Maximalmoment bis zur Maximalquerbeschleunigung) bezeichnet. Die Diagramme aus Abb. 4.7 für die beiden Fahrgeschwindigkeitsstufen im Kontrast zueinander unterstreichen den Unterschied zwischen Standardlenkungen wie in Fahrzeug H und fahrgeschwindigkeitsabhängigen Parametrierungen, z.B. F. Die Einzelgeschwindigkeitsstufen von F sind in Abb. 4.8 (rechts unten) enthalten und zeigen auf, daß die Unterstützung in ihrer Fahrgeschwindigkeitsparametrierung ab ca. 120 km/h unveränderlich bleibt.

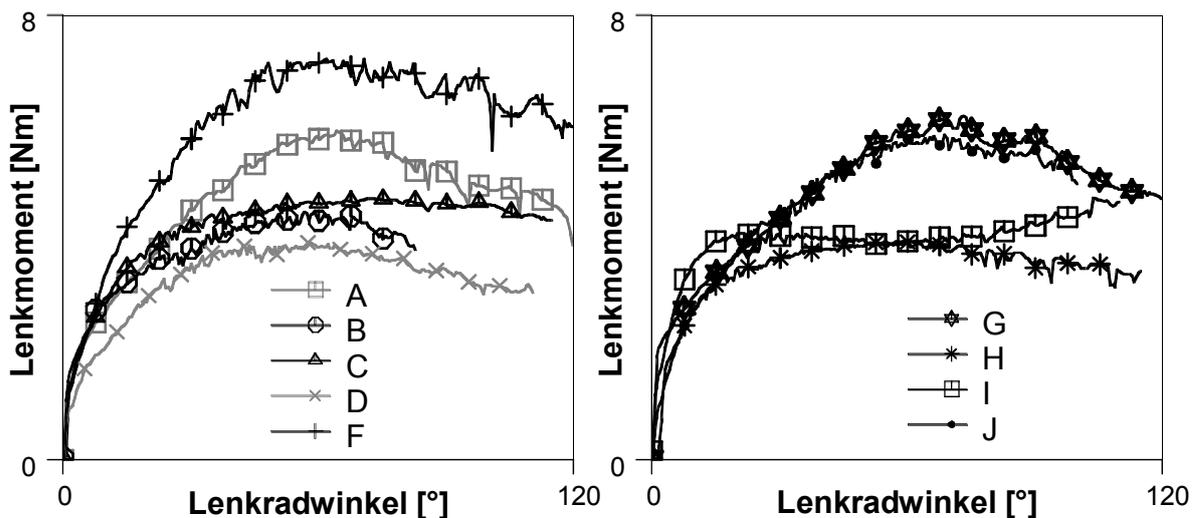
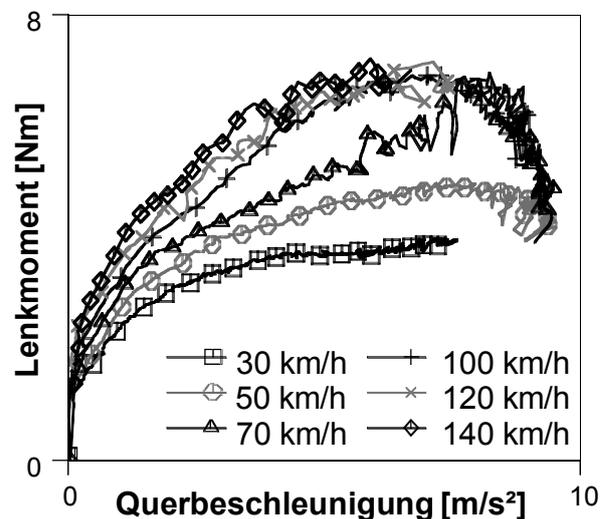


Abb. 4.8: Das Lenkmoment über dem Lenkradwinkel für $v = 100 \text{ km/h}$ (oben) und als Funktion der Querbeschleunigung für Fahrzeug F (rechts unten) sämtlicher Fahrgeschwindigkeitsstufen des Lenkungszuziehens.



Die beiden Fahrzeuge sind ebenfalls Beispiele für Grundformen der Unterstützungskennlinie; beim Vergleich der beiden Diagramme für 100 km/h weist H einen „U“-, F einen eher „V“-förmigen Verlauf auf. Bei Standardlenkungen ist zudem das Maximum im Lenkungsziehen ähnlich groß wie das Parkiermoment. Marginale Niveauunterschiede im Lenkmomentverlauf der Fahrzeuge mit Standardlenkung resultieren aus dem überstrichenen Lenkwinkel- und damit Lenkungswelligkeitsbereich. Eine negative Besonderheit hinsichtlich der Lenkmomentwelligkeit präsentiert Fahrzeug I insbesondere bei 30 km/h, siehe Abb. 4.7: nach anfänglich degressivem Anstieg erhöht sich das Lenkmoment progressiv bis zum Maximum, da die Lenkübersetzung direkter wird, d.h. der Lenkübersetzungsverlauf sich in einem Wellental bewegt, und die Unterstützung zur Kompensation nicht ausreicht. Nach dem Hochpunkt wird die Übersetzung wieder indirekter (Wellenberg) und das Lenkmoment fällt.

Als Kenngrößen zur objektiven Ausformulierung der Verläufe bezüglich der Niveaus und Steigungen warten

- lineare Regressionen über bestimmte Abschnitte, z.B. der *Gradient zwischen 1 und 4 m/s²* oder *Gradient zwischen ±5°* und
- Lenkmomentbeträge bei verschiedenen Querbeschleunigungen/Lenkradwinkeln, z.B. *Lenkmoment (1 m/s²)* oder *Lenkmoment (10°)*, bzw.
- die Differenzen daraus, z.B. $M_H(1\text{ m/s}^2) - M_H(0,5\text{ m/s}^2)$, auf.

Da die Differenzen aus bestimmten Kenngrößen die Fahrerurteile eventuell noch besser¹⁷⁹ erklären, werden die, als Kenngrößen erstgenannten, Steigungen zusätzlich in

- ein Verhältnis gesetzt, z.B. *Gradient zwischen ±0,5 m/s²* geteilt durch *Gradient zwischen 1 und 4 m/s²*.

Ein Maß für die Linearität des Verlaufs ist in Anbetracht der Regressionsgeraden

- die *Fläche* zwischen diesen und der eigentlichen Lenkmomentkennlinie.

Neben

- dem Maximalmoment ($M_{H, \max}$) kann
- die anliegende Querbeschleunigung ($a_y(M_{H, \max})$) und der Lenkwinkel ($\delta_H(M_{H, \max})$) in diesem Betriebspunkt sowie

an der Kraftschlußgrenze

¹⁷⁹ Riedel / Arbinger 1997

- die maximale Querschleunigung ($a_{y, max}$) ausgelesen werden.

Ähnlich den Lenkmomentbeträgen werden

- Lenkwinkelwerte bei diskreten Querschleunigungen, z.B. δ_H (4 m/s^2), und Lenkmomenten, δ_H (1 Nm), ausgegeben.

Die Werte dieser Kenngrößen werden für alle Fahrgeschwindigkeiten gesammelt. Unter Berücksichtigung, daß das Lenkungsziehen eine Abwandlung einer Kreisfahrt mit konstanter Fahrgeschwindigkeit und veränderlichem Radius repräsentiert, können auch Gesamtfahrzeuggrößen wie

- der *Eigenlenk-, Schwimmwinkel- und Wankwinkelgradient*

errechnet werden, insbesondere für die Geschwindigkeiten oberhalb der maximal in der Stationären Kreisfahrt erreichbaren.

Aus dem Frequenzgang-Manöver lassen sich Übertragungsfunktionen zwischen dem Lenkmoment und den Gesamtfahrzeuggrößen als jeweiligem Output und dem Lenkradwinkel als Input in Amplituden- und Phasengängen darstellen. Hinsichtlich des Lenkmoments, siehe Abb. 4.9 (oben), spiegelt sich quasi-stationär die Reihenfolge im Niveau der Fahrzeuge im Betriebspunkt 80 km/h und 4 m/s^2 wider. Die Verstärkung sinkt mit fallender Querschleunigungsamplitude, vergleiche Abb. 4.9 (oben), d.h. der Seitenkraftaufbau ist weniger stark, das Lenkmomentniveau reduziert. Zusätzlich kann der Abfall des Lenkmoments in Abhängigkeit der Lenkgeschwindigkeit durch eine geregelte Pumpenfördermenge erklärt werden, wie z.B. in Fahrzeug I vorhanden. Hin zu höheren Frequenzen steigt das Lenkmoment wiederum, da Drosseleffekte sowie die Volumendehnung in den Hydraulikleitungen bzw. die Temperatur des Elektromotors steigen und so die Lenkleistung sinkt: die Lenkung „verhärtet“.

Im Phasengang, vergleiche Abb. 4.9 (unten), zeigen die Fahrzeuge G, H und I eine Verkürzung des Lenkmomentvoreilens bis ca. 1 Hz bevor primär aufgrund der Lenkungsdämpferkennlinie der Phasenwinkel wieder zunimmt. Grundsätzlich herrscht ein Zeitverzug zwischen Seitenkraftaufbau und Lenkradwinkel vor, der auch von der Gierdämpfung bzw. dem Seitenkraftaufbau an der Hinterachse abhängt. Dieser Zeitverzug wirkt sich als Hysterese im Lenkmoment aus, wobei der Erregung die Achs- und Lenkungsreibung bzw. -dämpfung und die Unterstützungskennung entgegenwirken. Außerdem gelten im Frequenzgang dieselben Randbedingungen wie im Weave, wo ein systematischer Auswertefehler durch die Sinus-Annäherung des Lenkmomentsignals entsteht. Dieser kann umgangen werden, indem die Lenkmomenthysterese für bestimmte Frequenzbereiche, z.B. 0,25..0,5 Hz, direkt über dem Lenkwinkel aufgetragen und in Anlehnung an die Weave-Kenngrößen bewertet wird.

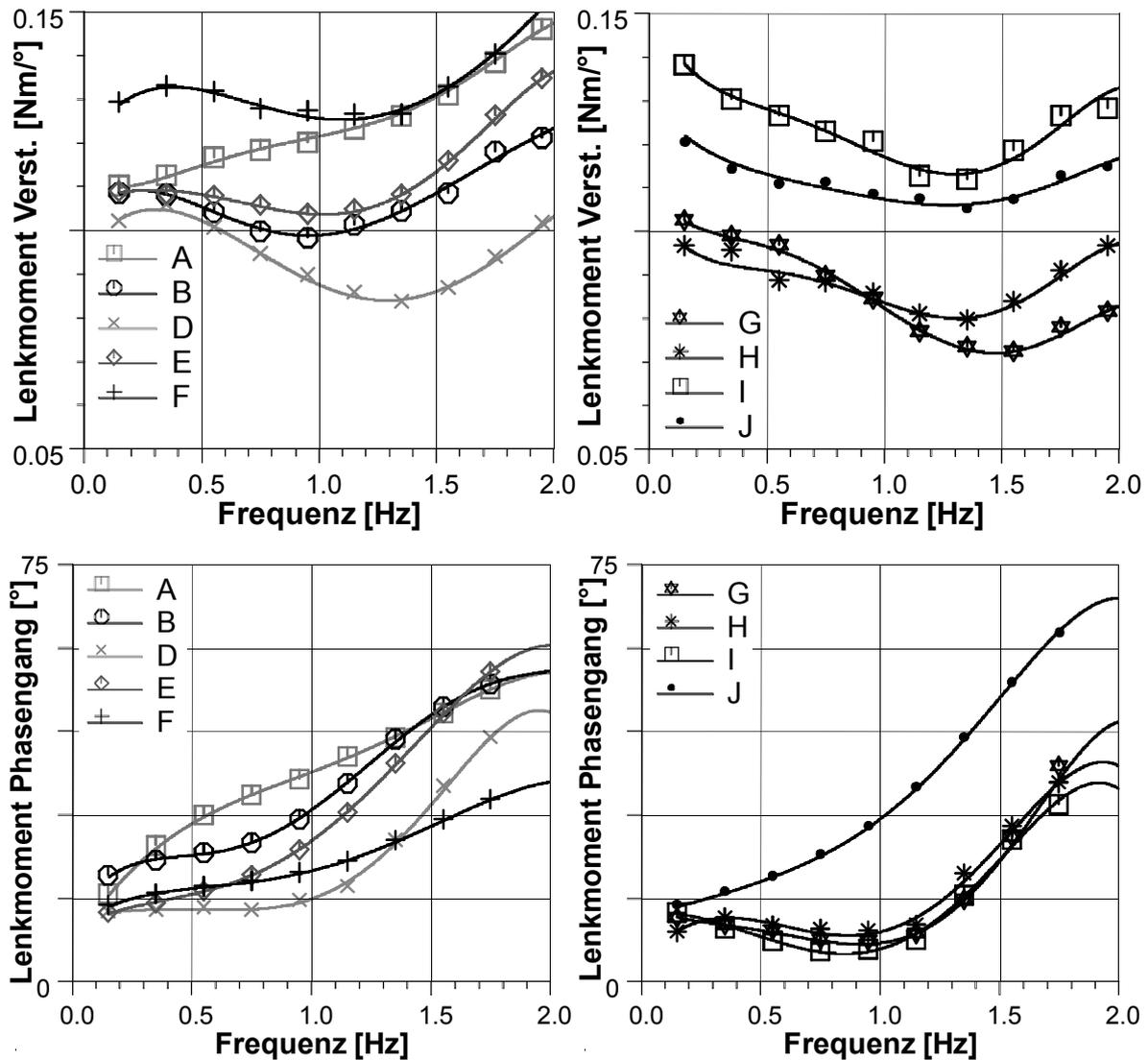


Abb. 4.9: Amplituden- (Lenkmomentverstärkungsfaktor) und Phasengang der Übertragungsfunktion von Lenkradwinkel zu Lenkmoment aus ISO-Frequenzgang.

Ausgehend vom quasi-stationären Wert steigt der Giergeschwindigkeitsverstärkungsfaktor bis zur Gierresonanzfrequenz in Abhängigkeit des Eigenlenkverhaltens unterschiedlich stark, siehe Abb. 4.10. Der Phasenverzug zum Lenkradwinkel wächst mit steigender Frequenz. Gemein ist den Kenngrößen der Übertragungsfunktionen, daß

- die Verstärkungen und Phasen bei diskreten Frequenzen ausgelesen werden, so z.B. $M_H / \delta_H (0,4 \text{ Hz})$, und
- die Differenzen zwischen diesen als Maß für die Steigungen der Verläufe gebildet werden, so z.B. $M_H / \delta_H (0,2 \text{ Hz}) - M_H / \delta_H (0,6 \text{ Hz})$,

wobei die Frequenzstützstellen bis max. 1,5 Hz als „Ergonomische Grenze“ der Lenkradbewegung von Interesse sind¹⁸⁰.

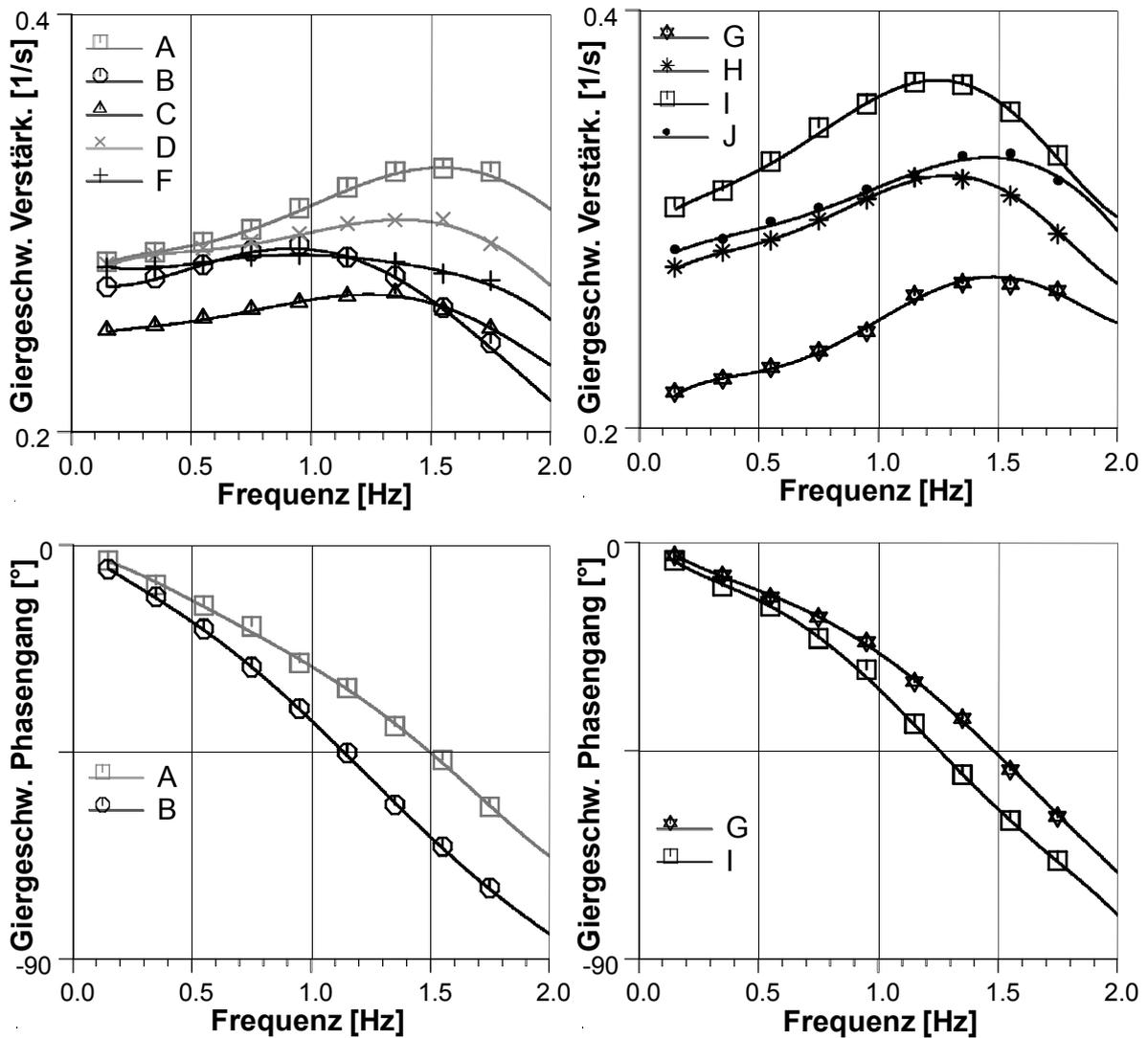


Abb. 4.10: Giergeschwindigkeitsübertragungsfunktionen, Amplituden- (Verstärkungsfaktor, oben) und Phasengang (unten) aus ISO-Frequenzgang.

Die Verstärkungskurven der Querschleunigungen fallen ab einer Frequenz von ca. 0,5 bis 0,7 Hz ab, siehe Abb. 4.11, und erfüllen somit nicht die Auslegungsempfehlung, daß die Amplitude aus Sicherheits- und Berechenbarkeitsgründen für den Fahrzeugführer bis ungefähr 1 Hz bei Ausweichmanöver konstant bleiben müsse¹⁸¹; gleichwohl werden die Reaktionen hier stumpfer.

¹⁸⁰ Mitschke / Wallentowitz 2004

¹⁸¹ Zomotor 1991

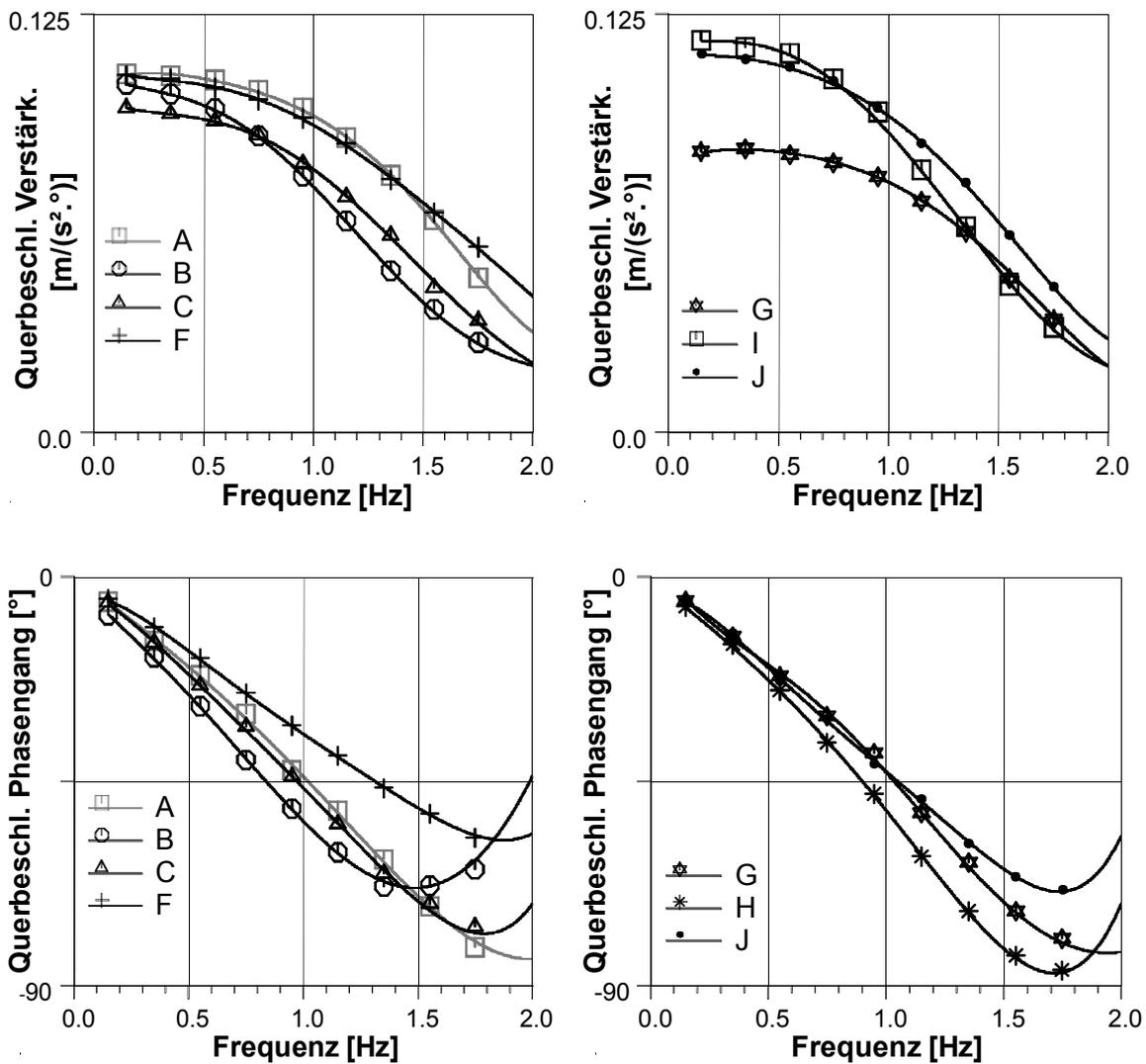


Abb. 4.11: Übertragungsfunktion der Querbeschleunigung zum Lenkradwinkel aus ISO-Frequenzgang, Amplituden- (Verstärkungsfaktor, oben) und Phasengang (unten).

Der Querbeschleunigungsphasenverzug verkürzt sich ab einer Frequenz von ca. 1,5 Hz, weil der Anteil aus dem Wankverhalten zum Tragen kommt; vergleiche Phasengang des Wankwinkels (Abb. 4.12 (unten)). Dies ist begründet in einer veränderten Bewegungsform, die bei höheren Frequenzen vielmehr Rollen als Wanken entspricht. Die momentane Drehachse der Wankbewegung verschiebt sich mit zunehmender Frequenz nach oben, was dazu führt, daß die „Kippbewegung“ (Wanken) zu einem Drehen (Rollen) wird. Hinzu kommt, daß die Bewegungsgrößen zwar inertial und horizontal gemessen werden, jedoch die Querbeschleunigung noch immer einen Wankanteil enthält. Mit steigender Frequenz nimmt die Wankbeschleunigung zu, der Wankwinkel vergrößert sich jedoch nicht weiter.

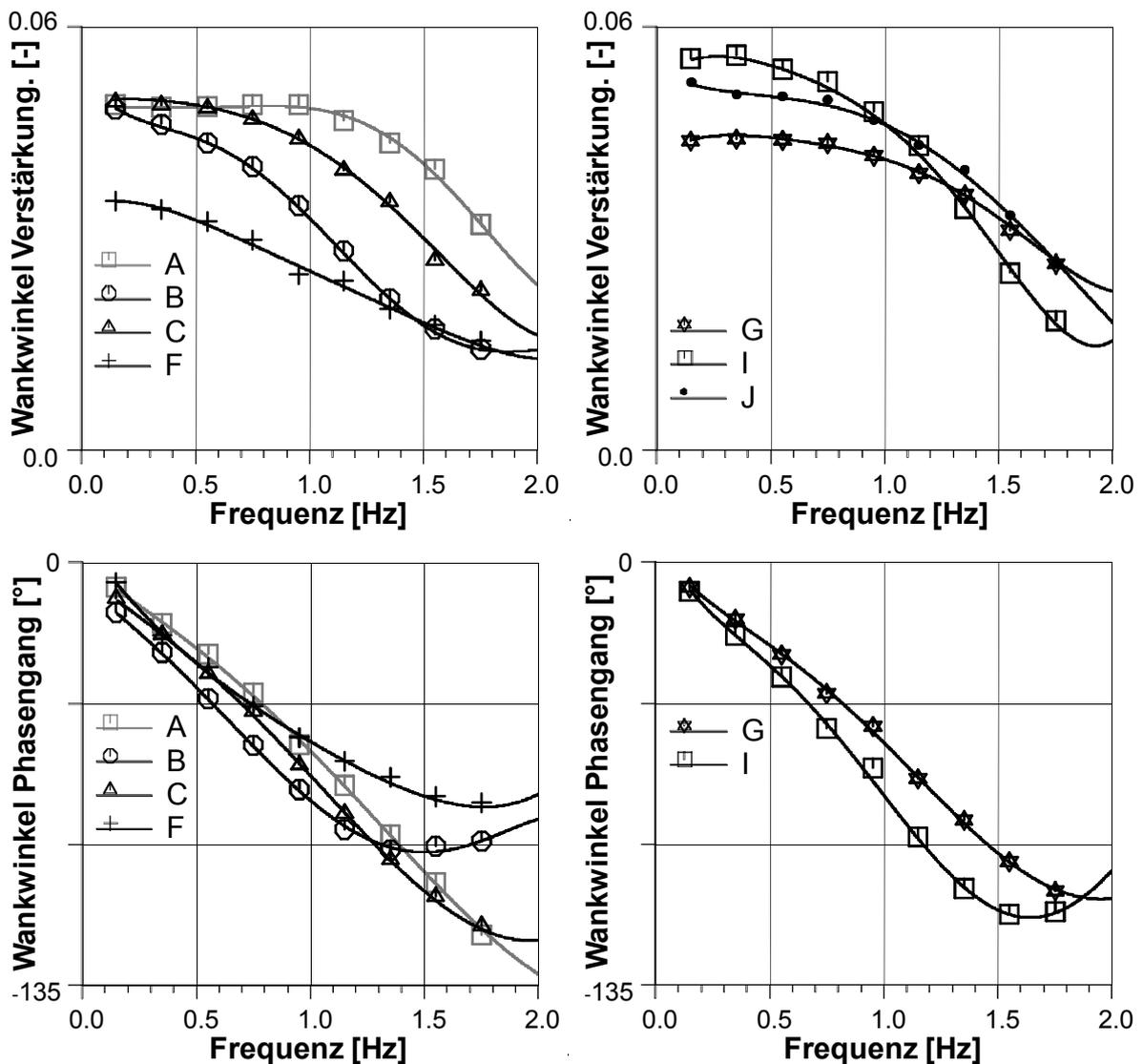


Abb. 4.12: Übertragungsfunktion des Wankwinkels zum Lenkradwinkel aus ISO-Frequenzgang, Amplituden- (Verstärkungsfaktor, oben) und Phasengang (unten).

Unter den Wankverstärkungen, vergleiche Abb. 4.12. (oben), die hier auf Anregung von Schalz et al.¹⁸² ausgewertet werden, sind die Verläufe der Fahrzeuge B und F hervorzuheben, die im ersten Falle über ein geregeltes Luftfederfahrwerk und im letzteren über eine sportlich-straftige gleich- und wechselseitige Feder- und Dämpferabstimmung verfügen. Für die Schwimmwinkel-, deren Kennlinien nicht illustriert sind, und Wankwinkelverstärkungen wird ferner der Querbeschleunigungskanal als Eingang für die Übertragungsfunktionen genutzt und mit denselben objektiven Kenngrößentypen analysiert.

¹⁸² Schalz et al. 2002

Auch bei den beiden Lenkwinkelsprungdurchführungsarten, „langsam“ und „schnell“, werden nicht nur die Aspekte Gieren und Querbeschleunigen geprüft, sondern auch Wanken, Schwimmen und Lenkmoment. Abb. 4.13 zeigt typische Zeitverläufe der Eingabe und Antwortgrößen (links), sowie die Differenzen zwischen Anfangs- und Endwerten in Abhängigkeit der gesprungenen Querbeschleunigungen (rechts, am Beispiel des Fahrzeugs H). Nach der instationären Sprungeingabe stellt sich ein stationärer Zustand ein, der in seinen Kennwerten mit dem Ausgangszustand durch

- Wertedifferenzen, z.B. *Differenzgiergeschwindigkeit* (4 m/s^2), siehe Abb. 4.13 (rechts), und
- Verstärkungsfaktoren, z.B. *Giergeschwindigkeit/Lenkwinkel* (2 m/s^2),

verglichen werden kann. Für die jeweiligen Kenngrößen werden durch die Ergebnisdatenpunkte Regressionskurven gelegt, um die Kennwerte bei 2, 3, 4 und 7 m/s^2 extrahieren zu können.

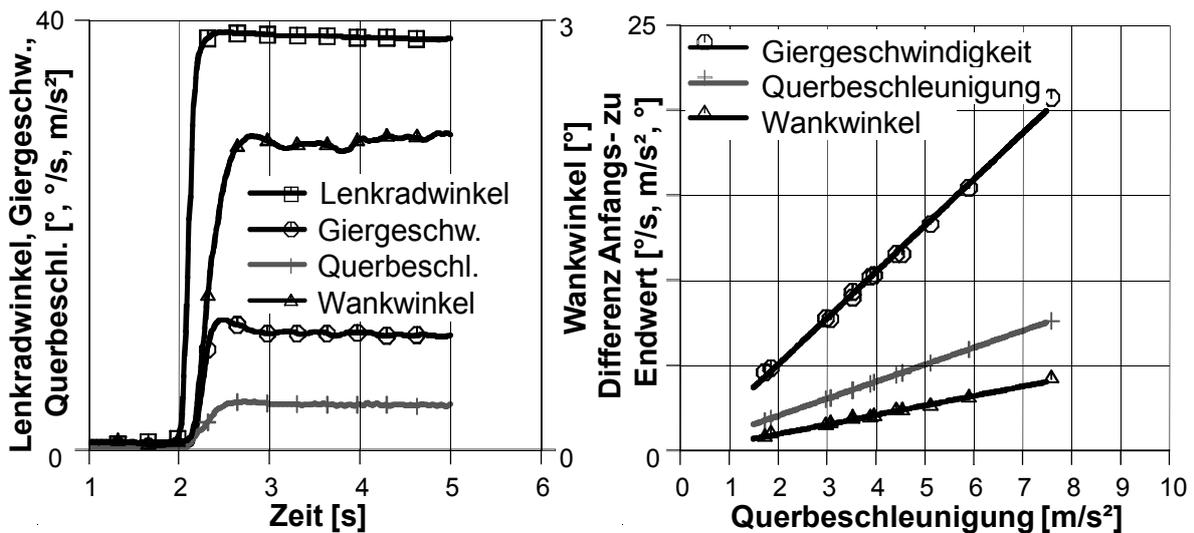


Abb. 4.13: Zeitverläufe von Lenkradwinkelsprungeingabe und Antwortgrößen (links) und Größen-Differenzen zwischen den entsprechenden Werten vor und nach der Sprungeingabe auf verschiedene Querbeschleunigungen (rechts, z.B. beträgt die Differenz in der Giergeschwindigkeit zwischen dem Zustand vor und nach der Sprungeingabe bei 2 m/s^2 $5 \text{ }^\circ/\text{s}$).

Als Referenz für die Auswertung dient der Zeitpunkt in der aufsteigenden Flanke des Lenkwinkels, zu dem 50% des stationären Wertes erreicht sind¹⁸³. Die

¹⁸³ Norm ISO 7401

Zeitdauer bis zum ersten Maximum der jeweiligen Größe bzw. bis zum Erreichen des 90%-Wertes der Größe wird als

- die Peak Response Time, z.B. *Wankwinkel Peak Response Time* (4 m/s^2), und
- die Response Time, z.B. *Querbeschleunigung Response Time* (4 m/s^2), bezeichnet.

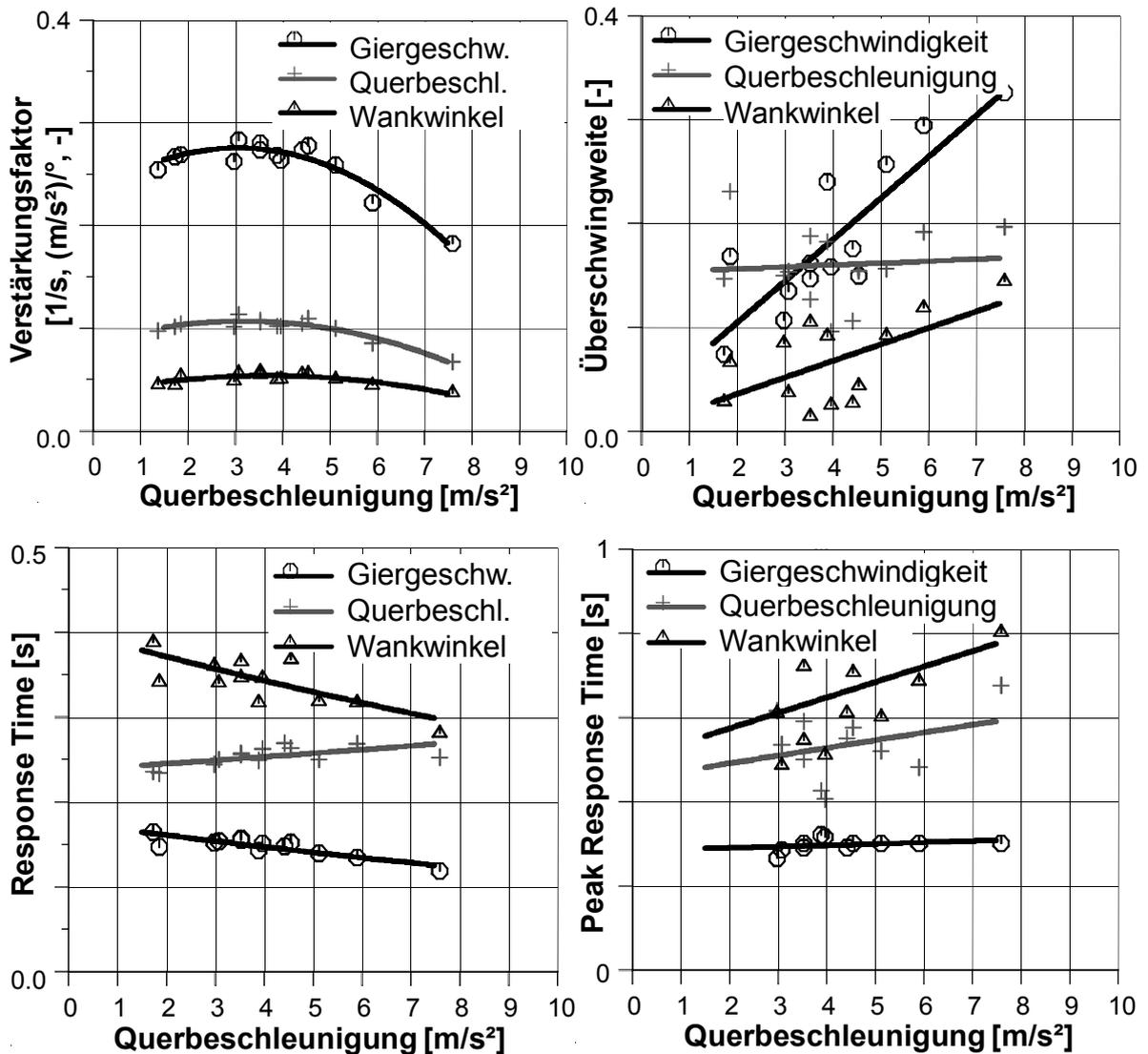


Abb. 4.14: Verstärkungsfaktoren, Überschwingweiten und Ansprechzeiten für Fahrzeug H aus dem „schnellen“ Lenkwinkelsprung.

Das Verhältnis aus erstem Hochpunkt und stationärem Endwert gibt die

- Überschwingweite, z.B. *Wankwinkel Überschwingweite* (4 m/s^2),

an, die objektiv in allen Größen stark streut. Insbesondere die Wankgrößen streuen auch in den Ansprechzeiten (Abb. 4.14), so daß diese Kennwerte für eine Analyse wenig verlässlich sind. Abschließend werden für die beiden Sprungarten und die verschiedenen Querbeschleunigungen die

- TB-Werte, z.B. $TB (2 m/s^2)$,

d.h. die Produkte aus der *Giergeschwindigkeit Peak Response Time* und der *Schwimmwinkeldifferenz* ermittelt.

Aufgrund der Tatsache, daß einige Fahrdynamikmanöver in mehreren Lenk-/Geschwindigkeits- und Querbeschleunigungsstufen durchgeführt werden, ergeben sich für die zehn Fahrzeuge zusammen für alle Meßabläufe über 900 objektive Kennwerte, die für die Korrelationsanalyse zur Verfügung stehen.

4.2 Subjektive Aspekte

4.2.1 Fahrprofile und Fahrerfeld

Dieselben, d.h. identischen, zehn Fahrzeuge werden nach der objektiven Vermessung von fünf Normal- und 17 Expertenfahrern konsekutiv in vier Verkehrssituationen bewertet und beurteilt. Da die Validierung von objektiven Kenngrößen mit dem subjektiven Fahreindruck im Vordergrund steht, sind überwiegend Expertenfahrer im Einsatz. Der Status „Experte“ ist in der vorliegenden Arbeit an Probanden vergeben, die beruflich in subjektive Fahrwerksabstimmungen und -bewertungen involviert sind. Aufgrund eines Vorversuchs und unter der Maßgabe einer signifikanten Aussagekraft bzw. mindestens mittlerer Korrelationskoeffizienten ist die Mindestprobandenanzahl von zehn Experten erfüllt. Die Normalfahrer fungieren als Vergleichskollektiv.

Die Bewerter werden vor der eigentlichen Versuchsdurchführung über die Fahrzeugflotte informiert und bezüglich des Aufbaus der Fragebögen für die Teilstrecken, die im folgenden Kapitel vorgestellt werden, instruiert. Der Versuchsbetreuer begleitet die Probanden während ihrer ersten Evaluierungsfahrt und bei Bedarf bei weiteren, um auf Fragen eingehen zu können. Da die Fahrer mit den Teilstrecken vertraut sind, handeln die Rückfragen vielmehr über das Verständnis der subjektiven Kriterien.

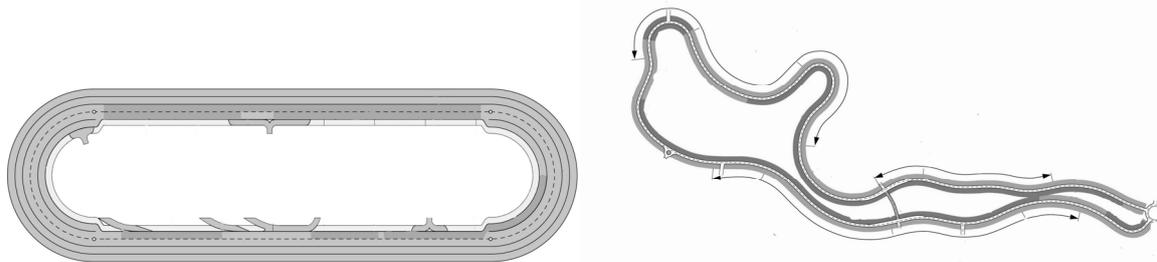


Abb. 4.15: Autobahn- (links) und Landstraßenprofil (rechts) für die Evaluierung mit einer Streckenlänge von 12,3 bzw. 4,8 km¹⁸⁴.

Die Subjektiv-Evaluierung beginnt mit Parkier-/ Rangiermanövern, Fahrten in einer „verkehrsberuhigten“ Zone mit Abbiegemanövern und einem Kreisverkehr, wobei die Fahrgeschwindigkeiten zwischen 30 und 50 km/h liegen. Darauf folgt eine Autobahnfahrt auf einem Oval mit einer Länge der Geraden von 5 km und 3-4 Fahrspuren, Abb. 4.15 links. Der Steilkurvenbereich ist hierbei von der Bewertung ausgenommen; statt dessen sind die beiden inneren, ebenen Spuren zu befahren. Den Probanden steht es frei, jederzeit am Fahrbahnrand anzuhalten und sich dem Ausfüllen des Fragebogens zu widmen. Bei zwei Geschwindigkeiten, 100 und 150 km/h, sind die jeweiligen Kriterien während Spurhaltung und -wechseln zu beantworten.

Danach schließen sich die Landstraßenfahrten mit mehreren Übergangsbögen und verschiedenen Kurvenradien an, siehe Abb. 4.15 rechts. In engeren Kehren wird 70-80 km/h schnell und den weiteren Kurven 100 km/h gefahren, wobei die Experten die Fahrzeuge in der engsten Kurve an den Grenzbereich führen und die Normalfahrer im Normalfahrbereich verbleiben. Die ISO-Spurwechsel werden als abschließendes Manöver auf einer Trapezfläche einer Länge von 570 m bzw. Breite von 15 bis 100 m und ausreichend Auslaufzone durchgeführt. Die Markierungsabstände der ISO-Spurwechselgasse richten sich nach den Fahrzeugbreiten der Mittelklasse¹⁸⁵, wobei für die Normalfahrer 80 km/h als Richtgeschwindigkeit gilt. Pro Fahrzeug dauert ein Prüfzyklus in Summe zwischen 45 und 60 Minuten; den umfassenden Abschluß bildet eine Wiederholfahrt in einem Fahrzeug, das eines der Ersten in der Evaluierungsreihenfolge gewesen ist. Die Prüfreihefolgen für die Testpersonen sind innerhalb ihrer Gruppen grundsätzlich randomisiert.

¹⁸⁴ @ ATP

¹⁸⁵ Norm ISO 3888-1

4.2.2 Kriterien- und Fragebogenentwicklung

Die subjektive Beschreibung und Ausformulierung des querdynamischen Fahreindrucks offenbart sich als sehr facettenreich. Um die unterschiedlichen Ansätze zusammenzufassen und die Mosaiksteine des ganzheitlichen Fahrempfindens in Form der verbalen Ausdrücke zu strukturieren, seien die im Stand der Forschung und Technik genannten Bewertungskriterien an dieser Stelle „objektiver“ gefaßt. In den Wechselwirkungen zwischen Fahrer und Fahrzeug sollen die Lenkeingaben und deren rückgemeldeten Auswirkungen über den Betriebsraum aus Fahrgeschwindigkeit, Querbeschleunigung, Lenkwinkel und Lenkfrequenz strukturiert formuliert werden. Dazu gilt es, folgende Fragen zu beantworten:

- Beginnend mit stehendem bzw. langsam rollendem Fahrzeug, wie groß ist das Parkiermoment? Verläuft das Parkiermoment über dem Lenkwinkel wellig oder gleichmäßig? Wie groß ist der Lenkwinkelbedarf?
- Bei langsamer Fahrt, wie hoch ist das Lenkmoment? Nach einem Abbiegemanöver, wie schnell stellt das Lenkrad in die Geradeausstellung zurück? Wie groß ist der Lenkwinkelbedarf?
- Bei mittleren Fahrgeschwindigkeiten, wie groß ist das Lenkmoment um die Lenkradmittellage bzw. wie verhält sich sein Anstieg und seine Rückstellung? Wie groß ist das Lenkmoment außerhalb der Lenkradmittellage? Wie ist die Querbeschleunigung im Handmoment abgebildet? Wie wird die Kraftschlußgrenze angezeigt? Wie stark spricht das Fahrzeug in seinen Aufbaufreiheitsgraden an? Wie sind die zeitlichen Verhältnisse zwischen den Größen?
- Im Spurwechsel und Ausweichmanöver, d.h. unter dynamischen Lenkfrequenzen, wie verläuft das Lenkmoment über dem Lenkwinkel? Wie giert, schwimmt und wankt das Fahrzeug?
- Im Hochgeschwindigkeitsgeradeauslauf, wie groß ist das Lenkmoment um die Lenkradmittellage bzw. wie verhält sich sein Anstieg und seine Rückstellung? Wie stark spricht das Fahrzeug unter Berücksichtigung des Lenkmomentverlaufs an?

Zur subjektiven Evaluierung der Fahreigenschaften stehen vier Fragebögen zur Verfügung: Als Beispiel zur Erläuterung deren Schemata dient derjenige des Landstraßenprofils, siehe Abb. 4.16. Die übrigen Fragebögen zur Nutzung auf den anderen Streckenprofilen finden sich im Anhang. Die subjektiven Evaluationskriterien sind in verschiedene Aspekte untergruppiert:

- das Lenkmoment,

- der Lenkungsrücklauf,
- das Parkieren,
- die Lenkwinkleingabe und
- deren Fahrzeugreaktion.

Um ein einheitliches Verständnis der Kriterien unter den Testpersonen zu erzielen, sind sie verbal umschrieben. Kern des Fragebogens auf der jeweiligen Bewertungsstrecke bilden zwei Skalen zur Einschätzung der Bewertung und Beurteilung, d.h. einerseits des „Niveaus“ und andererseits des „Gefallens“:

- Wie niedrig/hoch ist die Intensität, das Niveau des betreffenden Kriteriums?
- Wie gefällt dieses Größen-Niveau?

Die Niveau-Skala ist sechsstufig ausgelegt, um eine tendenzielle Festlegung zu erzwingen, da keine mittlere Auswahl zur Verfügung steht. Die Zahlenstufen „1“ bis „6“ sind codiert hinterlegt, wobei mit aufsteigendem Wert die Intensität zunimmt. Die Niveau-Bewertungen sind von zwei neutralen Ankern aus einem Fundus von Semantischen Differentialen¹⁸⁶ eingerahmt, um die Bedeutung der Wörter zu „messen“, mit denen der subjektive Eindruck assoziiert wird. Die Gefallensskala enthält zehn Stufen in Anlehnung an das Standard SAE-System¹⁸⁷; die Zahlencodierung erfolgt allerdings in umgekehrter Reihenfolge, weil die Experten durch ihre Tätigkeit daran gewöhnt sind und Normalfahrer die Reihenfolge durch das Schulnotensystem kennen, d.h. die hinterlegte „1“ entspricht der besten, „10“ der schlechtesten Note. Die Gefallensattribute sind zusätzlich farblich von grün über gelb bis rot in Bereiche markiert. Diese zweigleisige Herangehensweise ermöglicht es nicht nur, objektive Kenngrößen mit dem subjektiven Eindruck zu validieren, sondern die Kriterien hinsichtlich ihrer Zuteilung zu Lenkcharakter -oder Diskomfort zu identifizieren.

Beginnend mit den Fahrten im Stadtverkehr, also vom Parkieren aus bis in den unteren Geschwindigkeitsbereich, gilt es Fragen nach der Höhe

- des *Anlenkmoments*,
- des *Haltemoments*,
- der *Reibung*,
- der Art des *Lenkmomentverlaufs*,

¹⁸⁶ Snider / Osgood 1969

¹⁸⁷ Norm SAE J1441

- des *Lenkwinkelbedarfs*,
- der Geschwindigkeit des *Lenkungsrücklaufs* und
- dem *Lenkmoment*, das zum *Rückstellen* des Lenkrads aufzubringen ist,
- der *Wankreaktion*,
- des *Parkiermoments* bzw.
- der *Anzahl der Parkierumdrehungen*

zu beantworten, vergleiche Anh. 1. Bezüglich des Lenkmoments wird also der gesamte Betriebsraum vom On- zum Off-Centre Bereich mit dem Fokus auf Abbiegevorgänge abgefragt, vom Einlenken bis zur Phase der Rückstellung in die Geradeausfahrt und dem hierfür benötigten Lenkmoment.

In ähnlicher Weise sind die Prüfsteine der Landstraßenfahrt gestaltet, siehe Abb. 4.16. Zu den On-Centre Kriterien gehören

- das *Anlenkmoment* und
- die *Reibung*;
- der *Momentenverlauf*

beschreibt den Übergang hin zum Off-Centre Bereich, der durch

- das *Haltemoment* während einer Kurvenfahrt,
- den Lenkmomentanstieg über der Querschleunigung (*Lenkmomentgradient*) und
- *-Rückgang* vor der Kraftschlußgrenze

gekennzeichnet ist. Der

- *Fahrbahnkontakt* und die
- *Lenkpräzision*

sind hierbei eher „weiche“ Kriterien, da sie nicht unmittelbar an objektive Kenngrößen gekoppelt sind bzw. eine Überlagerung verschiedener Einflüsse darstellen. Während der Landstraßenfahrt ist auch der Gesamtfahrzeugteil umfangreicher. Neben den Fragestellungen nach

- *Lenkwinkelbedarf* für eine Fahrtrichtungsänderung und
- *Korrekturbedarf* nach der Kurvenfahrt

umfaßt der Katalog

- die *Gier-* und
- *Wankreaktion* in Bezug auf die Amplitude bzw.

- den *Zeitverzug* und
- das *Eigenlenkverhalten* des Fahrzeugs.

Während der Spurhaltung auf dem Autobahnprofil sind die Probanden gebeten, On-Centre

- die *Mittenzentrierung* und
- das *Lenkungsansprechen* sowohl bei 100 als auch 150 km/h

einzuschätzen; ansonsten gilt für die übrigen Kriterien in der Geradeausfahrt und den Spurwechseln die obere Geschwindigkeit 150 km/h, vergleiche Anh. 2.

- *Spiel*

ist objektiv in modernen Zahnstangenlenkungen vernachlässigbar, jedoch hier vor dem subjektiven Hintergrund zur Evaluierung aufgenommen. Der Aspekt des Geradeauslaufs wird aus der Sicht des Lenkmoments untersucht.

Zuden bisher erwähnten Kriterien kommen in den ISO-Spurwechseln, siehe Anh. 3,

- das *Verhärten* der Lenkung und
- *Stabilitäts-/Sicherheitsempfinden* während dieser Ausweichmanöver bzw.
- das *Diagonale Tauchen*

hinzu. Unter letzterem Kriterium wird die überlagerte Nick- und Wankbewegung des Fahrzeugs verstanden, das sich durch „Einknicken“ des Fahrzeugs zur kurvenäußeren Seite ausdrückt. Den objektiven Meßdaten und extrahierten Kennwerten stehen nun also ca. 19000 Noten gegenüber; im nächsten Kapitel wird näher auf den standardisierten Ablauf zur Korrelationsanalyse zwischen den beiden Charakteristika eingegangen.

| | | Bewertung (nicht fahrzeugklassenspezifisch!) | | | | | | | | | |
|---------------------------------------|---|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| | | Niveau | | | | | Gefallen | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| Kriterium | Beschreibung | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | gut | mittelmäßig | dürrig | sehr schlecht | |
| Lenkmoment | Anlenkmoment | niedrig | <input type="checkbox"/> | |
| | Reibung | gering | <input type="checkbox"/> | |
| | Momentenverlauf | eckig | <input type="checkbox"/> | |
| | Haltemoment im Weiterlenkbereich | niedrig | <input type="checkbox"/> | |
| | Lenkmomentgradient im Weiterlenkbereich | flach | <input type="checkbox"/> | |
| | Lenkmoment-Rückgang vor Grenzbereich | früh | <input type="checkbox"/> | |
| | Fahrbahnkontakt | lose | <input type="checkbox"/> | |
| | Lenkwinkelbedarf / Lenkübersetzung | klein | <input type="checkbox"/> | |
| | Lenkpräzision | gering | <input type="checkbox"/> | |
| | Nachlenken nach Kurvenfahrt | klein | <input type="checkbox"/> | |
| Fahrzeugreaktion & Lenkwinkel eingang | Kurvenwilligkeit/Gierreaktion | klein | <input type="checkbox"/> | |
| | Eigenlenkverhalten | neutral | <input type="checkbox"/> | |
| | Wankreaktion | klein | <input type="checkbox"/> | |
| | Wankreaktion, Zeitverzug | früh | <input type="checkbox"/> | |
| | | hoch | <input type="checkbox"/> | |
| | | hoch | <input type="checkbox"/> | |
| | | rund | <input type="checkbox"/> | |
| | | hoch | <input type="checkbox"/> | |
| | | steil | <input type="checkbox"/> | |
| | | spät | <input type="checkbox"/> | |
| | angebunden | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |
| | groß | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |
| | hoch | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |
| | groß | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |
| | groß | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |
| | untersteuernd | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |
| | groß | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |
| | spät | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | | |

Abb. 4.16: Fragebogen zur Evaluierung der zehn Fahrzeuge einschließlich Wiederholungsfahrt auf dem Landstraßenprofil.

4.3 Auswertemethoden und Auswerteablauf

Auf dem Weg hin zu den zu findenden signifikanten und relevanten subjektiv-objektiv Beziehungen ist eine „Filterung“ der subjektiven und objektiven Datenmengen durchzuführen. In den nachfolgenden Ausführungen wird anhand von Beispielen erläutert, wie diese reduzierenden Schritte ausgeführt werden. Die Methoden werden auch auf die übrigen nachfolgenden, modellbasierten Analysen der vorliegenden Arbeit in Kap. 5 angewandt.

Sowohl die subjektiven als auch objektiven Daten werden mehreren statistischen Prüfungen unterzogen, vergleiche die Grundlagen in Kap. 2.4.3. Nach Z-Transformation, Ausreißer- und Verteilungstests werden die experimentelle Reliabilität und Varianz überprüft. Im darauffolgenden Schritt werden die eigentlichen subjektiven Evaluationen untersucht, d.h. existieren Redundanzen in den Fragebogenkriterien und wie sind Niveau und Gefallen miteinander verknüpft? Auf der objektiven Seite stellt sich die Frage, ob Manöver gegenseitig substituiert werden können. Abschließend folgt die Investigation nach Korrelationen zwischen den objektiven Maßen und den subjektiven Noten. Ausgangspunkte dieser Untersuchungen sind parametrische und nichtparametrische Werkzeuge der einfachen und multiplen Regressionsanalyse. An dieser Stelle sei unterstrichen, daß sämtliche Untersuchungen einem 95%-Konfidenzintervall unterliegen.

4.3.1 Deskriptive Statistik und Hypothesentests: Z-Transformation, Verteilungs- und Ausreißertests, Reliabilität und Varianzanalyse

Vor der Suche nach Beziehungen zwischen subjektiven und objektiven Daten werden mehrere einleitende statistische Studien durchgeführt, die den Weg für die Korrelationsanalysen bereiten. Jede Testperson wendet ihren eigenen Maßstab an, d.h. nutzt einen gewissen Bereich auf der Bewertungsskala. Die Z-Transformation jeder einzelnen Subjektivnote verschmilzt die individuellen Skalen in eine gemeinsame innerhalb der Testgruppe. Die Ausprägungen dieser gemeinsamen Skala können rücktransformiert werden, um die Ergebnisse anschaulich im gewohnten Zahlenraum zu erhalten, vergleiche Gl. [23]. Zur Rücktransformation wird die individuelle Z-Note mit dem Mittelwert aus allen individuell gemittelten Standardabweichungen multipliziert und zum Mittelwert aller individuell gemittelten Noten aus dem Grundzahlenbereich addiert.

$$y_{\text{ind,rück}} = y_{\text{ind,z}} \cdot \bar{\sigma}_y + \bar{y}_y \quad [23]$$

Danach wird der Lilliefors-Test über die Güte der Anpassung an die Normalverteilung auf die Daten angewendet¹⁸⁸. Falls ein subjektives Kriterium oder ein objektives Maß den Test nicht besteht, muß für deren Korrelationsanalysen Spearmans nichtparametrischer Ansatz statt Students Parametrischem verfolgt werden. Ausreißer in den Stichproben werden entfernt, falls ihr Wert mindestens eineinhalb Mal den Interquartilabstand entfernt ist vom 25% oder 75% Perzentil¹⁸⁹. Die Resultate vorweggenommen, daß die Korrelationskoeffizienten der bereinigten Daten nicht deutlich höher ausfallen als die der Rohdaten, wird der Ausreißertest hier nicht weiter verfolgt. Die Auswertemethode ist jedoch in dieser Prozeßerläuterung enthalten, da sie bei zukünftigen, anderen Anwendungen von Relevanz sein könnte.

Jeder Proband fährt eines seiner zu Beginn bewerteten Fahrzeuge ein zweites Mal am Ende der Prüfprozedur, was eine elementare Betrachtung der subjektiven Bewertungswiederholzuverlässigkeit ermöglicht. Der Vergleich wird für jedes Kriterium erreicht durch Differenzbildung zwischen den beiden zugehörigen Mittelwertnoten des Referenz- und Wiederholungslaufs. Tabelle Tab. 4.1 führt am Beispiel der Landstraßenfahrten Differenznoten für beide Fahrergruppen auf sowie komparative Attribute der Evaluierung. Tendenziell zeigen die professionellen Fahrer kleinere Abweichungen zwischen den Fahrten; dies ist ebenso repräsentativ für die anderen Strecken. Im Gefallen sind die Bewertungsdrifts im allgemeinen größer als in Bezug auf das Niveau und zudem fast durchweg positiv: die Normalfahrer bewerten beim zweiten Mal z.B. den *Fahrbahnkontakt* um beinahe zwei Notenpunkte besser als zuvor, die Experten den *Lenkmomentgradient* um 0,7. Im Niveau sind die Abweichungen von -1,4 und -1 der Normalfahrer in *Lenkpräzision* und *Haltemoment* Ausreißer; alle sonstigen maximalen Abweichungen sind kleiner als eine Note. Die Experten drifteten in ihrer Niveau-Einschätzung um maximal einen halben Notenpunkt, wobei die Bewertung teilweise in umgekehrter Richtung als die der Normalfahrer treibt. Die Standardabweichungen im Gefallen differieren für die Normal- und Expertenfahrer maximal im Kriterium *Lenkmomentgradient* um 1 bzw. 1,8 Notenpunkte. Im Niveau dagegen tritt für die Fachleute die maximale Streuung von 0,4 in der *Wankreaktion*, für die Normalfahrer um 0,5 Notenpunkte im Kriterium *Haltemoment* auf.

¹⁸⁸ Conover 1980

¹⁸⁹ Velleman / Hoaglin 1981

| Kriterium | Niveau | | | Gefallen | | | |
|---------------------------------|---|-----------|------|----------|-----------|------|------|
| | | NF | EF | NF | EF | | |
| Lenkmoment | Anlenkmoment | höher | -0,2 | 0,2 | niedriger | 1,2 | 0,4 |
| | Reibung | geringer | 0,1 | -0,1 | höher | 0,3 | 0,5 |
| | Momentenverlauf | | 0 | 0,2 | eckiger | -0,2 | 0,2 |
| | Haltemoment im Weiterlenkbereich | höher | -1 | 0,1 | niedriger | 0,6 | 0 |
| | Lenkmomentgradient im Weiterlenkbereich | flacher | 0,1 | 0,1 | flacher | 0,1 | 0,7 |
| | Lenkmoment-Rückgang vor Grenzbereich | früher | 0,3 | 0,2 | früher | 0,8 | 0 |
| | Fahrbahnkontakt | angebund. | -1 | -0,2 | angebund. | 1,8 | 0,2 |
| Fzreaktion / Lenkwinkel eingabe | Lenkwinkelbedarf / Lenkübersetzung | kleiner | 0,6 | -0,4 | größer | 0,8 | -0,1 |
| | Lenkpräzision | höher | -1,4 | 0,3 | geringer | 1,2 | 0 |
| | Nachlenken nach Kurvenfahrt | kleiner | 0,2 | -0,1 | größer | 0,2 | 0,2 |
| | Kurvenwilligkeit/Gierreaktion | | 0 | 0 | | 1 | 0,2 |
| | Eigenlenkverhalten | neutraler | 0,2 | -0,1 | unterst. | -0,1 | 0,3 |
| | Wankreaktion | kleiner | 0,2 | -0,3 | größer | 0,2 | 0,4 |
| | Wankreaktion, Zeitverzug | früher | 0,3 | 0,1 | früher | 1 | 0,2 |

Tab. 4.1: Abweichungen der Mittelwertsnoten von Referenz- und Wiederholfahrt für Normal- und Expertenfahrer im Landstraßenprofil; ein positiver Wert des Gefallens indiziert eine Tendenz zum Positiven (NF = Normalfahrer, EF = Expertenfahrer).

Weitere Ausreißer bzw. maximale Abweichungen im Kontrast der beiden fahrgleichen Fahrten sind im Stadtverkehr (hier nicht in Tabellenform dargestellt): das *Anlenkmoment*-Gefallen mit 0,9 für die Experten und *Momentenverlauf*-Gefallen mit 2 Notenpunkten für die Normalfahrer. Sie sind es auch, die mit -1,2 Punkten im *Lenkungsrücklauf*- bzw. 1 im *Haltemoment*-Niveau driften, wobei die Experten -0,6 in der *Wankreaktion* aufweisen. Es erweist sich aus den Kommentaren der Probanden, daß die objektiven Wankreaktionen bei den niedrigen Fahrgeschwindigkeiten zu klein sind bzw. ihnen subjektiv weniger Bedeutung beigemessen wird. Die Autobahn-Evaluierung des *Haltemoment*-Gefallen wird bei den Normalfahrern um -1,6 kritischer; die Experten sehen die *Mittenzentrierung* 0,7 Punkte positiver. Auch während schnellerer Fahrt ist die *Lenkpräzision* mit einem Notenpunkt höher; dieses Kriterium zu bewerten, scheint für die Normalfahrer nicht trivial zu sein. Darüber hinaus offenbart sich kein Kriterium, das durchgängig weniger reliabel bewertet würde. Die Profis weichen um 0,5 Notenpunkte im *Haltemoment*- und *Lenkungsansprechen*-Niveau ab. In den ISO-Spurwechseln reißt die Normal-

fahrer-Bewertung des *Lenkpräzision*-Gefallens mit 2,6 bzw. -1,6 im Niveau nach oben aus, weil sie über das Experiment hinweg persönliche Sicherheit im Erfüllen der Fahraufgabe gewinnen. Die Experten verlieren mit 0,9 an ihrer kritischen Haltung gegenüber der *Stabilität* bzw. evaluieren den *Momentenverlauf* um -0,4 runder, d.h. konzentrieren sich marginal weniger auf die Lenkmomentbewertung als auf die anderen Kriterien, die während den Ausweichmanövern sehr reliabel sind. Schlußfolgernd heißt das, daß die Reliabilität beider Gruppen befriedigend ist bzw. das Gefallensempfinden durch den Gewöhnungseffekt über die Fahrzeuge hinweg „toleranter“ wird. Dem kann in Folgeuntersuchungen durch größere Spreizung der Versuchsvarianten und Reduktion der Bias-Faktoren bzw. der Versuchsdauer begegnet werden.

Eine einfaktorielle Varianzanalyse dient im nächsten Schritt als Werkzeug um zu bestimmen, ob die Probanden die objektiven Fahrzeugunterschiede in den subjektiven Kriterien auch getrennt auflösen können; falls nicht, sind ermittelte Korrelationen wenig aussagekräftig und werden nicht weiterverfolgt. Tabelle Tab. 4.2 enthält die Ergebnisse der Varianzanalyse für beide Probandengruppen am Beispiel der Landstraße. Die professionellen Bewerber differenzieren alle Kriterien auf beiden Skalen ausschließlich dem Niveau der *Kurvenwilligkeit/Gierreaktion* und *Wankreaktion, Zeitverzug*. Entweder das Streckenprofil ist nicht geeignet, um objektive Unterschiede in diesen beiden Kriterien „herauszufahren“ oder sie befinden sich unterhalb der Wahrnehmungsschwelle. Die nichtprofessionellen Probanden sind lediglich fähig, signifikant die Varianz im *Anlenkmoment, Lenkpräzision* und in der *Wankreaktion* zu detektieren. Sie reagieren offenbar sensitiv auf diese Kriterien und sind nicht adaptiert darauf, die anderen hochaufgelösten, objektiven Kenngrößen zu validieren. Andere Kriterien, die zwar der Varianzanalyse zufolge im Gefallen signifikant verschieden beurteilt werden, nicht aber im Niveau, fallen ebenso durch das Raster, denn die subjektive Auflösung der objektiven Varianz ist eine Vorbedingung für die Betrachtung der Verknüpfungen zwischen Niveau-Wahrnehmung und Gefallen eines bestimmten Niveaus. Deshalb konzentrieren sich die nachfolgenden Analysen auf die Ergebnisse der Experten und deren differenzierte Kriterien. Falls möglich, werden diese mit dem Normalfahrerkollektiv verglichen.

| Kriterium | Niveau | | | Gefallen | | | |
|-------------------------------|---|---------|----|----------|--------------|--|--|
| | | NF | EF | NF | EF | | |
| Lenkmoment | Anlenkmoment | niedrig | | | hoch | | |
| | Reibung | gering | | | hoch | | |
| | Momentenverlauf | eckig | | | rund | | |
| | Haltemoment im Weiterlenkbereich | niedrig | | | hoch | | |
| | Lenkmomentgradient im Weiterlenkbereich | flach | | | steil | | |
| | Lenkmoment-Rückgang vor Grenzbereich | früh | | | spät | | |
| | Fahrbahnkontakt | lose | | | angebunden | | |
| Fzreaktion / Lenkwinkleingabe | Lenkwinkelbedarf / Lenkübersetzung | klein | | | groß | | |
| | Lenkpräzision | gering | | | hoch | | |
| | Nachlenken nach Kurvenfahrt | klein | | | groß | | |
| | Kurvenwilligkeit/Gierreaktion | klein | | | groß | | |
| | Eigenlenkverhalten | neutral | | | untersteuer. | | |
| | Wankreaktion | klein | | | groß | | |
| | Wankreaktion, Zeitverzug | früh | | | spät | | |

Tab. 4.2: Ergebnisse der Varianzanalyse für Normal- und Expertenfahrer im Landstraßenprofil; Kriterien mit hell markierten Zellen sind signifikant variant, dunkle invariant (NF = Normalfahrer, EF = Expertenfahrer).

Im Stadtverkehr können die Spezialisten keine Unterschiede im *Momentenverlauf* festmachen, wohl aufgrund der niedrigeren Lenkmomentbeträge der Fahrzeuge bei langsamer Fahrt bzw. der kleineren Querschleunigungen. Hier sind die Normalfahrer in der Lage, die *Reibung*, das *Anlenkmoment*, *Haltemoment*, *Parkiermoment* und wiederum die *Wankreaktion* auszumachen. Sie können ihr Gefallen allerdings lediglich in den beiden letztgenannten Eigenschaften signifikant zum Ausdruck bringen. Das Merkmal *Wankreaktion* ist für die nichtprofessionellen Testpersonen auch auf der Autobahn von signifikanter Bedeutung, sowohl hinsichtlich des Betrags als auch des Hangs. Bei 100 km/h kann die *Mittenzentrierung* noch in ihrer Größe aufgelöst werden, bei schnellerer Fahrt nur noch der *Lenkwinkelbedarf*. Die Experten differenzieren hier den gesamten Fragenkatalog. In den ISO-Spurwechseln sensieren die Normalfahrer das *Anlenkmoment* und auf beiden Skalen die *Wankreaktion* sowie das *Diagonale Tauchen*. Es fällt auf, daß die nichtprofessionelle Gruppe insbesondere sensitiv gegenüber dem *Wankverhalten* der Fahrzeuge ist. Die Fachleute wiederum unterscheiden den *Zeitverzug* in der

Wankreaktion sowie das *Verhärten* nicht. Zu Ersterem: die Probanden verknüpfen die Wahrnehmung des Wankverhaltens mit der Amplitude, nicht mit dem Zeitverhalten; zum Zweiten: die Abnahmegrenze für *Verhärten* ist bei diesen Fahrzeugen noch nicht erreicht. Durch die bisherigen statistischen Voruntersuchungen ist die Datenmenge nun jedenfalls bereits erheblich reduziert.

4.3.2 Redundanz- und Korrelationsbetrachtung innerhalb der subjektiven Daten

Als nächstes werden die beiden Bewertungsdatengruppen getrennt aus korrelativer Sicht betrachtet. Es ist von besonderem Interesse zu wissen, welche Kriterien/Kenngrößen redundant sind, d.h. auf der subjektiven Seite, um den Fragebogen kürzen zu können und auf der objektiven Seite, um Prüfaufwände zu reduzieren. Zunächst zur subjektiven Seite: hier ist zudem Gegenstand der Analyse, inwiefern die Niveau-Bewertungen und Gefallen-Beurteilungen miteinander verknüpft sind.

Sinnvollerweise werden ausschließlich die Kriterien, die auf Basis der vorhergehenden Varianzanalyse signifikante Unterschiede aufweisen, auf Redundanzen geprüft. Falls die Korrelationsrechnungen zwischen den subjektiven Niveau-Noten der einzelnen Kriterien einen sehr hohen Korrelationskoeffizienten von $R > 0,9$ ergeben, wird die Schlußfolgerung einer vorliegenden Redundanz auf Basis der Expertenfahrerdaten gezogen. Unter dieser Maßgabe resultieren für die Normalfahrerbewertungen folgende Indizien (die Teilnehmergröße fünf ist zu klein, um von Beweis sprechen zu können) für Niveau-Doppelaussagen: Im Stadtverkehr korrelieren die subjektiven Daten des *Anlenkmoments* mit denen des *Haltemoments*. Die Landstraße weist keine Redundanzen auf, und auf dem Autobahnprofil sind die Stimmen zur *Mittenzentrierung* bei 100 km/h und 150 km/h gleichgeartet. In den ISO-Spurwechseln kommt das *Diagonale Tauchen* subjektiv der *Wankreaktion* gleich.

Das Korrelieren der subjektiven Kennzeichen der Spezialisten miteinander ergibt sowohl im Stadtverkehr als auch auf der Landstraße sehr starke Verbindungen zwischen dem *Anlenk-* und *Haltemoment*, vergleiche Tab. 4.3.

| Stadtverkehr | | |
|-----------------------------------|----------|------------------------------------|
| subjektives Kriterium | R | subjektives Kriterium |
| Anlenkmoment-Niveau | 0.94 | Haltemoment-Niveau |
| Reibung-Niveau | 0.90 | Lenkungsrücklauf/Lenkmoment-Niveau |
| Landstraße | | |
| subjektives Kriterium | R | subjektives Kriterium |
| Anlenkmoment-Niveau | 0.91 | Haltemoment-Niveau |
| Lenkpräzision-Niveau | 0.94 | Fahrbahnkontakt-Niveau |
| Autobahn | | |
| subjektives Kriterium | R | subjektives Kriterium |
| Mittenzentrierung 100km/h-Niveau | 0.98 | Mittenzentrierung 150km/h-Niveau |
| Lenkpräzision-Niveau | 0.90 | Lenkungsansprechen 150km/h-Niveau |
| Lenkungsansprechen 100km/h-Niveau | 0.97 | Lenkungsansprechen 150km/h-Niveau |
| ISO-Spurwechsel | | |
| subjektives Kriterium | R | subjektives Kriterium |
| Momentenverlauf-Niveau | 0.92 | Lenkpräzision-Niveau |
| Diagonales Tauchen-Niveau | 0.96 | Wankreaktion-Niveau |

Tab. 4.3: Lineare Verknüpfungen unter den subjektiven Kriterien-Niveaubewertungen der Fachleute.

Beide Testgruppen differenzieren, zumindest auf diesen Teststrecken, die beiden Einzelaspekte nicht voneinander, sondern befinden die Höhe des Handmoments singular. Im Stadtverkehr hat das subjektive Reibungsniveau der Lenkung Auswirkungen auf das Lenkmoment, das aufzubringen ist, um das Lenkrad nach einem Lenkvorgang wieder in die Geradeausposition zurückzustellen. Auf der Landstraße bringen die Fachleute die *Lenkpräzision* in Zusammenhang mit dem Empfinden des *Fahrbahnkontakts*. Die On-Centre Kriterien wie *Mittenzentrierung* und *Lenkungsansprechen* werden über der Fahrgeschwindigkeit nicht unterschiedlich bewertet; zur Bewertung der *Lenkpräzision* kommt auf der Autobahn eine weitere Beeinflussung hinzu, nämlich die Gierreaktion, ausgedrückt als *Lenkungsansprechen*. Die ISO-Spurwechsel weisen zudem aus, daß der Lenkpräzisionseindruck auch vom *Momentenverlauf* bestimmt wird; infolgedessen sollten die objektiven Kenngrößen, die auf den Größen Lenkmoment und Gierrate basieren, mit der subjektiven Einschätzung auf Zusammenhänge hin überprüft werden. Dar-

über hinaus sind somit Indizien gefunden, um die nachfolgenden und zukünftigen Fragenkataloge zu kürzen.

Bezüglich des Niveaus können nicht nur zwischen den einzelnen Merkmalen Korrelationen gefunden werden, sondern auch zwischen Niveau und Gefallen für ein Kriterium; sofern beide Datenmengen signifikant unterschiedliche Noten aus der Varianzanalyse enthalten. Die resultierenden Zusammenhänge beziehen sich des Weiteren auf den Kennwerterraum, der durch die objektive Merkmalsausprägung der Fahrzeuge aufgespannt wird, und den Probanden mittels der Fahrzeuge dargebrachten objektiven Spreizung. Es dürfen keine Rückschlüsse über den jeweiligen Wertebereich hinweg, der durch die Wagen abgedeckt ist, gezogen werden; die Regressionen sind nicht zu extrapolieren.

Die Normalfahrer zeigen eindeutige, linear-monotone Verknüpfungen zwischen Niveau und Gefallen für die *Wankreaktion* auf den jeweiligen Strecken und dem *Parkiermoment*; diese Kriterien sind also für die Testgruppe per definitionem Aspekte des Lenkdiskomforts. Die Fachleute teilen diese Einordnung, siehe Tab. 4.4. Darüber hinaus sind für sie im Stadtverkehr generell die *Höhe der Lenkmomente* und die *Anzahl der Parkierumdrehungen* zu minimieren sowie die *Lenkübersetzung* direkter auszulegen und der *Lenkungsrücklauf* zu beschleunigen. Aufgeführt sind in Tab. 4.4 sämtliche linearen Beziehungen der Kriterien beider Skalen. Die Enge der Zusammenhänge erweist sich als hoch bis sehr hoch. Die Korrelationskoeffizienten für die Kriterien *Lenkwinkelbedarf/Lenkübersetzung*, *Lenkungsrücklauf* und *Parkierumdrehungen* fallen im Stadtverkehr mit $0,7 < R < 0,9$ „nur“ hoch aus, was indiziert, daß die linearen Funktionen durch obere und untere Schranken begrenzt sein könnten. Ähnlich verhält es sich mit dem *Lenkmomentgradient* auf der Landstraße, *Lenkungsansprechen* auf der Autobahn und der *Gierreaktion* im ISO-Spurwechsel. Die linearen Verknüpfungen sind in Tab. 4.4 daneben verbalisiert, z.B. „je später subjektiv der *Rückgang im Lenkmoment vor dem Grenzbereich* erfolgt, desto besser das Gefallen“. Zwei weitere Kriterien sind mit quadratischen Funktionen belegt, es handelt sich hierbei um den *Lenkmomentgradienten* auf der Landstraße und *Lenkwinkelbedarf/Lenkübersetzung* auf der Autobahn (Tab. 4.5) sie sind Lenkcharakterkriterien.

| Stadtverkehr | | | | |
|-------------------------------|---------|-------|---------|--------------------------------|
| subj. Niveau | wenn... | R | ...dann | subj. Gefallen |
| Anlenkmoment-Niveau | niedrig | 0.93 | gut | Anlenkmoment-Gefallen |
| Reibung-Niveau | gering | 0.96 | gut | Reibung-Gefallen |
| Haltemoment-Niveau | niedrig | 0.92 | gut | Haltemoment-Gefallen |
| Lenkübersetzung-Niveau | klein | 0.77 | gut | Lenkübersetzung-Gefallen |
| Lenkungsrücklauf-Niveau | schnell | -0.87 | gut | Lenkungsrücklauf-Gefallen |
| Lenkungsrücklauf L.moment-N. | niedrig | 0.95 | gut | Lenkungsrücklauf L.moment-Gef. |
| Wankreaktion-Niveau | klein | 0.90 | gut | Wankreaktion-Gefallen |
| Parkiermoment-Niveau | niedrig | 0.98 | gut | Parkiermoment-Gefallen |
| Parkierumdrehungen-Niveau | wenige | 0.87 | gut | Parkierumdrehungen-Gefallen |
| Landstraße | | | | |
| subj. Niveau | wenn... | R | ...dann | subj. Gefallen |
| Momentenverlauf-Niveau | rund | -0.95 | gut | Momentenverlauf-Gefallen |
| Lenkmomentgradient-Niveau | steil | -0.71 | gut | Lenkmomentgradient-Gefallen |
| Lenkmomentrückgang-Niveau | spät | -0.92 | gut | Lenkmomentrückgang-Gefallen |
| Fahrbahnkontakt-Niveau | angeb. | -0.93 | gut | Fahrbahnkontakt-Gefallen |
| Lenkpräzision-Niveau | hoch | -0.98 | gut | Lenkpräzision-Gefallen |
| Nachlenken-Niveau | gering | 0.93 | gut | Nachlenken-Gefallen |
| Eigenlenkverhalten-Niveau | neutral | 0.92 | gut | Eigenlenkverhalten-Gefallen |
| Wankreaktion-Niveau | klein | 0.97 | gut | Wankreaktion-Gefallen |
| Autobahn | | | | |
| subj. Niveau | wenn... | R | ...dann | subj. Gefallen |
| Momentenverlauf-Niveau | rund | -0.98 | gut | Momentenverlauf-Gefallen |
| Spiel-Niveau | klein | 0.94 | gut | Spiel-Gefallen |
| Lenkpräzision-Niveau | hoch | -0.98 | gut | Lenkpräzision-Gefallen |
| Lenkungsansprechen 100km/h-N. | hoch | -0.85 | gut | L.ansprechen 100km/h-Gefallen |
| Lenkungsansprechen 150km/h-N. | hoch | -0.88 | gut | L.ansprechen 150km/h-Gefallen |
| Wankreaktion-Niveau | klein | 0.96 | gut | Wankreaktion-Gefallen |
| Geradeauslauf-Niveau | treu | -0.99 | gut | Geradeauslauf-Gefallen |
| ISO-Spurwechsel | | | | |
| subj. Niveau | wenn... | R | ...dann | subj. Gefallen |
| Momentenverlauf-Niveau | rund | -0.95 | gut | Momentenverlauf-Gefallen |
| Lenkpräzision-Niveau | hoch | -0.98 | gut | Lenkpräzision-Gefallen |
| Gierreaktion-Niveau | groß | -0.81 | gut | Gierreaktion-Gefallen |
| Stabilität-Niveau | hoch | -0.98 | gut | Stabilität-Gefallen |
| Diagonales Tauchen-Niveau | schwa. | 0.97 | gut | Diagonales Tauchen-Gefallen |
| Wankreaktion-Niveau | klein | 0.95 | gut | Wankreaktion-Gefallen |

Tab. 4.4: Lineare Verknüpfungen der Fachleute zwischen ihren subjektiven Niveau-Einschätzungen und Gefallen; Aufstellung der Lenkdiskomfort-Aspekte.

| Landstraße | | |
|---------------------------------------|-------|---|
| subj. Niveau | R^2 | subj. Gefallen |
| Lenkmomentgradient-Niveau | 0,83 | Lenkmomentgradient-Gefallen |
| Autobahn | | |
| subj. Niveau | R^2 | subj. Gefallen |
| Lenkwinkelbed./Lenkübersetzung-Niveau | 0,6 | Lenkwinkelbed./Lenkübersetzung-Gefallen |

Tab. 4.5: Quadratische Verbindungen zwischen subjektiver Niveau-Einschätzung und Gefallen der Fachleute; Aufstellung der Lenkcharakter-Aspekte.

Der Betrag des Lenkmoments (ausgedrückt durch das subjektive Niveau des *Anlenkmoments*) offenbart wiederum einen linearen Zusammenhang, wenn die Beeinflussung durch die Reibungsbewertung mit Hilfe des Verfahrens der Partiellen Korrelation heraus gerechnet wird; die Verknüpfung ist jedoch nicht so eindeutig wie bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten (Tab. 4.6).

| Landstraße | | | | | |
|---------------------|---------|------|---------|-----------------------|--------------------|
| subj. Niveau | wenn... | R | ...dann | subj. Gefallen | partiell bereinigt |
| Anlenkmoment-Niveau | niedrig | 0.77 | gut | Anlenkmoment-Gefallen | Reibung-Niveau |

Tab. 4.6: Partialisierter Zusammenhang zwischen der subjektiven Experten-Niveau-Einschätzung und dem Gefallen des Anlenkmoments für die Landstraße.

Tabelle Tab. 4.7 enthält der Vollständigkeit willen die Kriterien, offenbar insbesondere On-Centre Aspekte des Lenkmoments, für die in diesem Versuch keine hochkorrelierenden, signifikanten Zusammenhänge erster oder zweiter Ordnung gefunden werden können; es sind Fragen persönlicher Präferenzen, die eingehender investigiert werden müssen.

| subj. Niveau - Gefallen | | |
|-------------------------|-------------------|------------------|
| Landstraße | Autobahn | ISO-Spurwechsel |
| Reibung | Mittenzentrierung | Anlenkmoment |
| Lenkübersetzung | Reibung | Lenkwinkelbedarf |
| | Haltemoment | |

Tab. 4.7: Offene Zusammenhänge, d.h. $R < 0,7$ bzw. $R^2 < 0,5$, zwischen den subjektiven Niveau-Einschätzungen und Gefallen.

Zielbereiche für Gesichtspunkte des Lenkdiskomforts sind also lineare, technische Minimierungs- oder Maximierungsaufgaben, z.B.: „je kleiner das Parkiermoment, desto besser gefällt es“ oder „je weniger das Fahrzeug wankt, desto besser“. Disziplinen des Lenkcharakters unterliegen komplexeren funktionalen Beziehungen, z.B. quadratischen: d.h. „ist der *Lenkmomentgradient* zu flach oder zu steil, gefällt er nicht; dazwischen befindet sich der gewünschte Zielbereich“.

4.3.3 Redundanzbetrachtung innerhalb der objektiven Daten

Die zehn Fahrzeuge bzw. die sie beschreibende reale Kennwerteschar bilden objektiv eine breite Basis für die Untersuchung über die Redundanzen innerhalb und zwischen den Prüfmanövern, mit dem Ziel den Manöverkatalog zu optimieren. Hierzu werden wiederum Korrelationen gerechnet, dieses Mal mit den objektiven Manöverdaten der Fahrzeuge, und auf sehr hohe Koeffizienten ($R > 0,9$) hin abgeprüft.

Für den Weave-Test bedeutet dieses Vorgehen, die Durchführungen bei 50, 100 und 150 km/h untereinander zu korrelieren und die Kenngrößen gegeneinander bei 100 km/h als Referenzgeschwindigkeit zu betrachten. Es erweist sich, daß die Kennwerte der niedrigen und mittleren Geschwindigkeit nicht zusammenhängen; dies ist begründet in der großen Differenz des überstrichenen Lenkwinkelbereichs, bei 50 km/h $\pm 40..45^\circ$ gegenüber $\pm 15..20^\circ$ bei 100 km/h, sowie in den geschwindigkeitsabhängigen Lenkunterstützungsunterschieden. Die Manövervariation erbringt also einen Mehrwert.

| Weave 100 km/h | | Weave 100 km/h | |
|---------------------------------------|------|--------------------------------------|----------------|
| obj. Kenngröße | R | | obj. Kenngröße |
| MH vs. dH, Weiterlenksteifigkeit | 0.99 | MH vs. ay, Weiterlenkmomentgradient | |
| Gierrate vs. dH, Lenkungsansprechen | 0.94 | ay vs. dH, Lenkempfindlichkeit | |
| Gierrate vs. dH, Weiterlenkansprechen | 0.91 | ay vs. dH, Weiterlenkempfindlichkeit | |
| Gierrate vs. dH, Weiterlenkansprechen | 0.93 | Gierverstärkung (100 km/h) | |
| Gierrate vs. dH, Restwinkel | 0.93 | Gierrate vs. dH, Restgierrate | |
| ay vs. dH, Restquerbeschleunigung | 0.97 | Gierrate vs. dH, Restgierrate | |
| MH vs. ay, Rest-Lenkmoment | 0.91 | MH vs. Gierrate, Rest-Lenkmoment | |

Tab. 4.8: Untereinander redundante Kenngrößen des Manövers Weave 100 km/h.

Werden die Werte der Kenngrößen aus dem Weave Manöver bei 100 km/h untereinander korreliert, so finden sich die in Tab. 4.8 enthaltenen Hauptgrößen, die sich gegenseitig ersetzen können. Prinzipiell transportieren in diesem quasi-stationären Betriebspunkt die *Steigungen* und *Achsenabschnitte* der Giergeschwindigkeits- und der Querschleunigungshysterese als Funktion des Lenkradwinkels die gleiche Information. Da die Gesamtfahrzeugreaktionsgrößen quasi-stationär direkt voneinander abhängen, ist das *Rest-Lenkmoment* als Funktion der beiden Größen ebenso redundant, vergleiche Tab. 4.8. Die außermittigen Gradienten des Lenkmoments, also die *Weiterlenksteifigkeit* im Diagramm M_H vs. δ_H und der *Weiterlenkmomentgradient*, M_H vs. a_y , sind ebenso vergleichbar. Daraus folgt, daß die Weave-Hysterese zum einen grundsätzlich durch die Kenngrößen aus den Schleifen der Gierrate und des Lenkmoments in Bezug auf den Lenkradwinkel, zum anderen durch die Mittensteigung des Lenkmoments über der Querschleunigung beschrieben werden können.

Der Vergleich zwischen den beiden Weave Tests, durchgeführt bei 100 und 150 km/h, zeigt eine weitgehende Überdeckung der Kennwerte der jeweiligen Abhängigkeiten, bis auf den *Restwinkel*, der zwischen den beiden Geschwindigkeiten „nur“ hoch korreliert (Tab. 4.9). Es ist somit, auf Basis dieser Fahrzeuge betrachtet, überflüssig, den Weave Test zusätzlich bei 150 km/h zu fahren. Einzige Ausnahme ist die Lenkmomenthysterese.

Ebenso liefern die extrahierten *Phasenverzögerungen* und *Verstärkungsfaktoren* für die jeweilige Fahrgeschwindigkeitsstufe in Bezug auf den Lenkradwinkel dieselbe Information wie die *Hysteresebreiten* und *-höhen* bzw. *außermittigen Gradienten*.

| Weave 100 km/h | | Weave 150 km/h |
|---------------------------------------|-------------|---|
| objektive Kenngröße | R | objektive Kenngröße |
| MH vs. dH, Lenkungssteifigkeit | 0.92 | MH vs. dH, Lenkungssteifigkeit |
| MH vs. dH, Reibungsmaß | 0.94 | MH vs. dH, Reibungsmaß |
| Gierrate vs. dH, Weiterlenkansprechen | 0.91 | Gierrate vs. dH, Weiterlenkansprechen |
| Gierrate vs. dH, Weiterlenkansprechen | 0.91 | a_y vs. dH, Weiterlenkempfindlichkeit |
| MH vs. a_y , Lenkmomentgradient | 0.94 | MH vs. a_y , Lenkmomentgradient |
| MH vs. a_y , Restquerbeschleunigung | 0.92 | MH vs. a_y , Restquerbeschleunigung |
| MH vs. a_y , Lenkmoment-Restmaß | 0.90 | MH vs. a_y , Lenkmoment-Restmaß |

Tab. 4.9: Gemeinsame Kennwerte zwischen den Weave Tests bei 100 und 150 km/h.

| Lenkungsziehen 100 km/h | | Lenkungsziehen 100 km/h |
|---|------|---|
| objektive Kenngröße | R | objektive Kenngröße |
| MH (0,5 m/s ²) - MH (1 m/s ²) | 0.97 | An-Weiterlenkgradient (0,5-1 m/s ²) |
| MH, max | 0.92 | MH (4 m/s ²) |
| Weiterlenkgradient (1-4 m/s ²) | 0.97 | Weiterlenkgradient (2-5 m/s ²) |
| MH (0,5 m/s ²) | 0.92 | MH (1 m/s ²) |

Tab. 4.10: Gemeinsamkeiten innerhalb der Kennwertschar des Lenkungsziehens bei 100 km/h.

Im Prüfmanöver Lenkungsziehen und der jeweiligen Fahrgeschwindigkeit, vergleiche stellvertretend 100 km/h in Tab. 4.10, stehen im Mittenbereich die *Anlenkmomente* bei $0,5 \text{ m/s}^2$ und 1 m/s^2 in Zusammenhang bzw. ist das maximale Lenkmoment $M_{H, \text{max}}$ über die Unterstützungskennlinie aus dem *Lenkmoment* bei 4 m/s^2 festgelegt. Die beiden, den Weiterlenkbereich beschreibenden, Gradienten sind ebenfalls ähnlich. Die Lenkmomentkennlinien unterscheiden sich durch die Lenkungstypen über der Fahrgeschwindigkeit. Obwohl die Fahrzeuge verschiedene Lenkübersetzungsverläufe aufweisen, können die Handmomente auch in Abhängigkeit des Lenkradwinkels ausgedrückt werden. So entspricht das *Anlenkmoment* (1 m/s^2) bei 100 km/h dem Lenkmoment im Bereich zwischen ca. 5° und 10° Lenkwinkel bzw. korrespondiert der Wert bei 4 m/s^2 im Weiterlenk- und Übergangsbereich zu den *Lenkmomenten* zwischen ca. 15° und 60° . Die bei 4 m/s^2 extrahierten *Lenkradwinkel* korrelieren mit dem *außermittigen Lenkungsansprechen* aus Weave und der *Gierverstärkung* bei 100 km/h , da in diesem Betriebspunkt die Gierreaktion direkt proportional zur Lenkübersetzung ist. Vergleichbar verhält es sich mit den *Gierraten-* und *Querbeschleunigungsverstärkungen* bis zu einer Frequenz von ca. $0,6 \text{ Hz}$, also auch dynamischeren Frequenzen, aus dem Frequenzgang 80 km/h . Der Fahrgeschwindigkeitsunterschied von 20 km/h hat in diesem Bereich einen vernachlässigbaren Einfluß, wobei die *Verstärkungen* bei $0,8 \text{ Hz}$ immer noch mit $R = -0,83$ korrelieren. Die Querbeschleunigung von 4 m/s^2 bildet den Schnittpunkt beider Manöver.

Die Redundanzanalyse ergibt auch, daß die stationären, klassischen Gesamtfahrzeugkenngrößen aus der Kreisfahrt wie *Eigenlenk-*, *Wankwinkel-* und *Schwimmwinkelgradient* auch aus dem Lenkungsziehen ermittelt werden können, wobei der *Schwimmwinkelgradient* bei 30 km/h einen sehr starken Zusammenhang mit dem Wert aus der Kreisfahrt aufweist. Die Korrelation sinkt bis auf $R = 0,73$ für den Wert bei 100 km/h ab, da die Schräglaufwinkeleigenschaften an der Hinterachse fahrgeschwindigkeitsabhängig sind.

Im Lenkwinkelsprung Off-Centre Bereich sind die Querbeschleunigungs- und Gier-Größenverstärkungen miteinander verknüpft, d.h. die Werte von 2 und 4 m/s², z.B. *Querbeschleunigungsverstärkung* (2 m/s²) und *Gierratenverstärkung* (4 m/s²), transportieren die gleiche Information. Die Variation der Lenkgeschwindigkeit beeinflusst bei diesem Manöver die Ansprechzeiten und Überschwingweiten im linearen Bereich, ausgenommen die *Gierratenüberschwingweite*. Zwischen den dynamischen Manövern Lenkwinkelsprung und Frequenzgang ist es ebenfalls so, daß die *Giergeschwindigkeits-, Querbeschleunigungs- und Schwimmwinkelverstärkungen* bis ca. 0,7 Hz mit den Pendanten aus dem Lenkwinkelsprung bei 4 m/s² korrelieren. Der Frequenzgang, für alle Kennwerte in 0,2 Hz-Schritten betrachtet, zeigt, daß die Einzelwerte der betreffenden Größe bis ca. 0,8..1 Hz untereinander redundant sind, so z.B. der *Wankwinkelverstärkungsfaktor* (0,2 Hz) mit dem bei 0,8 Hz. Das liegt darin begründet, daß die charakteristischen Kurvenverläufe sehr ähnlich sind. Dasselbe gilt auch für die *Phasengänge ab 0,4 Hz*, wobei der *Wankwinkel- und Schwimmwinkelverzug* auch mit dem *Querbeschleunigungsphasenverzug* im Zusammenhang steht. Auffällig bleibt, daß die Verstärkungen dieser beiden Größen zumindest nicht sehr hoch mit der Gier- und Querbewegung korrelieren, also unabhängige Fahrzeuginformation liefern.

Zusammenfassend lässt sich ableiten, daß die Gierreaktion nicht nur über der Fahrgeschwindigkeit, sondern auch über der Querbeschleunigung veränderlich ist und im Normalfahrfrequenzbereich außermittig vorherrschend von der Lenkübersetzung bestimmt wird. Die singuläre Analyse der Gesamtfahrzeuggrößen zeigt, daß sie im dynamischen Normalfahrbereich frequenzunabhängig miteinander in Zusammenhang stehen. Der Lenkwinkelsprung ist grundsätzlich für verschiedene Querbeschleunigungen sinnvoll, aber aus Reproduzierbarkeitsgründen gegenüber dem Frequenzgang hinten anzustellen. Infolgedessen lassen sich die Manöveraufwände prinzipiell auf den Weave für das quasi-stationäre On-Centre Verhalten, Frequenzgang hinsichtlich der Dynamik und das Off-Centre Lenkungsziehen reduzieren.

4.3.4 Korrelationsanalyse zwischen den objektiven und subjektiven Daten

Hauptziel einer Fahrzeugabstimmung ist es, den Geschmack des Kunden über die Pkw-Eigenschaften zu treffen. Dafür ist es wichtig im ersten Schritt herauszufinden, welche objektiven Maße den subjektiven Sinn beschreiben. Wenn im zweiten Schritt bekannt ist, welche subjektive Wahrnehmungsintensität zu einem positiven Urteil führt, ist es möglich, auf objektive Zielbereiche rückzurechnen. Dieses Prinzip illustriert die Abbildung Abb. 4.17. Nach den Voruntersuchungen, die innerhalb der beiden Evaluierungsdatenmengen getrennt voneinander ablaufen, soll nun die

Brücke zwischen ihnen geschlagen werden. Anhand zweier Beispiele wird das Vorgehen, das in den weiteren Kapiteln Anwendung findet, erläutert.

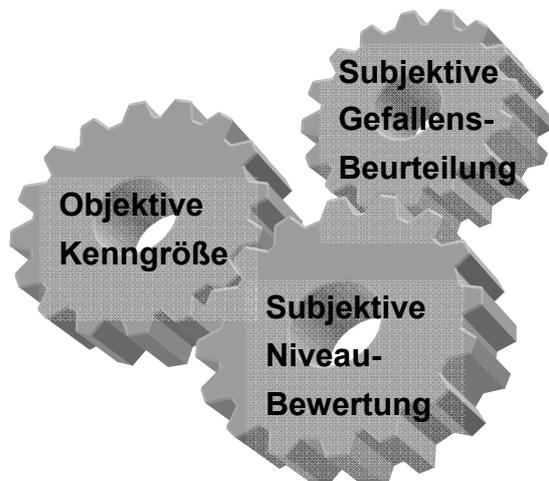


Abb. 4.17: „Verzahnung“ von objektiven Kennwerten und subjektiven Niveau- bzw. Gefallensnoten.

Die Abbildung Abb. 4.18 visualisiert den Schlüsselansatz der subjektiv-objektiv Analysen, exemplarisch mit subjektiven Niveau-Noten der Fachleute über das *Anlenkmoment* auf der Landstraße gegenüber dem *Lenkmoment* (1 m/s^2) aus Lenkzuziehen sowie über das *Parkiermoment* im Stadtverkehr im Zusammenhang mit dem objektiven *Parkiermoment*.

Hierbei repräsentiert ein z-Skalenwert von „-2,5“ auf der Ordinate, Abb. 4.18 (oben), ein subjektiv niedriges, „+2,5“ ein hohes Niveau. Die Originalskala in Abb. 4.18 (unten), reicht von „1“, niedrig, bis „6“, hoch. Die individuellen Noten spannen einen bestimmten Bereich über jede objektive Stufe. Die gefüllten schwarzen Punkte indizieren die gemittelten Noten. Zusätzlich ist damit zu erkennen, daß auf Basis der Mittelwerte effektiv zwei Wahrnehmungsstufen des *Anlenkmoments* „leichtgängig“ bis 2,9 Nm und darüber „schwergängig“ vorliegen. Dem gegenüber wird das *Parkiermoment* grob in drei Staffeln eingestuft, wobei die Niveau-Bewertungen, Abb. 4.18 (unten), aus dem Z-Raum auf die Originalskala rücktransformiert abgebildet sind.

Auf der Abszisse sind die objektiven Meßwerte aufgetragen. Die Korrelationen zum subjektiven Fahrereindruck werden teilautomatisiert für technisch-plausible Kombinationen im betreffenden Betriebspunkt gerechnet; so wird das subjektive *Parkiermoment* z.B. nicht mit dem Lenkmomentniveau höherer Geschwindigkeit in Zusammenhang gebracht. Die Geraden in den Diagrammen visualisieren die Regression zwischen den abhängigen Mittelwertsnoten und unabhängigen Parametern, deren Grad der Verknüpfung durch den Korrelationskoeffizienten angegeben ist. Als Mindestwert zur Berücksichtigung eines potentiellen Zusammenhanges ist

$R > 0,7$ für eine hohe Korrelation¹⁹⁰ definiert. Zudem wird der Ansatz der intra-individuellen Korrelationen für das betreffende Kriterium herausgestellt, indem die Einzelnoten integriert und die Individualkorrelationskoeffizienten im Diagrammtitel aufgezählt sind, siehe Abb. 4.18. Infolge der statistischen Voruntersuchungen und abhängig von deren Ergebnissen resultieren die signifikanten Koeffizienten entweder aus einem nichtparametrischen oder parametrischen Korrelationsverfahren.

Aus der Diagrammtitelliste tritt hervor, daß hohe bis sehr hohe individuelle Werte erreicht werden, d.h. zum Teil exzellente Bewerter am Versuch teilnehmen. Gleichwohl ergibt die Bildung der Mittelwerte daraus am Beispiel des *Anlenkmoments* $R = 0,55$, also mit $R > 0,5$ eine Korrelation mittlerer Stärke. Einige wenige Probanden weisen negative Koeffizienten auf. Vermutlich nutzen sie die Skala mit umgekehrten Polen. Würden die Koeffizienten als Beträge verrechnet, ergäbe sich der Mittelwert zu $R = 0,69$. Die Standardabweichung „Std“ indiziert, wie weit der Einzelne innerhalb der Testgruppe streut, d.h. wie offensichtlich, wie konsistent die Wahrnehmung ist. Hierfür wird als Gütekriterium in der vorliegenden Arbeit die Differenz zwischen dem gemittelten Einzelkorrelationskoeffizienten und $R = 0,5$ (Grenzwert für das Vorliegen einer zumindest mittleren Korrelation) herangezogen, am Beispiel des *Anlenkmoments* also: $R = 0,55 - 0,5 = 0,05$. Die Standardabweichung beträgt jedoch $0,53$ und ist somit größer als $0,05$, d.h. das Kriterium für die Konsistenz wird nicht erfüllt. Zwar liegt ein starker Zusammenhang der Mittelwertsnoten mit dem objektiven Maß und so Indizien für eine Verknüpfung der beiden vor. Dessen ungeachtet erscheinen sie durch die zu große Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert nicht konsistent genug und können so noch nicht als abgesichert, validiert betrachtet werden. Ein hoher, gemittelter Einzelkorrelationskoeffizient in Kombination mit einer kleinen Abweichung zeigt eine starke Verknüpfung zwischen den subjektiv-objektiv Evaluationen an. Der Vergleich zwischen den gemittelten Individualkorrelationskoeffizienten zu den Korrelationskoeffizienten von Mittelwertsnoten und Parametern weist auf Rangreihenfolgeeffekte hin, die z.B. im *Anlenkmoment* eine größere Geltung besitzen als im *Parkiermoment*. Im folgenden werden die Reihenfolgeeffekte vernachlässigt und die Mittelwertkorrelationen beachtet, falls sie $R > 0,7$ und der gemittelte Individualkoeffizient $> 0,5$ betragen sowie das Konsistenz-Kriterium der Standardabweichung (gemittelter Einzelkorrelationskoeffizient $- 0,5 >$ Standardabweichung) gilt.

¹⁹⁰ Zöfel 2003

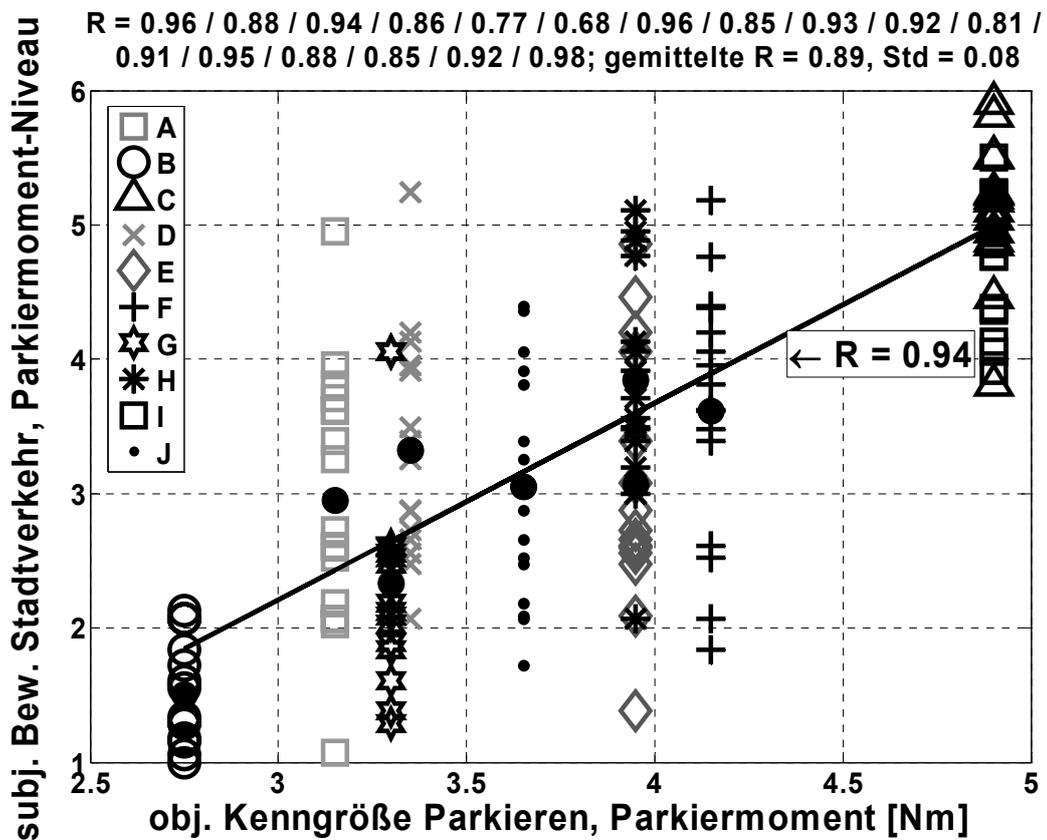
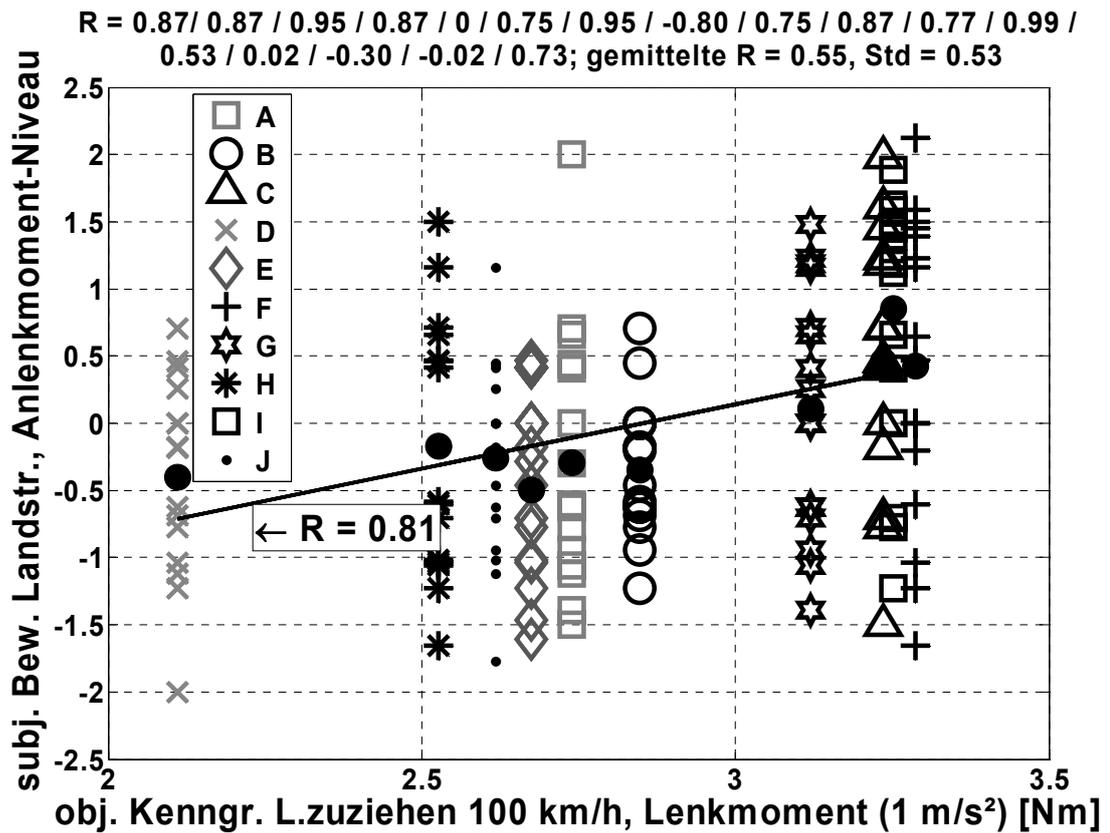


Abb. 4.18: Korrelationsplots der subjektiven Experten Niveau-Bewertungen des *Anlenkmoments* (exemplarisch ausgedrückt mit z-Noten) und *Parkiermoments* in Bezug auf objektive Kennwerte aus Lenkungszuziehen und Parkieren.

Zur „Verzahnung“ des Gefallens im Sinne eines Lenkcharakters bzw. Lenkdis-komforts mit den objektiven Maßen kommt folgender Ansatz zum Tragen: Unter der Maßgabe einer subjektiven Beurteilungsgrenze, die gerade noch als positiv im Gefallen erachtet wird, kann die korrespondierende Niveau-Stufe ausgelesen werden. Das bedeutet am Beispiel des *Parkiermoment* Gefallen-Niveau Diagramms, siehe Abb. 4.19: Sei eine Gefallensnote „5“, „mittelmäßig“, als Toleranzgrenze definiert, so liefert der Schnittpunkt mit der Regressionsgeraden eine Niveaubewertung „4“. Diese kann wiederum in das Subjektiv-Objektiv-Diagramm, vergleiche Abb. 4.18 (unten), übertragen werden, so daß der Schnittpunkt mit der entsprechenden Regressionsgeraden einen projizierten Wert auf der objektiven Abszisse ergibt: ca. 4,2 Nm. Dieser Wert entspricht also einer Forderung nach einem maximalen, objektiven *Parkiermoment* von 4,2 Nm, damit es subjektiv wenigstens als mittelmäßig angesehen wird.

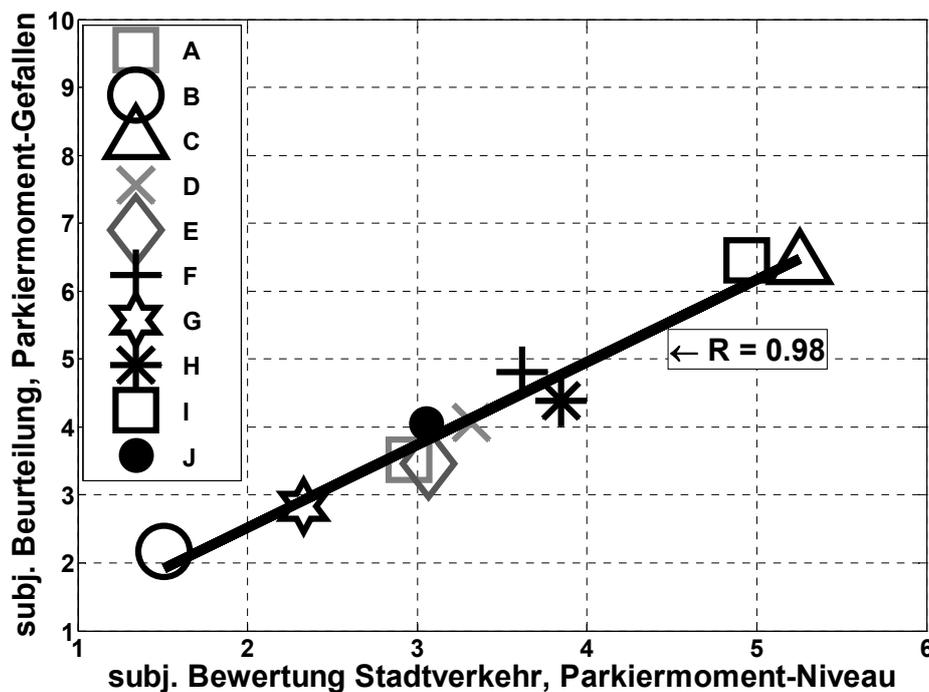


Abb. 4.19: Korrelationsplots der subjektiven, gemittelten Experten-Gefallensbeurteilungen des Parkiermoments gegenüber der subjektiven Niveau-Bewertung im Stadtverkehr.

Die vorangegangenen Überlegungen können nun getrennt für Normal- und Expertenfahrer und deren Evaluationen bzw. die betreffenden objektiven Parameter durchgeführt werden; die Rohdaten werden demzufolge „gefiltert“ bis die Hauptfaktoren für die Korrelationsanalyse verbleiben. In den folgenden Unterkapiteln werden die resultierenden Hauptkorrelationen aufgeführt. Abschließend sei das

Auswerteverfahren, das in der vorliegenden Arbeit durchgängig Anwendung findet, nochmals in einem Flußdiagramm illustriert (Abb. 4.20):

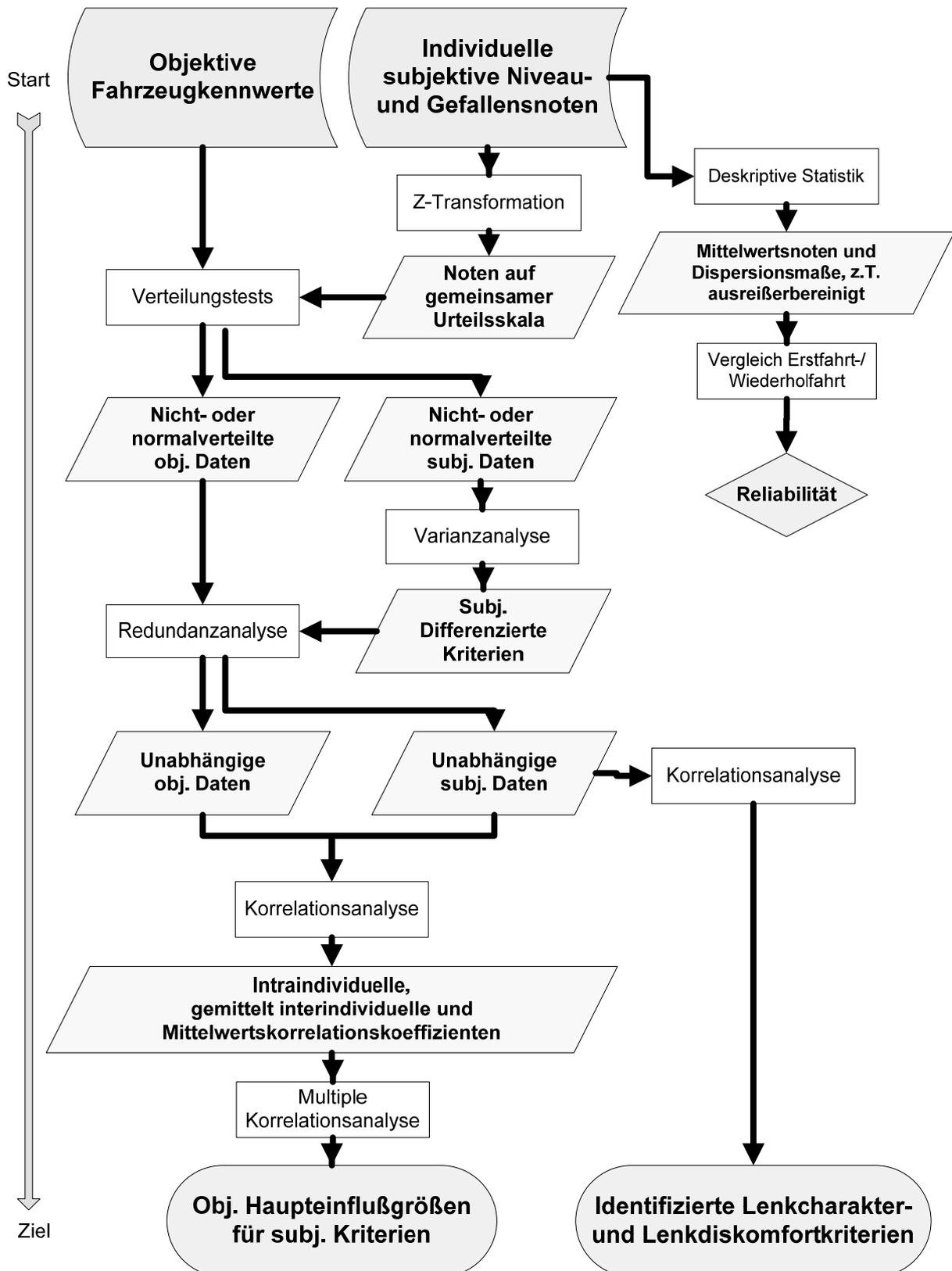


Abb. 4.20: Flußdiagramm der objektiven und subjektiven Datenauswertung zur Korrelationsanalyse.

4.4 Resultierende Einzelverknüpfungen zwischen subjektiver Bewertung und objektiver Kenngröße

Die Korrelationsanalyse verfolgt als Ziel, den einzelnen Evaluationskriterien valide Parameter zuzuordnen. Die sich aus den statistischen Voruntersuchungen mittels der Varianzanalyse als signifikant verschieden erweisenden Daten und die als redundant identifizierten und zusammengefaßten Kriterien werden mit den betreffenden objektiven Kennwerten korreliert. Die Ergebnisse sind mit einem Richtungsindikator für die subjektiven Gefallen-Niveau Beurteilungen versehen, um auf die Optimierungsrichtung der objektiven Kenngröße hinzuweisen, vergleiche im Folgenden z.B. Tab. 4.11: Der Pfeil „↑“ bedeutet „je größer das objektive Maß, desto besser das Gefallen und „↓“, „je kleiner das objektive Maß, desto besser“. Die darüber hinaus als konsistent festgestellten Individualkorrelationen sind in den Ergebnistabellen grau schattiert dargestellt.

4.4.1 Im Stadtverkehr

Die wahrgenommene Höhe des Lenkmoments im Stadtverkehr, sowohl in einem Hin- als auch Rücklenkvorgang, kann in Zusammenhang gebracht werden mit dem gemessenen *Lenkmoment* bei 1 m/s^2 und 30 km/h , siehe Tab. 4.11, wobei diese Kenngröße im linearen Bereich stellvertretend für die Werte bei den anderen Querbeschleunigungen und Fahrgeschwindigkeiten steht. Die subjektive „Verklebtheit“ lässt sich mit dem Ordinatenabschnitt aus dem Weave Test mit 50 km/h ausdrücken, dem sog. *Reibungsmaß*. Im Zuge der niedrigen Fahrgeschwindigkeiten im Stadtverkehr hat die *Anzahl der Lenkradumdrehungen von Anschlag zu Anschlag* einen signifikanten Einfluß sowohl auf die Bewertung des *Lenkwinkelbedarfs/Lenkübersetzung* im Fahren als auch den expliziten Umdrehungen während des Parkierens. Der subjektive Lenkungsrücklauf ist verknüpft mit dem *Restlenkradwinkel nach 2s* in Bezug auf den Ausgangswinkel des Abbiegemanövers mit 4 m/s^2 . Da das objektive Wankverhalten vergleichsweise unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit ist, kann dessen subjektive Einschätzung mit dem Verstärkungsverlauf aus dem Frequenzgang abgedeckt werden. Das *Parkiermoment* wird für beide Testpersonengruppen konsistent mit sehr hohen Koeffizienten durch das entsprechende objektive Maß beschrieben.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, daß alle Kriterien im Stadtverkehr objektiv ausformuliert werden können. Für die kleine Vergleichsgruppe der Normalfahrer lässt sich lediglich ableiten, daß das *Parkiermoment* der Aspekt von überragender Bedeutung im Stadtverkehr ist.

| subj. Kriterium, Stadtverkehr | | R | obj. Kenngröße | Manöver |
|----------------------------------|---|-------|--|----------------------------|
| Parkiermoment | ↓ | 0.94 | Parkiermoment | |
| Parkierumdrehungen | ↓ | 0.93 | Anz. d. Umdr. von Anschlag zu Anschlag | Parkieren |
| Lenkwinkelbed./ -übersetzung | ↓ | 0.83 | | |
| Lenkungsrücklauf | ↑ | -0.92 | bez. Lenkradwinkel 2s (4 m/s ²) | Lenkungsrücklauf |
| Anlenkmoment/ Haltemoment | ↓ | 0.85 | Lenkmoment (1 m/s ²) | Lenkungszuziehen 30km/h |
| Lenkungsrücklauf, Lenkmoment | ↓ | 0.73 | | |
| Reibung | ↓ | 0.7 | Reibungsmaß | Weave 50km/h |
| Wankreaktion | ↓ | 0.73 | Wankwinkel Verstärkungsfaktor < 0.8 Hz | Frequenzgang |

Tab. 4.11: Zusammenstellung der subjektiv-objektiv Korrelationen der Fachleute im Stadtverkehr mit Richtungsanzeige der Gefallen-Niveau-Evaluierung, Korrelationskoeffizienten aus den Mittelwertsnoten, Kenngrößen und Manöverangaben.

4.4.2 Auf der Landstraße

Die Landstraßenfahrt liefert ebenso Hinweise auf das *Anlenkmoment* (1 m/s²) im betreffenden Geschwindigkeitsbereich als Kenngröße zur Beschreibung des Lenkmomentniveaus, siehe Tab. 4.12. Der *Momentenverlauf* im Übergang zwischen An- und Weiterlenken wird durch den mehr oder weniger „stetigen“ Anstieg des Handmoments im On-Centre Bereich beeinflusst: Ist die *Differenz* zwischen dem *Lenkmomentenbetrag* bei 0,5 und dem bei 1 m/s² zu groß, wird der Verlauf als eher „eckig“ empfunden. Die subjektive *Reibung* lässt sich nicht nur durch den Ordinatenabschnitt wie im Stadtverkehr, sondern auch durch den Abszissenabschnitt, dem *Restwinkel*, aus Weave bei 100 km/h ausdrücken. Der Anstieg des Lenkmoments im Weiterlenkbereich, d.h. die Rückmeldung der Querbeschleunigung über das Handmoment, ist nicht nur durch den physikalischen Gradienten, z.B. zwischen 1 und 4 m/s², abgebildet, sondern auch durch das *Lenkmoment* (4 m/s²), weil die Probanden offenbar Momentenbeträge und weniger Gradienten bewerten.

Bemerkenswert ist, daß weder die Position, d.h. die erreichte *Querbeschleunigung*, bei der der *Lenkmoment-Rückgang* vor dem Grenzbereich eintritt, noch der *Lenkwinkelbedarf* im kleinen On-Centre Lenkwinkelbereich mit den korrespondierenden objektiven Maßen hoch korrelierend ausfallen (R < 0,7 sind nicht in den

Tabellen enthalten). Die kleinen Differenzierungen der auf dem Markt erhältlichen Fahrzeuge in diesen Kriterien werden von den Probanden nicht exakt wiedergegeben. Die *Lenkpräzision* in Bezug auf die Gierreaktion der Fahrzeuge ist im On-Centre Bereich mit der Linearität durch das *Verhältnis der Gierratensteigung um 0° Lenkwinkel* und dem *außermittigen Zweig* verkettet. Im Hinblick auf die Hysterese des Lenkmoments in Abhängigkeit der Querbewegung korreliert der Abszissenabschnitt, was mit den Erkenntnissen von Harnett¹⁹¹ übereinstimmt.

| subj. Kriterium, Landstraße | | R | obj. Kenngröße | Manöver |
|-----------------------------------|---|-------|--|-----------------------------|
| Anlenkmoment/ Haltemoment | ↓ | 0.85 | Lenkmoment (1 m/s ²) | Lenkungszuziehen 70km/h |
| | | 0.81 | | Lenkungszuziehen 100km/h |
| Momentenverlauf | ↑ | -0.84 | L.moment (0,5 m/s ²) - L.moment (1 m/s ²) | Lenkungszuziehen 100km/h |
| Lenkmomentgradient | U | 0.71 | Lenkmoment (4 m/s ²) | Lenkungszuziehen 70km/h |
| | | 0.84 | | Lenkungszuziehen 100km/h |
| Lenkmoment- Rückgang | ↑ | | Querbew. (M _{H,max}), max. Querbew. | Lenkungszuziehen 100km/h |
| Reibung | | 0.80 | Restwinkel | |
| Lenkpräzision/ Fahrbahnkontakt | ↑ | 0.75 | Lenkungsansprechverhältnis | Weave 100km/h |
| | | 0.79 | Restquerbewegung (MH vs. ay) | |
| Lenkwinkelbedarf/ -übersetzung | | | Mittlenlenkübersetzung | Stationäre Kreisfahrt |
| Eigenlenkverhalten | ↓ | 0.94 | Lenkwinkelgradient (6 m/s ²) | |
| Nachlenken | ↓ | -0.73 | Gierrate Verst.faktor (0.2 Hz) - (1 Hz) | ISO-Frequenzgang |
| Wankreaktion | ↓ | 0.77 | Wankwinkel Verst.faktor < 0.8 Hz | |

Tab. 4.12: Zusammenstellung der subjektiv-objektiv Korrelationen der Fachleute auf der Landstraße mit Richtungsanzeige der Gefallen-Niveau-Evaluierung, Korrelationskoeffizienten aus den Mittelwertsnoten, Kenngrößen und Manöverangaben.

Die *Steigung der Gieramplitudenübertragungsfunktion* ausgehend vom quasi-stationären Wert bis zur Resonanzfrequenz ist ein Maß für die Gierdämpfung und

¹⁹¹ Harnett 2002

ist verknüpft mit dem *Nachlenk-* bzw. *Korrekturbedarf*. Nicht der konstruktive Parameter des *Eigenlenkgradienten* bildet den subjektiven Eigenlenkeindruck ab, sondern die Steigung des Lenkradwinkelverlaufs über der Querb beschleunigung im Stützpunkt 6 m/s^2 (*Lenkwinkelgradient (6 m/s²)*), da die Probanden die Veränderung des Lenkradwinkels im Übergangsbereich detektieren. Auch bei mittlerer Fahrgeschwindigkeit ist die *Verstärkung* der *Wankübertragung* im Normalfrequenzbereich ein Maß für das subjektive Wankverhalten. Es ist auch ausschließlich das Wankverhalten, das von den Normalfahrern ebenfalls sehr hoch korrelierend validiert werden kann. Der klassische *Wankwinkelgradient* aus der Stationären Kreisfahrt korreliert nicht hoch, da Wanken einen subjektiv dynamischeren Vorgang repräsentiert bzw. offenbar in Bezug auf die Lenkeingabe wahrgenommen wird. Als Auffälligkeit ist festzuhalten, daß viele objektive Giergrößen mit der subjektiven Einschätzung des Wankens korrelieren. Dieser Sachverhalt kann an dieser Stelle nicht weiter hinterfragt werden.

4.4.3 Auf der Autobahn

Auf der Autobahn werden die Kriterien *Mittenzentrierung* und *Lenkungsansprechen* in zwei Geschwindigkeitsstufen bewertet, wobei die subjektive Redundanzanalyse ergibt, daß die Evaluation unabhängig von der Fahrgeschwindigkeit ist. Die Evaluation beschränkt sich für die beiden Aspekte und den *Geradeauslauf* sowie die *Reibung* und das *Spiel* auf die Spurhaltung und den On-Centre Bereich. Die übrigen Merkmale werden zudem während den Spurwechseln bewertet und beurteilt. Im On-Centre Bereich stehen die Mittensteigungen des Lenkmoments über dem Lenkradwinkel und der Querb beschleunigung, die *Lenkungssteifigkeit* und der *Lenkmomentgradient*, ähnlich eng in Zusammenhang mit der *Mittenzentrierung*, die *Reibung* wiederum mit der *Hysteresehöhe* und *-breite* (Tab. 4.13). In ähnlicher Weise wird das subjektive *Spiel* mit dem *Phasenverzug* des *Lenkradwinkels* zum *Lenkmoment* assoziiert; je kleiner dieser und damit die Lenkmomenthysterese, desto „loser“ das Empfinden des Handmoments.

Die *Restquerbeschleunigung* der Weave-Hysterese in Bezug auf das Lenkmoment ist gleichbedeutend mit den *Restgiergeschwindigkeiten* und den entsprechenden Phasenverzügen und korreliert sowohl mit der *Lenkpräzision*, als auch mit dem *Geradeauslauf*. Das bedeutet, daß bei kleiner Restgröße und gleichzeitig fehlendem Lenkmoment die „Regelungsgüte“ des Fahrers „nervöser“ ausfällt. Eine ebenso verwandte Kenngröße, der *Restwinkel* als Funktion der *Querb beschleunigung*, ist laut der objektiven Untersuchung von Salaani et al. mit „vernünftigem“

Wert verantwortlich für einen guten *Geradeauslauf*¹⁹²; die Korrelation kann hier bestätigt werden. Die *Restquerbeschleunigung* ist nach Norman die sog. „Returnability“ und sollte kleiner 0,07g ausfallen, weil der Fahrer in diesem Betriebspunkt kein Lenkmoment spürt und sich bei größeren *Restbeschleunigungen* zusätzlich in einem dynamischeren Betriebszustand befindet¹⁹³. Hier bewegen sich die Fahrzeuge mit modernen Lenkanlagen im Weave bei 100 und 150 km/h in dieser Kenngröße zwischen 0,12 und 0,21g; die Probanden fordern nun aber, der Korrelation zufolge, höhere Werte, was auf das damit einhergehende größere Rückstellpotential zurückzuführen ist.

Die subjektive Redundanzanalyse weist auch darauf hin, daß die *Lenkpräzision* mit dem *Lenkungsansprechen* in Verbindung steht. Die subjektiv-objektiv Korrelationen berücksichtigend bedeutet das, daß das Linearitätsmaß als *Differenz* des *Lenkansprechens*, also der Gierverstärkung bei 2 m/s^2 , zur eigentlichen *Gierverstärkung* (4 m/s^2) in Beziehung mit der *Lenkpräzision* steht: je linearer das Fahrzeugverhalten, desto präziser. Die singular über der Fahrgeschwindigkeit analysierte *Gierverstärkung* ist ein Maß für den *Lenkwinkelbedarf*, weil die Testpersonen die erzielte Gierreaktion der Fahrzeuge pro eingegebenem Lenkwinkel dafür in Betracht ziehen. Die Mittensteigung der Querbesehleunigung als Funktion des Lenkradwinkels, die *Lenkempfindlichkeit*, und somit der Querbesehleunigungsaufbau bezieht sich auf die subjektiv wahrgenommene Fahrzeugreaktion aufgrund kleiner Lenkwinkleingaben.

Die *Querbesehleunigungsverstärkung* nimmt mit der Frequenz ab, was für die *Geradeausfahrt* bei schnellerer Fahrgeschwindigkeit sogar hilfreich ist, vergleiche Tab. 4.13. Das stellt damit eine strengere Forderung als die nach einem konstanten Verlauf bis ca. 1 Hz ¹⁹⁴ dar, da dadurch das Fahrzeug mit schnelleren Lenkeingaben stumpfer und damit „gutmütiger“, berechenbarer wird. Hinsichtlich der Lenkmomentbewertung des *Momentenverlaufs* und *Haltemoments* im betreffenden, zügigeren Fahrgeschwindigkeitsbereich kommen wiederum die objektiven On-Centre *Lenkmomentbeträge* aus dem Lenkungsziehen zum tragen, wobei die Lenkunterstützungsparametrierung der getesteten Fahrzeuge ab ca. 100 km/h überwiegend unveränderlich ist und so die ermittelten Kennwerte aus dem Manöver bei 100 km/h stellvertretend in der Korrelationsanalyse genutzt werden. Das durch die *Übertragungsfunktion* des *Wankwinkels* beschriebene Fahrzeugwankverhalten äußert sich auch subjektiv in gleicher Tendenz.

¹⁹² Salaani et al. 2004

¹⁹³ Norman 1984

¹⁹⁴ Zomotor 1991

| subj. Kriterium, Autobahn | | R | obj. Kenngröße | Manöver |
|-----------------------------------|----------|-------|--|------------------|
| Mittenzentrierung | | 0.86 | Lenkmomentgradient | |
| | | 0.7 | Lenkungssteifigkeit | |
| Reibung | | 0.83 | Restwinkel | |
| | | 0.81 | Reibungsmaß | |
| Spiel | ↓ | -0.71 | Lenkmoment Phasenvoreilung | Weave |
| Lenkpräzision | ↑ | -0.72 | Gierverst. (100 km/h) - L.ansprechen | |
| | | 0.77 | Restquerbeschleunigung (MH vs. ay) | |
| Lenkungsansprechen | ↑ | 0.78 | Lenkempfindlichkeit | |
| Lenkwinkelbedarf/ -übersetzung | U | -0.85 | Gierverstärkung (v) | Gierverstärkung |
| Momentenverlauf | ↑ | 0.72 | L.moment (0.5 m/s ²) - L.moment (1 m/s ²) | Lenkungsziehen |
| Haltemoment | | 0.75 | Lenkmoment (1 m/s ²) | |
| Geradeauslauf | ↑ | 0.77 | Restquerbeschleunigung (MH vs. ay) | Weave |
| | | 0.81 | Querbeschl. Verst.faktor (0.2 Hz) - (0.6 Hz) | ISO-Frequenzgang |
| Wankreaktion | ↓ | 0.79 | Wankwinkel Verstärkungsfaktor < 0.5 Hz | ISO-Frequenzgang |

Tab. 4.13: Zusammenstellung der subjektiv-objektiv Korrelationen der Fachleute auf dem Ovalrundkurs mit Richtungsanzeige der Gefallen-Niveau-Evaluierung, Korrelationskoeffizienten aus den Mittelwertsnoten, Kenngrößen und Manöverangaben.

Auch die Autobahnfahrt zeigt, daß die Normalfahrer, im Gegensatz zum *Lenkwinkelbedarf* und der *Mittenzentrierung*, sensitiv gegenüber dem Wankverhalten sind, das sie mit dem *Wankübertragungsverlauf* aus dem Frequenzgang ähnlich hoch wie die Fachleute validieren können.

4.4.4 Im ISO-Spurwechsel

Auch im Ausweichmanöver ISO-Spurwechsel können Korrelationen im korrespondierenden Geschwindigkeitsbereich zwischen den subjektiven und objektiven *Anlenkmomenten* aufgestellt werden. Da mit dem Manöver dynamischere Lenkfrequenzen einhergehen bzw. der gesamte Querbeschleunigungsbereich durch die

Fahrer abgedeckt wird, resultieren hier Kenngrößen, die bisher noch nicht aufgetreten sind. Im Zuge der größeren, anliegenden Lenkwinkel und erzielten Querbeschleunigungen bewerten die Probanden den *Lenkwinkelbedarf* z.B. als *Querbeschleunigungs-* bzw. *Giergeschwindigkeits-Verstärkungsfaktor* bei 7 m/s^2 , siehe Tab. 4.14. Die subjektive Redundanzanalyse indiziert einen Zusammenhang zwischen dem *Momentenverlauf* und der *Lenkpräzision*. Das schlägt sich auch in der subjektiv-objektiv Betrachtung nieder: Die *Phasengangwerte* des voreilenden *Lenkmoments* im interessierenden dynamischen Frequenzbereich bzw., im Zeitbereich ausgedrückt, die *Hystereseform* in den betreffenden Frequenzklassen, beeinflusst beide Aspekte.

Bemerkenswerterweise korreliert diese Kenngröße daneben mit dem Stabilitätseindruck und Sicherheitsempfinden, obschon das Schwimmverhalten der Fahrzeuge im eigentlichen Sinne für diesen Eindruck prägend und auch durch den *Schwimmwinkelgradienten* aus der Stationären Kreisfahrt, wie von Mitschke und Wallentowitz¹⁹⁵ gefordert, validiert ist. Der Umstand der Beeinflussung mehrerer verschiedener Eindrücke durch das Lenkmoment ist mit Hilfe eines modellbasiereten Ansatzes näher zu untersuchen.

| subj. Kriterium, ISO-Spurwechsel | | R | obj. Kenngröße | Manöver |
|-------------------------------------|---|-------|--|-----------------------|
| Anlenkmoment | | 0.81 | Lenkmoment (1 m/s ²) | Lenkungszuziehen |
| Einlenkwilligkeit/ Gierreaktion | ↑ | -0.79 | Lenkradwinkelgradient (6 m/s ²) | Stationäre Kreisfahrt |
| Stabilität/ Sicherheitsgefühl | ↑ | -0.81 | Schwimmwinkelgradient | |
| Lenkwinkelbedarf/ -übersetzung | | -0.82 | Querbeschleunigung Verstärkungsfaktor (7 m/s ²) | Lenkwinkelsprung |
| Wankreaktion/ Diagonales Tauchen | ↓ | 0.73 | Wankwinkel Überschwingweite (7 m/s ²) | |
| Lenkpräzision/ Momentenverlauf | ↑ | 0.80 | Lenkmoment Phasengang < 1 Hz | Frequenzgang |

Tab. 4.14: Zusammenstellung der subjektiv-objektiv Korrelationen der Fachleute in den ISO-Spurwechseln mit Richtungsanzeige der Gefallen-Niveau-Evaluierung, Korrelationskoeffizienten aus den Mittelwertsnoten, Kenngrößen und Manöverangaben.

Die *Einlenkwilligkeit/Gierreaktion* in die Spurwechselgassen äußert sich für die Testpersonen dynamisch in erster Linie durch ihre aufzubringende Lenkradwinkel-

¹⁹⁵ Mitschke / Wallentowitz 2004

eingabe und den Korrekturbedarf im Übergangsbereich und somit dem *Überschwinger* in der *Gierrate* bzw. der *Querbesehleunigung*. Sowohl die Normal- als auch Expertenfahrer validieren die *Wankübertragungsfunktion* an den interessierenden Frequenzstellen aus dem Frequenzgang. Die Normalfahrer sind allerdings nicht in der Lage, ihr weiteres, variantes Kriterium *Anlenkmoment* in einen starken Zusammenhang mit den objektiven Werten zu bringen: die Bewertung ist zu inkonsistent, da die Fahraufgabe die Teilnehmer zu sehr herausfordert.

Der Überblick der Fahrprofile zeigt, daß die Normalfahrer zwar nicht eingesetzt werden können, um objektive Kenngrößen, außer für das Wankverhalten, sicher zu validieren. Da sie jedoch subjektiv die gleichen Evaluationstendenzen aufweisen, sind die Experten für sie eine valide Referenzgruppe. Die vorgenannten Ergebnisse repräsentieren die stärksten, plausibelsten Korrelationen; dessen ungeachtet existieren weitere Zusammenhänge, die ebenfalls hohe Koeffizienten zeigen, wie z.B. der Lenkwinkelsprung *TB-Wert* oder auch der Lenkungsziehen *Lenkmomentgradient* im Weiterlenkbereich mit dem Kriterium *Stabilität/Sicherheitsgefühl*. Das lässt sich für die übrigen Fahrprofile und anderen Kriterien in ähnlicher Form fortsetzen.

Die Miteinbeziehung der Individualkorrelationen in der Analyse weist darauf hin, daß die einzelnen Zusammenhänge weniger konsistent innerhalb der Probandengruppen sind bzw. verschiedene subjektive Evaluationskompetenzen vorliegen. Im Zuge der modellbasierten Untersuchungen wird auf die Konsistenzfrage nochmals eingegangen. Im folgenden Kapitel finden die vorgenannten Einzelkorrelationen Eingang in eine multiple Regressionsanalyse, um die unabhängigen Hauptvariablen für die abhängigen Evaluationen zu identifizieren.

4.5 Multivariate Betrachtung der Zusammenhänge zwischen subjektiver Bewertung und objektiven Kenngrößen

Die vorherigen Kapitel führen für die varianten Bewertungskriterien korrelierende Einzelhauptkenngrößen auf. Daneben existieren für einzelne Kriterien weitere, nicht-redundante, hochkorrelierende objektive Parameter. Mit Hilfe von multiplen Regressionsanalysen werden diese nun zusammengefaßt betrachtet und schrittweise mit dem Ziel ausgeschlossen, für den betreffenden Zusammenhang die gewichtigste(n) Größe(n) zu finden.

Die Tabelle Tab. 4.15 z.B. enthält für den Stadtverkehr die Aspekte, die durch mehrere unabhängige Variablen erklärt werden können. Die vorangestellte Aufgabe der objektiven Redundanzanalyse ist es, diese Unabhängigkeit sicherzustellen.

Am Beispiel des subjektiven *Anlenkmoments/Haltemoments* bedeutet das, daß es durch die *Lenkmomentbeträge* bei 1 und 4 m/s^2 mit Geschwindigkeiten von 30 und 50 km/h erklärt werden kann. Nach der schrittweisen Reduktion (siehe u.U. die statistischen Grundlagen aus Kap. 2.4.3) verbleiben die *Lenkmomentwerte* bei 1 m/s^2 und den beiden Fahrgeschwindigkeitsstufen zur ausreichenden, subjektiven Varianzaufklärung. Das unkorrigierte bzw. korrigierte Bestimmtheitsmaß für die verbliebenen Variablen betragen $R^2 = 0,83$ und $R^2_{\text{korr}} = 0,75$. Es ist demzufolge hinreichend, diese beiden Werte zur objektiven Beschreibung des subjektiven Lenkmomentniveaus bei langsamer Fahrt zu messen. Der subjektive *Lenkungsrücklauf* nach einem Abbiegevorgang und das *Lenkmoment*, das aufzuwenden ist, falls die Lenkung nicht selbsttätig bis zur Geradeausstellung zurückstellt, können objektiv durch den *Restlenkwinkel* nach Loslassen des Lenkrads und den stationären *Lenkmomentwert* während des Abbiegens ausgedrückt werden.

| subj. Kriterium | obj. Kenngrößen | |
|--|---|--|
| R^2 der multiplen Regression | Gruppe der unabhängigen Eingangsvariablen in der multiplen Regression | |
| Anlenkmoment/ Haltemoment | M_H (1 m/s^2), LZ 30 km/h | M_H (4 m/s^2), LZ 30 km/h |
| $R^2 = 0,83$ $R^2_{\text{korr}} = 0,75$ | M_H (1 m/s^2), LZ 50 km/h | M_H (4 m/s^2), LZ 50 km/h |
| Lenkungsrücklauf | bez. Lenkradwinkel 2 s (4 m/s^2), LR | Restwinkel, WV 50 km/h |
| $R^2 = 0,85$ $R^2_{\text{korr}} = 0,81$ | | |
| Lenkungsrücklauf- Lenkmoment | M_H (1 m/s^2), LZ 30 km/h | $M_{H, \text{stat}}$ (1 m/s^2), LR |
| $R^2 = 0,72$ $R^2_{\text{korr}} = 0,60$ | | |

Tab. 4.15: Zusammenstellung der multiplen subjektiv-objektiv Korrelationen der Fachleute im Stadtverkehr mit den unkorrigierten und korrigierten Bestimmtheitsmaßen nach der schrittweisen Regression; die verbliebenen Kenngrößen sind markiert.

Im Geschwindigkeitsbereich der Landstraßenfahrt ist wiederum der *Lenkmomentbetrag* bei einer Querbeschleunigung von 1 m/s^2 ausschlaggebend für die subjektive Einschätzung über die Höhe des *Lenkmoments*, Tab. 4.16. Wird dieser Kennwert bei 100 km/h aufgezeichnet, ist eine ausreichende objektive Beschreibung gewährleistet. In derselben Geschwindigkeitsstufe ist die *Differenz* im *Lenkmoment* des Mittenbereichs zwischen 0,5 und 1 m/s^2 ein Maß für den wahrgenommenen *Momentenverlauf*. Unterscheiden sich die beiden Momentenwerte deutlich, so wird der Verlauf als unharmonisch empfunden. Der *Lenkmomentwert*

bei 4 m/s^2 repräsentiert in seinem Betrag den Anstieg des Lenkmoments aus dem On-Centre- bis zum Übergangsbereich und kann deshalb auch den subjektiven *Lenkmomentengradienten* ausdrücken.

Die *Lenkpräzision* und der *Fahrbahnkontakt* werden zum Teil beeinflusst durch das Verhältnis aus der On- und Off-Centre Steigung der Gierrate über der Lenkradwinkeleingabe. Subjektiv geht *Lenkpräzision* verloren, wenn das Verhältnis kleiner 1, d.h. das *Ansprechverhältnis* nichtlinearer, ausfällt. Eine verwandte, redundante Kenngröße zur Beschreibung dieses Zustands wäre die *Differenz* aus der *Gierverstärkung* und dem *Lenkungsansprechen*.

| subj. Kriterium | obj. Kenngrößen | |
|---|---|--|
| R^2 der multiplen Regression | Gruppe der unabhängigen Eingangsvariablen in der multiplen Regression | |
| Anlenkmoment/ Haltemoment | M_H (4 m/s^2), LZ 70 km/h | |
| $R^2 = 0,66$ $R^2 \text{ korr} = 0,57$ | M_H (1 m/s^2), LZ 100 km/h | M_H (4 m/s^2), LZ 100 km/h |
| Momentenverlauf | M_H ($0,5 - 1 \text{ m/s}^2$), LZ 70 km/h | Anlenkgrad./Weiterlenkgr., LZ 70 km/h |
| $R^2 = 0,70$ $R^2 \text{ korr} = 0,62$ | M_H ($0,5 - 1 \text{ m/s}^2$), LZ 100 km/h | Anlenkgrad./Weiterlenkgr., LZ 100 km/h |
| Lenkmomentengradient | M_H (4 m/s^2), LZ 70 km/h | Weiterlenkgradient, LZ 70 km/h |
| $R^2 = 0,70$ $R^2 \text{ korr} = 0,62$ | M_H (4 m/s^2), LZ 100 km/h | Weiterlenkgradient, LZ 100 km/h |
| Lenkpräzision/ Fahrbahnkontakt | Lenkmomentgradient- Restquerbeschl., WV | Lenkungsansprech- verhältnis, WV |
| $R^2 = 0,51$ $R^2 \text{ korr} = 0,38$ | Schwimmwinkel (α_y) Ph.gang ($0,5 \text{ Hz}$), FG | Lenkwinkelgradient (6 m/s^2), SK |
| Nachlenken | Gierrate Überschwingw. (4 m/s^2), LS | |
| $R^2 = 0,69$ $R^2 \text{ korr} = 0,61$ | Gierrate Verst.faktor ($0,2 - 1 \text{ Hz}$), FG | Schwimmwinkel (α_y) Ph.gang ($0,5 \text{ Hz}$), FG |
| Eigenlenkverhalten | Lenkwinkelgradient (6 m/s^2), SK | Gierrate Verst.faktor ($0,2 - 1 \text{ Hz}$), FG |
| $R^2 = 0,88$ $R^2 \text{ korr} = 0,85$ | Gierrate Überschwingw. (4 m/s^2), LS | Querbeschleunigung Überschwingw. (7 m/s^2), LS |

Tab. 4.16: Zusammenstellung der multiplen subjektiv-objektiv Korrelationen der Fachleute auf der Landstraße mit den unkorrigierten und korrigierten Bestimmtheitsmaßen nach der schrittweisen Regression; die verbleibenden Kenngrößen sind markiert.

Insbesondere im Hinblick auf den *Fahrbahnkontakt* spielen weitere Aspekte zur Varianzaufklärung eine Rolle, wie z.B. kleinamplitudige, höherfrequente Anteile im

Lenkmoment, die hier allerdings nicht Untersuchungsgegenstand sind (und das Bestimmtheitsmaß erhöhen könnten). Der *Nachlenk-* bzw. *Korrekturbedarf* während und nach einer Kurvenfahrt ist hauptsächlich bestimmt durch das dynamische Überschwingverhalten der Gierreaktion, die entsprechend ihrer Ausprägung Lenkkorrekturen nach sich zieht, um den gewünschten Kurs zu halten. Das Eigenlenkverhalten der Fahrzeuge äußert sich den Fachleuten deutlich im Übergangsbereich, indem sie der Untersteuertendenz unterschiedlich stark durch das Stellen eines Lenkradwinkels begegnen. Der klassische *Eigenlenkgradient* stellt hierzu vielmehr eine konstruktive Größe dar.

Für die Autobahnfahrt und die dortige Einschätzung der *Mittenzentrierung* ist der objektive Anstieg des Lenkmoments nicht nur über dem Lenkradwinkel, sondern vielmehr über der Quereschleunigung im Mittenbereich ausschlaggebend (Tab. 4.17). Die Probanden ziehen die Fahrzeugreaktion in ihre Bewertung mit ein. Die Einschätzung der *Reibung* hängt von der *Lenkmomenthysteresehöhe* ab, die im Gegensatz zu den Gradienten wiederum über der Fahrgeschwindigkeit veränderlich ist. Deshalb ist die Lenkmomenthysterese bei beiden bzw. ggf. weiteren Geschwindigkeitsstufen zu bestimmen. Objektiv stoßen Salaani et al. auch auf diese Eigenschaft, indem sie das Lenkmoment messen, ab dem ein Fahrzeug reagiert; dieses Moment (Hysterese) sinkt mit erhöhter Fahrgeschwindigkeit¹⁹⁶.

Der *Momentenverlauf* kann erneut teilweise durch die *Lenkmomentdifferenz* im Anlenken und das *Haltemoment* über den *Betrag* bei 1 m/s^2 erklärt werden. Die Auslegung der *Lenkübersetzung* und damit des *Lenkwinkelbedarfs* äußert sich durch die Fahrzeugreaktion pro eingegebenem Lenkradwinkel bei der jeweiligen Fahrgeschwindigkeit, wobei das Hauptaugenmerk auf dem 100 km/h-Wert liegt. Ein unterschiedliches Hystereseverhalten des Lenkmoments gegenüber der Fahrzeugreaktion macht eine geringe oder hohe *Lenkpräzision* aus. Offenbar muß für eine hohe *Lenkpräzision* ein gewisses Lenkmoment vorliegen, um zielgenau die Lenkeingabe vornehmen zu können. Das *Lenkungsansprechen*, also die Fahrzeugreaktion im Kleinsignalbereich, wird in dem kleinen Lenkwinkelbereich durch den Anstieg der Quereschleunigung repräsentiert. Darüber hinaus ist eine lineare, also vorhersagbare, Fahrzeugreaktion über der Lenkeingabefrequenz verantwortlich für ein treues *Geradeauslaufempfinden*.

¹⁹⁶ Salaani et al. 2004

| subj. Kriterium | obj. Kenngrößen | | |
|---|---|--|---|
| R ² der multiplen Regression | Gruppe der unabhängigen Eingangsvariablen in der multiplen Regression | | |
| Mittenzentrierung | Lenkungssteifigkeit, WV 100 km/h | Lenkmomentgradient, WV 100 km/h | |
| R ² = 0,73 R ² korr = 0,66 | | | |
| Reibung | Restwinkel, WV 100 km/h | Reibungsmaß, WV 100 km/h | |
| R ² = 0,80 R ² korr = 0,71 | Restwinkel, WV 150 km/h | Reibungsmaß, WV 150 km/h | |
| Momentenverlauf | MH (0,5 - 1 m/s ²), LZ 100 km/h | MH (0,5 - 1 m/s ²), LZ 140 km/h | |
| R ² = 0,58 R ² korr = 0,4 | | | |
| Haltemoment | M _H (1 m/s ²), LZ 100 km/h | M _H (4 m/s ²), LZ 100 km/h | |
| R ² = 0,57 R ² korr = 0,46 | M _H (1 m/s ²), LZ 140 km/h | M _H (4 m/s ²), LZ 140 km/h | |
| Lenkübersetzung | Gierverstärkung (100 km/h), GV | Gierverstärkung (150 km/h), GV | |
| R ² = 0,73 R ² korr = 0,66 | Lenkungsansprechen, WV 100 km/h | Lenkungsansprechen, WV 150 km/h | |
| Lenkpräzision | GV (100 km/h) - L.ansprechen WV | Schwimmwinkel (ay) Ph.gang (0,5 Hz), FG | |
| R ² = 0,59 R ² korr = 0,49 | M _H grad.-Restquerb., WV 150 km/h | Lenkempfindlichkeitsv erh., WV 150 km/h | |
| Lenkungsansprechen | Lenkungsansprechen, WV 100 km/h | Lenkungsansprechen, WV 150 km/h | Lenkempfindlichkeit, WV 150 km/h |
| R ² = 0,61 R ² korr = 0,51 | Querb. Verstärk.faktor (0,2 Hz) - (0,6 Hz), FG | Gierrate Phasengang (0,5 Hz), FG | |
| Geradeauslauf | Querb. Verstärk.faktor (0,2 Hz) - (0,6 Hz), FG | Gierrate Phasengang (0,5 Hz), FG | Schwimmwin. Ph.gang (0,5 Hz), FG |
| R ² = 0,65 R ² korr = 0,56 | Lenkempfindlichkeitsv erh., WV 150 km/h | GV (100 km/h) - L.ansprechen WV | M _H grad.-Restquerb., WV 150 km/h |

Tab. 4.17: Zusammenstellung der multiplen subjektiv-objektiv Korrelationen der Fachleute auf der Autobahn mit den unkorrigierten und korrigierten Bestimmtheitsmaßen nach der schrittweisen Regression; die verbliebenen Kenngrößen sind markiert.

Im ISO-Spurwechsel, vergleiche Tab. 4.18, ist ebenfalls das On-Centre Lenkmoment ein Indiz für das subjektive *Anlenkmoment*. Bemerkenswerterweise kommt dem dynamischen Verhalten des Lenkmoments in diesem Fahrzustand nicht nur für die Evaluation des *Anlenkmoments*, sondern auch des *Stabilitäts-* und *Lenkpräzisionsempfindens*, ein Einfluß zu. Die Varianz in der *Lenkpräzision/Momentenverlauf*-Bewertung erklärt sich somit durch die *Phasengangwerte* des Lenkmoments im betreffenden Frequenzbereich (stellvertretend ist in der multiplen Regression der Wert bei 0,8 Hz enthalten) sowie das Schwimm- und Unter-

sterverhalten. In Bezug auf die *Einlenkwilligkeit/Gierreaktion* hat das dynamische Überschwingverhalten des Gesamtfahrzeugs vorrangige Bedeutung. Der *Stabilitätseindruck* hängt mit dem Schwimmverhalten und dem dynamischen, mehr oder minder voreilenden Lenkmoment zusammen. Offenbar existiert eine physikalische Eigenart des Lenkmoments, die haptisch wahrgenommen, und subjektiv mit dem Gesamtfahrzeugverhalten assoziiert wird. Diesem Zusammenhang geht ein modellbasierter Ansatz im nächsten Hauptkapitel auf den Grund.

| subj. Kriterium | obj. Kenngrößen | | |
|--|---|--|---------------------------------------|
| R ² der multiplen Regression | Gruppe der unabhängigen Eingangsvariablen in der multiplen Regression | | |
| Anlenkmoment | M _H (1 m/s ²), LZ 100 km/h | M _H (4 m/s ²), LZ 100 km/h | |
| R ² = 0,66; R ² korr = 0,57 | M _H (1 m/s ²), LZ 120 km/h | M _H (4 m/s ²), LZ 120 km/h | Lenkmoment Ph.gang (0,8 Hz), FG |
| Lenkpräzision/ Momentenverlauf | Lenkwinkelgradient (6 m/s ²), SK | Schwimmwinkel Differenz (4 m/s ²), LS | |
| R ² = 0,92; R ² korr = 0,87 | Gierrate Verst.faktor (0,2 - 1 Hz), FG | Lenkmoment Ph.gang (0,8 Hz), FG | Anlenkgr./Weiterl.gr., LZ 100 km/h |
| Einlenkwilligkeit/ Gierreaktion | Gierrate Ü.schw.weite (4 m/s ²), LS | Querb. Ü.schw.weite (7 m/s ²), LS | |
| R ² = 0,70; R ² korr = 0,63 | Lenkwinkelgradient (6 m/s ²), SK | | |
| Stabilität | TB-Wert (4 m/s ²), LS | Weiterlenkgradient, LZ 100 km/h | |
| R ² = 0,83; R ² korr = 0,76 | Schwimmwinkel Ph.gang (0,8 Hz), FG | Lenkmoment Ph.gang (0,8 Hz), FG | Schwimmwinkel- gradient (SG), SK |

Tab. 4.18: Zusammenstellung der multiplen subjektiv-objektiv Korrelationen der Fachleute in den ISO-Spurwechseln mit den unkorrigierten und korrigierten Bestimmtheitsmaßen nach der schrittweisen Regression; die verbliebenen Kenngrößen sind markiert.

Zusammenfassend betrachtet lässt die Untersuchung folgende Rückschlüsse zu: die objektiven Manöver spiegeln mit Hilfe der daraus extrahierten Kenngrößen den subjektiven Eindruck des Gesamtfahrzeugverhaltens im

- Eigenlenken,
- Schwimmen,
- Gieren,
- Querbeschleunigen und
- Wanken

sehr gut wider. Ebenso können die Erkenntnisse aus den Arbeiten über

- die On-Centre Weave-Lenkmoment-Kenngrößen

validiert und um

- die Linearitätsmaße der Gesamtfahrzeugreaktionen

erweitert werden. Die Korrelationsanalysen liefern ebenso Indizien über

- die stationären Lenkmomentkennlinien aus dem Lenkungsziehen,

die die subjektive Niveau-Einschätzung repräsentieren. Somit ist ein Gerüst von objektiven Maßen geschaffen, um die Basis eines Gesamtfahrzeugs auszulegen und zu entwickeln. Die Methoden aus dem nächsten Kapitel (Kap. 5) konzentrieren sich auf eine effiziente Grund- und Feinabstimmung des Lenkmoments.

5 Modellbasierte Ansätze zur Untersuchung des Lenkcharakters

Aus dem vorherigen Kap. 4 bleibt in gewissem Maße die Zuordnung, insbesondere der Lenkmomentkriterien, zu Lenkdiskomfort- und Lenkcharakteraspekten unklar. Ferner geben speziell die ISO-Spurwechsel Hinweise auf eine Rolle der dynamischen Lenkmomentenverläufe in Bezug auf den subjektiven Gesamtfahrzeugeindruck bzw. ist die Rolle des Lenkmoments bei Hochgeschwindigkeitsfahrt noch unbeleuchtet.

Aus den vorangestellten Analysen folgen zu überprüfende, verfeinerte Hypothesen zu den in den Zielen der Arbeit (Kap. 3) formulierten: erstens, das Lenkmoment hat Einfluß auf das Empfinden des dynamischen Gesamtfahrzeugverhaltens und des Geradeauslaufs, speziell bei hohen Geschwindigkeiten. Zweitens, als Erweiterung der Erkenntnisse über die Einordnung der Aspekte in den Lenkcomfort: es existieren interkulturelle Unterschiede in der Wahrnehmung von Lenkmomenten. Dazu werden nun schrittweise das Werkzeug, die Modelle und Versuchspläne der Validierungsmethode präsentiert, um die „weißen“ Felder des Lenkcomforts zu bearbeiten und mit Ergebnissen zu belegen.

Die modellbasierten Analysen werden mit Hilfe eines Versuchsträgers durchgeführt, der aufgrund seines aktiven Fahrwerks horizontalisiert ist und so die Aufbaubewegungen Wanken, Nicken und Huben unterdrückt. Den Erkenntnissen aus der vorhergehenden Probandenaktion zufolge giert er ausgewogen bzw. schwimmt stabil. Das Versuchsfahrzeug stellt also ein optimales Gesamtfahrzeugumfeld dar, um Lenkmomente objektiv und subjektiv analysieren zu können. Darüber hinaus werden die Bias-Faktoren in der Evaluierung reduziert, um die Auflöseseite, insbesondere der Normalfahrer, zu erhöhen. Die folgenden Experimente gehen den Aufgabenstellungen über die modellbasierten Ansätze mit Hilfe einer größeren Kennwertespreizung nach.

5.1 Entwicklungswerkzeug Lenkmomentensteller

Ein Teilziel innerhalb der Methodenentwicklung zur modellbasierten Objektivierung ist es, eine Möglichkeit zu schaffen, mehrere Lenkmomentcharakteristika in einem Trägerfahrzeug realistisch darzustellen. Das System, mittels dem in den Versuchen verschiedene Lenkmomentvarianten für die Probanden erfahrbar gemacht werden, ist der sog. Lenkmomentensteller, siehe Abb. 5.1. Es handelt sich hierbei nicht um ein Steer-by-Wire System, sondern ein Lenkrad, welches wie ein Serienlenkrad auf der Lenkzapfenverzahnung sitzt und verschraubt ist. So ist jederzeit ein mechanischer Durchgriff zu den Rädern gewährleistet. Im angeflanschten Gehäuse beherbergt das Lenkrad zwei Momentensensoren zwischen denen ein permanenterregter bürstenloser Synchronmotor in Reihe geschaltet ist, vergleiche Abb. 5.2. Das Handmoment ist ein, mittels des E-Motors, zum Lenkmoment des Grundfahrzeugs addiertes oder subtrahiertes Zusatzlenkmoment („Torque-by-Wire“). Einer der Momentensensoren mißt strangseitig die Grundlenkmomentcharakteristik des Fahrzeugs; der andere bestimmt das anliegende Handmoment, das der Fahrzeugführer spürt.

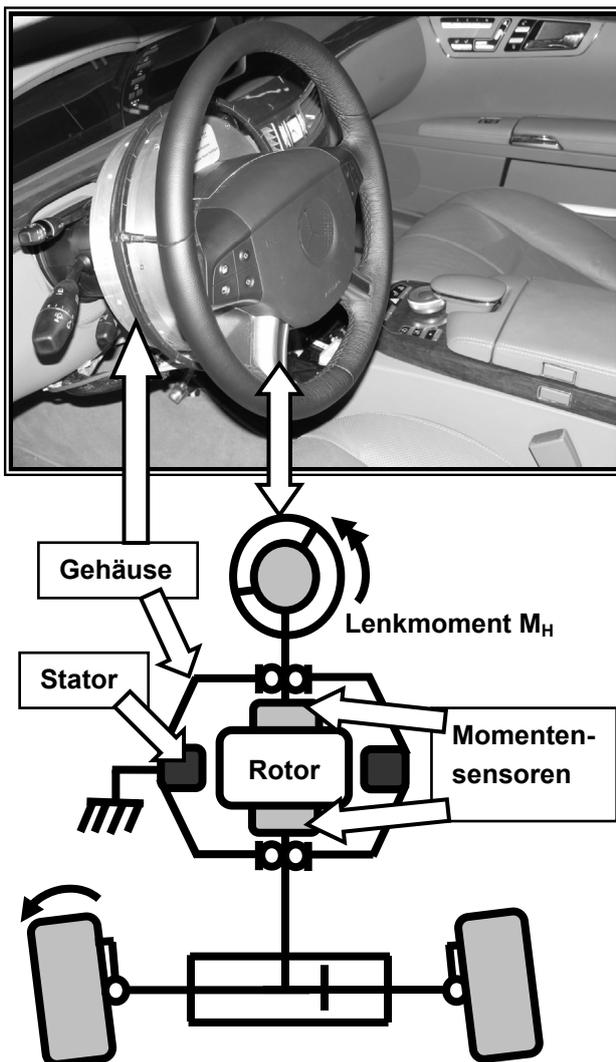


Abb. 5.1: Der Lenkmomentensteller an seinem Einsatzort.

Abb. 5.2: Prinzipskizze des Lenkstrangs mit Lenkmomentensteller.

Das zu stellende Lenkmoment resultiert aus einem modellierten Sollmoment, das in Abhängigkeit jedweder Größen, wie z.B. Lenkwinkel, -moment, Querbesehleunigung, etc. errechnet werden kann. Das jeweilige, zugehörige Modell ist auf einem frei programmierbaren Steuergerät mit einer Schrittweite von 1ms aktiv und gibt der Motorendstufe einen dem Zusatzmoment entsprechenden Sollstrom über einen PID-Regler vor. Beide Einheiten, Steuergerät und Endstufe, sind im Kofferraum untergebracht. Die Endstufe wird für eine hinreichende Dynamik des Lenkmoments mit 42 V betrieben. Der Motor selbst verfügt über ein Maximalmoment von 30 Nm, die aus Sicherheitsgründen auf 8 Nm begrenzt sind.

Damit die Probanden ihre ergonomisch beste Lenkradposition nutzen können, ist die Lenksäule in Höhe und Tiefe justierbar. Das gestellte Zusatzlenkmoment wird über eine Strebe, die am Kardantunnel befestigt ist, abgestützt. Bis zu einer Lenkfrequenz von 2 Hz erreicht das System eine Regelabweichung von maximal 0,1 Nm, wobei das Sensorrauschen ca. $\pm 0,02$ Nm beträgt. So ist es auch in den Probandenversuchen dynamisch möglich, ohne störenden Torque-Ripple oder ähnlichem, reale, frei parametrierbare Lenkmomentcharakteristika exakt vorzugeben.

5.2 Rolle des Lenkmoments im dynamischen Fall eines Fahrspurwechsels

5.2.1 Hintergrund und Modellbildung

Aus der Evaluationsanalyse der zehn realen Versuchsträger ergeben sich mehrfach Indizien, daß die dynamischen Eigenschaften des Lenkmoments in Zusammenhang mit dem subjektiven Eindruck über das Gesamtfahrzeugverhalten stehen. Die Diagramme aus Abb. 5.3 illustrieren für Fahrzeug I exemplarisch Lenkmomenthysteresen aus Frequenzgangmessungen der vorhergehenden Untersuchung. Unter anderen wird dieses Fahrzeug in den Kriterien *Lenkpräzision* und *Stabilität* subjektiv als schlecht bewertet. Fahrzeuge, die keine überschneidenden Schleifen aufweisen, werden subjektiv als gut bewertet. Die vier Diagramme aus Abb. 5.3 zeigen Lenkmomentverläufe über dem Lenkradwinkel die zu verschiedenen aus dem Sinuslenken extrahierten Lenkfrequenzabschnitten gehören. Oberhalb der Weave-Frequenz von 0,2 Hz, vergleiche Diagramm 0,4 Hz $\pm 10\%$, ist eine Einschnürung der Hysterese festzustellen, die sich bei 0,8 Hz $\pm 10\%$ in eine überschneidende Form wandelt; das Lenkmoment wirkt also „anfachend“, es ist im Mitlenkbereich unterdämpft. Übertragen auf einen Spurwechsel bedeutet dies, daß

das Lenkmoment aus der Geradeausfahrt bis zum Umkehrpunkt der Lenkbewegung in für den Fahrer gewohnter Weise ansteigt; nach dem Umlenken jedoch wirkt es nicht konventionell rückstellend, sondern „drückt“ den Fahrer weiter über die Geradeausstellung hinweg, er „überlenkt“.

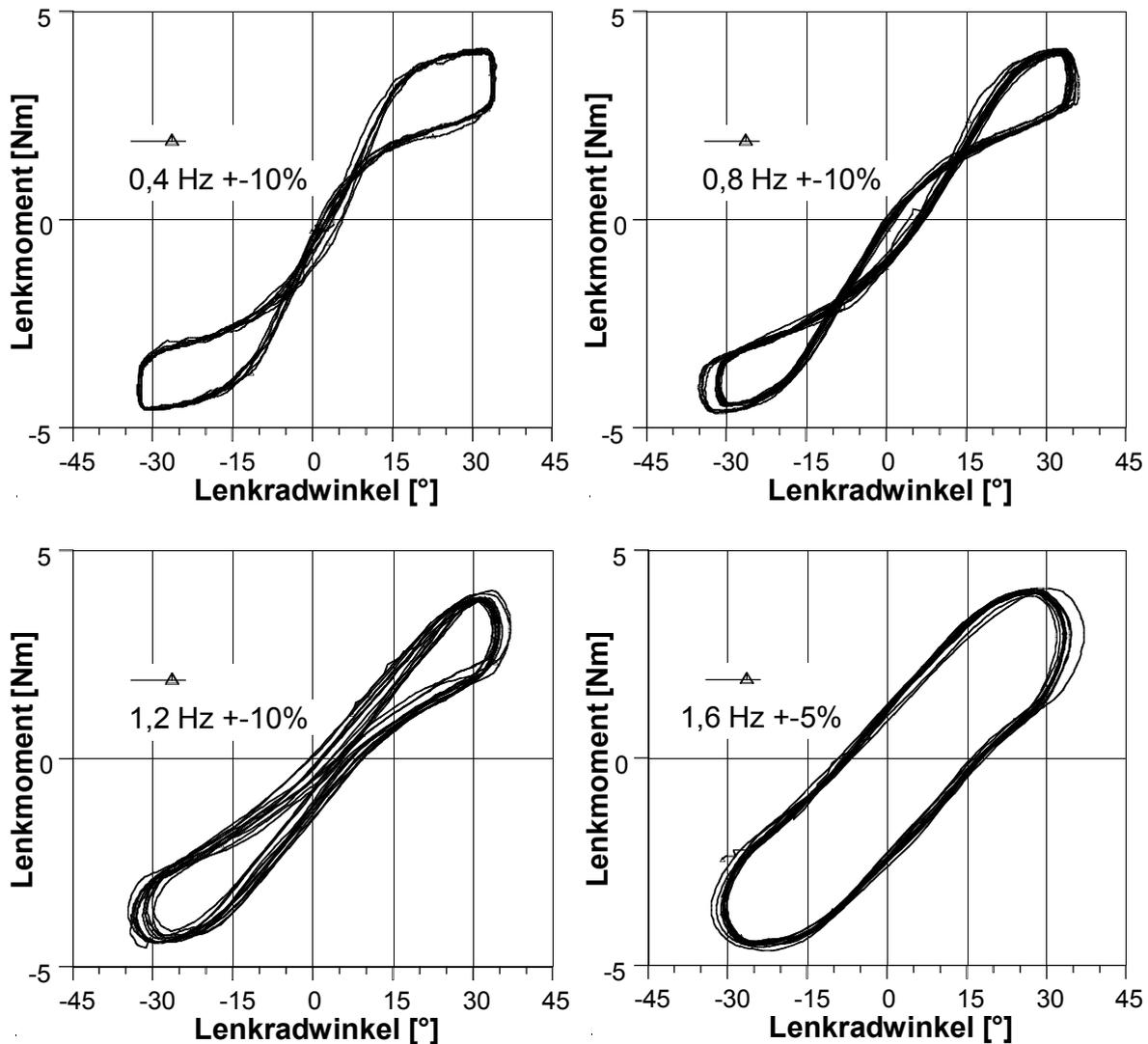


Abb. 5.3: Verläufe der Lenkmomenthysterese von Fahrzeug I, extrahiert aus Frequenzgangmessungen für verschiedene Frequenzausschnitte.

Ab ca. 1,1 Hz entschnürt die Hysterese von Fahrzeug I wiederum und baucht mit steigender Frequenz weiter aus. Das zugrundeliegende Phänomen ist auf den Zeitverzug zwischen Lenkwinkleingabe und Seitenkraftaufbau im Reifenlatsch zurückzuführen, woraus z.B. im Spurwechsel oder daraus abstrahierten Manöver Frequenzgang eine Hysterese mit umgekehrter Drehrichtung zwischen den beiden Größen entsteht. Wird die Seiten- bzw. über den Nachlauf umgerechnete Spurstangenkraft mit den in Achse und Lenkung vorhandenen Hysteresen (z.B. auf-

grund des Lenkungsdämpfers) und über die Lenkmomentunterstützungskennlinie in ein Handmoment transformiert, resultiert eine üblicherweise gleichsinnig umlaufende Hysterese zwischen Lenkmoment und -winkel. In Abhängigkeit der Komponenteneigenschaften, wie Schräglaufsteifigkeit, Quersteifigkeit, Zahnstangenreibung, Lenkungsdämpferkennlinie etc., kann die Hysterese so bei höheren Frequenzen überschneidend ausfallen. Das Verhalten wird mit Hilfe des Manövers Weave objektiv nicht bemerkt werden; das Lenkmoment ist also nicht nur quasi-stationär zu analysieren, sondern demzufolge auch dynamisch.

Zu klären bleibt, inwieweit dieses Verhalten eine Rolle im subjektiven Empfinden des *Momentenverlaufs*, der *Stabilität* und *Lenkpräzision* spielt. Dazu dient das im Schaltplan gemäß Abb. 5.4 gezeigte Modell, welches das Lenkmomentensignal des Grundfahrzeugs nutzt und einen lenkwinkelabhängigen Anteil zum Lenkmoment addiert bzw. subtrahiert. In Abhängigkeit seiner Parametrierung entstehen so Hystereseschleifen unterschiedlicher Formenausprägung, um das Verhalten realer Fahrzeuge abzubilden.

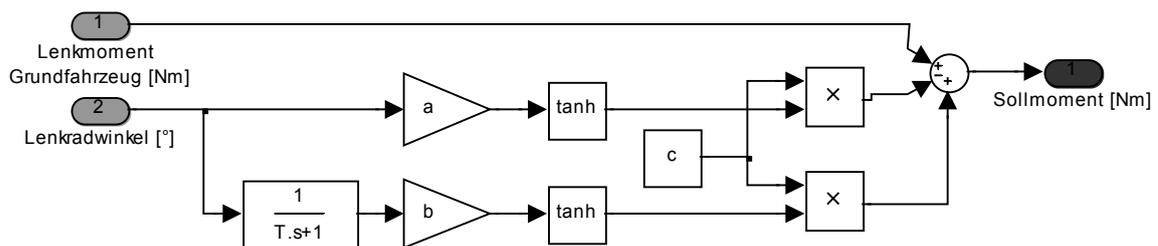


Abb. 5.4: Modell zur Darstellung verschiedener Formen der Lenkmomenthysterese.

Die beiden Zweige verrechnen einen bestimmten Lenkwinkel mittels einer tanh-Funktion. Diese ist die durch zwei Steigungen a , b und eine Verstärkung c definiert, um Momentensprünge zwischen den Hystereseästen zu vermeiden und vielmehr die Hysteresekrümmungen zu verschleifen. Der additive Anteil nutzt nicht den aktuell anliegenden Lenkwinkel, sondern verarbeitet einen zeitverzögerten Wert bzw. einen Wert, der vor einer bestimmten Zeiteinheit anlag, vergleiche Gl. [24]:

$$M_{H,o} = M_{H,u} - M_{H,z}(\delta_H) + M_{H,z}(\delta_H(T)) \quad [24].$$

Dadurch verändert sich die nichtüberschneidende Hysterese des Grundfahrzeugs und ergibt eine überschneidende, wobei die Zeitkonstante T die Breite der Überschneidung bestimmt. Der Verstärkungsfaktor c beeinflusst die Höhe der Über-

schneidung; die Steigungsfaktoren a, b den Krümmungsverlauf. Somit kann das Modell im nächsten Kapitel in ein Experiment eingebettet werden.

5.2.2 Versuchsplan

Die Frage nach dem Einfluß des Lenkmoments auf den subjektiven Fahreindruck bei dynamischen Manövern stellt den zentralen Untersuchungsgegenstand eines Versuchs mit 26 Fachleuten und sechs Normalfahrern dar. Die Probanden erfahren in einem Versuchsträger sieben verschiedene Lenkmomenthysterese-Varianten mittels des Lenkmomentenstellers. Sie bewerten diese in einfachen Spurwechseln auf einer Fahrbahn mit zwei Spuren hinsichtlich dreier Kriterien zwischen 100 und 120 km/h, siehe Abb. 5.5:

- der *Momentenverlauf*,
- die *Stabilität* und
- die *Lenkpräzision*.

Die Bewertungsskala reicht hierbei von „1“, gering und eckig, bis „6“, hochpräzise, große *Stabilität* und runder *Momentenverlauf*.

| | | Bewertung | |
|--|--|------------------|------|
| | | Niveau | |
| Kriterium | Beschreibung | | |
| Einfache Spurwechsel Richtgeschwindigkeit 100-120 km/h | Fahrer Variantenreihenfolge | | |
| Lenkpräzision | während des Spurwechsels und beim Wiederfinden der Geradeausstellung | gering | hoch |
| Sicherheitsgefühl/Stabilität | "Abneigung"/"Widerstand" des Fahrzeugs auszubrechen | gering | groß |
| Momentenverlauf | im Übergang Mitten- zu Weiterlenkbereich | eckig | rund |

Abb. 5.5: Der Fragebogen zu den Lenkmomenthysterese-Varianten in den Spurwechseln mit einer Niveau-Skala.

Der Versuchsträger ist mit einem aktiven Fahrwerk ausgestattet, das es ermöglichen würde, die Verteilung der Wankmomentabstützung und damit dynamische Radlasten zu verändern. Vergrößerte dynamische Radlasten an der Hinterachse ziehen eine übersteuernde Tendenz im Eigenlenken des Fahrzeugs nach sich, d.h. der Versuchsträger würde nach allgemeinem Sprachgebrauch instabiler. Die Probanden werden vor dem Versuch darüber unterrichtet, daß währenddessen sowohl das Wank- als auch Lenkmoment manipuliert werden könnte, um ihre Er-

wartungshaltung auch auf die Gesamtfahrzeugreaktionen zu richten. Tatsächlich werden den Testpersonen aber ausschließlich Lenkmomentvarianten dargeboten.

Um ihnen ein Gespür zu vermitteln, wie die Spreizung des Versuchs ausfällt, sind sie zu Beginn gebeten, die beiden Extremvarianten zu bewerten, vergleiche Abb. 5.6. Die Lenkmomentschleifen des Grundfahrzeugs sind in Abb. 5.6 (links) und der Variante mit der größten Überschneidung, rechts, aus dem Manöver Frequenzgang bis 4 m/s^2 in einem definierten Frequenzbereich dargestellt, wobei dieses Verhalten fahrgeschwindigkeitsunabhängig modelliert ist. Die Schleifen sind aus Auswertegründen in jeweils zwei Äste getrennt; so ist es möglich, die Differenz zwischen den Kennlinien für das nach links und rechts Lenken zu bestimmen: die sog. Lenkmoment-Differenzkurve (M_H -Differenz) entsteht. Die Lenkmomentdifferenzkurve ist ein Maß für die Hysteresehöhe über dem Lenkradwinkel. Im nicht-überschneidenden Falle ist die Kurve stets positiv, Abb. 5.6 (links), überschneidend wird der Verlauf teilweise negativ (Abb. 5.6 (rechts)). Exemplarisch ist hier der Frequenzabschnitt zwischen $0,5..0,75 \text{ Hz}$ illustriert. In vergleichbarer Weise lassen sich die Charakteristika für weitere Frequenzen bestimmen.

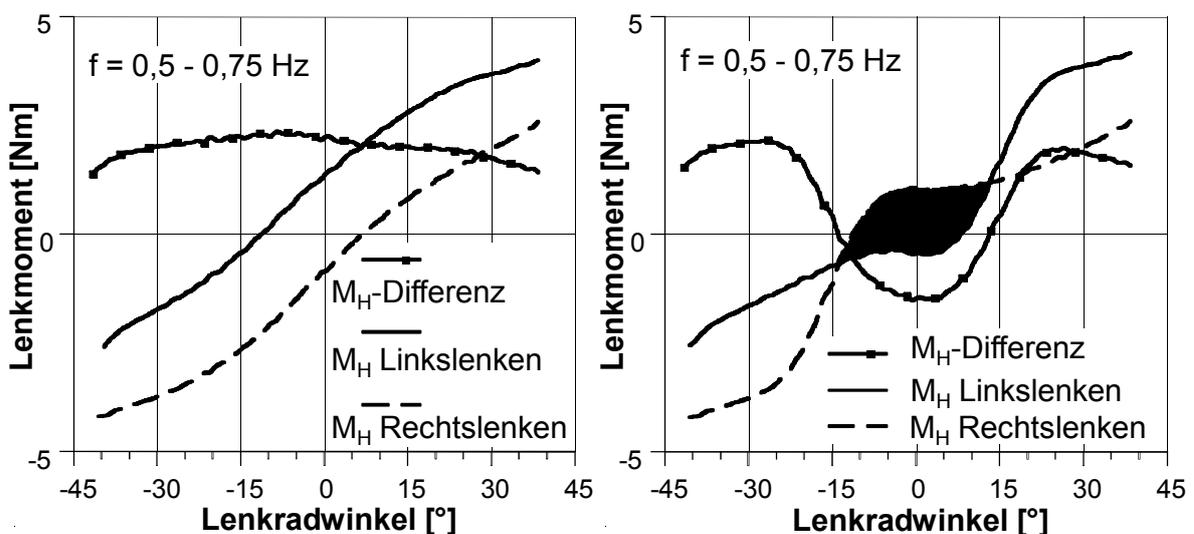


Abb. 5.6: Beide Extremvarianten des Versuchs, dargestellt im Hystereseverlauf selbst und in der Differenzkurve aus den Hystereseästen des „nach links“ und „nach rechts“ Lenkens (Frequenzbereich $0,5..0,75 \text{ Hz}$); Variante links, nicht überschneidende Schleife mit positiver Differenzkurve, rechts, Schleife mit unterdämpftem Mittenbereich und so teilweise negativer Differenzkurve.

Die objektive Analyse konzentriert sich auf die Frequenzbereiche $0,25..0,5$ und $0,5..0,75 \text{ Hz}$, da diese als Hauptlenkkomponenten bei den Spurwechsel identifiziert sind: Abbildung Abb. 5.7 zeigt eine FFT des summierten Lenkwinkelsignals

aus zahlreichen Spurwechseln. Da es sich nicht um Notausweichmanöver handelt, sondern um Spurwechsel vergleichbar zu einem Überholvorgang, liegt der Hauptanteil in dem genannten Bereich.

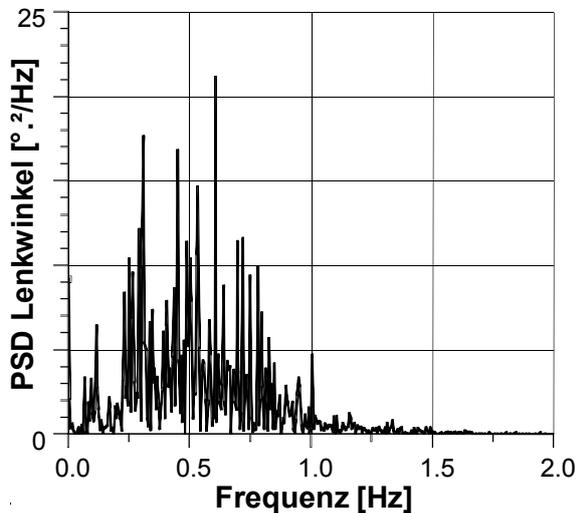


Abb. 5.7: Leistungsdichtespektrum aus einer FFT des Lenkwinkelsignals bei Spurwechseln.

Aus den beiden Frequenzbereichen werden im Folgenden die objektiven Kennwerte bestimmt. Abbildung Abb. 5.8 (unten) enthält, der Übersichtlichkeit willen, nur eine Differenzkurve einer Versuchsvariante aus dem Abschnitt 0,25..0,5 Hz. Der Verlauf kann beschrieben werden durch:

- die *außermittige Grundhysteresehöhe*, z.B. bei 30° Lenkradwinkel oder dem Lenkwinkel, der 3 m/s² Querbefleunigung entspricht,
- zur Mitte hin durch das *Verhältnis* aus *Grundhysteresehöhe* und dem *Minimalwert* oder dem Wert bei 0° Lenkwinkel,
- On-Centre durch den *Minimalhysteresewert* oder den Wert bei 0° Lenkwinkel,
- das *Integral der Hysterese* als Maß für den Lenkaufwand, sowie
- die *Flankensteigung* des Hystereseeinbruchs, z.B. die *Differenz* zwischen der gemittelten *Hysteresehöhe* bei ±10° und 0°.

Im Falle des Verlaufs in Abb. 5.8 (unten) beträgt die gemittelte Referenzhysteresehöhe an den Lenkwinkelstellen, die ±3 m/s² entsprechen, ca. 2 Nm. Die Hysteresehöhe bei 0° ist 0,2 Nm, so daß sich das Verhältnis daraus als Maß für den Einbruch zu 90% errechnet.

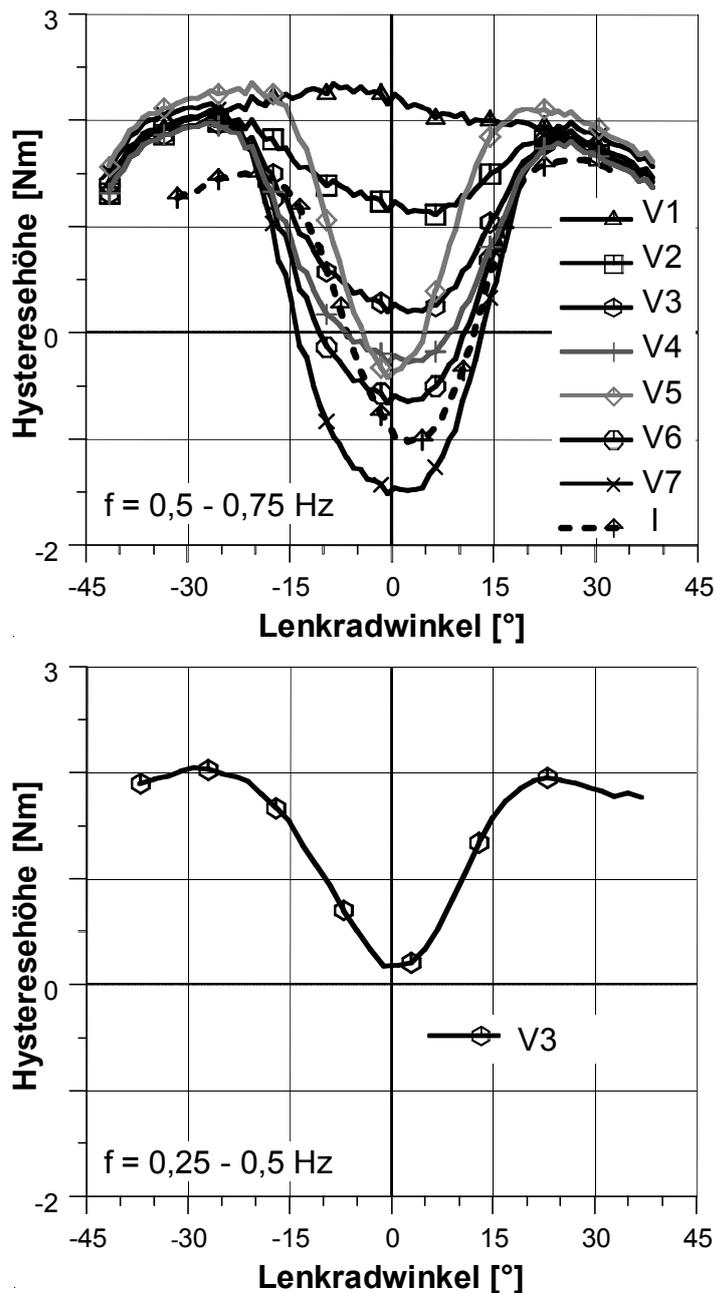


Abb. 5.8: Die Versuchsvarianten im Frequenzbereich 0,5..0,75 Hz (oben) bzw. exemplarisch für V3 0,25..0,5 Hz (unten) dargestellt mit den Differenzkurven als Maß für die Hysteresehöhe über dem Lenkradwinkel; zum Vergleich ist oben zusätzlich das Fahrzeug I aus dem Versuch in Kap. 4 genommen.

Das Diagramm in Abb. 5.8 (oben) illustriert, exemplarisch für den Abschnitt 0,5..0,75 Hz, die sieben Versuchsvarianten V1 bis V7 in ihren Differenzkurven, wobei V1 die Charakteristik des Grundfahrzeugs repräsentiert. Eine Besonderheit im Experiment zeigt der Kontrast zwischen V4 und V5, vergleiche Abb. 5.8 (oben), die sich zwar durch ein ähnliches Hysterese minimum von -0,3 Nm auszeichnen, V5 jedoch über einen schmaleren Lenkwinkelbereich hinweg einbricht.

Zu Beginn des Versuchs sind die Probanden gebeten, die Grenzmustervarianten absolut innerhalb ihrer Erfahrungswelt einzuordnen; es könnte sein, daß ihres Erachtens andere Fahrzeuge existieren, die in den drei zu bewertenden Aspekten noch höher oder niedriger ausfallen. So könnte eines der Grenzmuster mit sehr gering präzise, „1“, und das andere möglicherweise mit eher präzise, „4“, bewertet

werden. Nach der Eingangsbewertung beider Extreme sind die übrigen fünf Zwischenvarianten randomisiert ebenfalls auf einer Sechskerskala zu evaluieren. Im Nachgang werden die Noten mittels einer „Lupenfunktion“ zwischen die Ergebnisse der Extremvarianten transformiert: Am Beispiel festgemacht, wäre die Note „1“ für eine Zwischenvariante gleich der „1“ des Grenzmusters, eine „6“ einer anderen Zwischenvariante entspräche der „4“; die übrigen Versionen lägen interpoliert dazwischen. Die Probanden bewerten zudem unwissentlich am Versuchsende nochmals eine ihrer zuerst evaluierten Varianten.

5.2.3 Versuchsergebnisse

Die statistischen Voranalysen ergeben, daß sowohl die objektiven als auch subjektiven Daten beider Testgruppen normalverteilt sind. Bis auf die Bewertung der *Lenkpräzision* durch die Normalfahrer sind die Bewertungen der Kriterien, der Varianzanalyse zufolge, signifikant unterschiedlich. Die subjektive Redundanzanalyse weist darauf hin, daß die Probanden alle drei Kriterien miteinander verknüpfen, d.h. wenn eine Variante als eckig empfunden wird, so ist sie zugleich gering präzise und wenig stabil. Da das stationäre Lenkmomentniveau in diesem Experiment konstant bleibt, sind auch die objektiven Kennwerte untereinander redundant. Die Betrachtung der Wiederholzuverlässigkeit offenbart einen Bewertungsdrift der Probanden kleiner einer Note und damit eine gute Reliabilität, vergleiche Tab. 5.1. Die Evaluation wird über das Experiment hinweg tendenziell kritischer.

| Kriterium | Niveau | | | |
|------------------------------|----------|-----|-----|----------|
| | | NF | EF | |
| Lenkpräzision | geringer | 0,7 | 0,6 | geringer |
| Sicherheitsgefühl/Stabilität | geringer | 0,7 | 0,8 | geringer |
| Momentenverlauf | eckiger | 0,5 | 0,7 | eckiger |

Tab. 5.1: Gemittelte Individualabweichungen zwischen den Noten der Basis- und Wiederholungsfahrt für die Normal- (NF) und Expertenfahrer (EF); der Bewertungsdrift ist mit Attributen beschrieben.

Die Korrelationsanalyse zwischen den subjektiven Noten bezüglich der drei Kriterien und den objektiven Kennwerten über die Hystereseform ergeben hohe bis zum Teil sehr hohe Korrelationskoeffizienten. Insbesondere das Maß für die *mittlere Hysteresehöhe* beschreibt den subjektiven Eindruck sehr gut. Die beiden Diag-

ramme in Abb. 5.9 zeigen die Mittelwertsnoten der Fachleute über das *Sicherheitsgefühl/Stabilität* und den *Momentenverlauf* bezogen auf die *Lenkmomenthysteresehöhe* bei 0° im Bereich 0,5..0,75 Hz.

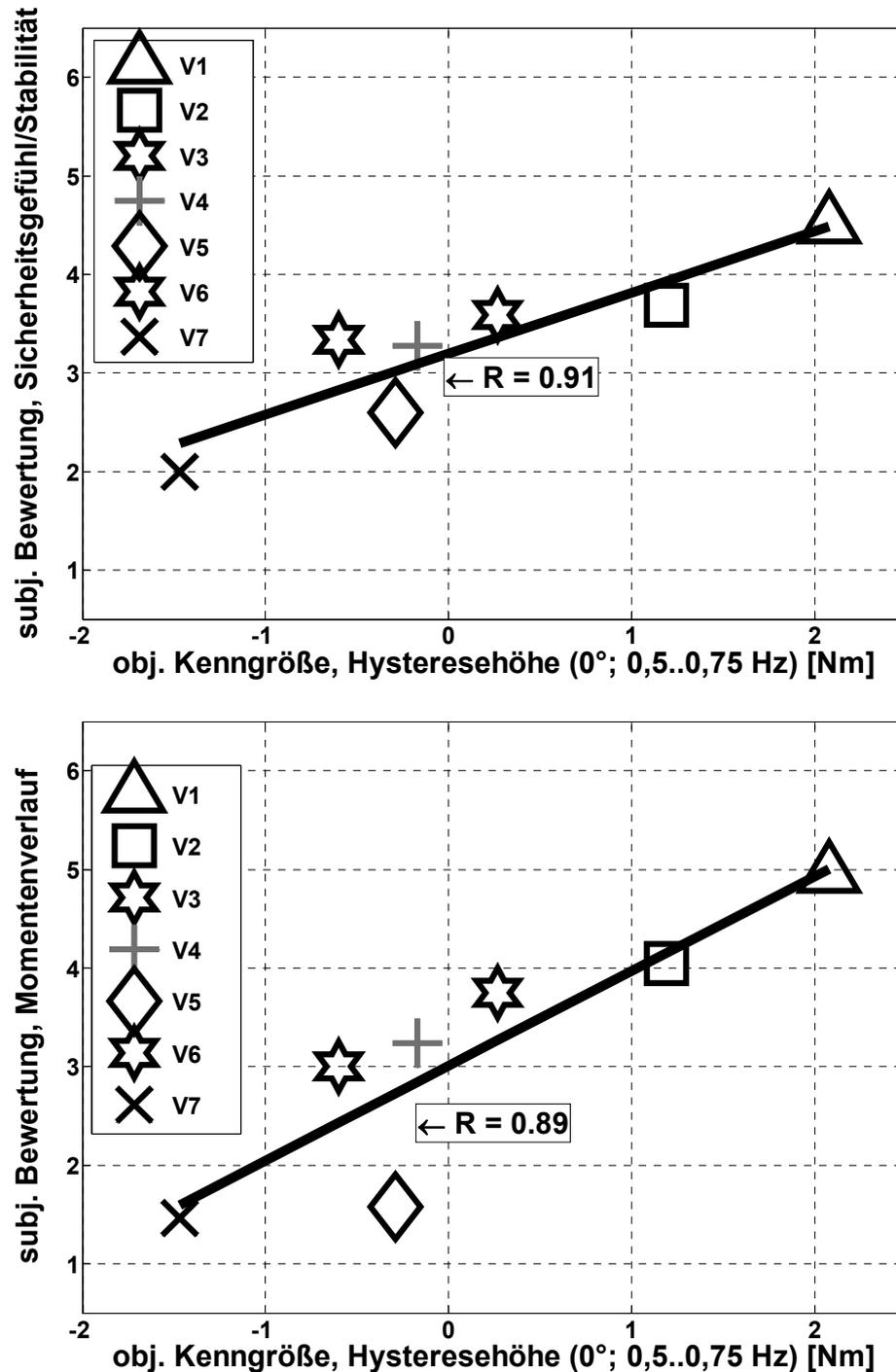


Abb. 5.9: Korrelationsplots zwischen der subjektiven *Stabilitäts*-, oben, *Momentenverlauf*-Bewertung, unten, der Fachleute und den objektiven Kennwerten zur mittigen Hysteresehöhe.

Im untersuchten Wertebereich weisen die Korrelationen darauf hin, daß eine überschneidende Hysterese zu vermeiden ist, um eher präzise, sichere und runde subjektive Bewertungen zu erzielen.

Wie die Tabellen Tab. 5.2 und 5.3 aufzeigen, setzen sich die engen Zusammenhänge auch im zweiten Frequenzabschnitt von 0,25 bis 0,5 Hz für die Hystereseform fort. Die Fachleute evaluieren die *Lenkpräzision* und den *Momentenverlauf* hierbei sehr konsistent (indiziert durch farblich markiertes Feld der Korrelationskoeffizienten). Darüber hinaus kommentieren ca. zwei Drittel aller Probanden die überschneidenden Varianten mit einem übersteuernden Verhalten des Fahrzeugs bzw. „ausbrechendem Heck“, obwohl am Gesamtfahrzeugverhalten keine Änderungen vorgenommen werden. Die Normalfahrer sind sehr sensitiv gegenüber ihrem *Sicherheitsgefühl* bzw. *Stabilitätseindruck* und zeigen einhellig hohe Korrelationskoeffizienten für dieses Kriterium (Tab. 5.3). Wiederum weniger Beachtung schenken sie den beiden anderen Kriterien, da sie mit der Fahraufgabe bereits ausgelastet sind. Trotzdem gilt auch für sie, daß überschneidende Verläufe im dynamischen Lenkmoment zu vermeiden sind.

| subj. Kriterium, Expertenf. | R | obj. Kenngröße | Manöver |
|------------------------------|--------------|--|------------------|
| Lenkpräzision | 0.90..0.93 | | |
| Sicherheitsgefühl/Stabilität | ↑ 0.89..0.91 | Lenkmomenthysteresehöhe (0°; 0,25..0,75 Hz) | ISO-Frequenzgang |
| Momentenverlauf | 0.86..0.89 | | |

Tab. 5.2: Korrelationstafel der Expertenfahrer für die Zusammenhänge zwischen den subjektiven Kriterien und den Lenkmomenthysteresehöhen; die jeweils zwei Korrelationskoeffizienten repräsentieren die Ergebnisse aus den Frequenzabschnitten 0,25..0,5 und 0,5..0,75 Hz (der Pfeil „↑“ indiziert die Bewertungstendenz, „je höher, desto höher“; grau markierte Felder eine vorliegende Konsistenz).

| subj. Kriterium, Normalfahrer | R | obj. Kenngröße | Manöver |
|-------------------------------|--------------|--|------------------|
| Sicherheitsgefühl/Stabilität | ↑ 0.89..0.91 | Lenkmomenthysteresehöhe (0°; 0,25..0,75 Hz) | ISO-Frequenzgang |
| Momentenverlauf | 0.75..0.79 | | |

Tab. 5.3: Korrelationstafel der Normalfahrer für die Zusammenhänge zwischen den subjektiven Kriterien und den Lenkmomenthysteresehöhen; die jeweils zwei Korrelationskoeffizienten repräsentieren die Ergebnisse aus den Frequenzabschnitten 0,25..0,5 und 0,5..0,75 Hz.

An dieser Stelle sei ein kurzer Rückgriff auf Abb. 5.9 (unteres Diagramm) getätigt: im Korrelationsplot zum Momentenverlauf werden V5 und V7 ähnlich eckig bewertet, obwohl sie sich in ihrer Hysteresehöhe deutlich unterscheiden. Die Erklärung liefert Abb. 5.10, die die subjektiven Bewertungen gegenüber der Kenngröße über die Breite des Lenkmomenteinbruchs illustriert. Die Abszisse enthält die Kennwerte aus der *Differenz* zwischen der gemittelten *Hysteresehöhe* bei $\pm 10^\circ$ und 0° .

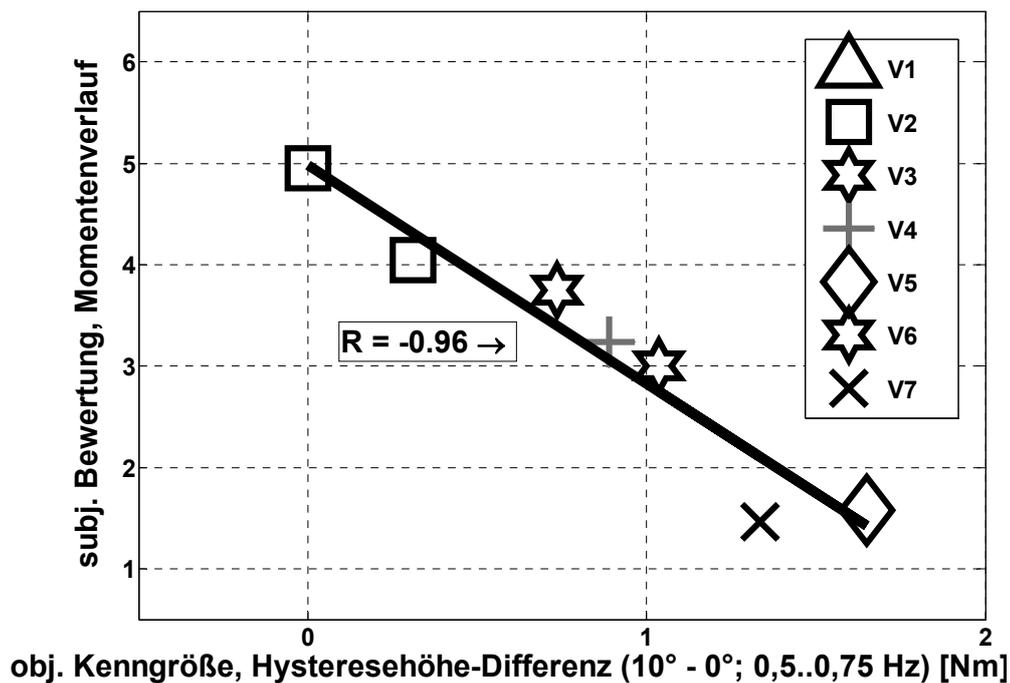


Abb. 5.10: Korrelationsplot zwischen dem subjektiven Momentenverlauf der Fachleute und den objektiven Kennwerten zum Einbruch der Hysterese.

Ein großer Wert, wie ihn V5 aufweist, repräsentiert einen steilen Flankenabfall von der Grundhysterese zum Tiefpunkt. Schlußfolgernd heißt das, daß nicht nur die Hysterese nicht unterdämpft, sondern ein potentieller Einbruch der Hysterese ferner nicht zu steil sein darf (gleichwohl bewirkt eine „leichte“ Eindrückung der Hysterese einen positiven Eindruck über die Mittenzentrierung). Diese Forderungen können auch auf höhere Frequenzbereiche (bis ca. 1,2 Hz), wie sie z.B. in Notausweichmanövern auftreten, übertragen werden, um die Beherrschbarkeit in Bezug auf die Größe Lenkmoment zu gewährleisten. Zu analysieren bleibt, ob eine obere Grenze für die Hysteresehöhe existiert, die, um eines positiven Eindrucks willen, nicht überschritten werden darf.

5.3 Rolle des Lenkmoments bei Hochgeschwindigkeitsfahrt

5.3.1 Abhängigkeit der Lenkmomenthysterese von Fahrgeschwindigkeit und Querbesehleunigung

Hinsichtlich des Geradeauslaufverhaltens konzentrieren sich bisherige Arbeiten primär auf die Aufbaureaktionen und Seitenwindempfindlichkeiten der Fahrzeuge im mittleren Geschwindigkeitsbereich; so enthält die Norm¹⁹⁷ zum objektiven Prüfmanöver des Geradeauslaufs z.B. nicht die Erfassung von Lenkmomenten. Im Hochgeschwindigkeitsbereich fehlen Erkenntnisse über die subjektive Einschätzung der Fahreigenschaften bzw. des Lenkmoments. Aber auch objektiv ist das Verhalten lediglich durch die stationäre Gierreaktionsverstärkung abgedeckt. Wie durch Abb. 5.11 verdeutlicht wird, offenbart die Analyse des dynamischen Betriebsraums zweier Fahrzeuge komplexere Ausprägungen.

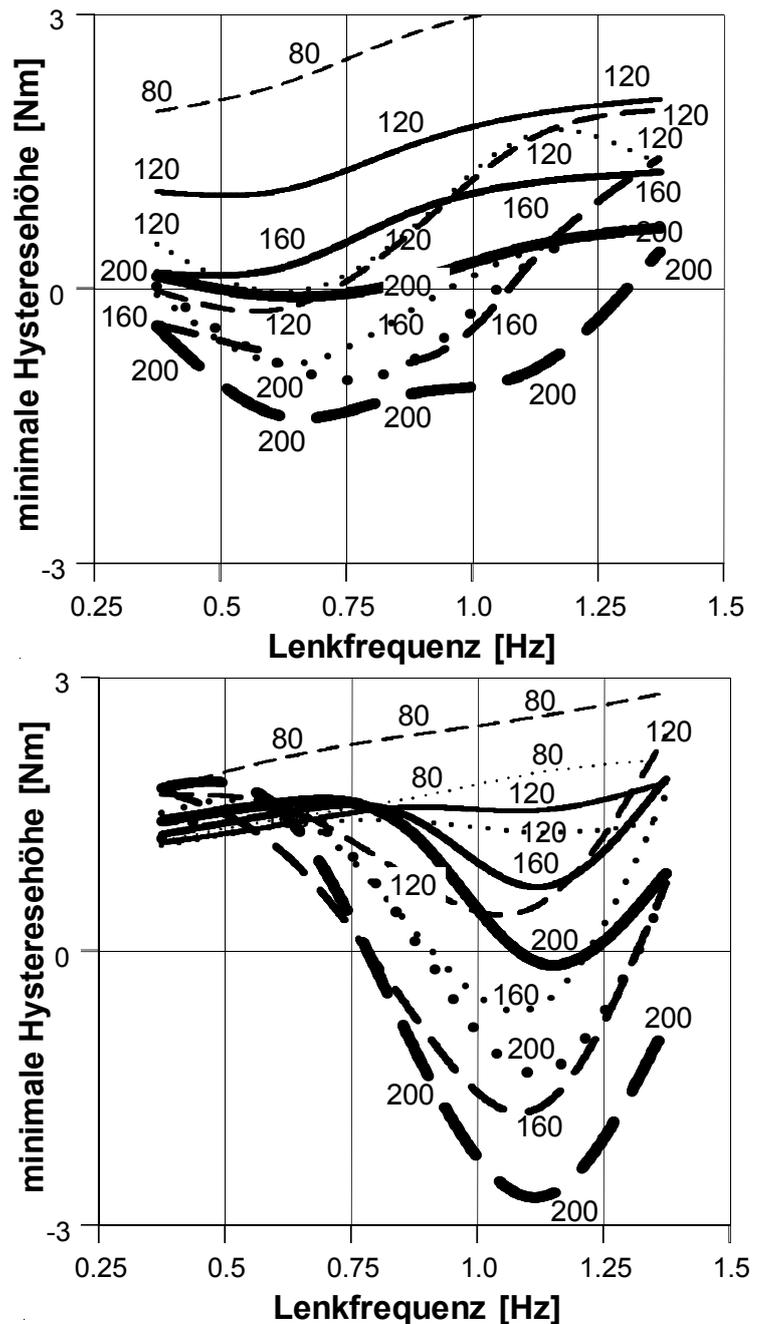
Die Diagramme kontrastieren die *Minima der Lenkmomenthysterese* über der Lenkfrequenz für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten und Querbesehleunigungen zweier Oberklassefahrzeuge. Zu den entsprechenden Frequenzausschnitten werden die Lenkmomenthysteresen auf ihren Wert der *minimalen Hysteresehöhe* hin ausgewertet. Qualitativ lässt sich feststellen, daß die Hysterese des Fahrzeugs aus dem oberen Diagramm mit steigender Querbesehleunigung und Fahrgeschwindigkeit bereits bei niedrigen Frequenzen abnimmt. Das im unteren Diagramm dargestellte Fahrzeug hält ein positives Hysterese-Niveau in allen Betriebspunkten bis ca. 0,75 Hz aufrecht, bevor die Lenkmomentschleifen eine Überschneidung aufweisen. Objektiv unterscheiden sich die beiden Fahrzeuge demzufolge deutlich in diesen Betriebspunkten, was mutmaßlich auch subjektiv wahrnehmbar ist.

Die Einflußparameter, wie in Kap. 5.2.1 exemplarisch auszugsweise aufgezählt, verursachen durch ihre bestimmten Konstellationen Veränderungen in der Hystereseform. Über eine Sensitivitätsanalyse ergibt sich z.B., daß der mit zunehmender Lenkgeschwindigkeit, d.h. Lenkfrequenz, steigende Lenkungsdämpferanteil für einen gleichsinnigen Zuwachs der Hysterese sorgt.

¹⁹⁷ Norm ISO/TS 20119

Abb. 5.11:

Gegenüberstellung von Frequenzgängen zweier Fahrzeuge (pro Fahrzeug ein Diagramm); die Verläufe repräsentieren die minimalen Lenkmomenthysteresewerte bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten (indiziert durch Zahlensymbole und Linienstärke) und Querbeschleunigungen (durch die Linienart markiert: durchgezogen = 2 m/s², punktiert = 3 m/s², strichliert = 4 m/s²).



Dasselbe gilt für eine erhöhte Zahnstangenreibung. Eine Eigenlenktendenz, die

- elastokinematisch seitenkraftuntersteuernd oder
- kinematisch rolluntersteuernd

wirkt, verkleinert die erregende, ungleichsinnige Hysterese. Ein verkürzter Nachlauf und damit Hebelarm bzw. Verstärkungsfaktor verringert ebenso die Anregung. Aber auch die Hinterachse spielt hierfür eine Rolle. Eine vergrößerte Schräglauf- bzw. Quersteifigkeit der Hinterachsreifen und dadurch erhöhte Gierdämpfung/-Steifigkeit sowie verringerte Schwimmwinkel (die sich zum Vorderachslenkwinkel addieren) reduzieren durch ihren positiven Anteil die negative Hysterese, die aus

dem erregenden Zeitverzug zwischen Seitenkraftaufbau an der Vorderachse und Lenkwinkelinput entsteht. Welchen Einfluß die Lenkmomenthystereseform im Normalfahrbereich auf das Empfinden des Hochgeschwindigkeitsgeradeauslaufs hat, soll hier ein Probandenversuch klären.

5.3.2 Versuchsplan zur Untersuchung des Geradeauslaufs im Zusammenhang mit der Lenkmomenthysterese

Die Fahraufgabe im Rahmen des Versuchs besteht für die 18 Expertenfahrer darin, mit einer Geschwindigkeit von 200 km/h die Fahrspur zu halten, wofür sie auf dem aus Kap. 4 bekannten Ovalrundkurs stochastisch Seitenwindeinflüsse und Fahrbahnunebenheiten durch kleine Lenkkorrekturen ausregeln müssen. Der Versuchsträger weist eine, aus Sicht der Probandenuntersuchung aus Kapitel 4 wünschenswerte, mittlere Gierreaktion auf. Mit Hilfe des Modells aus dem Spurwechselexperiment und einer abgewandelten Parametrierung werden die Versuchsvarianten erfahrbar gemacht. Das Modell, das das Sollmoment für den Lenkmomentsteller liefert, verändert hierbei die Hysterese in dem betreffenden, kleinen Lenkwinkelbereich von ca. $\pm 5^\circ$. Dies wird bewerkstelligt durch Zusammenfassen der Parameter a und b, vergleiche den Schaltplan aus Abb. 5.4, und Anpassen zu einem Wert.

Die Probanden bewerten und beurteilen die Versuchsvarianten hinsichtlich ihrer subjektiven Empfindung der Hysterese und zugleich des Gesamtfahrzeuggeradeauslaufs, vergleiche Abb. 5.12. Hierbei ist die Frage zu klären, ob sich die Veränderungen im Lenkmoment ebenso auf die Regeltätigkeit bezüglich des Geradeauslaufs auswirken. Hierzu reicht im Niveau die Skala für die Reibung/Dämpfung von „unterdämpft“ bis „verklebt“, für den Geradeauslauf von „nervös“ bis „stoisch“.

| | | Bewertung (nicht fahrzeugklassenspezifisch!) | | | | | | | | | |
|--------------------|---|--|---|--|--|---|--------------|-----|-------------|----------|---------------|
| | | Niveau | | | | | Gefallen | | | | |
| Kriterium | Beschreibung | unterdämpft | | | | | hervorragend | gut | mittelmäßig | dürrftig | sehr schlecht |
| Reibung / Dämpfung | Die Lenkung vermittelt den Eindruck, "lose" oder "verklebt" zu sein | | x | | | | | | | x | |
| Geradeauslauf | Fahrzeug folgt seiner Sollkursgeraden | nervös | | | | x | | x | | | |

Abb. 5.12: Fragebogen zur Evaluation der Lenkmomentvarianten hinsichtlich des Hysterese- und Geradeauslaufverhaltens auf der Autobahn.

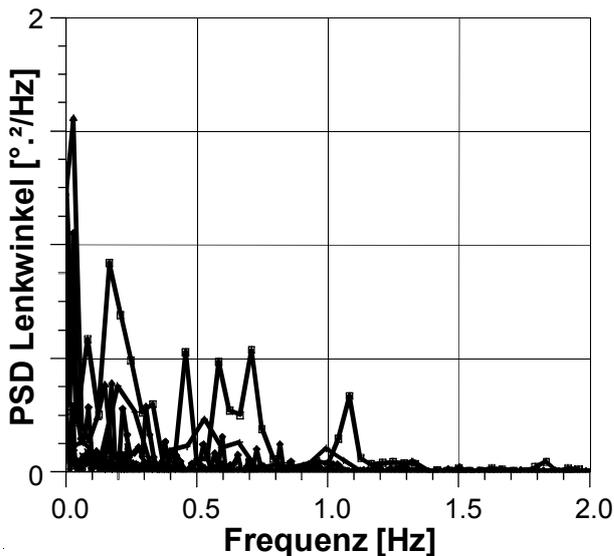


Abb. 5.13: FFT-Leistungsdichtespektren des Lenkwinkelsignals aus mehreren Messungen verschiedener Zeitdauer bei Spurhaltung und 200 km/h.

Da die Versuchsvarianten in ihrer Ausprägung in zwei Richtungen manipuliert werden (Hysteresen schnüren ein und bauchen aus), ist zusätzlich, im Gegensatz zum Spurwechselexperiment, die Gefallen-Beurteilungsskala eingefügt. So kann der Frage nach der Klassifikation dieser Kriterien in Lenkdiskomfort oder -charakter nachgegangen werden.

Zur objektiven Analyse des Hochgeschwindigkeitsverhaltens werden die Lenkanäle und Fahrzeuggrößen unter mehreren realen Fahrten in Spurhaltung bei 200 km/h aufgezeichnet und hinsichtlich des Betriebszustandes ausgewertet. Es resultieren maximale Querbeschleunigungen von $2,5 \text{ m/s}^2$, z.B. wenn Windstöße durch die Fahrer zu kompensieren sind. Wird das Lenkwinkelsignal einer FFT unterzogen, siehe Abb. 5.13, treten Lenkkorrekturfrequenzen vornehmlich quasi-stationär, aber auch Anteile bis ca. 0,75 Hz bzw. Ausreißer höherer Frequenz auf. Damit liegen die Lenkfrequenzen höher als der Wert 0,45 Hz aus einer Untersuchung zur Seitenwindkompensation¹⁹⁸, die bei 65 mph (104 km/h) durchgeführt wurde.

Das Manöver Frequenzgang 200 km/h dient der objektiven Beschreibung des Hochgeschwindigkeitsverhaltens; hierbei wird ein Lenkradwinkelsweep mit einer Amplitude durchgeführt, die eine stationäre Querbeschleunigung von $\pm 2 \text{ m/s}^2$ erzeugt. Das Lenkmoment weist in diesem Fall Hysteresen auf, die in bestimmten Frequenzabschnitten betrachtet werden, vergleiche Abb. 5.14 (links), am Beispiel 0,25..0,5 Hz. Werden im linken Diagramm die beiden entsprechenden Hystereseäste voneinander abgezogen, resultieren die Differenzkurven, Abb. 5.14 (rechts), als Maß für die Hysteresehöhe über dem Lenkradwinkel für den kleinen On-Centre Bereich.

¹⁹⁸ Salaani et al. 2005

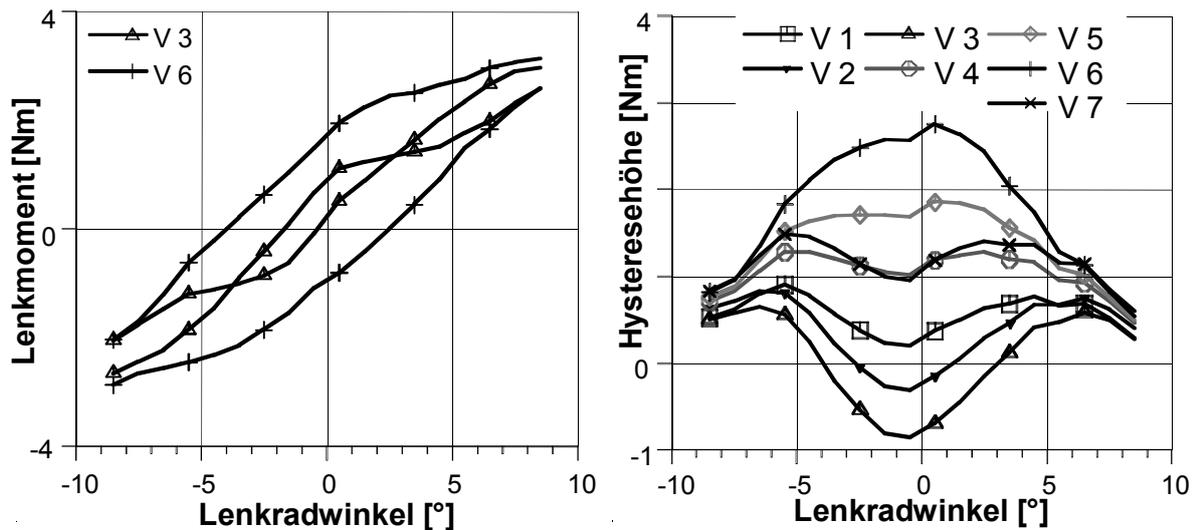


Abb. 5.14: Die Versuchsvarianten objektiv dargestellt in zwei exemplarischen Hystereseschleifen, links, und von allen sieben abgeleitete Differenzkurven, rechts, aus dem Frequenzgang bei 200 km/h und 2 m/s² (hier: Frequenzabschnitt 0,25..0,5 Hz).

Eingang in die Korrelationsanalyse finden aus den Frequenzabschnitten 0..0,25, 0,25..0,5 und 0,5..0,75 Hz

- die *Lenkmomentbeträge* aus den Hystereseschleifen an den Lenkwinkelstellen 0 und 5°,

um grundsätzlich das Lenkmoment- bzw. Lenkunterstützungsniveau bei dieser Fahrgeschwindigkeit zum Ausdruck zu bringen. Zudem dienen als Hysterese Maße

- die *minimale* für einschnürende bzw. *maximale Hysteresehöhe* (Lenkmomentdifferenz) für ausbauchende Schleifen, sowie
- die *prozentuale Zu-/Abnahme der Hysterese* vom außermittigen Grundniveau hin zur Mitte.

Die Kenngröße der *minimalen* bzw. *maximalen Hysteresehöhe* ist eine Weiterentwicklung der *Lenkmomentdifferenz* bei 0° Lenkwinkel, die als Kenngröße im Spurwechselexperiment genutzt wurde. Beide liefern grundsätzlich dieselbe Information, weil die *minimale* oder *maximale Hysteresehöhe* mittig, d.h. um 0° und maximaler Lenkgeschwindigkeit, anliegt. Exemplarisch für die Kenngröße *min./max. Hysteresehöhe* ergibt sich der maximale Wert zu 2,8 Nm, der minimale zu -0,9 Nm, vergleiche Abb. 5.14 (rechts). Die Spreizung der Versuchsvarianten ist dem Verhalten realer Fahrzeuge entlehnt, wobei die Hysteresen in Fortsetzung des Spurwechselversuchs im Gegensatz dazu nicht nur einschnürend, sondern auch ausbauchend parametrisiert sind, um potentielle obere Toleranzschwellen zu finden. Da die unterdämpften Versuchsvarianten stark verunsichernd wirken, ist

dieses Hochgeschwindigkeitsexperiment aus Sicherheitsgründen auf die Fachleute beschränkt.

5.3.3 Versuchsergebnisse

Die statistischen Eingangsanalysen aller objektiven Kennwerte und subjektiven Expertenfahrernoten zeigen Varianzen und Normalverteilungen auf signifikantem Niveau. Subjektiv hängt die *Reibungs-/Dämpfungsbewertung* linear sehr stark, $R = 0,98$, mit der *Geradeauslaufbewertung* zusammen. Die Kenngrößen sind objektiv sind untereinander bei gegebenem *Anlenkmoment* (1 m/s^2) von 2,4 Nm redundant. Die Betrachtung der Wiederholvariante im Vergleich zur Basis zeigt, daß, über den Versuch hinweg, die Reibung/Dämpfung höher und der Geradeauslauf stoischer bewertet werden. Das geht einher mit einer Tendenz zu einer besseren Bewertung der beiden Kriterien, vergleiche Tab. 5.4 (ein negatives Vorzeichen gibt an, daß die Wiederholfahrt die betragsmäßig größere Note aufweist und vice versa). Mit größten Abweichungen von einem halben Notenpunkt auf der Sechser- und einer Note auf der Zehnerskala liegt eine sehr gute Reproduzierbarkeit vor.

| Kriterium | Niveau | | Gefallen | |
|------------------|-----------|------|----------|-----|
| | | EF | | EF |
| Reibung/Dämpfung | höher | -0,2 | besser | 0,8 |
| Geradeauslauf | stoischer | -0,5 | besser | 1 |

Tab. 5.4: Gemittelte Individualabweichungen zwischen den Noten der Basis- und Wiederholungsfahrt für die Fachleute

Werden die subjektiven Niveau-Bewertungen und Gefallen-Beurteilungen in Zusammenhang gebracht, so tauchen für beide Aspekte jeweils mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,94$ quadratische Funktionen auf. Das bedeutet, es existiert ein gewisser Niveau-Bereich, der subjektiv gefällt und der von zwei Niveau-Abschnitten eingerahmt ist, die nicht gefallen, oder umgekehrt. Daraus läßt sich ableiten, daß die Kriterien Fragen des Lenkcharakters sind. Liegen so eindeutige Korrelationen vor, können die subjektiven Gefallen-Noten direkt über den objektiven Kennwerten aufgetragen werden, siehe Beispieldiagramm Abb. 5.15 (unten). Hier ist das Gefallen der *Reibung/Dämpfung* über der *min./max. Hysteresehöhe* im Frequenzabschnitt 0,5..0,75 Hz aufgetragen. Wird die Gefallen-Note „5“, mittelmäßig, als Beurteilungsgrenze herangezogen, kann daraus abgeleitet werden,

daß die Hysteresehöhe nicht kleiner 0 und größer 2,8 Nm werden darf, um mindestens einen mittelmäßigen subjektiven Eindruck zu erzielen. Ein überschneidendes Verhalten wird dabei ungleich negativer als eine zu große Hysterese evaluiert. Ähnliches gilt für das Gefallen des *Geradeauslaufs*.

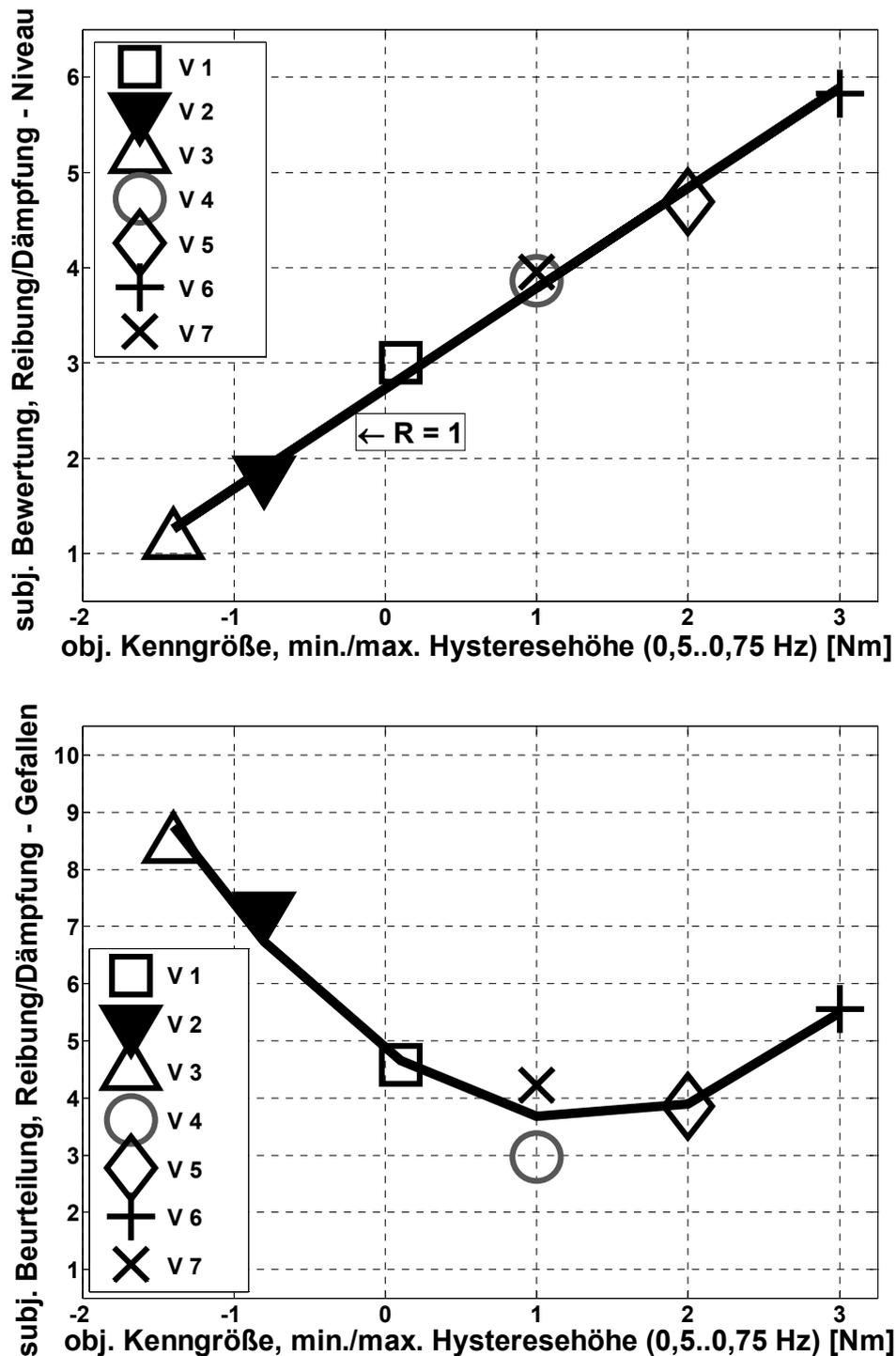


Abb. 5.15: Die Korrelationsplots der subjektiven Mittelwertsnoten hinsichtlich der Niveau-Bewertung (oben) und Gefallen-Bewertung (unten) der Reibung/Dämpfung über der minimalen bzw. maximalen Hysteresehöhe im Abschnitt 0,5..0,75 Hz.

Grundvoraussetzung für die Projektion des Gefallens auf die objektive Kenngröße ist, daß überhaupt ein Zusammenhang zwischen der subjektiven Niveaueinschätzung und dem Meßwert besteht. Dies ist für das Kriterium der *Reibung/Dämpfung* eindeutig gegeben, vergleiche das Diagramm der subjektiven Bewertungsnoten gegenüber den objektiven Kennwerten in Abb. 5.15 (oben). In ähnlicher Weise ist die *Hysteresehöhe* mit der *Geradeauslaufbewertung* über einen Korrelationskoeffizienten von $R = 0,97$ verknüpft. Die Korrelationen der beiden Kriterien sind ebenso durchweg individuell konsistent und bestehen nicht nur zwischen 0,5..0,75 Hz und 0,25..0,5 Hz, sondern auch statisch.

Schlußfolgernd läßt sich festhalten, daß das Lenkmoment bei gegebenen Aufbauigenschaften eine charakterliche Rolle für das Empfinden des Hochgeschwindigkeitsgeradeauslaufs spielt. Die Lenkmomenthysterese sollte sich auch in diesem Betriebspunkt quasistationär und dynamisch in einem bestimmten positiven Bereich bewegen, damit die fahrerinduzierte und auch -reaktive Regeltätigkeit nicht zu nervös ausfällt. Das quasistationäre Verhalten bildet zwar die notwendige, jedoch nicht hinreichende Grundabstimmung der Lenkkraftunterstützung und damit des Lenkmoments. In der Fahrzeugentwicklung ist das hier untersuchte dynamische Verhalten des Lenkmoments gleichsam äußerst wichtig, um den Lenkcharakter positiv zu prägen. Der Frage nach den notwendigen quasi-stationären Grundeigenschaften des Lenkmoments bzw. inwiefern sie unter den Lenkcharakter oder -diskomfort fallen, geht das nächste Kapitel nach.

5.4 Verknüpfung des virtuellen und realen Fahrversuchs über parameteridentifizierte Lenkmomentencharakteristika am Beispiel einer Landstraßenfahrt

Die Untersuchung des Lenkkomforts unter Beteiligung der zehn Fahrzeuge hat teilweise inkonsistente Korrelationen aufgezeigt. Aufgrund des beschränkten Wertebereichs der Lenkmoment-Kenngrößen, der durch die Fahrzeuge gegeben war, konnte die Verknüpfung als Lenkcharakter oder -diskomfort Aspekt noch nicht eindeutig identifiziert werden. Die beiden bisher vorgestellten Experimente nutzten maßgeschneiderte Modelle, um konkrete, wichtige Betriebszustände zu durchleuchten. Im nachstehenden wird ein modellbasierter Gesamtfahrzeugansatz mit dem Zweck verfolgt, eine Brücke zur Komponentenebene und Simulation zu schlagen, um Rückschlüsse auf die Ursachen und Wirkungen zwischen Bauteil- und Lenkeigenschaften ziehen zu können, und frei beliebige Lenkmomentcharakteristika darzustellen.

5.4.1 Methode zum Erfahrbarmachen modellbasierter Lenkmomente

Das involvierte Modell geht aus früheren Studien auf dem Feld des „Model-based Testing“ (MbT) hervor, worin die Fahrdynamik in eine spezifische Modellumgebung¹⁹⁹ eingebettet und über ein Online-Identifikationsverfahren²⁰⁰ objektiv bewertet wird. Die Fahrdynamik wird sodann auf Basis der Modellparameter, welche aus stationären und dynamischen Open-Loop Tests identifiziert sind, analysiert²⁰¹.

Diebold et al. wiederum präsentieren ein kombiniertes Modell²⁰², das modular unterteilt ist in ein Lenkungs-²⁰³ (die Modellbildung ist für HPS aufgestellt), Achsen-, Erweitertes Einspur- und ein Hilfsmodell, das die Fahrbahnquerneigung, den Rollwiderstand und die Aerodynamik berücksichtigt. Es bildet die Basis für die im Folgenden vorgestellten Weiterentwicklungen²⁰⁴, um das Modell in der vorliegenden Arbeit zur Objektivierung nutzen zu können. Eingabegrößen sind

- der Lenkradwinkel,
- die Lenkgeschwindigkeit,
- die Lenkbeschleunigung und
- die Fahrgeschwindigkeit.

Ausgangsgrößen sind, zusätzlich zu den vorgenannten,

- der Radwinkel,
- die Querbewegung,
- der Wankwinkel,
- die Wankgeschwindigkeit,
- die Giergeschwindigkeit und
- der Schwimmwinkel.

Das Fahrzeugmodell liefert dem Lenksystem das Rückstellmoment M_R und über den Nachlauf n_K die Seitenkraft F_{SV} . Das Lenkungsmodell, siehe Abb. 5.16, ist aufgeteilt in zwei Einheiten, primär vom Lenkrad zum Torsionsstab und sekundär

¹⁹⁹ Meljnikov 2003

²⁰⁰ Zomotor 2002

²⁰¹ Kobetz 2004

²⁰² Diebold et al. 2006

²⁰³ Däsch 2004, Ammon et al. 2006

²⁰⁴ Feinauer 2007, Zschocke / Albers 2008b

vom Torsionsstab zum Rad. Die Seitenkraft F_{SV} und das Rückstellmoment M_R befinden sich zusammen mit dem Radträgheitsmoment J_R und dem Moment aus dem Radlasthebelarm M_ε mit den Sekundär lenkungsparametern auf der rechten Seite von Gl. [26] im Momentengleichgewicht um die Lenkachse.

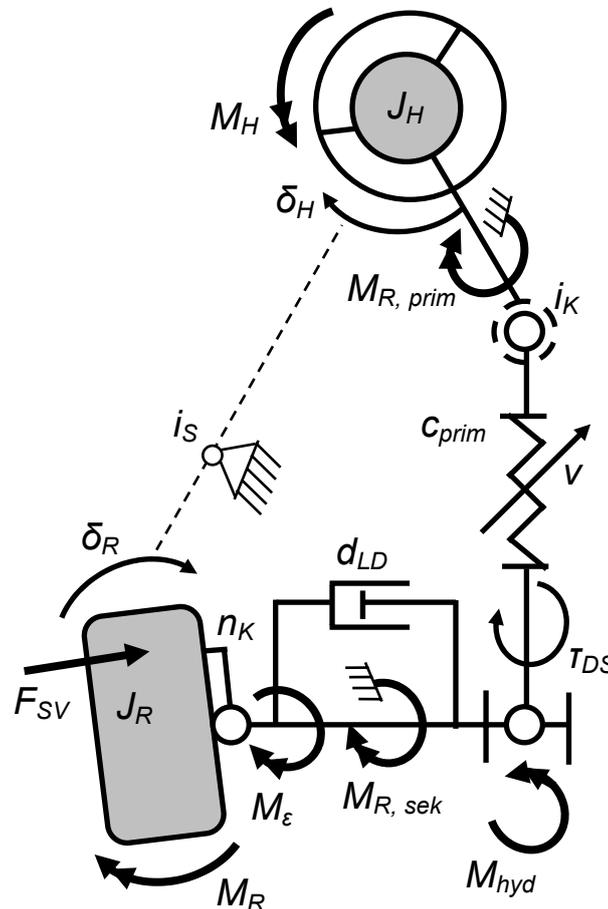


Abb. 5.16: Prinzipskizze des in Primär- und Sekundärseite geteilten Lenkungsmodells²⁰⁵.

Der Beitrag aus der Primärsteifigkeit c_{prim} wird über die, um die Kardanik i_K korrigierte, differentielle Lenkübersetzung d_{i_S} auf die Sekundärseite transformiert. Hierbei stellt der Torsionsstabverdrehwinkel T_{DS} (unter Vernachlässigung der Kardangelenke) die Differenz zwischen Lenkrad- und Ritzelwinkel dar. Die Primärsteifigkeit besteht aus einer Reihenschaltung zwischen Mantelrohr- und Torsionsstabsteifigkeit, die bei fahrgeschwindigkeitsparametrierten Lenkungen veränderlich modelliert ist. Das bedeutet, daß sich die Grundbauteilsteifigkeit zusätzlich erhöhen kann; in der Realität geschieht dies z.B. durch eine hydraulisch-mechanische Beaufschlagung.

²⁰⁵ Zschocke / Albers 2008b

Die Sekundärreibung $M_{R, \text{sek}}$ und das Lenkungsdämpfermoment (mit Dämpfungskoeffizient d_{LD}) arbeiten gegen das Unterstützungsmoment M_{hyd} und die Primärseite, vergleiche Gl. [25].

$$F_{SV} \cdot n_K + M_R + M_\epsilon + J_R \cdot \ddot{\delta}_V = c_{\text{prim}}(v) \cdot T_{DS} \cdot d\dot{i}_S + M_{\text{hyd}} - M_{R, \text{sek}} - d_{LD} \cdot \ddot{\delta}_V \quad [25]$$

woraus δ_V = Freiheitsgrad der Raddrehung um die Hochachse.

$$M_H - J_H \cdot \ddot{\delta}_H = c_{\text{prim}}(v) \cdot T_{DS} \cdot d\dot{i}_K + M_{R, \text{prim}} \quad [26].$$

Die Primärseite schließt die Lenksäule vom Lenkrad bis zum Lenkventil ein. In diesem Zweig beeinflussen nur die Lenksäulenkomponenten und, der hier implementierten Modellierung zufolge, eine optionale fahrgeschwindigkeitsabhängige Unterstützungsfunktion das Lenkmoment. Referenz für die primärseitige Momentengleichung Gl. [26] ist der Torsionsstab, der das Maß der Unterstützung als Schnittstelle zur Sekundärseite steuert. Unter Vernachlässigung des Lenkradträgheitsmoments bringt der Fahrer ein Lenkmoment auf, das der Summe aus mechanischem Lenken (inklusive des fahrgeschwindigkeitsabhängigen Faktors) und Primärreibung, also Mantelrohrreibung $M_{R, \text{prim}}$, entspricht.

Im Übrigen sind die Primär- und Sekundärreibungselemente in elastisch-dämpfender Weise angebunden, vergleiche Abb. 5.17.

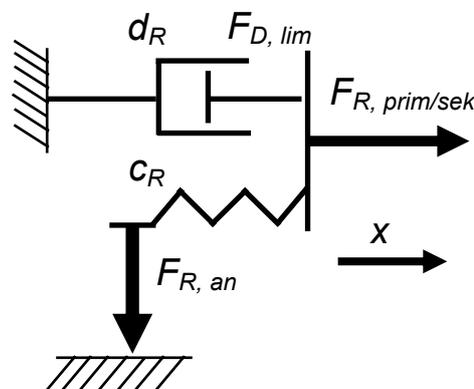


Abb. 5.17: Das sowohl primär- als auch sekundärseitig implementierte Reibungsmodell (hier mit Kräften dargestellt)²⁰⁶.

Da das modellierte Lenkmoment subjektiv von Testpersonen evaluiert wird, ist die Reibungsmodellierung von überragender Bedeutung für das gesamthafte Empfinden des Lenkmoments, insbesondere im On-Centre Bereich. In jedem Subsystem ist das Reibelement eine Parallelschaltung von exponentiellen Dämp-

²⁰⁶ Zschocke / Albers 2008b

fern und Federn, die aus empirischen Ansätzen²⁰⁷ abgeleitet sind. Hierbei ist das jeweilige Reibelement für Primär- und Sekundärseite aus Gl. [27] durch Momententerme ausgedrückt:

$$M_{R, \text{prim/sek}} = M_{R \text{ prim/sek, an}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{M_{R \text{ prim/sek, an}}}{c_{R \text{ prim/sek}}} \delta_{H/V}}\right) + M_{D \text{ prim/sek, lim}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{M_{D \text{ prim/sek, lim}}}{d_{R \text{ prim/sek}}} \delta_{H/V}}\right) \quad [27].$$

Die Faktoren $M_{R \text{ prim/sek, an}}$ und $M_{D \text{ prim/sek, im}}$ begrenzen die exponentiellen Feder- und Dämpferkennlinien, die durch die konstanten Feder- und Dämpferkoeffizienten $c_{R \text{ prim/sek}}$ und $d_{R \text{ prim/sek}}$ als Funktion der Lenkrad- (primärseitig, $M_{R \text{ prim, an}}$) oder Radwinkelfreiheitsgrade (sekundärseitig, $M_{R \text{ prim/sek, an}}$) gegeben sind. Das Moment $M_{R \text{ prim/sek, an}}$ stellt jeweils einen aus Meßdaten für die Primär- und Sekundärseite analysierten Wert dar. Die übrigen Größen müssen über eine Optimierung identifiziert werden. Das Reibungselement könnte durch einen zusätzlichen zu optimierenden Vorfaktor lastabhängig ausgeführt werden; dies erweist sich aber für die im On-Centre Bereich auftretenden Kräfte als nicht signifikanter Einfluß²⁰⁷.

Der gesamte Parameter-Identifikationsprozeß besteht aus drei Meßverfahren, die auf einem Gesamtfahrzeugprüfstand durchgeführt werden, ähnlich dem aus Data et al.²⁰⁸. Lenkmoment und -winkeldaten werden während des Lenkens von Anschlag zu Anschlag sowohl mit als auch ohne Lenkhilfe gesammelt. Zuerst wird die Lenkübersetzung zwischen Rad- und Lenkradwinkel auf Drehplatten bestimmt. Zweitens können die Torsionsstab- und Mantelrohrsteifigkeit analysiert werden, indem in die Anschläge und wieder zurück gelenkt wird. Bei Betrachtung des Diagramms Lenkmoment gegenüber -winkel innerhalb des Anschlagbereichs sind die resultierenden Gradienten Maße für die Steifigkeiten. Drittens wird bei ruhendem Verbrennungsmotor, d.h. ohne Lenkhilfe, über den gesamten Lenkbereich hinweg gelenkt. Hierbei bildet der Gradient die Komponente der Radlastrückstellung (Gewichtsrückstellung) sowie die Höhe der Hysterese die Summe aus Sekundär- (in Gl. [27] dementsprechend $M_{R \text{ sek, an}}$) und Primärreibung ab²⁰⁹ ($M_{R \text{ prim, an}}$ in Gl. [27]).

Die Kombination aus beiden Meßverfahren (mit/ohne Lenkhilfe) ermöglicht die Analyse der Primärreibung sowie der Lenkunterstützungskennlinie, siehe Abb. 5.18. Das Auftragen der Meßdaten ergibt vier Schnittpunkte, in denen die Hysterese des unterstützten Lenkradmomentes derjenigen ohne Lenkhilfe gleicht, vergleiche Abb. 5.18 (links). Zwei der betreffenden Zweige repräsentieren die Primärreibung als einen sehr guten Startwert für die nachfolgende Optimierung. Die

²⁰⁷ Neureder 2002

²⁰⁸ Data et al. 2004

²⁰⁹ Oparin 2005

Differenz beider Lenkhystereseschleifen impliziert zudem das Maß der Lenkunterstützung, d.h. den Unterschied zwischen beiden Lenkmomentverläufen bringt die Lenkhilfe auf. Das Ausmitteln der Differenzkurve und Multiplizieren mit der Gesamtlenkübersetzung führt zum, auf die Lenkachse bezogenen, Unterstützungsmoment. Der Torsionsstabverdrehwinkelbereich ist abgeleitet aus dem Lenkunterstützungsmoment geteilt durch die Kardanübersetzung und analysierte Torsionsstabsteifigkeit. Die Approximation der Datenpunkte durch eine Funktion dritter Ordnung führt im letzten Schritt zur Unterstützungskennlinie, siehe exemplarisch Abb. 5.18 (rechts)²¹⁰.

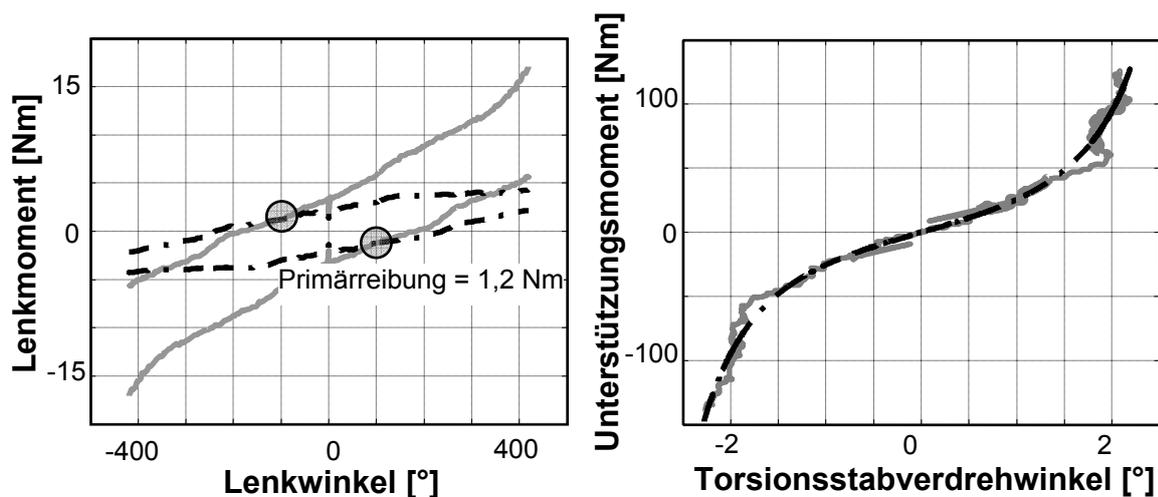


Abb. 5.18: Links, exemplarische Lenkhystereseschleifen aus Messungen auf Drehplatten mit (strich-punktiert) und ohne Lenkhilfe (durchgezogen); rechts, Verlauf des Unterstützungsmoments über dem Torsionsstabverdrehwinkel aus Meßdaten (durchgezogen) und mit Näherungskurve (strich-punktiert)²¹¹.

Auf der Teststrecke werden mit dem jeweils zu identifizierenden Fahrzeug stationäre Kreisfahrten, Lenkungsziehen, Weaves und Frequenzgänge durchgeführt, während die Aufbau- und Lenkgrößen erfaßt werden. Anschließend werden die Meßdaten in das kombinierte erweiterte Einspur- und Lenkungsmodell eingegeben, so daß ein Optimierungsverfahren die fehlenden Parameter, durch einen stetigen Vergleich zwischen realer Messung und virtueller Modellsimulation, identifizieren kann²¹². Die Stationäre Kreisfahrt liefert die Kennlinien des Reifenrück-

²¹⁰ Würde der Betrag der illustrierten Unterstützungskennlinie gebildet, ergäbe sich tendenziell eine sog. „V“-Form; die gegensätzliche Art ist die „U“-Form, d.h. für kleine Lenkwinkel ist das Unterstützungsmoment geringer.

²¹¹ Feinauer 2007

²¹² Däsch 2004, Oparin 2005

stellmoments, die Schräglaufsteifigkeit und den Nachlauf. Aufgrund der Versuchsdurchführung des Lenkungsuziehens bei verschiedenen Fahrgeschwindigkeiten kann die geschwindigkeitsabhängige Unterstützungsfunktion optimiert werden. Entscheidend für den subjektiven Lenkcomfort ist die Optimierung der Reibungsparameter aus Gl. [27] im On-Centre Weave-Test. Letztlich stellen die Frequenzgangdaten die Dynamik der Aufbaubewegungen und des Lenkmoments dar. Pro identifiziertem Fahrzeug resultiert so ein Parametersatz.

Das Modell und seine betreffenden Parameter werden durch Vergleich der charakteristischen Lenkmomentkenngrößen validiert. Zum einen werden diese aus den eigentlichen Prüfmanövern ausgewertet, zum anderen aus der Simulation gewonnen, wobei die gemessenen Lenkwinkel-, Lenkgeschwindigkeits- und Fahrgeschwindigkeitssignale als Inputs dienen. Die Diagramme in Abb. 5.19 illustrieren exemplarisch für ein reales Fahrzeug und seinen korrespondierenden virtuellen „Fingerabdruck“ Kennlinien aus Weave und Lenkungsuziehen:

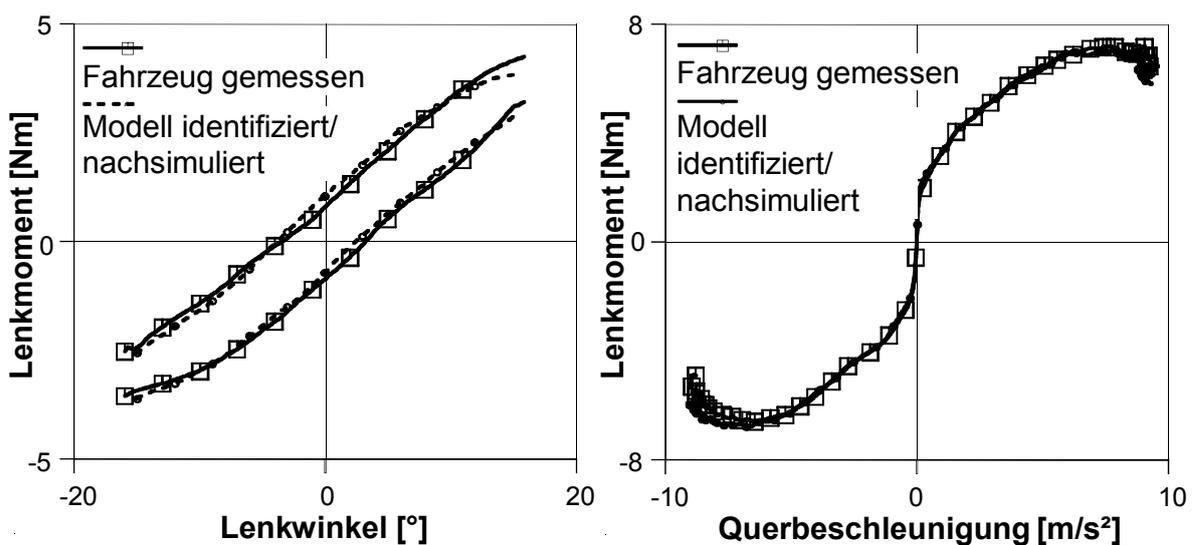


Abb. 5.19: Für ein Fahrzeug simulierte und gemessene Weave-Hystereseschleifen (die Umkehrpunkte sind vernachlässigt, links) bzw. Kennlinien aus Lenkungsuziehen (rechts).

Lenkmomentbeträge und -gradienten aus Simulation und Messung sind sowohl On- als auch Off-Centre sogar bis in den nichtlinearen Grenzbereich in großer Übereinstimmung; das gilt in gleicher Weise über den gesamten Fahrgeschwindigkeitsbereich, entsprechend den eingegebenen Lenkungsuziehen-Messungen. Ausgenommen ist das Parkieren, da das Bohrmoment nicht modelliert ist; jedoch ist dieser Betriebspunkt auch nicht Gegenstand der modellbasierten Untersuchungen. Die Validierung anhand des Frequenzgangs präsentiert eine Vergleichbarkeit zwischen Versuch und Simulation bis ca. 0,6 Hz. Darüber hinaus beschreibt die

Modellierung die Realität noch ungenügend, allerdings ist die Validität für einen Probandenversuch im Normalfahrbereich absolut gegeben. Bemerkenswerterweise zeigen identifizierte Fahrzeuge, die über eine EPS-Lenkung verfügen, im Vergleich zur Auswertung der realen Meßdaten eine ebenso große Übereinstimmung in den Kennwerten.

Zusammengefaßt bedeutet dies, daß das simulierte Lenkmoment, das aus einem identifizierten Fahrzeugmodell stammt, die wirkliche Lenkmomentcharakteristik eines realen Fahrzeugs im Rahmen des betrachteten Betriebsraums korrekt abbildet. Infolgedessen können die Lenkmomentcharakteristika verschiedener realer Fahrzeuge mittels des modellbasierten Ansatzes und des Lenkmomentenstellers in einem Versuchsträger unter einheitlichen Gesamtfahrzeugrandbedingungen erfahren werden. Neben den Fragebögen und statistischen Werkzeugen dient das modellbasierte Verfahren als Teil der Methode zur Lenkmoment-Objektivierung.

5.4.2 Variantengenerierung durch Modellparametrierungen

Vier Pkw, jeweils ein Kompaktwagen, gehobenes Mittelklasse-Coupé, -Limousine und Luxuslimousine ausgerüstet mit HPS werden den vorgenannten Test- und Identifikationsprozeduren unterzogen, was einen einzigartigen Parametersatz für jedes Fahrzeug produziert. Die Ergebnissätze machen zusammen mit acht Derivaten die Versuchsvarianten für die subjektive Evaluierung aus. Die Derivate basieren auf einem der Parametersätze der vier realen Fahrzeuge und differieren von ihm in einem oder bis zu vier veränderten Lenkungsparametern, vergleiche Tab. 5.5. Zeile 1 aus Tab. 5.5 enthält z.B. die Torsionsstabsteifigkeit-, Primär- und Sekundärreibungparameter für Fahrzeug 1. Reihe 2 repräsentiert ein Derivat davon mit einem Modell-Primärreibungswert von 1,5 Nm anstatt 0,9 Nm. Reihe 3 zeigt ein Derivat mit einer im Vergleich zur Basis stark U-förmigen Unterstützungskurve; folglich Reihe 4 ein Modell mit deutlicher V-Form. Unter Betrachtung von Fahrzeug 4 als Referenz, spannen die Parametersätze des Versuchs ungleich große Wertebereiche von bis zu 250% Variation auf, um eine subjektive Evaluierung einer weiten Kennwertespreizung zu ermöglichen.

| Fzg | Derivat | Torsionsstabsteifigkeit [Nm/°] | Primärreibung [Nm] | Sekundärreibung [Nm] | Unterstützungskurve [-] |
|----------|----------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|
| | | 1 | 0,9 | 80 | |
| 1 | 2 | | 1,5 | | |
| | 3 | | | | U |
| | 4 | | | | V |
| | | 0,75 | 0,66 | 46,6 | |
| 2 | 2 | 0,25 | | | |
| | 3 | | 0,2 | | |
| | | 1,37 | 0,72 | 51,5 | |
| 3 | 2 | | | | U |
| | 3 | | 1,2 | | U |
| | 4 | 1,1 | 0,7 | 64 | U |
| | | 0,8 | 0,59 | 80,8 | |

Tab. 5.5: Extrakt aus vier Ursprungsmodellparametersätzen (Fahrzeug 1 bis 4) und ihrer Derivate, die sich in der Torsionsstabsteifigkeit, den Reibungswerten und/oder Unterstützungskurvenformen unterscheiden (**fettgedruckt** = Kurvenform stark verändert, normal = leichte Veränderung).

Die Parametersätze können sodann als Versuchsvarianten in den Lenkmomentensteller integriert werden. Der Torquemotor liefert die Modelleingangsgrößen Lenkwinkel und -geschwindigkeit in Echtzeit bzw. wird die Fahrgeschwindigkeit dem Modell über den Pkw-CAN zur Verfügung gestellt. Der Lenkmomentensteller stellt denen entsprechend die Modellvorgabe für die Probanden. Die Versuchsvarianten aus Tab. 5.5 sind entwickelt, um eine möglichst große Spreizung der zu untersuchenden quasi-stationären Lenkmoment-Kenngrößen zu erreichen.

Für Fahrzeug 2 und seine beiden Derivate ist das resultierende Verhalten exemplarisch im Weave und Lenkungsziehen 100 km/h in Abb. 5.20 dargestellt. Im Vergleich zum identifizierten Basisfahrzeug führt die reduzierte Primärreibung von Derivat 3 im Weave bereits quasi-stationär zu einer Minimierung der Hysterese über den gesamten Lenkwinkelbereich hinweg, vergleiche Abb. 5.20 (links), und einem Offset über der Querbeschleunigung im Lenkungsziehen, Abb. 5.20 (rechts). Die geringere Torsionsstabsteifigkeit von Derivat 2 wirkt sich als Skalierungsfaktor für den Lenkmomentverlauf aus.

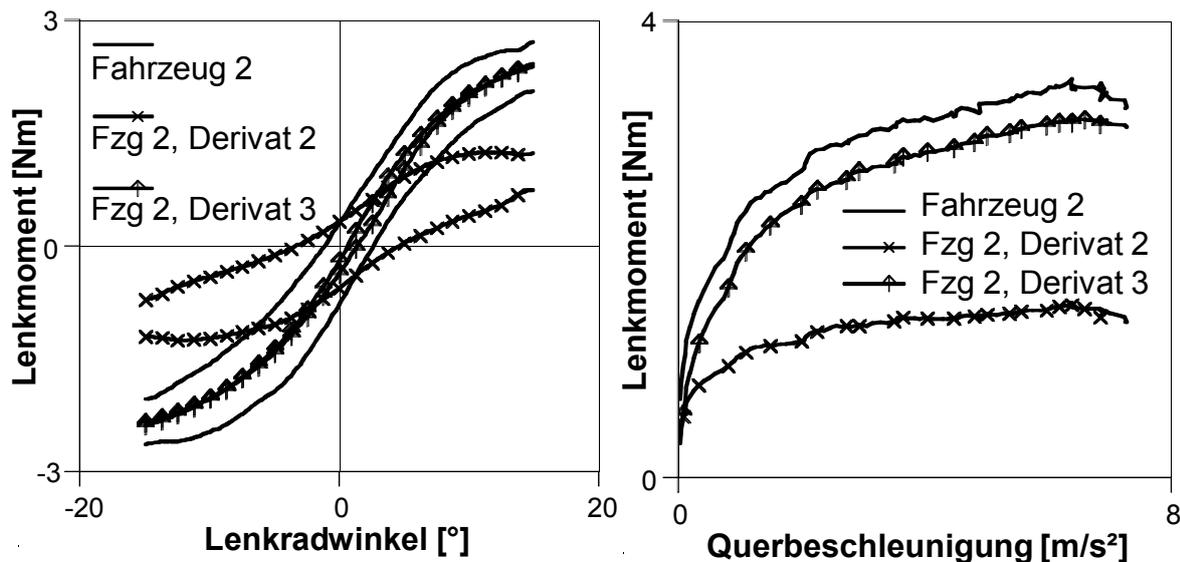


Abb. 5.20: Weave und Lenkungsziehen-Kennlinien der drei Versuchsvarianten basierend auf Fahrzeug 2.

Da die Modelle mit ihren ganzheitlichen Lenkmoment-Charakteristika das Sollmoment für den Lenkmomentensteller liefern, ist es möglich, virtuell Bauteileigenschaften zu verändern und ihre Auswirkungen auf den subjektiven Eindruck direkt zu erfahren. Auch können z.B. die Lenkmoment-Abstimmungen verschiedener Fahrzeugtypen in einem Versuchsträger dahingehend evaluiert werden, wie sie sich subjektiv in einem anderen Gesamtfahrzeugumfeld darstellen.

5.4.3 Versuchsplan

Zwölf Einstellungen werden 18 Experten- und fünf Normalfahrern präsentiert während sie auf dem, aus der ersten Untersuchung (Kap. 4) bekannten, typischen Landstraßenprofil mit einer Geschwindigkeit zwischen 70 und 100 km/h fahren. Unterdessen sind sie gebeten, die folgenden Kriterien zu evaluieren:

- *Mittenzentrierung,*
- *Anlenkmoment,*
- *Reibung,*
- *Lenkmomentgradient im Weiterlenkbereich und*
- *Kurvenwilligkeit/Gierreaktion.*

Das soll mit der Hilfe der zwei bekannten, sechs- und zehnstufigen Skalen, vergleiche Abb. 5.21, bewerkstelligt werden. Auf der ersten Skala sollte das Kriterium in einem neutralen Niveau-Sinne bewertet werden, so z.B.: Ist die wahrgenomme-

ne *Mittenzentrierung* niedrig, was zur Stufe „1“ korrespondiert oder hoch, „6“, oder irgendwo dazwischen? Auf der zweiten Skala gilt: Wie gefällt das betreffende Niveau aus der Geschmacksperspektive, „1“ wäre „hervorragend“, „10“ desaströs?

| Landstraße Fahrzeug Richtgeschw. 100 km/h Fahrer | | Bewertung (nicht fahrzeugklassenspezifisch!) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|--|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | Niveau | | | | | Gefallen | | | | | | | |
| Kriterium | Beschreibung | | | | | | hervorragend | gut | mittelmäßig | dürrtig | sehr schlecht | | | |
| Mittenzentrierung | Kraftanstieg auf den ersten 3-5° Lenkwinkel und die Rücklenkwilligkeit in die Geradeausstellung | gering | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Anlenkmoment | Kraft, die am Lenkrad im ersten Moment des Anlenkens in eine Kurve hinein spürbar ist | niedrig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Reibung | Die Lenkung vermittelt den Eindruck, "lose" oder "verklebt" zu sein | gering | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Lenkmomentgradient im Weiterlenkbereich | Lenkkräftenstieg über Querbeschleunigungsbereich | flach | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Kurvenwilligkeit/ Gierreaktion | Wie schnell geht das Fahrzeug von der Geradeaus- in die Kurvenfahrt über? | klein | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Abb. 5.21: Fragebogen zu den Lenkmoment-/Gierreaktionsbewertungen und -beurteilungen der modell-basierten Versuchsvarianten auf dem Landstraßenprofil.

Um ein gemeinsames Verständnis der Kriterien zu erreichen, ist für jedes einzelne eine Beschreibung enthalten. Obwohl die Gesamtfahrzeugreaktion durch die Lenkmomenteneinstellungen nicht verändert wird, ist die Frage nach der subjektiven *Gierreaktion* mit eingeführt, um den Einfluß verschiedener Lenkmomentniveaus darauf nachzuvollziehen. Abschließend wird den Testpersonen unwissentlich eine der ersten evaluierten Einstellungen nochmals eingespielt, um die experimentelle Reliabilität zu überprüfen.

Im vorliegenden Experiment wird das fahrdynamische Verhalten der Einstellungen objektiv im Weave und Lenkungszuziehen bei 70 und 100 km/h ausgedrückt und untersucht, weil die Probanden die Modelle in einem quasistationären Fahrzustand niedriger Lenkfrequenz evaluieren, siehe Abb. 5.22:

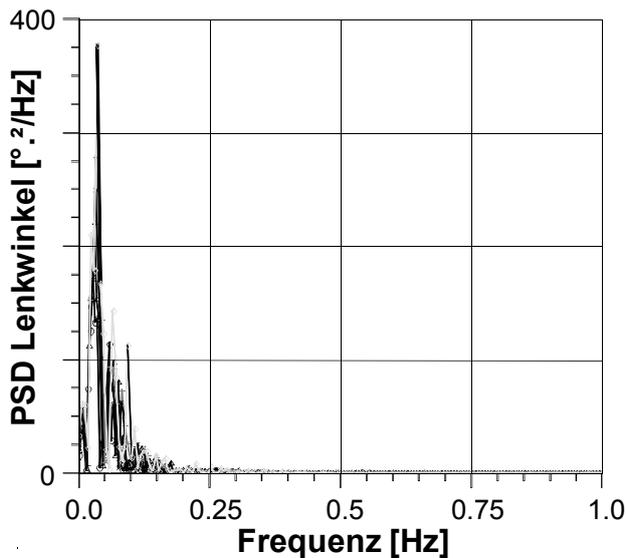


Abb. 5.22: FFT über Lenkwinkelsignale aus mehreren Landstraßenfahrten.

Der Übersichtlichkeit willen zeigt das Diagramm aus Abb. 5.23 nur vier Versuchseinstellungen im Weave Test: sie verkörpern die Extremvarianten in der *Hysteresehöhe* und *-steigung*. Die übrigen rangieren mit ihren Hystereseformen zwischen diesen vier. Die Parametervariationen verursachen verschiedenartige Formen der Weave Hystereseschleifen im Hinblick auf ihre Steigung und Höhe über den Lenkwinkelbereich. Sowohl die Versteifung des Torsionsstabes als auch die Anpassung der Unterstützungskennlinie in Richtung „U“ erhöhen die Steigung, z.B. Fahrzeug 3 Derivat 3. Ein weicherer Torsionsstab senkt die Neigung der Hysterese, Fahrzeug 2 Derivat 2. Eine größere Reibung verdickt die Schleife, wie z.B. bei Derivat 2 von Fahrzeug 1. Im Umkehrfalle führt eine virtuelle, fast hysteresefreie Lenkung des Derivats 3 von Fahrzeug 2 bereits quasistationär zu einer Ausdünnung der Hysterese.

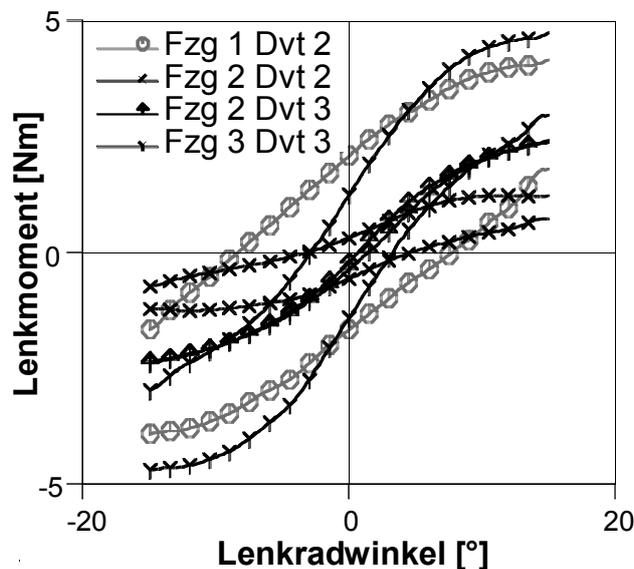


Abb. 5.23: Weave-Ergebnisse von vier Versuchsvarianten, Lenkmoment über Lenkwinkel („Fzg“ = Fahrzeug, „Dvt“ = Derivat).

Im Lenkungsziehen verantwortet eine V-förmige Lenkunterstützungskurve ein eher lineares Verhalten mit relativ niedrigen *Anlenkmomenten* bei niedrigen Querbeschleunigungen und schwergängigeren Momenten bei höheren a_y , wie z.B. bei Fahrzeug 3 oder 4, vergleiche Abb. 5.24 (links unten).

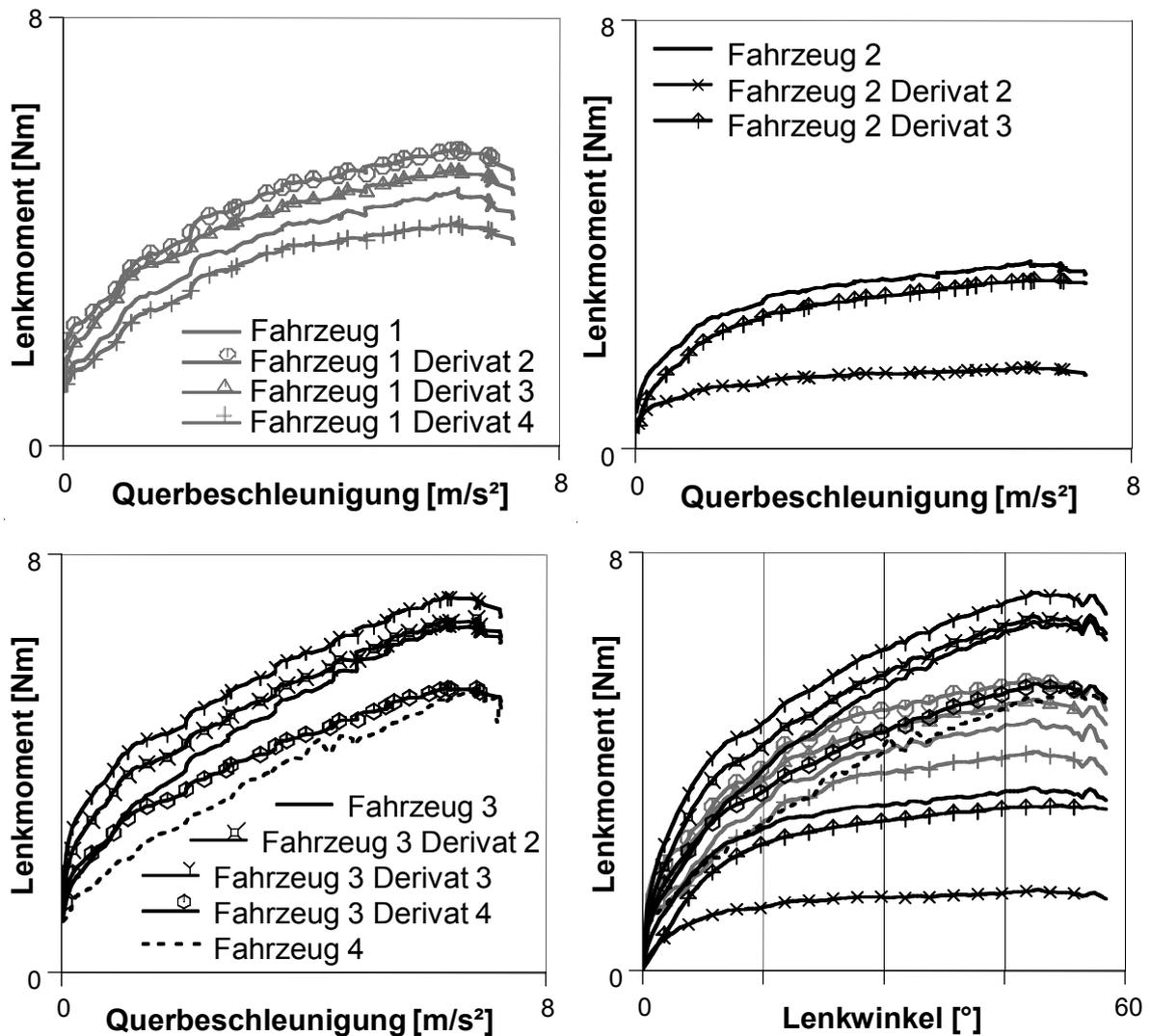


Abb. 5.24: Ergebnisse der Versuchsvarianten aus Lenkungsziehen, Lenkmoment vs. Querbeschleunigung (Kennlinien ohne Symbole repräsentieren die Basismodelle, mit Symbolen und gleicher Farbe die zugehörigen Derivate); Lenkmoment über Lenkwinkel aus Lenkungsziehen aller Fahrzeuge (unten rechts).

Mehr oder weniger Reibung bedeutet ein Offset relativ zur Basis, wogegen die Torsionsstabssteifigkeit, wie schon im vorhergehenden Kapitel gesehen, als Skalierungsfaktor für die gesamte Kennlinie wirkt.

Dieses Bündel von Einstellungen ist entwickelt worden, um weite Bereiche in den objektiven Kennwerten zu spannen, welche innerhalb eines Fahrzeugtyps

nicht üblich sind; höchstens von „exotischen“ Segmenten wie Supersportwagen oder Pick-up Trucks vorgewiesen werden. Das jeweilige Modell ist hier also Teil einer Methode zur Validierung objektiver Kenngrößen: Das reale Fahrzeugverhalten wird im Modell abgebildet, analysiert, u.U. verändert und mit Hilfe des Lenkmomentenstellers subjektiv erfahren, woraus wiederum Rückschlüsse auf die Kenngröße gezogen werden können.

Die charakteristischen Lenkmomentkurven über dem Lenkradwinkel und der Querbeschleunigung aus beiden Manövern können durch Lenkmomentbeträge bei diskreten Winkeln oder Beschleunigungen und Gradienten, die über bestimmte On- und Off-Centre Bereiche gebildet sind, beschrieben werden. Unter ihnen sollen hier aus dem Weave-Test der Ordinatenabschnitt, das *Reibungsmaß*, als ein Maß für die Hysteresehöhe und der maximale On-Centre Gradient, die sog. *Lenkungssteifigkeit*, für die Hysterese Steigung exemplarisch erwähnt werden. Aus der ersten Objektivierungsuntersuchung resultieren die Mittengradienten und Ordinatenabschnitte der Weave Lenkmomenthysterese sowohl bezogen auf die Querbeschleunigung als auch den Lenkwinkel als Indikatoren für die subjektive *Mittenzentrierung* bzw. *Reibung*.

| Manöver | objektive Kenngröße | Einheit | Min | Max |
|-------------------|---|------------------------|------|------|
| Weave | Lenkungssteifigkeit | Nm/° | 0,13 | 0,44 |
| | Reibungsmaß | Nm | 0,2 | 3,8 |
| Lenkungs-zuziehen | Anlenkmoment (1 m/s ²) | Nm | 1,1 | 4,1 |
| | Lenkmoment (4 m/s ²) | Nm | 1,4 | 6,1 |
| | Lenkmomentgradient (1-4 m/s ²) | Nm/(m/s ²) | 0,11 | 0,8 |

Tab. 5.6: Minimale und maximale Werte der Versuchsvarianten ausgewählter Kenngrößen aus Weave und Lenkungs-zuziehen 100 km/h.

Das Niveau des Lenkmoments, d.h. die Frage nach der Leicht- oder Schwergängigkeit, kann im Lenkungs-zuziehen ausgedrückt werden durch die *Beträge* bei 1 und 4 m/s² für den On- bzw. Off-Centre Bereich. Der Anstieg des Lenkmoments zwischen 1 und 4 m/s², der so bezeichnete *Lenkmomentgradient (1-4 m/s²)*, vermittelt im Normalfahrbereich eine Rückmeldung über die Querbeschleunigung durch das Lenkmoment. Die Kennwerte dieser Größen können sodann mit den korrespondierenden subjektiven Kriterienevaluierungen korreliert werden. Die Ta-

belle Tab. 5.6 führt die, durch die Versuchsvarianten, auftretenden Werteminima und -maxima für ausgewählte Kenngrößen auf, um die großen Spannweiten des Versuchs zu verdeutlichen.

5.4.4 Versuchsergebnisse

Einmal gesammelt, werden sowohl die subjektiven als auch objektiven Daten dem bekannten Analyseprozeß unterzogen. Alle objektiven Kennwerte und subjektiven Experten- und Normalfahrernoten stellen sich aus der Varianzanalyse als signifikant verschieden und aus den Verteilungstests als normalverteilt heraus. In Anbetracht der objektiven Redundanzen determinieren die Steigungen der Lenkmomenthysterese gegenüber Lenkwinkel und Querbeschleunigung aus Weave (*Lenkungssteifigkeit* und *Lenkmomentgradient*), die Momentenbeträge im betreffenden Bereich $\pm 2 \text{ m/s}^2$ und $\pm 15^\circ$. Unter der gegebenen Lenkübersetzung des Versuchsträgers ist die Analyse der Lenkmomentbeträge in Bezug auf Querbeschleunigung und Lenkradwinkel äquivalent. Subjektiv besteht für beide Testgruppen ein sehr hoher Zusammenhang zwischen den Niveau-Einschätzungen des *Anlenkmoments* und der *Gierreaktion*. Im Gefallen existiert eine Beziehung zwischen der subjektiven *Reibung* und *Mittenzentrierung*: falls die *Reibung* gefällt, gilt dies ebenso für die *Mittenzentrierung*.

Die Analyse der Reliabilität im Versuch erweist grundsätzlich eine sehr gute Reproduzierbarkeit mit maximalen Niveau-Bewertungsdrifts der Fachleute von einem halben Notenpunkt und nur unwesentlich größeren für die Kundenfahrer, vergleiche Tab. 5.7. Die größte Abweichung von einem Notenpunkt in der Gefallensbeurteilung haben die Normalfahrer im Kriterium *Anlenkmoment*; sie beurteilen hierbei das subjektiv kleiner werdende Moment besser. Bezüglich der *Mittenzentrierung* ist die Kopplung zwischen Niveau und Gefallen der beiden Testgruppen schlüssig; zwar driften sie im Niveau in verschiedene Richtungen, jedoch im Gefallen dem entsprechend auch in die entgegengesetzte Richtung. Im allgemeinen evaluieren die beiden Gruppen einheitlich in ihrer Tendenz.

| Kriterium | Niveau | | Gefallen | | | | | |
|--------------------|----------|------|----------|----------|------------|------|------|------------|
| | | EF | NF | | | EF | NF | |
| Mittenzentrierung | geringer | 0,1 | -0,4 | höher | besser | 0,1 | -0,2 | schlechter |
| Anlenkmoment | höher | -0,5 | 0,5 | geringer | besser | 0,1 | 1 | besser |
| Reibung | höher | -0,2 | -0,2 | höher | besser | 0,5 | 0,4 | besser |
| Lenkmomentgradient | steiler | -0,5 | -0,6 | steiler | besser | 0,7 | 0 | |
| Gierreaktion | kleiner | 0,5 | 0 | | schlechter | -0,8 | 0,7 | besser |

Tab. 5.7: Zusammenstellung der Differenzen zwischen den gemittelten Bewertungen und Beurteilungen der Basis- und Wiederholungsfahrt (EF = Expertenfahrer, NF = Normalfahrer).

Der Korrelationsplot aus Abb. 5.25 (oben) zeigt, als exemplarisches Experten-Ergebnis auf der Ordinate eingetragen, die Mittelwertsnoten für das subjektiv wahrgenommene Reibungsniveau als eine lineare Regressionsfunktion des objektiven Weave Test *Reibungsmaßes* auf der Abszisse: eine sehr hoher Korrelationskoeffizient von $R = 0,98$ tritt auf. Das heißt, daß die Kriteriumsvariable signifikant durch die objektive Kenngröße erklärt werden kann; neben dem Faktum, daß die Testpersonen eine höhere *Reibung* detektieren, je größer das *Weave Reibungsmaß* ausfällt. Im unteren Diagramm von Abb. 5.25 sind subjektive Gefallensnoten gegen die Niveau Bewertungen aufgetragen. Eine quadratische Beziehung mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,93$ zeigt sich, was ausdrückt, daß unter einem gewissen subjektiven Wahrnehmungslevel das Gefallen negativ, dann positiv und wiederum oberhalb eines anderen negativ wird.

Unter der beispielhaften Berücksichtigung der Gefallensnote „5“ als eine Abnehmbarkeitsschwelle, die die Regressionskurve an den Niveau-Mittelwerts-einschätzungen „2,3“ und „4,7“ schneidet, können diese beiden zurück auf das subjektiv-objektiv Diagramm transferiert werden. Daraus lässt sich ein objektiver Zielbereich ableiten, indem wiederum die Schnittpunkte mit der Regressionsgerade gesucht und auf die Kennwert-Abszisse projiziert werden. Weiterhin ist bemerkenswert, daß zu kleine Reibungswerte subjektiv schlechter als zu große eingeschätzt werden, vergleiche nochmals Abb. 5.25 (unten). Diese Feststellung ist im Einklang mit der Analyse der dynamischen Lenkmomenthysterese.

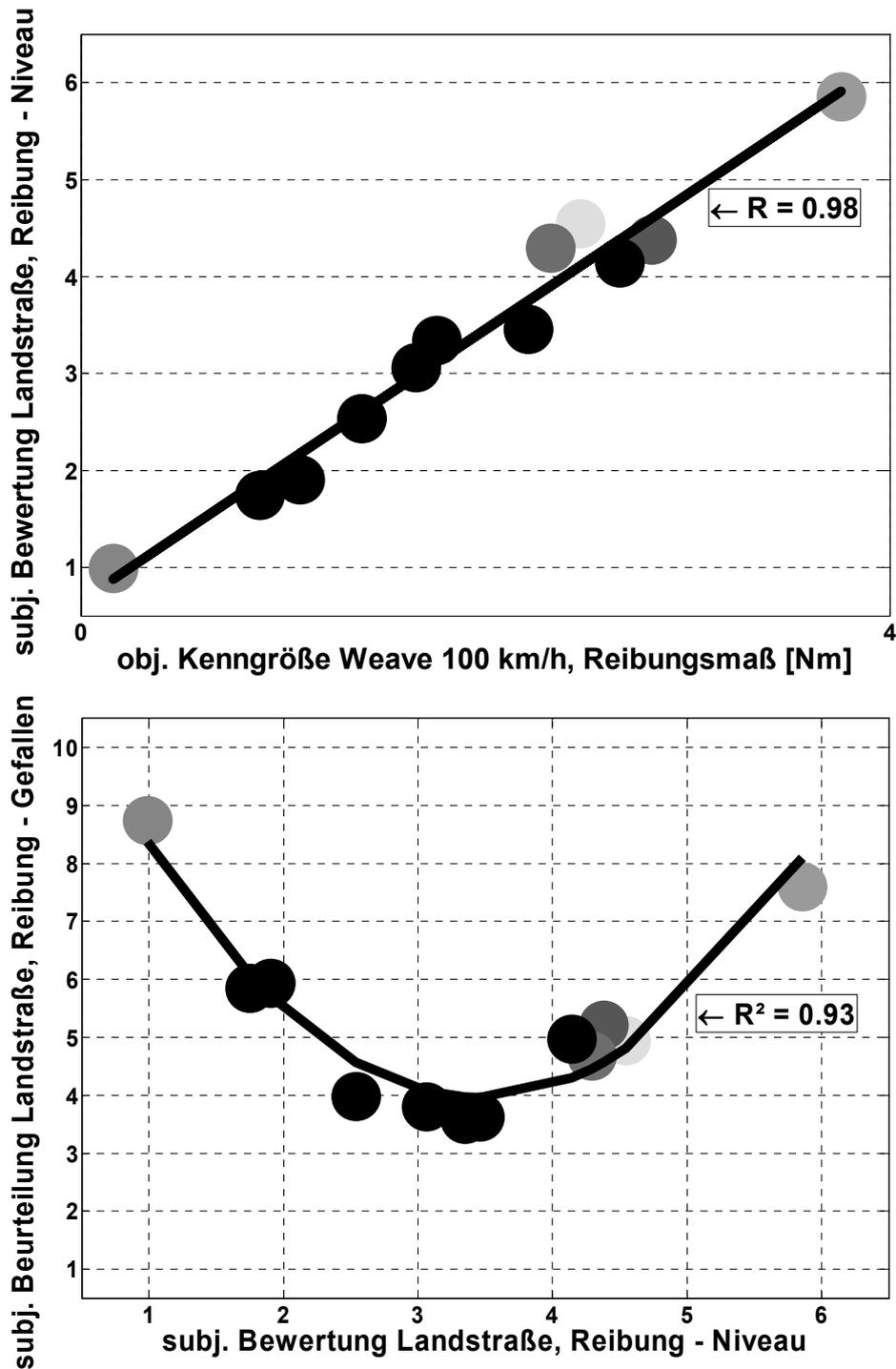


Abb. 5.25: Korrelations- und Regressionsanalyseergebnis der Expertenfahrer für das Kriterium *Reibung* im Hinblick auf das Niveau und die zugeordnete objektive Kenngröße (oben) bzw. das subjektive Gefallen und Niveau, (unten).

Die Analyseverfahren wird ebenso auf die anderen Kriterien angewendet, woraus die in Tab. 5.8 zusammengefaßten Ergebnisse resultieren. Es ergeben sich hohe bis sehr hohe Korrelationskoeffizienten, sowohl für die Experten- als auch Normalfahrer. Im Gegensatz zur Vergleichsfahrt mit der Fahrzeugflotte sind die Normalfahrer in der Lage, die überwiegende Mehrzahl der Kriterien und ihrer zu-

gehörigen Kenngrößen konsistent zu validieren. Für die *Mittenzentrierung* im Zusammenhang mit der *Lenkungssteifigkeit* tritt durch die Normalfahrer zwar eine konsistente, aber nur mittlere Korrelation auf. Mutmaßlich sind die geraden Teilstücke der Bewertungstrecke zu kurz für die Normalfahrer, um den Zusammenhang noch enger aufzulösen. Hinsichtlich der Verknüpfung zwischen Niveau und Gefallen befinden sich die Fachleute und Normalfahrer im Hinblick auf alle Aspekte in Übereinstimmung, so daß die gleichen Zielbereiche für die Kenngrößen festgestellt werden können.

Das Symbol „u“ indiziert die quadratische Verknüpfung zwischen Niveau und Gefallen ähnlich derjenigen für die *Reibung*. Niveau und Gefallen können für die *Mittenzentrierung* nicht verknüpft werden, vermutlich wegen ihrer Interaktion mit dem anderen On-Centre Kriterium *Reibung*. Zumindest ist festzuhalten, daß das Niveau der *Mittenzentrierung* objektiv durch die *Weave-Lenkungssteifigkeit* beschrieben werden kann und sich unter gegebenem Idealwert der *Reibung* in der Mitte des untersuchten Wertebereiches bewegen sollte.

| subjektives Kriterium | | R | | objektive Kenngröße | Manöver |
|-------------------------|---|------|------|---|-----------------------|
| | | EF | NF | | |
| Mittenzentrierung | - | 0,89 | | Lenkungssteifigkeit | Weave |
| Reibungsmaß | U | 0,98 | 0,95 | Reibungsmaß | |
| Anlenkmoment | U | 0,95 | 0,87 | Anlenkmoment (1 m/s ²) | Lenkungs- zuziehen |
| Lenkmoment- gradient | U | 0,96 | 0,95 | Lenkmomentgradient (1-4 m/s ²) | |
| Gierreaktion | U | -0,9 | | Anlenkmoment (1 m/s ²) | |

Tab. 5.8: Ergebnisse der subjektiv Niveau-Gefallen (indiziert durch „-“, „u“) und subjektiv-objektiv Korrelationen ($R > 0,7$) für beide Fahrergruppen (EF = Expertenfahrer, NF = Normalfahrer); farblich hinterlegte Zellen repräsentieren konsistente Korrelationen.

In einem kurzen Rückgriff auf die Redundanzanalyse der objektiven Kenngrößen zeigt sich, daß die *Steigungen* in der *Nullage* des Lenkungs-zuziehens nicht mit den *Mittengradienten* des Weave korrelieren. Der Plot aus Abb. 5.26 illustriert das Verhalten zweier Versuchsvarianten im Weave und Lenkungs-zuziehen. Um die Nullage offenbart sich die unterschiedliche Versuchsdurchführung, da das Lenkungs-zuziehen aus der Geradeausfahrt, also Nullage, nach links und rechts gelenkt wird, wohingegen der Weave einer sinusförmigen Vorgabe um die Mitte folgt. Daraus resultieren unterschiedliche Lenkmomentverläufe in der Mittelstel-

lung und somit verschiedene Lenkmomentsteigungen. Im Querschleunigungsbereich ausgedrückt, liefern die beiden Manöver zwischen ca. 0,8 und 2 m/s² vergleichbare objektive Informationen: Die Verläufe überdecken sich bis das Lenkungsziehen über die Manövergrenze des Weave weiter gelenkt wird.

Der Gradient, der im Lenkungsziehen zwischen $\pm 2^\circ$ Lenkwinkel bestimmt werden kann und sich um die Nullage von den Weave-Steigungen unterscheidet, korreliert im Vergleich mit, z.B. der Weave-Lenkungssteifigkeit, nur mittelmäßig mit der subjektiven *Mittenzentrierung*.

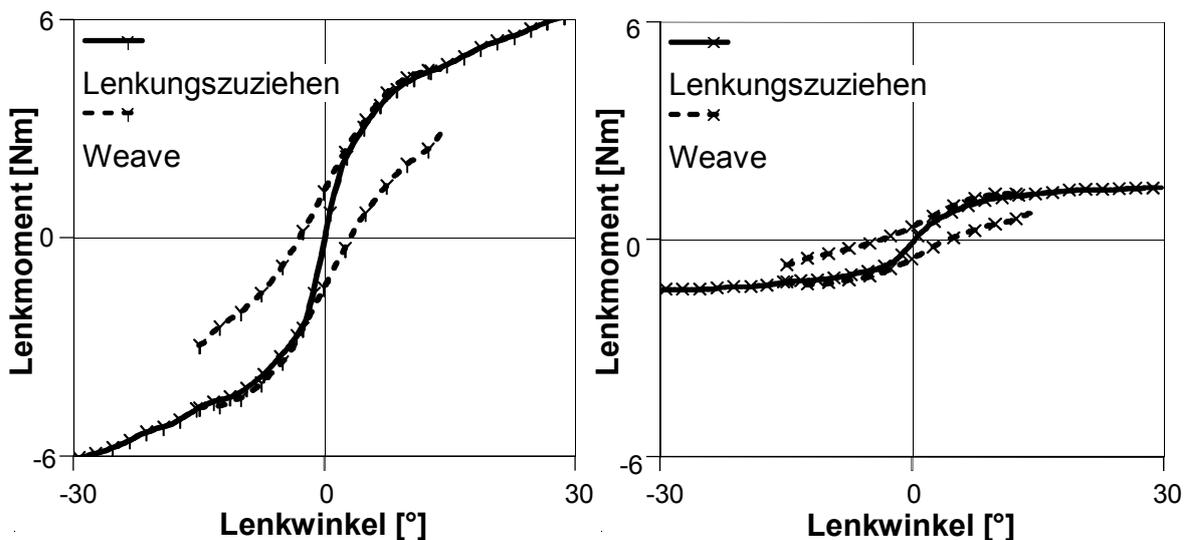


Abb. 5.26: Verläufe des Lenkmoments über Lenkradwinkel zweier Versuchsvarianten (links: Fahrzeug 3 Derivat 3, rechts: Fahrzeug 2 Derivat 2) im Links- und Rechtskreis sowohl aus dem Manöver Weave als auch Lenkungsziehen gemeinsam aufgetragen.

Als objektive Kenngrößen zur Beschreibung der *Mittenzentrierung* sind also die *Weave-Mittensteigungen* zu nutzen, wodurch die Hypothese von Farrer widerlegt wird, die *Anlenksteigungen* aus dem Transition Test würden das Mittenverhalten besser beschreiben²¹³. Begründet liegt dieser Umstand in der Fahrerregelungstätigkeit, die im On-Centre Bereich bestimmte, kleine Lenkwinkel einstellt, d.h. von einem Ausgangswinkel (der nicht notwendigerweise 0° sein muß) auf die Hysterese „springt“ und in einer Rücklenkbewegung wiederum den Rücklenkcast „zurückfährt“. Im Umkehrpunkt nach der Lenkbewegung bzw. einer Halteposition erfolgt der Momentenabfall, der aus dem Reibungsabfall resultiert, bis auf den Rücklenkcast.

²¹³ Farrer 1993

In Anbetracht des Lenkungs-zuziehens und den übrigen Kriterien *Anlenkmoment* und *Lenkmomentgradient* können diese durch das *Lenkmoment* bei 1 m/s^2 und den *Gradienten* zwischen 1 und 4 m/s^2 ausgedrückt werden. Hierbei ist auffällig, daß ein zu hohes *Anlenkmoment* und flacher *Lenkmomentgradient* schlechter als die umgekehrten Fälle beurteilt werden; das ist zum einen in dem zu hohen Lenkkräftaufwand und zum anderen in der mangelnden Stellpräzision begründet. In dieser Untersuchung zeigt der zwischen 1 und 4 m/s^2 gebildete *Lenkmomentgradient* den höheren Korrelationskoeffizienten im Zusammenhang mit dem Kriterium *Lenkmomentgradient* als der *Lenkmomentbetrag* bei 4 m/s^2 , der aus der Objektivierung der Eindrücke über die zehn Fahrzeuge noch höher korrelierend ausfiel. Die hier eingestellten und bewerteten Varianten spreizen objektiv größer hinsichtlich der *Lenkmomentgradienten* als im *-betrag* bei 4 m/s^2 .

Zudem resultieren aus der Objektivierungsuntersuchung der zehn Fahrzeuge Zielbereiche für die Geschwindigkeiten innerorts, die im Hinblick auf das *Anlenkmoment* ebenso nicht signifikant leichtgängiger ausfallen. Daraus lässt sich folgern, daß die geschwindigkeitsabhängige Unterstützungsfunktion im Fahrbetrieb nicht deutlich gespreizt sein muß. Das Lenkmoment-Niveau sollte ausschließlich im Hinblick auf Parkier- und Rangiermanöver leichtgängig sein. Diese Funde gehen in eine ähnliche Richtung wie die Erkenntnisse von Barthenheier, der die Hypothese widerlegt, Lenkmomente sollten über der Fahrgeschwindigkeit veränderlich sein²¹⁴, bzw. Bertollini und Hogan, die in einem Fahrsimulatorversuch keine Differenzierung im gewünschten Lenkmoment feststellen können²¹⁵.

Die Korrelation der Daten zur *Kurvenwilligkeit/Gierreaktion* mit den Lenkmomentbeträgen, in Abb. 5.27 am Beispiel der objektiven *Anlenkmoment*-Werte, deckt auf, daß der subjektive Queragilitätseindruck unter gegebener mittlerer *Gierverstärkung* und *Lenkungsansprechen* abstumpft, sofern das *Lenkmoment* bei 1 m/s^2 schwergängiger als 3 Nm wird. Diese Erkenntnis steht teilweise im Gegensatz zu den Ergebnissen von Harrer et al.²¹⁶, die für den Mittenbereich $\pm 5^\circ$ erwähnen, daß eine geringe *Lenkempfindlichkeit* durch ein höheres *Lenkmomentniveau* „maskiert“ werden könne.

²¹⁴ Barthenheier 2004

²¹⁵ Bertollini / Hogan 1999

²¹⁶ Harrer et al. 2006

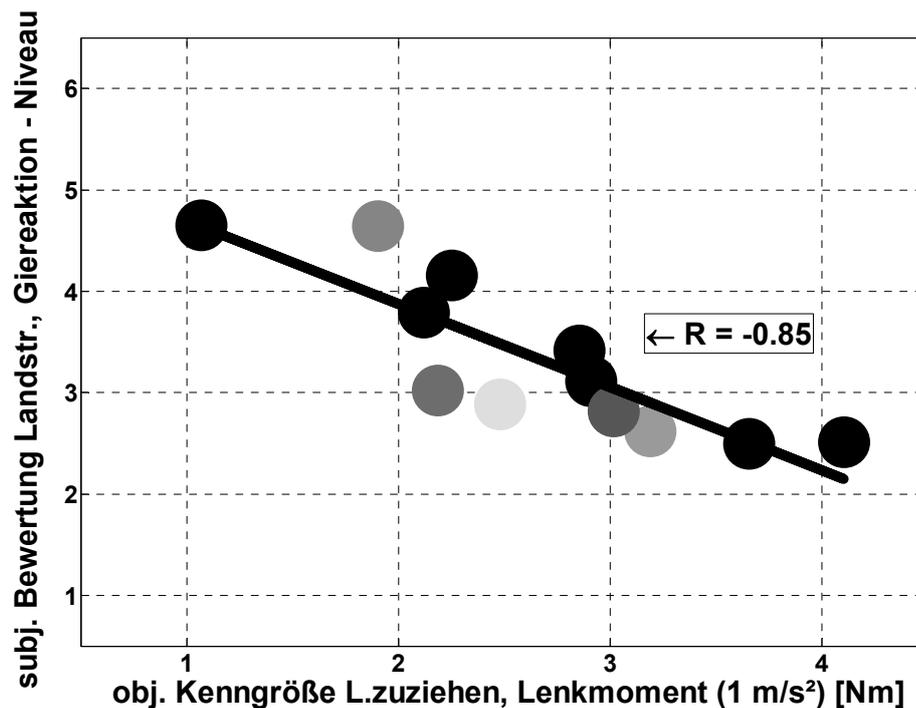


Abb. 5.27: Korrelationsplot der subjektiven Gierreaktionseinschätzung gegenüber dem Anlenkmoment.

5.4.5 Rekapitulation der Methode zur Objektivierung

Zusammengefaßt gilt: Der Vergleich der realen Prüfmanövermessungen mit Simulationsergebnissen des Modells indiziert, daß die getroffenen Modellierungsmaßnahmen, z.B. der Reibungsmodellansatz, gewinnbringend für die Realitätsabbildung sind. Das dynamische Verhalten oberhalb von ca. 0,6 Hz sollte weitergehend betrachtet werden. Trotzdem ist das Modell Bestandteil einer validen Methode, um im Produktentstehungsprozeß Bauteilparameterstudien, Analysen über ihre Beeinflussung des Gesamtfahrzeugeindrucks und insbesondere auch von Fremdfahrzeugen ausgehend von wenigen Meßprozeduren erfolgreich durchzuführen. In dieser Arbeit ist das Modell integriert in den Lenkmomentensteller, der gleichwohl durch eine EPS substituiert sein könnte, um objektive Fahrdynamikenngrößen mit dem subjektiven Lenkkomfort zu validieren. Die Methode ermöglicht, Bauteileigenschaftenänderungen und verschiedene Fahrzeuge virtuell in Prüfverfahren objektiv zu analysieren und real subjektiv evaluieren zu lassen, illustriert von Abb. 5.28. Zusammen mit der im vorliegenden Beitrag eingesetzten Auswertemethode zur Korrelationsanalyse (in Abb. 4.20 dargestellt) konnten zudem, den subjektiven Fahreindruck prägende, objektive Parameter validiert, die Klassifikation der Komfortkriterien identifiziert werden. In einem potentiellen nächsten Schritt könnten Zielbereiche für die objektiven Kennwerte abgeleitet werden.

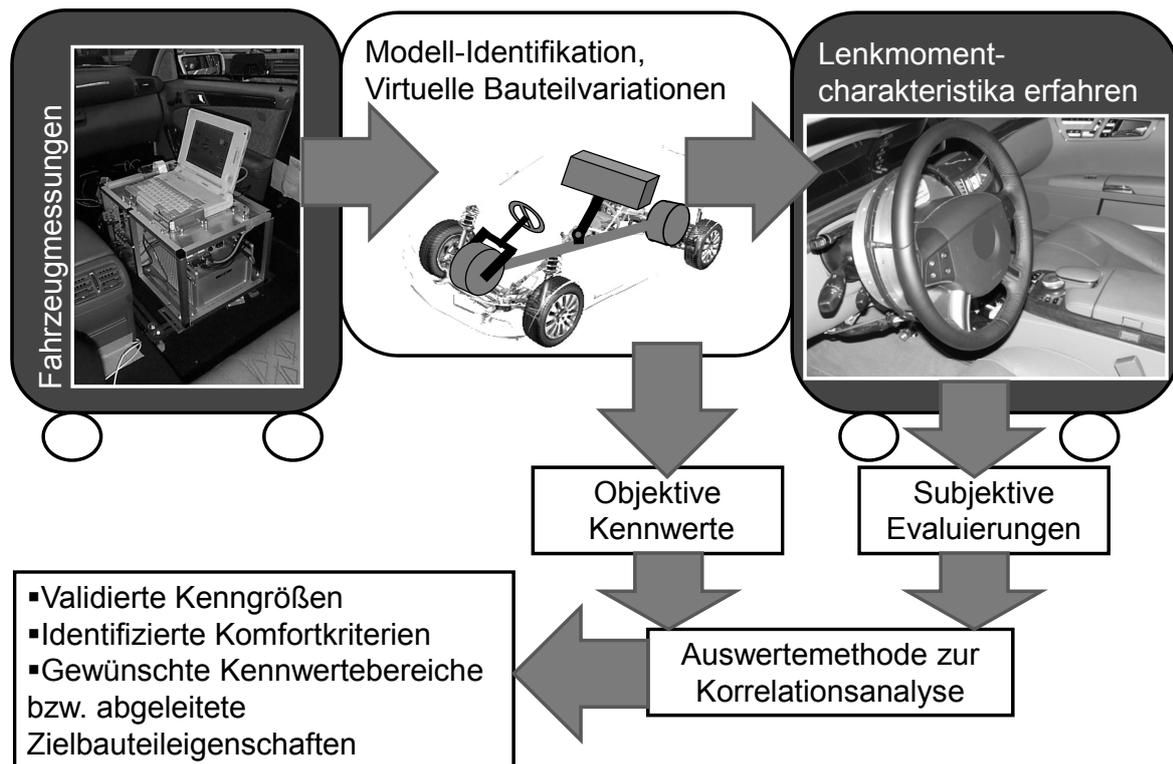


Abb. 5.28: Entwickelte Methode zur Objektivierung des Lenkmoments.

Außer für die *Mittenzentrierung* weisen alle subjektiven Evaluierungskriterien des Lenkkomforts quadratische Beziehungen auf, implizierend, daß sie Lenkcharakterthemen sind, nicht Lenkdiskomfort. Falls sie Diskomfort-Kriterien wären, würden sie, vergleichbar zum Wanken, streng lineare Verknüpfungen zeigen. Daher führt die Maximierung bzw. Minimierung der entsprechenden Kenngröße zu positiven subjektiven Beurteilungen. Besonderes Augenmerk sollte den Charakterfragen geschenkt werden, um Kundenbedürfnisse zu befriedigen. Dank der großen untersuchten Wertespannweite kann das Lenkmoment als eine Charaktergröße identifiziert und durch die vorgeschlagene Methode Zielbereiche für die On- und Off-Centre Lenkmomenthysterese, Gradienten und Beträge abgeleitet werden. Hohe bis sehr hohe, konsistente Korrelationskoeffizienten beweisen offensichtlich, daß die Bias-Faktoren in der subjektiven Evaluierung verglichen mit einem konventionellen Test, worin reale Fahrzeuge beurteilt werden, reduziert sind. Die Erkenntnisse bestätigen zudem vorherige Studien²¹⁷, daß die gewünschte Lenkmoment-Charakteristik segmentunabhängig ist, weil die favorisierten Modell-Einstellungen der vorliegenden Arbeit nicht notwendigerweise von Luxussegmenten abgeleitet sind. Es verbleibt, die Beziehungen im Zentriergefühl zu investigieren, indem weitergehend das Zusammenspiel zwischen *Lenkungssteifigkeit*, der

²¹⁷ Harrer / Pfeffer 2007

Lenkmomenthysterese und dem *Lenkmomentbetrag* untersucht wird. Weiterhin kann der subjektive Agilitätseindruck unter gegebener Gierreaktionsauslegung verbessert werden, indem das Anlenkmoment gesenkt wird bzw. vice versa.

5.5 Ausprägung des Lenkcharakters in Bezug auf US-amerikanische Fahrer

Die bisher durchgeführten Experimente verfolgten das Ziel, die relevanten Kenngrößen zur Beschreibung des Lenkkomforts eines Fahrzeugs zu identifizieren: im Hinblick auf das Gesamtfahrzeugverhalten über die stationäre Grundabstimmung des Lenkmoments hin zum Hygienefaktor des dynamischen Verhaltens. Darüber hinaus können aus den Probandenuntersuchungen Empfehlungen zu Zielbereichen für die identifizierten Kenngrößen abgeleitet werden, da die Art ihrer Verknüpfungen mit dem subjektiven Gefallen aufgedeckt sind. Die vorgenannten Untersuchungen wurden ausschließlich mit deutschen Probanden durchgeführt. Die abschließende Untersuchung soll klären, ob die gefundenen Zusammenhänge auch für den wichtigen Auslandsmarkt USA Gültigkeit haben, ob sich also interkulturelle Unterschiede in der Objektivierung des Lenkmoments niederschlagen.

5.5.1 Versuchsplan

Insgesamt 36 Probanden, davon neun Damen und 27 Herren, zwischen 25 und 75 Jahren alt, vergleiche Abb. 5.29, evaluieren hierzu sieben Lenkmomentvarianten, die sie im Versuchsträger mit dem Lenkmomentensteller erfahren können. Die Probanden sind allesamt US-Amerikaner verschiedener ethnischer Herkunft. Privat besitzen sie individuell bis zu vier Fahrzeuge, wobei sie in Summe etwa zu gleichen Teilen Kunden europäischer, japanischer und amerikanischer Fabrikate sind. Im Hinblick auf die Fahrzeugtypen sind alle Fahrzeugsegmente durch die Probandenstichprobe vertreten, so daß ihre Vorkonditionierung als homogen zu erachten ist. Eine Person unter den Probanden dient als Expertenfahrer der Gegenüberstellung mit den Fachleuten aus den vorhergehenden Untersuchungen.

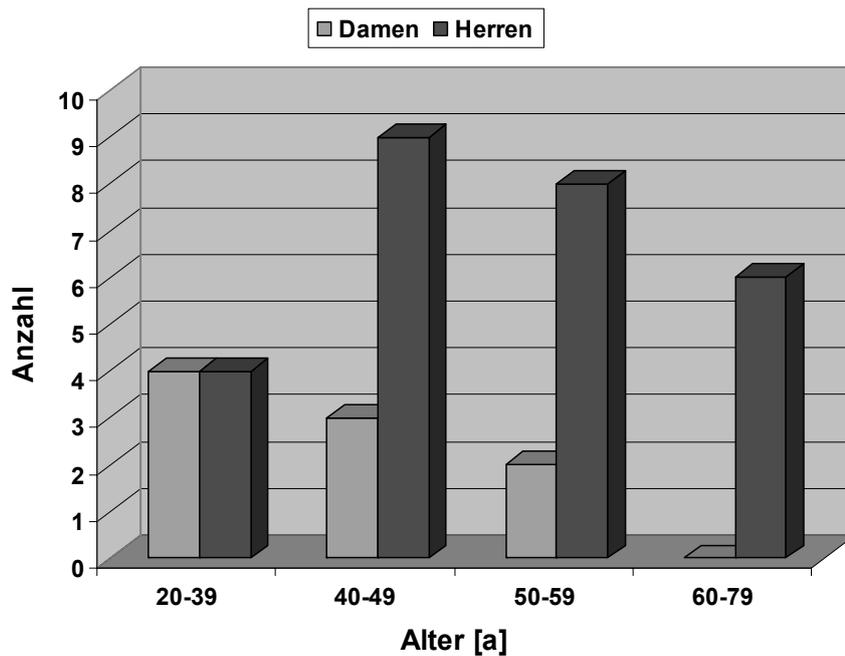


Abb. 5.29: Altersstruktur der Probanden.

Die zur Evaluierung genutzte Strecke bildet ein landestypisches Profil ab, siehe Abb. 5.30 (rechts). Für die Bewertungsfahrten steht ein Parcours mit einer Gesamtlänge von 3800 m zur Verfügung. Auf eine 1000 m lange Gerade folgt ein Abschnitt, der Rechts- und Linkskurven mit Radien von 40 bis 200 m enthält, vergleiche Abb. 5.30 (links). Nach diesem Abschnitt schließt sich wiederum eine Gerade mit zwei integrierten Spurwechseln mit Radien von 200-500 m an. Die Fahrgeschwindigkeiten bewegen sich auf der Geraden zwischen 70 und im Kurvenabschnitt zwischen 30-45 mph, d.h. zwischen 50 und 110 km/h. Die Probanden absolvieren jeweils eine Runde pro zu evaluierender Lenkmomentvariante und schließen den Versuch unwissentlich mit einer Wiederholvariante ab.

Auf den Geraden ist das *Centre-Point Feeling*, als feststehender, englischer Begriff für das Zentriergefühl, zu evaluieren²¹⁸. Die Probanden sind gefragt, inwieweit die Lenkkraft ihnen die Geradeausstellung anzeigt während sie auf den Geraden die Spur halten. Das Semantische Differential reicht von einer „losen“ bis „straffen“ Einschätzung der Geradeausposition.

²¹⁸ Koide / Kawakami 1988

zum einen um $0,5 \text{ Nm/}^\circ$ erhöhter und zum anderen reduzierter Torsionsstabsteifigkeit. Die beiden Derivate von Fahrzeug 2 sind im Vergleich jeweils in ihrer Primär- von $0,75$ auf 1 Nm bzw. Sekundärreibung von 65 auf 75 Nm höher parametrisiert. Beide unterscheiden sich außerdem von ihrer Basis durch die von $1,1$ auf $0,5$ bzw. $1,5 \text{ Nm/}^\circ$ veränderte Torsionsstabsteifigkeit. Die beiden Basisfahrzeuge 1 und 2 sind in Realität mit für den europäischen Markt abgestimmten Standardlenkungen ausgerüstet, wohingegen Fahrzeug 3 einem fahrgeschwindigkeitsabhängigen Lenkungsmodell entspricht. Hintergrund der Einstellungen ist die Beantwortung der Frage, ob eine europäische Lenkmoment-Abstimmung ebenso für den amerikanischen Markt geeignet ist, denn auf dem dortigen Markt herrschen überwiegend Standardlenkungen vor. Um die Kennwerte zu spreizen, sind die *Lenkmomentniveaus*, *Lenkungssteifigkeiten* und *Reibungsmaße* der Derivate ausgehend von den beiden Basisvarianten aufgrund der veränderten Bauteilparametrisierungen reduziert oder erhöht, vergleiche Abb. 5.32.

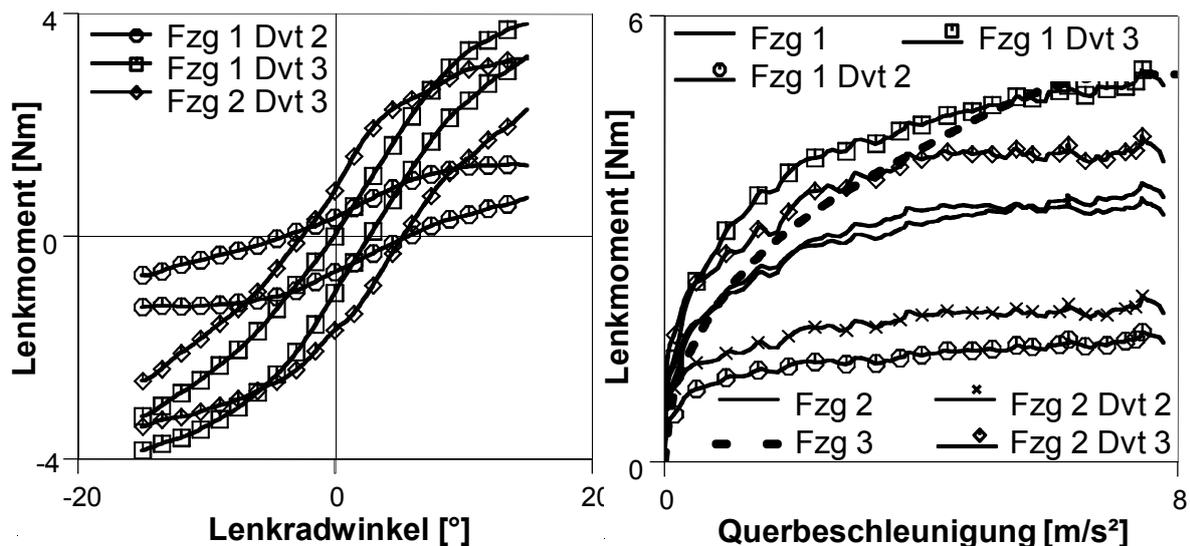


Abb. 5.32: Ergebnisse dreier Weave-Extremvarianten, links; die sieben Versuchsvarianten exemplarisch dargestellt im Lenkungsziehen bei 70 km/h ($\approx 44 \text{ mph}$), rechts („Fzg“ = Fahrzeug, „Dvt“ = Derivat).

Vorausgesetzt wird im Zuge dieses Versuchs, daß das dynamische Verhalten des Lenkmoments als Hygienefaktor entsprechend den vorherigen Experimenten auch für diese Testgruppe nicht unterdämpft sein darf: die Hysteresen der enthaltenen Varianten sind demzufolge dynamisch nicht überschneidend. Das Diagramm in Abb. 5.32 (links) illustriert der Übersichtlichkeit willen drei Weave-Hystereseschleifen, die in den On-Centre Kenngrößen Extrema darstellen. Derivat 2 von Fahrzeug 1, das als Variante ebenfalls in der vorhergehenden modell-

basierten Untersuchung integriert war, besitzt die niedrigste *Lenkungssteifigkeit*. Dagegen weist Derivat 3 die höchste mit gleichzeitig dem niedrigsten *Reibungsmaß* auf. Derivat 3 von Fahrzeug 2 zeigt das größte *Reibungsmaß* mit ähnlich hoher *Lenkungssteifigkeit*; die übrigen vier Varianten liegen mit ihren quasi-stationären Hystereseformen dazwischen.

Das Diagramm aus Abb. 5.32 (rechts) zeigt die Einstellungen mit ihren Kennlinien im Lenkungsziehen. Die beiden Basisfahrzeuge 1 und 2 offenbaren ähnliche Verläufe im Lenkungsziehen, unterscheiden sich jedoch in ihren Weave-Kenngrößen signifikant (Fahrzeug 1 weist eine um $0,05 \text{ Nm/}^\circ$ kleinere *Lenkungssteifigkeit* und ein um $0,4 \text{ Nm}$ kleineres *Reibungsmaß* auf). Auffällig ist, daß der Versuchsplan tendenziell weniger schwergängige Varianten beinhaltet als die deutsche Untersuchung, weil sich höhere Handmomente nicht als die bevorzugten Varianten erwiesen hatten und davon auszugehen ist, daß die amerikanischen Probanden dies nicht diametral verschieden beurteilen. Im Interesse einer angemessenen Beanspruchung der Normalfahrer durch die Evaluierungsfahrten ist hier die Anzahl der Varianten verkleinert. Neben Derivat 2 von Fahrzeug 1 war auch seine Basis 1 im vorherigen Experiment als Variante enthalten. Somit bildet Derivat 2 die gemeinsame untere Grenze der Spreizung zwischen den beiden modellbasierten, amerikanischen und deutschen Versuchen. Die schwergängigste Variante, Fahrzeug 1 Derivat 3, liegt im Anlenken leicht oberhalb des als positiv beurteilten deutschen Zielbereichs. Zur objektiven Beschreibung des Lenkaufwands dienen die *Lenkmomentbeträge* bei 1 und 4 m/s^2 .

Die Tabelle Tab. 5.9 subsumiert die Versuchsspreizungen durch die Minima und Maxima einiger On- und Off-Centre ausgewerteter Kenngrößen. Diese beschreiben, den vorangestellten Experimenten zufolge, die Grundlenkmomentabstimmung.

| Manöver | objektive Kenngröße | Einheit | Min | Max |
|---------------------|---------------------------------------|--------------------|------|------|
| Weave | Lenkungssteifigkeit | Nm/° | 0,12 | 0,38 |
| | Reibungsmaß | Nm | 1 | 2,5 |
| Lenkungs- ziehen | Anlenkmoment (1 m/s^2) | Nm | 1,1 | 3,1 |
| | Lenkmoment (4 m/s^2) | Nm | 1,5 | 4,6 |

Tab. 5.9: Zusammenstellung der Minimal- und Maximalwerte der Versuchsvarianten aus Weave und Lenkungsziehen.

5.5.2 Versuchsergebnisse

Die Eingangsanalysen der subjektiven und objektiven Datenmengen stellen eine signifikante Varianz und Normalverteilung fest. Die Wiederholzuverlässigkeit der amerikanischen Normalfahrer ist hinsichtlich der Niveau-Einschätzung geringfügig schlechter als im Vergleich zur deutschen Untersuchung, vergleiche Tab. 5.10. Mit Abweichungen der Bewertungen von -0,8 und -0,6 Notenpunkten ist die Reliabilität noch immer mindestens befriedigend. Der Beurteilungsdrift von 1,5 Notenpunkten weist daraufhin, daß die Probanden über den Versuch hinweg toleranter werden.

| Kriterium | Niveau | | Gefallen | |
|-----------------|----------------------|----------|----------|--------|
| | Centre-Point Feeling | straffer | -0,8 | 1,5 |
| Steering Effort | höher | -0,6 | 1,5 | besser |

Tab. 5.10: Zusammenstellung der Abweichungen zwischen Basis- und Wiederholfahrt, ausgedrückt in gemittelten Notenpunkten.

Die beiden subjektiven Skalen sind für die zwei Kriterien quadratisch verknüpft: die Gefallensbeurteilungen korrelieren mit den Niveau-Einschätzungen über das *Centre-Point Feeling* zu einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,69$, allerdings nicht-signifikant. Der Aspekt des *Centre-Point Feeling*, (dt.) „Mittengefühl“²¹⁹, umfaßt objektiv primär das Zusammenspiel zwischen *Lenkungssteifigkeit*, *Reibungsmaß* und sekundär *Anlenkmoment*, so daß ein einzelnes Kriterium zur subjektiven Beschreibung zu global gefaßt ist. In den vorhergehenden Untersuchungen aus Kap. 5.4 wurde eine quadratische Verknüpfung für die Kriterien *Reibung* und *Anlenkmoment* aufgedeckt bzw. mit Hilfe einer multiplen Analyse herausgefunden, daß die *Mittenzentrierung* in Abhängigkeit der *Reibung* beurteilt wird. Der *Steering Effort* ist andererseits eindeutig auch für diese Probandengruppe mit einer signifikant erklärten Varianz von $R^2 = 0,9$ ein Lenkcharakter-Kriterium.

Unter Betrachtung der subjektiv-objektiv Korrelationen validieren auch die amerikanischen Probanden die bekannten Kenngrößen *Lenkungssteifigkeit* und die *Lenkmomentbeträge* bei verschiedenen Querbeschleunigungen (Tab. 5.11). Abbildung Abb. 5.33 enthält den Korrelationsplot für das *Centre-Point Feeling* im Zusammenhang mit der *Lenkungssteifigkeit*: Ein hoher Korrelationskoeffizient resultiert.

²¹⁹ Heißing / Brandl 2002

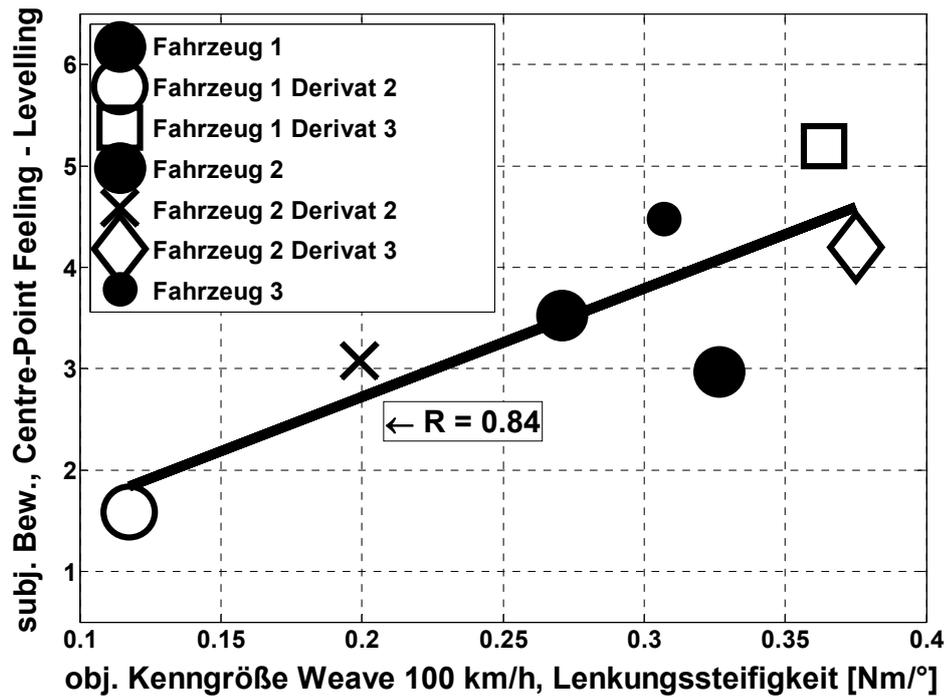


Abb. 5.33: Korrelationsplot der Normalfahrer Niveau-Mittelwertsnoten zum *Centre-Point Feeling* gegenüber der Weave-Lenkungssteifigkeit.

Bemerkenswert sind die Varianten Fahrzeug 2 und sein Derivat 2, die subjektiv gleich mit der Stufe „3“ bewertet werden. Umgekehrt verhält es sich mit den Derivaten 3 der Fahrzeuge 1 und 2, die objektiv ähnlich steif ausfallen, subjektiv jedoch eine Notenstufe unterschiedlich bewertet werden. Dies liegt in einem unterschiedlichen Reibungsniveau begründet: z.B. im letzteren Fall mit einem *Reibungsmaß* von 1,5 Nm „übertüncht“ die Reibung die Wahrnehmung der Zentrierung. Umgekehrt lässt wenig Reibung, wie z.B. bei Fahrzeug 1 Derivat 3, die Zentrierung „federartig“ übertrieben wirken. Im Falle von Fahrzeug 2 und seinem Derivat 2 mit geringerer Steifigkeit bei größerer Reibung suggeriert diese ein gewisses *Zentriergefühl*, da das Lenkrad bei Bewegungen um die Mittellage „klebt“.

| subjektives Kriterium | U | R | | objektive Kenngröße | Manöver |
|-----------------------|---|------|------|------------------------------------|-------------------|
| | | EF | NF | | |
| Centre-Point Feeling | U | 0,83 | 0,84 | Lenkungssteifigkeit | Weave |
| Steering Effort | U | 0,94 | 0,85 | Anlenkmoment (1 m/s ²) | Lenkungs-zuziehen |

Tab. 5.11: Ergebnisauszug der subjektiv-objektiv Korrelationen für den Experten- (EF) und die Normalfahrer (NF) (farblich hinterlegte Zellen repräsentieren konsistente Korrelationen subjektiv Niveau-Gefallen; „u“ indiziert Lenkcharakter).

Im Vergleich des Experten zu den Normalfahrern ergeben sich ähnlich hohe Korrelationskoeffizienten für das *Centre-Point Feeling*. Um noch höhere Werte zu erreichen, könnte der Versuchsplan weiter gespreizt, d.h. die Unterschiede in den Faktorstufen vergrößert werden. Auch hätte der Versuchsplan vollfaktoriert ausgeführt werden können, was jedoch zu einer größeren Anzahl an Varianten geführt hätte. Der Zusammenhang zwischen *Steering Effort* und den *Lenkmomentbeträgen* erscheint dem Experten enger, u.a. da die Normalfahrer im Kurvenabschnitt stärker mit der Bewältigung der Fahraufgabe beschäftigt sind. Unter Einbeziehung der abweichenden Bewertungskriterien stehen die Erkenntnisse nicht im Kontrast zu den Validierungen durch die deutschen Probandengruppen. Die deutschen Normalfahrer zeigen subjektiv-objektiv eine mittlere Korrelation von $R = 0,55$ hinsichtlich der *Mittenzentrierung* und einen sehr hohen Korrelationskoeffizienten von $R = 0,95$ für die *Reibung*; gemein ist zwischen den Untersuchungen die tendenziell uneinheitlichere Evaluierung des Mittenverhaltens. In Bezug auf den *Steering Effort* in der Gegenüberstellung zum *Anlenkmoment* weisen sowohl Normal- als auch Expertenfahrer Korrelationskoeffizienten jeweils auf gleichem Niveau aus.

Werden die quadratischen Verknüpfungen zwischen subjektivem Niveau und Gefallen zurück auf die objektiven Kennwerte transformiert, so resultieren im Kontrast zur deutschen Stichprobe für die *Lenkungssteifigkeit* und die *Lenkmomentbeträge* weitere Bereiche, in denen der Lenkcharakter gefällt. Der von den amerikanischen Probanden gewünschte Bereich für die *Lenkungssteifigkeit* überdeckt sich mit dem der Deutschen und ist zudem nach unten, also hin zum weniger Straffen geöffnet. Die Projektion der Gefallensurteile über das *Centre-Point Feeling* auf das Reibungsmaß führt zum gleichen Zielbereich zwischen beiden Experimenten. Eine multiple Regressionsanalyse mit der *Lenkungssteifigkeit* und dem *Reibungsmaß* zur Erklärung der Varianz des *Centre-Point Feeling* führt zu einem optimalen Betriebspunkt, wenn die *Lenkungssteifigkeit* in die Mitte und das *Reibungsmaß* am unteren Ende des betreffenden Zielbereichs liegt. Im allgemeinen gilt innerhalb der Zielbereiche tendenziell für die Abstimmung: Je steifer die Zentrierung, desto höher sollte die Reibung ausfallen und vice versa.

Die Zielbereiche der Lenkmomentbeträge überschneiden sich ebenfalls teilweise für beide Probandengruppen und Untersuchungsorte. Das Kriterium *Steering Effort* umfaßt das subjektive Lenkmomentniveau integral und teilt aus Anforderungsgründen für die Normalfahrer nicht in z.B. *Anlenkmoment* und *Lenkmomentgradient*. Da die Lenkmomentkennlinien der Varianten über der Querbeschleunigung charakteristische Verläufe aufweisen und die Probanden die Evaluierung über den gesamten Normalfahr-Querbeschleunigungsbereich durchführen, können mehrere Lenkmomentwerte bei verschiedenen Querbeschleunigungen in Zu-

sammenhang mit den Gefallensnoten gebracht werden. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den Ergebnissen aus den zwei Untersuchungen zu erzielen, werden die *Lenkmomente* bei 1 und 4 m/s² genutzt. Die amerikanischen Teilnehmer setzen die Obergrenzen ihrer gewünschten Werte leicht unter denen der deutschen an und weiten im Anlenken (1 m/s²) die gewünschten Bereiche um bis zu 0,4 Nm (für die Geschwindigkeitsstützstelle 100 km/h) nach unten auf. Im Kurvenabschnitt, also im langsamen Fahrgeschwindigkeitsbereich, bei höheren Querbeschleunigungen (4 m/s²) liegt die Untergrenze des Zielbereichs um 1,2 Nm und die Obergrenze um 0,9 Nm unter den Werten der Vergleichsuntersuchung.

Um einen Indikator zu erhalten, inwieweit geschlechtsspezifische Unterschiede eine Rolle für den gewünschten Lenkmomentverlauf spielen, wird die Stichprobe in zwei, zwar verschieden große, Untergruppen geteilt und deren Beurteilungen nochmals mit den Kennwerten korreliert. Beide Untergruppen verknüpfen die Kriterien zu Lenkcharakterthemen, wobei sie die Obergrenzen der jeweiligen Zielbereiche gemeinsam haben. Für sich einzeln betrachtet, sind es die Damen, die sogar noch leichtgängigere Handmomente als die für die gemeinsame Stichprobe analysierten tolerieren (bis zu 0,8 Nm unter der Untergrenze im Betriebspunkt 70 km/h und 4 m/s²). Da sich die geschlechtsspezifischen Lenkmoment-Zielbereiche jedoch überschneiden, besteht, wie bisher bei im Markt befindlichen Fahrzeugen, praktiziert, keine unbedingte Notwendigkeit, eine getrennte Lenkungsabstimmung vorzunehmen.

Die Modelle von Fahrzeug 1 und seinem Derivat 2, siehe nochmals Abb. 5.34, waren auch Bestandteil der deutschen Vergleichsuntersuchung. Im Gegensatz zu dieser wird die Basis 1 im amerikanischen Experiment hinsichtlich des Lenkmoments im Mittel um beinahe zwei Notenpunkte besser beurteilt. Diese Versuchsvariante ist einem in den USA entwickelten Pkw mit einer „U“-Kennlinie entlehnt. Die Probanden sind offenbar an diese Lenkungsabstimmungsart mit niedrigem Anlenkmoment und flachem Lenkmomentgradient gewöhnt. Gemein ist der anderen, Fahrzeug 1 Derivat 2, ebenfalls beteiligten, leichtgängigsten Variante eine mittelmäßig bis schlechte Beurteilung. Die Kommentare zu dieser Variante sind im Einklang von „cheap“ bis „can't really trust the loose“, wohingegen die schwergängigste Variante Fahrzeug 1 Derivat 3 „far too heavy“ und ein „work-out“ sei.

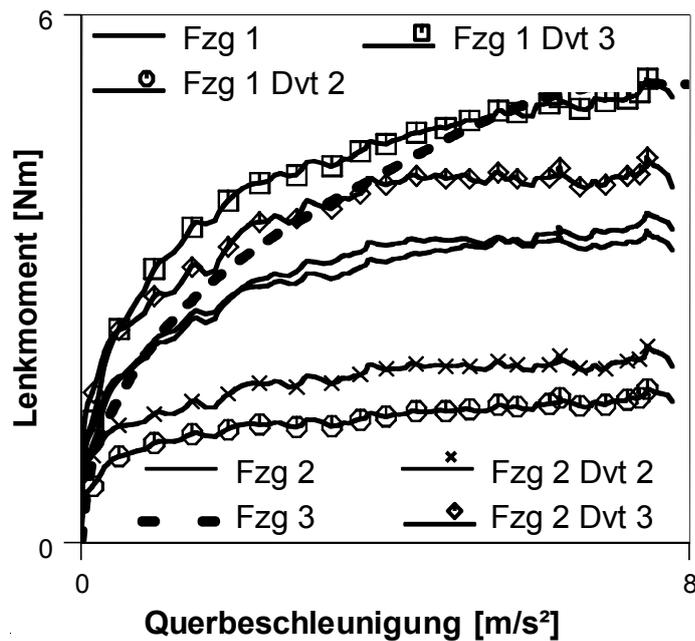


Abb. 5.34: Die sieben Versuchsvarianten exemplarisch bei 70 km/h (\approx 44 mph) dargestellt im Lenkungsziehen.

Schlußfolgernd lässt sich feststellen, daß die beiden Probandengruppen (deutsche und amerikanische) unter der Voraussetzung eines gleichen Mittenverhaltens ein ähnliches *Anlenkmoment* mit unterschiedlich steilem *Lenkmomentgradient* präferieren. Die durch den Versuchsaufbau reduzierten Bias-Faktoren und global formulierte Kriterien helfen den Normalfahrern, ebenfalls hohe Korrelationskoeffizienten in der Validierung aufzustellen. Die Ergebnisse gehen zudem in eine andere Richtung als diejenigen von Bertollini und Hogan²²⁰, in deren Studie trotz vieler demographischer Unterschiede ebenfalls zwei Untersuchungsgruppen (Schweden und USA) ähnliche Lenkmoment-Präferenzen in einem Fahrsimulator ohne Bewegungssystem zeigten.

²²⁰ Bertollini / Hogan 1999

6 Zusammenfassung und Ausblick

Um für den virtuellen und realen Produktentwicklungsprozeß Kenngrößen zur Validierung des gewünschten Lenkcharakters und Lenkdiskomforts abzuleiten, werden in der vorliegenden Ausarbeitung, neben einer Analyse von subjektiven und objektiven Daten über mehrere reale Fahrzeuge, modellbasierte Methoden eingesetzt. Auf Basis des in Kapitel 2 ermittelten Standes der Forschung und Technik werden in Kapitel 3 die Ziele dieser Arbeit formuliert.

Kapitel 4 beschäftigt sich zum einen mit der Vorstellung der statistischen Analysemethoden, die durchgängig in allen Untersuchungen implementiert ist, und zum anderen mit der Suche von Zusammenhängen zwischen dem subjektiven Fahr-eindruck und objektiven Charakteristika auf Basis von zehn Fahrzeugen. Aus der Analyse ergeben sich validierte Erkenntnisse zur Beschreibung des Gesamtfahrzeugverhaltens und Indikatoren für Lenkmoment-Kenngrößen. Insbesondere hinsichtlich der Verknüpfung des subjektiven Gefallens- mit dem Niveau-Empfinden werden neue Fragestellungen aufgeworfen.

Kapitel 5 greift diese „weißen“ Felder aus dem vorhergehenden Abschnitt auf und bearbeitet sie gezielt in den Fahrzuständen „Spurwechsel“ und „Hochgeschwindigkeitsfahrt“. Dies geschieht mit Hilfe von parametrischen Modellen über das dynamische Lenkmomentverhalten in Kombination mit einem realen Entwicklungswerkzeug, dem Lenkmomentensteller. Des weiteren wird ein modell-basierter Ansatz zur Fahrdynamik-Analyse in Bezug auf die Komponenten- und Gesamtfahrzeugebene zu einer Methode der Lenkmoment-Objektivierung ausgebaut. Die Methode ermöglicht die virtuelle Veränderung von Bauteileigenschaften und damit des Gesamtfahrzeugverhaltens bzw. seiner es beschreibenden Kenngrößen sowie ihr Erfahren in einem Versuchsträger. So wird eine Analyse der subjektiv-objektiv Zusammenhänge im quasi-stationären Fahrbereich ermöglicht. Am Beispiel einer zweiten, amerikanischen Probandengruppe wird die Methode exemplarisch nochmals angewandt, um Unterschiede in der subjektiven Lenkcharakterevaluierung aufgrund der geographischen Herkunft und Marktsozialisation aufzuzeigen.

Die Objektivierung ging von der zentralen Hypothese aus, daß Zusammenhänge zwischen dem subjektiven Eindruck und objektiv bestimmbar Charakteristika

des Gesamtfahrzeugverhaltens, hier insbesondere des Lenkmoments, bestünden. Dies kann mittels der etablierten reliablen, validen und objektiven Methode durch signifikant hohe Korrelationskoeffizienten zwischen den subjektiven und objektiven Niveau-Evaluationen im relevanten Betriebsraum belegt werden. Hinsichtlich der notwendigen stationären Grundabstimmung und dazu hinreichendem dynamischen Verhalten des Lenkmoments wurden Indikatoren für Kenngrößen gefunden. Das Niveau und subjektive Gefallen mehrerer Aspekte, wie z.B. des Wankens, lassen sich im gesamten Fahrgeschwindigkeitsbereich eindeutig verknüpfen.

Aus den Analysen der subjektiven und objektiven Fahrzeugevaluationen folgten zu den in den Zielen der Arbeit formulierten, verfeinerte Hypothesen: erstens, das Lenkmoment habe Einfluß auf das Empfinden des Aufbauverhaltens und des Geradeauslaufs, speziell bei hohen Geschwindigkeiten. Diese Hypothesen bestätigen sich durch Untersuchungen über Verläufe des Lenkmoments im dynamischen Bereich von Spurwechseln. Fällt die Lenkmomenthysterese im relevanten Frequenzbereich überschneidend aus, wird das Verhalten als unpräzise, eckig und z.T. als instabil bezeichnet. Vergleichbares gilt in einem weitaus kleineren Lenkwinkel- und höheren Fahrgeschwindigkeitsbereich für den Geradeauslauf, da sich die Fahrerregelgüte bei fehlender oder zu großer Hysterese verschlechtert.

Die weiteren Hypothesen lauteten: Mit Hilfe eines modellbasierten Ansatzes kann die Lenkkomfort-Klassifikation des Lenkmoments eindeutig getroffen, der Einfluß von Bauteileigenschaften auf das Gesamtverhalten analysiert und grundsätzlich die Validierungsgüte erhöht werden. Letzterer Punkt bemißt sich an den, auch für die Normalfahrer, konsistenten Korrelationen. Zum Zweiten, der modellbasierte Ansatz bildet das reale Verhalten in den virtuell gefahrenen Prüfmanövern hinreichend gut ab, so daß Auswirkungen von Parameteränderungen auf die Kenngrößen analysiert werden können. Außerdem ermöglicht die Methode das Erfahren und Evaluieren verschiedener Fahrzeugmodelle und Modifikationen mittels des Lenkmomentenstellers. Es können gezielt Eigenschaften eingestellt werden, die eine große Spreizung der Lenkmoment-Kennwerte bewirken. So ist es möglich, das Lenkmoment als Lenkcharakter-Gesichtspunkt zu identifizieren, was die Hypothese abschließend bestätigt. Für die stationäre Lenkmomentauslegung sind die Steigung und Höhe der Weave-Hysterese und die Lenkmomentbeträge aus Lenkungsziehen von Bedeutung.

Als Erweiterung der Erkenntnisse über die Einordnung des Lenkmoments in die Lenkkomfortgattung Lenkcharakter wurde die Hypothese aufgestellt, daß interkulturelle Unterschiede in der Wahrnehmung von Lenkmomenten existierten. Diese Hypothese muß teilweise verworfen werden, weil die Normal- und Expertenfahrer beider Probandengruppen (deutsche und amerikanische) ähnlich enge bis sehr enge Verknüpfungen im Niveau aufweisen. Des Weiteren sollte die Lenkmoment-

charakteristik im Mittenbereich ähnlich abgestimmt werden, wohingegen sich das allgemein bevorzugte Lenkmomentniveau signifikant unterscheidet; die amerikanischen Probanden bevorzugen im Off-Centre Bereich niedrigere Lenkmomente.

Ausblickend stellen sich hieraus weitere Ideen und Aufgaben für die Forschung:

- Es sollte versucht werden, das Zeitverhalten der Fahrzeugreaktionen zu objektivieren.
- Die Wirkkette und -mechanismen hinter der fahrgeschwindigkeitsabhängigen Gierdämpfung sind genau zu untersuchen. Der grundsätzliche Zusammenhang zwischen subjektivem Fahreindruck und Lenkmomentenhysterese könnte als Funktion des Anlenkmoment-Niveaus beleuchtet werden.
- Durch die präsentierte Methode sind für die einzelnen Kenngrößen Zielbereiche bestimmbar. Damit ein Fahrzeug den gewünschten Wert der Kenngröße annimmt, können die Bauteilkonfigurationen des Fahrzeugs (aber auch mit zusätzlichem Modellierungsaufwand die EPS-Reglerparameter) über eine Rückwärtsrechnung des modell-basierten Ansatzes bestimmt werden („Reverse Engineering“).
- Mit Hilfe eines kombinierten Stellers, der sowohl Lenkwinkel als auch Lenkmoment verändert, kann das Zusammenspiel aus Fahrzeugreaktion, z.B. der Gierreaktion, und Lenkmoment objektiviert, oder aber auch z.B. die Linearität der Fahrzeugreaktion genauer untersucht werden.
- Da die ermittelten Charakterausprägungen der jeweiligen Kenngröße eine gesamthafte Gültigkeit vorweisen, werden die Lenkmomente auf Kundenwunsch hin innerhalb der Zielbereiche für die verschiedenen Fahrzeugtypen, wie z.B. SUV oder Sportwagen, nuanciert.

Die in dem vorliegenden Beitrag entwickelten, eingesetzten und validierten Methoden bestätigen objektive Kenngrößen, siehe Abb. 6.1, die den subjektiven Lenkkomfort beschreiben. Diese validen Kenngrößen können im Produktentwicklungsprozeß als Referenzen für digitale Prototypensimulationen und reale Prototypenerprobungen genutzt werden. Entsprechend der Organisation des PEP werden digitale Prototypen getestet und auf Einhaltung der objektiven Kennwerte überprüft noch bevor reale Fahrzeuge gebaut sind. Dies dient einer Basisabstimmung der zu realisierenden Komponenten. Mit fortschreitender Entwicklungsreife werden die Kenngrößen parallel an Ergebnissen aus Gesamtfahrzeugerprobungen reflektiert.

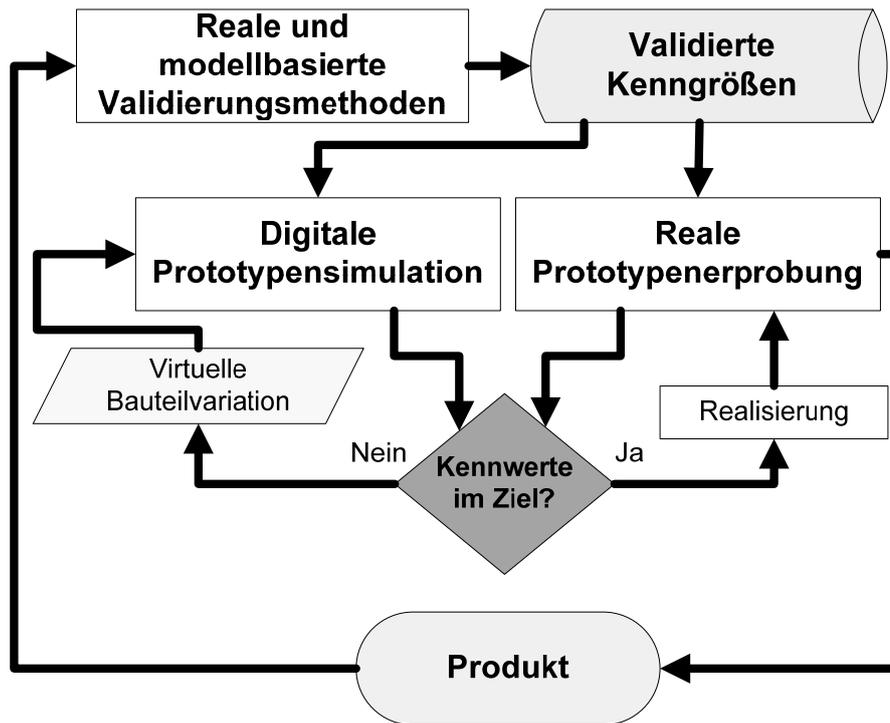


Abb. 6.1: Einsatz der validierten Kenngrößen in der Produktoptimierung.

Diese Ergebnisse werden idealerweise wiederum in die Simulation zur Feinoptimierung zurückgespiegelt. Am Ende dieser Iterationen steht das Produkt, das im Hinblick auf Folgegenerationen neuerlich den Validierungsmethoden unterzogen werden kann, um Kenngrößen weiterzuentwickeln oder Zielbereiche zu fokussieren.

7 Literaturverzeichnis

7.1 Referenzen

@ **ATP** ATP Automotive Testing Papenburg GmbH: Teststrecken, <http://www.atp-papenburg.com>, Stand 21.07.2008

Aigner 1982 Aigner, Jürgen: Zur zuverlässigen Beurteilung von Fahrzeugen. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 84 (1982), Nr. 9, S. 447-450

Albers 2008 Albers, Albert: *Produktentstehung: Entwicklungsmethodik – vom Markt zum Produkt*. Karlsruhe, Universität (TH), Institut für Produktentwicklung, Vorlesungsumdruck, 2008

Albers / Albrecht 2002 Albers, Albert; Albrecht, Marc: Vorhersage subjektiver Komforturteile mittels künstlicher neuronaler Netze. In: VDI (Veranst.): *Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau* (Würzburg 01.-02.10. 2002). Düsseldorf: VDI-Verlag, 2002, S. 401-420 (VDI-Berichte Nr. 1701)

Albers / Albrecht 2003 Albers, Albert; Albrecht, Marc: New Approach Using Artificial Neural Networks for Modelling and Evaluation of Man-Machine-Interaction at the Start-Up Process in Passenger Cars. In: ICED (Veranst.): *14th International Conference on Engineering Design* (Stockholm, Schweden 19.-21.08.2003)

Albers / Albrecht 2004a Albers, Albert; Albrecht, Marc: Einsatz Künstlicher Neuronaler Netze zur objektiven Beurteilung des Schwingungskomforts am Beispiel des automatisierten Anfahrens. In: VDI (Hrsg.): *Humanschwingungen* (Darmstadt, 17.-18.03.2004). Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004, S. 159-182 (VDI-Berichte Nr. 1821)

Albers / Albrecht 2004b Albers, Albert; Albrecht, Marc: Driver Start-up Comfort Rating of Automated Clutch Systems – an Objectification Using Artificial Neural Networks. In: FISITA (Veranst.): *FISITA 2004 World Automotive Congress* (Barcelona, Spanien 23.-27.05.2004), Paper No. F2004U108

Albers / Meboldt 2006 Albers, Albert; Meboldt, Mirko: A new approach in product development, based on systems engineering and systematic problem solving. In: AEDS 2006 (Veranst.): *International Workshop Applied Engineering Design Science* (Pilsen, Tschechische Rep. 27./28.10.2006)

Albers et al. 2006 Albers, Albert; Burkardt, Norbert; Deigendesch, Tobias: Processes, methods and tools in product development of multi-scale systems. In: TMCE 2006 (Veranst.): *Tools and methods of competitive engineering* (Laibach, Slowenien 18.-22.04.2006)

- Albers et al. 2007** Albers, Albert; Lerspalungsanti, Sarawut; Ott, Sascha: Methode zur Generierung und Schwingungskomfortbewertung von virtuellen Fahrten am Beispiel des Anfahrens mittels Antriebsstrangsimulationsmodellen und Bewertungsmodellen auf Basis Künstlicher Neuroner Netze (KNN). In: VDI (Hrsg.): *3. Nationale Tagung Humanschwingungen* (Dresden, 08.10.2007). Düsseldorf: VDI-Verlag, 2007, S. 229-245 (VDI-Berichte Nr. 2002)
- Albers et al. 2008a** Albers, Albert; Lerspalungsanti, Sarawut; Düser, Tobias; Ott, Sascha; Wang, Jiangang: A systematic approach to support drive train design using tools for human comfort evaluation and customer classification. In: ASME IDETC (Veranst.): *10th International Conference on Advanced Vehicle and Tire Technologies (AVTT)* (New York, USA 03.-06.08.2008), Paper No. DECT2008-49082
- Albers et al. 2008b** Albers, Albert; Düser, Tobias; Seifermann, Achim: Concept for environment simulation at the roller test bench. In: ASME IDETC (Veranst.): *10th International Conference on Advanced Vehicle and Tire Technologies (AVTT)* (New York, USA 03.-06.08.2008), Paper No. DECT2008-49746
- Albers et al. 2008c** Albers, Albert; Lerspalungsanti, Sarawut; Düser, Tobias; Ott, Sascha: Vehicle start-up simulation on drive train test bench and subjective comfort evaluation of virtual drive train by means of new driver modelling tools based on artificial neural networks. In: FISITA (Veranst.): *FISITA World Automotive Congress 2008* (München 2008), Paper No. F2008-12-168
- Albers et al. 2008d** Albers, Albert; Düser, Tobias; Ott, Sascha: X-in-the-loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebsystemen. In: HdT (Veranst.): *8. Tagung Hardware-in-the-loop-Simulation* (Kassel 16./17.09 2008)
- Albrecht 2005** Albrecht, Marc: *Modellierung der Komfortbeurteilung aus Kundensicht am Beispiel des automatisierten Anfahrens*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Diss., 2005 (Forschungsberichte des Instituts für Produktentwicklung / Albers, Albert (Hrsg.), Bd. 18)
- Ammon et al. 2006** Ammon, D.; Börner, M.; Rauh, J.: Simulation of the perceptible feed-forward and feed-back properties of hydraulic power-steering systems on the vehicle's handling behaviour using simple physical models. In: *Vehicle System Dynamics* 44 (2006), Spl, S. 158-170
- Angleviel et al. 2006** Angleviel, D.; Frachon, D.; Masson, G.: *Development of a contactless Hall effect torque sensor for electric power steering*. SAE Paper 2006-01-0939, Warrendale, USA: SAE, 2006
- Augsburg et al. 2005** Augsburg, Klaus; Sendler, Jan; Trutschel, Ralf: Subjektive und objektive Beschreibung von Mensch-Maschine-Schnittstellen am Beispiel des Bremspedalgefühls. In: GfA (Hrsg.): *Arbeitswissenschaftlicher Kongreß der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft* (Stuttgart 2005), Dortmund: GfA Press, S. 83-86
- Bachmann et al. 1995** Bachmann, Thomas; Bielaczek, Christian; Breuer, Bert: Der Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn und dessen Inanspruchnahme durch den Fahrer. In: *Automobil-technische Zeitschrift* 97 (1995), Nr. 10
- Backhaus et al. 2003** Backhaus, Klaus; Erichson, Bernd; Plinke, Wulff: *Multivariate Analysemethoden*. 10. neubearb. u. erw. Aufl. Berlin: Springer, 2003

- Balletshofer 1996** Balletshofer, Markus: *Untersuchung des Einflusses der Lenkungsabstimmung auf die subjektive Beurteilung der Lenkung mittels eines Steer-by-Wire-Fahrzeugs*. Stuttgart, Berufsakademie, Fachbereich: Maschinenbau/Fertigungstechnik, Diplomarbeit, 1996
- Barnstorf 2003** Barnstorf, Michael: Objektivierung des subjektiven Fahrkomfortempfindens. In: IFF (Veranst.): *10. IFF-Tagung* (Braunschweig 26.-28.03.2003). S. 143-160
- Bajcinca 2006** Bajcinca, Naim: *Robuste Regelungsverfahren mit Anwendungen bei Steer-by-Wire-Systemen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2006 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 1091) – Diss.
- Barthenheier 2004** Barthenheier, Thomas: *Potenzial einer fahrertyp- und fahrsituationsabhängigen Lenkradmomentengestaltung*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 584). – Diss.
- Berkefeld 1983** Berkefeld, Volker: *Der Einfluß der Elastizitäten in Radaufhängung und Lenkung auf das Eigenlenkverhalten von Kraftfahrzeugen*. München, Universität (TU), Diss., 1983
- Bertolini / Hogan 1999** Bertolini, Gary P.; Hogan, Robert M.: *Applying Driving Simulation to Quantify Steering Effort Preference as a Function of Vehicle Speed*. SAE Paper 1999-01-0394, Warrendale, USA: SAE, 1999
- Bertram / Opgen-Rhein 2001** Bertram, T.; Opgen-Rhein, P.: Modellbildung und Simulation mechatronischer Systeme – Virtueller Fahrversuch als Schlüsseltechnologie der Zukunft. In: *Sonderausgabe von ATZ/MTZ-Automotive Electronics* (2001), Nr. 1, S. 20-26
- Bitter 2005** Bitter, Thorsten: Dynamischer Sitzkomfort. In: Forschungsvereinigung Automobiltechnik (Hrsg.): *Darstellung des Schwingungsverhaltens von Fahrzeug-Insassen – Symbiose aus Experiment und Simulation* 189 (2005), S. 82-221
- Bortz 1985** Bortz, Jürgen: *Lehrbuch der Statistik: für Sozialwissenschaftler*. 2.Aufl. Berlin: Springer, 1985
- Botev 2008** Botev, Stefan: *Digitale Gesamtfahrzeugabstimmung für Ride und Handling*. Berlin, Universität (TU), Diss., 2008
- Braess 2001** Braess, Hans-Hermann: Lenkung und Lenkverhalten von Personenkraftwagen – Was haben die letzten 50 Jahre gebracht, was kann und muß noch getan werden? In: VDI (Hrsg.): *Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn* (Hannover 18.-19.10.2001). Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001, S. 13-55 (VDI-Berichte 1632)
- Braess / Seiffert 2003** Braess, Hans-Hermann (Hrsg.); Seiffert, Ulrich (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 2003
- Bröcker 2006** Bröcker, M.: New control algorithms for steering feel improvements of an electric powered steering system with belt drive. In: *Vehicle System Dynamics* 44 (2006), Heft Spl, S. 759-769
- Bubb 2001** Bubb, Heiner: Haptik im Kraftfahrzeug. In: Jürgensohn, Th. (Hrsg.); Timpe, K.-P. (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*. Berlin: Springer-Verlag, 2001
- Bubb 2003** Bubb, Heiner: *Wie viele Probanden braucht man für allgemeine Erkenntnisse aus Fahrversuchen?* Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 557). – S. 26-39
- Buschardt 2003** Buschardt, Boris: *Synthetische Lenkmomente*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 22 Nr. 12). – Diss.

- Buschardt 2004** Buschardt, Boris: *Haptische Informationsübertragung des Straßenzustandes*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 22 Nr. 16).-S. 322-337
- Butz et al. 2004** Butz, T.; Ehmann, M.; Stryk, O. von; Thieß-Magnus, W.: Realistische Straßenmodellierung für die Fahrdynamiksimulation in Echtzeit. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 106 (2004), Nr. 2, S. 118-125
- Chai et al. 2004** Chai, Yu Wun; Saitou, Youhei; Sakakibara, Yusuke; Kano, Yoshio; Abe, Masato: A Study of Effect of Steering Gain and Steering Torque on Driver's Feeling for SBW. In: FISITA (Veranst.): *2004 FISITA World Automotive Congress* (Barcelona, Spanien 2004)
- Chen / Chen 2006** Chen, X.; Chen, X.: *Control-oriented model for electric power steering system*. SAE Paper 2006-01-0938, Warrendale, USA: SAE, 2006
- Chen et al. 2005** Chen, Xiang; Chen, Xiaoqun; Zhou, Kemin: Optimal control of electric power-assisted steering system. In: IEEE (Veranst.): *Internat. Conf. on Control Applications* (Toronto 31.08.2005). Piscataway: IEEE Operations Center, 2005, S. 1403-1408
- Conover 1980** Conover, W. J.: *Practical Nonparametric Statistics*. 2. Aufl. New York, USA: Wiley, 1980
- Continental 2005** Continental AG (Institution): Neuer Anlauf für Vierradlenkungen: Hinterradlenkung von Continental. In: *Automobil-Produktion* 9 (2005), S. 67
- Crolla et al. 1998** Crolla, D.A.; Chen, D.C.; Whitehead, J.P.; Alstead, C.J.: *Vehicle Handling Assessment Using a Combined Subjective-Objective Approach*. SAE Paper 980226, Warrendale, USA: SAE, 1998
- Czichos / Habig 1992** Czichos, H.; Habig, K.-H.: *Tribologie-Handbuch*. Braunschweig: Vieweg, 1992
- Data / Frigerio 2002** Data S. C.; Frigerio F.: Objective evaluation of handling quality. In: *Proc. Instn Mech Engrs Vol 216 Part D: J Automobile Engineering* (2002), S. 297-305
- Data et al. 2004** Data, S.; Pesce, M.; Reccia, L.: Identification of steering system parameters by experimental measurements processing. In: *Proc. Instn Mech. Engrs Vol. 218 Part D: J. Automobile Engineering* (2004), S. 783-792
- Däsch 2004** Däsch, Ch.: *Lenkungsmodellierung für Modelbased Testing*. Esslingen, Fachhochschule (FHT), Diplomarbeit, 2004
- Dettki 2005** Dettki, Frank: *Methoden zur objektiven Bewertung des Geradeauslaufs von Personenkraftwagen*. Stuttgart, Universität, Fakultät Maschinenbau, Diss., 2005
- Diebold et al. 2006** Diebold, Luc; Schindler, Wolfgang; Haug, Jürgen; Däsch, Christoph; Lahti, Magnus: Anwendung eine Einspurmodells zur Fahrdynamiksimulation und -analyse. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 108 (2006), Nr. 11
- Dylla 2006** Dylla, Simon: Einfluss von Schwingungsparametern auf den Schaltbetätigungscomfort von Fahrzeugen mit Handschaltgetriebe. In: VDI (Hrsg.): *Getriebe in Fahrzeugen* (Friedrichshafen 2006). Düsseldorf: VDI-Verlag, 2006, S. 263-288 (VDI-Berichte 1943)
- Dylla / Albers 2006** Dylla, Simon; Albers, Albert: Development of a method for objective evaluation of gear control quality in manual-shifted vehicles. In: CTI (Veranst.): *5th International CTI Symposium Innovative Automotive Transmissions* (Berlin 2006)

- Fankhauser et al. 2005** Fankhauser, C.; Rosenmaier, M.; Kussmann, C.; Grabner, G.: Maschindynamische Optimierung des Lenksystems. In: DMK (Veranst.): *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium* (Dresden 01.-02.12.2005). Dresden: TUDpress Verlag der Wissenschaften, 2005, S. 605-617
- Farrer 1993** Farrer, David G.: *An Objective Measurement Technique for the Quantification of On-Centre Handling Quality*. SAE Technical Paper 93827, Warrendale, USA: SAE, 1993
- Fehlings / Liesenfeld 2005** Fehlings, D.; Liesenfeld, G.: Anforderungen an die Entwicklung von Elektromotoren für moderne Lenksysteme. In: DMK (Veranst.): *Dresdner Maschinenelemente Kolloquium* (Dresden 01.-02.12.2005). Dresden: TUDpress Verlag der Wissenschaften, 2005, S. 589-603
- Feinauer 2007** Feinauer, Martin: *Verknüpfung eines modellbasierten Lenkungsanalyse-Ansatzes mit einem realen Entwicklungswerkzeug zur Darstellung von Lenkmomentencharakteristika*. Heilbronn, Hochschule (FH), Diplomarbeit, 2007
- Fernholz / Nessler 2006** Fernholz, C.M.; Nessler, G.L.: *Prediction of vehicle steering system NVH from component-level test data*. SAE Paper 2006-01-0483, Warrendale: SAE, 2006
- Frost & Sullivan 2005** Frost & Sullivan: Elektrisch durch die Kurven: Studie über den Einsatz elektrischer Lenksysteme in Automobilen. In: *Automobil-Produktion* (2005), Nr. 6, S. 72
- Gies / Marusic 2000** Gies, Stefan; Marusic, Zeljko: Das Lenkgefühl – Merkmale der subjektiven und objektiven Beschreibung. Becker, Klaus (Hrsg.): *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen*. Renningen: expert-Verlag, 2000
- Gies / Schachner 2004** Gies, S.; Schachner, M.: Neue Funktionalitäten durch elektronifizierte Lenksysteme. In: ika (Veranst.): *13. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik* (Aachen 2004). Aachen, 2004, S. 1479-1500
- Hackenberg / Heißing 1982** Hackenberg, U.; Heißing, B.: Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* (1982), Nr. 7/8, S. 341-345
- Harnett 2002** Harnett, Philip: Objective Methods for the Assessment of Passenger Car Steering Quality. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2002 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 506). – Diss.
- Harrer 2005** Harrer, Manfred: *Steering System Development in Premium Car Segment*. SAE-Paper 2006-01-0935, Warrendale: SAE, 2005
- Harrer et al. 2006** Harrer, Manfred; Pfeffer, Peter E.; Johnston, D. Nigel: Steering Feel - Objective assessment of passenger cars - Analysis of steering feel and vehicle handling. In: FISITA (Veranst.): *2006 World Automotive Congress* (Yokohama, Japan 22.-27.10.2006), Ref. No. F2006V165
- Harrer / Pfeffer 2007** Harrer, Manfred; Pfeffer, Peter E.: Characterisation of Steering Feel. In: TV SD / TUM FTM (Veranst.): *chassis.tech 2007* (München 01.-02.03.2007)
- Heißing 2002** Heißing, B.: Die Simulation als Tool im Produktentstehungsprozess von Krafftfahrzeugen. In: Vieweg (Hrsg.): *Tagungsband Virtual Product Creation* (Berlin 2002). Wiesbaden: Vieweg, 2002
- Heißing / Brandl 2002** Heißing, Bernd; Brandl, Hans J.: *Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens*. 1.Aufl., Würzburg: Vogel Verlag, 2002

- Heathershaw 2006** Heathershaw, Andrew: *Developments in On-Centre Steering Evaluation and Testing*. SAE Paper 2006-01-0796, Warrendale, USA: SAE, 2006
- Hinüber 2002** Hinüber, E. von: Inertiale Messsysteme mit faseroptischen Kreiseln für Fahrdynamik und Topologiedaten-Erfassung. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 104 (2002), Nr. 6, S. 584-591
- Hisaoka et al. 1996** Hisaoka, Yuji; Yamamoto, Masaki; Fujinami, Hiroaki: A study on desirable steering responses and steering torque for driver's feeling. In: ika (Veranst.): *AVEC'96, International Symposium on Advanced Vehicle Control* (Aachen 24.-28.06.1996)
- Isermann 1992** Isermann, Rolf: *Identifikation dynamischer Systeme- 2. Besondere Methoden*. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1992
- Isermann 1999** Isermann, Rolf: *Mechatronische Systeme: Grundlagen*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1999
- Kende et al. 2006** Kende, P.; Kulkarni, A.; Kothalikar, U.; Lakhera, V.: *Simple, effective and low cost solution for power steering hydraulic rattle noise isolation*. SAE Paper 2006-01-0936, Warrendale, USA: SAE, 2006
- King et al. 2002** King, R.P.; Crolla, D.A.; Ash, H.A.S.; Whitehead, J.: *Identification of Subjective-Objective Vehicle Handling Links Using Neural Networks for the Foresight Vehicle*. SAE Paper 2002-01-1126, Warrendale, USA: SAE, 2002
- Karch / Grüner 2007** Karch, Gerald; Grüner, Stefan: Mechatronische Lenksysteme. In: *Automatisierungstechnik* 55 (2007), Nr. 6, S. 281-289
- Kobetz 2004** Kobetz, Christian: *Modellbasierte Fahrdynamikanalyse durch ein an Fahrmanövern parameteridentifiziertes querdynamisches Simulationsmodell*. Wien, Universität (TU), Diss., Aachen: Shaker Verlag, 2004
- Kodaira et al. 2007** Kodaira, Kazunori; Oyama, Yasuharu; Sano, Shoichi: Improved azimuth angle feedback steering system by introducing yaw rate feedback. In: *Review of Automotive Engineering* 28 (2007), Nr. 3, S. 377-383
- Koide / Kawakami 1988** Koide, M.; Kawakami, S.: Analysis of Steering Feel Evaluation in Vehicles with Power Steering. In: *JSAE Review* 9 (1988), Nr. 3
- Krenn / Richter 2004** Krenn, M.; Richter, T.: Active steering – BMW's approach to modern steering technology. In: Barton, David (Ed.); Blackwood, Andrew (Ed.): *Braking 2004, Vehicle Braking and Chassis Control* (Leeds 07.-09.07.2004). Bury St. Edmunds: Professional Engineering Publ., 2004, S. 3-14
- Krüger / Neukum 2001** Krüger, H.-P.; Neukum, A.: Bewertung von Handlingeigenschaften – zur methodischen und inhaltlichen Kritik des korrelativen Forschungsansatzes. In: Jürgensohn, Th. (Hrsg.); Timpe, K.-P. (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung*. Berlin: Springer-Verlag, 2001
- Kudritzki 2000** Kudritzki, Detlef: Möglichkeiten der Objektivierung subjektiver Beurteilungen des Fahrzeugverhaltens. In: Becker, Klaus (Hrsg.): *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen*. Renningen: expert-Verlag, 2000
- Kudritzki 2002** Kudritzki, Detlef: Neue Erkenntnisse über das zeitabhängige Beurteilungsverhalten des Fahrers. In: Becker, Klaus (Hrsg.): *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II*. Renningen: expert-Verlag, 2002

- Kushiro / Yamomoto 2006** Kushiro, Ikuo; Yamomoto, Masaki: *Vehicle behavior under the influence of steering dynamics by means of low frequency torque input*. SAE Paper 2006-01-0557, Warrendale, USA: SAE, 2006
- Lundquist et al. 2006** Lundquist, C.; Reinelt, W.; Engvist, O.: *Back driving assistant for passenger cars with trailer*. SAE Paper 2006-01-0940, Warrendale, USA: SAE, 2006
- Milliken / Milliken 1995** Milliken, William F.; Milliken, Douglas L.: *Race car vehicle dynamics*. Warrendale: SAE, 1995
- Mareis 2006** Mareis, T.: Neue Allradlenkung. In: *Krafthand* 79 (2006), S. 39
- Meljnikov 2003** Meljnikov, Darko: *Entwicklung von Modellen zur Bewertung des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen*. Stuttgart, Universität, Fakultät Maschinenbau, Institut A für Mechanik, Diss., 2003 (Bericht aus dem Institut A für Mechanik 2003/4)
- Metz 2004** Metz, L.D.: *What Constitutes Good Handling?* SAE Paper 2004-01-3532, Warrendale, USA: SAE, 2004
- Mouri et al. 2007** Mouri, Hiroshi; Kubota, Masahiro; Horiguchi, Nami: *Study on effects of transient steering efforts characteristics on driver's steering behaviour*. SAE Paper 2007-01-0823, Warrendale, USA: SAE, 2007
- Mimuro et al. 1990** Mimuro, Tetsushi; Ohsaki, Masayoshi; Yasunaga, Hiromichi; Satoh, Kohji: *Four Parameter Evaluation Method of Lateral Transient Response*. SAE Paper 901734, Warrendale, USA: SAE, 1990
- Mitschke / Wallentowitz 2004** Mitschke, M.; Wallentowitz, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2004
- Neukum 2002** Neukum, Alexandra: Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop - Zur Brauchbarkeit des korrelativen Ansatzes. In: Becker, Klaus (Hrsg.): *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II*. Renningen: expert-Verlag, 2002
- Neunzig / Benmimoun 2002** Neunzig, D.; Benmimoun, A.: Potentiale der vorausschauenden Fahrerassistenz zur Reduktion des Kraftstoffverbrauchs. In: RWTH (Hrsg.): *Tagungsband des 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik (Aachen 2002)*
- Neureder 2002** Neureder, Uwe: *Untersuchung zur Übertragung von Radkraftschwankungen auf die Lenkung von Pkw mit Federbeinvorderachse und Zahnstangenlenkung*. Düsseldorf: VDI Verlag, 2002 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr.518). – Diss.
- Nissing et al. 2007** Nissing, Dirk; Gessat, Jochen; Bitzer, Thilo; Seewald, Alois: Hydraulische Fahrwerksysteme mit elektrohydraulische Lenkung und aktiver Wankstabilisierung. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 109 (2007), Nr. 3, S. 238-244
- Norm DIN 70000** Norm DIN 70000: *Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten*.
- Norm ISO 3888-1** ISO 3888-1: *Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double lane-change*. 1st ed., Ref. No. ISO 3888-1:1999(E), Geneva, Switzerland: International Standardisation Organization, 1999
- Norm ISO 4138** ISO 4138: *Passenger cars, Steady-state circular driving behaviour - Open-loop test methods*. 3rd ed., Ref. No. ISO 4138:2004(E), Geneva, Switzerland: International Standardisation Organization, 2004

- Norm ISO 7401** ISO 7401: *Road vehicles - Lateral transient response test methods - Open-loop test methods*. 2nd ed., Ref. No. ISO 7401:2003(E), Geneva, Switzerland: International Standardisation Organization, 2003
- Norm ISO 8726** ISO 8726: *Road vehicles - Transient open-loop response test method with pseudo-random steering input*. Ref. No. ISO/TR 8726:1988(E), Geneva, Switzerland: International Standardisation Organization, 1988
- Norm ISO 13674-1** ISO 13674-1: *Road vehicles - Test method for the quantification of on-centre handling - Part 1: Weave Test*. 1st ed., Ref. No. ISO 13674-1:2003(E), Geneva, Switzerland: International Standardisation Organization, 2003
- Norm ISO CD 13674-2** ISO CD 13674-2: *Road vehicles - Test method for the quantification of on-centre handling - Part 2: Transition Test*. Geneva, Switzerland: International Standardisation Organization, 2002
- Norm ISO/TS 20119** ISO/TS 20119: *Road vehicles - Test method for the quantification of on-centre handling - Determination of dispersion metrics for straight-line driving*. 1st ed., Ref. No. ISO/TS 20119:2002(E), Geneva, Switzerland: International Standardisation Organization, 2002
- Norm SAE J1060** SAE J1060: *Subjective Rating Scale for Evaluation of Noise and Ride Comfort*. Issued 1973-11, Reaffirmed 2000-05, Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 2000
- Norm SAE J1441** SAE J1441: *Subjective Rating Scale for Vehicle Handling*. Issued 1985-06, Reaffirmed 1998-03, Warrendale, USA: Society of Automotive Engineers, 1998
- Norman 1984** Norman, Kenneth D.: *Objective Evaluation of On-Center Handling Performance*. SAE Technical Paper 840069, Warrendale, USA: SAE, 1984
- Nutsch / Braun 2007** Nutsch, Torsten; Braun, Andreas: Sicherheits- und Komfortgewinn durch Hybridlenkungen. Assistenzfunktionen mittels Momentenüberlagerung. In: VDI (Hrsg.): *9. Internationales Forum Nutzfahrzeuge* (München 14.-15.06.2007). Düsseldorf: VDI-Verlag, 2007 (VDI-Berichte 1986), S. 133-148
- Oberhaus / Rönitz 1989** Oberhaus, H.; Rönitz, R.: Fahrversuche im Labor oder auf realer Straße – Ergänzung oder Konkurrenz ? In: VDI (Hrsg.): *Erprobung und Simulation in der Fahrzeugentwicklung* (Böblingen 1989). Düsseldorf : VDI-Verlag, 1989 (VDI-Berichte 741)
- Olley 1947** Olley, M.: Road Manners of the Modern Car. In: *Proceedings of the Institution of Automobile Engineers*, Vol. 32, pp. 147-182, 1946-47
- Ono et al. 2004** Ono, Eiichi; Asano, Kenji; Koibuchi, Ken: Estimation of tire grip margin using electric power steering system. In: *Vehicle System Dynamics* 41 (2004), Heft SUPPL, S. 421-430
- Oparin 2005** Oparin, Denys: *Modellbasierte Lenkungsanalyse, „Model-based Testing“*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Institut für Produktentwicklung, Diplomarbeit, 2005
- Pacejka / Besselink 1997** Pacejka, H.; Besselink, I.: Magic Formula Tyre Model with Transient Properties. In: *Vehicle Systems Dynamics* (1997), Nr. Supplement 27, S. 234-249
- Pfeffer 2006** Pfeffer, Peter E.: Modellierung des Lenkmoments. In: ika (Veranst.): *15. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik* (Aachen 2006), 2006, S. 1587-1607

- Pötzl et al. 2005** Pötzl, T.; Kornhaas, R.; Karch, G.; Huart, D.: Anforderungen an zukünftige Lenksysteme bis zur Fahrzeugoberklasse. In: VDI (Hrsg.): *12. Internat. Kongreß Elektronik im Kraftfahrzeug* (Baden-Baden 06.-07.2005). Düsseldorf : VDI-Verlag, 2005, S. 673-682 (VDI-Berichte 1907)
- Reiber / Jäkel 2004** Reiber, T.; Jäkel, M.: Virtual Reality – Neue Konzepte für die Produktentwicklung. In: *CAD-CAM Report* (2004), Nr. 7, S. 34-39
- Reimpell 1988** Reimpell, Jörnßen: *Fahrwerktechnik: Radaufhängungen*. Reimpell, Jörnßen (Hrsg.), 2.Aufl., Würzburg: Vogel, 1988
- Reimpell / Sponagel 1988** Reimpell, Jörnßen; Sponagel, Peter: *Fahrwerktechnik: Reifen und Räder*. Reimpell, Jörnßen (Hrsg.), 2.Aufl., Würzburg: Vogel, 1988
- Richter 1974** Richter, Bernd: *Driving Simulator Studies: The influence of Vehicle Parameters on safety in critical situations*. SAE Paper 741105, Warrendale, USA: SAE, 1974
- Riedel / Arbinger 1997** Riedel, Andreas; Arbinger, Roland: *Subjektive und objektive Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw*. FAT-Schriftenreihe Nr. 139, Frankfurt: FAT, 1997
- Riedel / Arbinger 2000** Riedel, Andreas; Arbinger, Roland: *Ergänzende Auswertungen zur subjektiven und objektiven Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw*. FAT-Schriftenreihe Nr. 161, Frankfurt: FAT, 2000
- Riekert / Schunck 1940** Riekert, Paul ; Schunck, Theo-Ernst: *Zur Fahrmechanik des gummibereiften Kraftfahrzeugs*. Deutsche Kraftfahrtforschung/Technischer Forschungsbericht. Nr. 89, S. 211-224, Sonderdr. aus: Ingenieur-Archiv XI (1940) H. 3, Berlin, 1940
- Rill 1994** Rill, G.: *Simulation von Kraftfahrzeugen*. Wiesbaden : Vieweg-Verlag, 1994
- Rönitz 1986** Rönitz, R.: Objektive Prüfverfahren zum Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen und ihre internationale Normung. In: *Automobil-Industrie* (1986), S. 263-273
- Rustemeier et al. 2005** Rustemeier, C.; Liu-Henke, X.; Goldau, A.; Jäker, K.-P.: Simulationsumgebung zur Modellkopplung von Black-Box-Modellen mechatronischer Funktionsmodule und MKS-Fahrzeugmodellen. In: VDI (Hrsg.): *Mechatronik 2005 - Innovative Produktentwicklung* (Wiesloch 2005). Düsseldorf : VDI-Verlag, 2005 (VDI-Berichte 1892)
- Salaani et al. 2004** Salaani, M. Kamel; Heydinger, Gary J.; Grygier, Paul A.: *Experimental steering feel performance measures*. SAE Technical Paper 2004-01-1074, Detroit: SAE, 2004
- Salaani et al. 2005** Salaani, Mohamed Kamel; Heydinger, Gary J.; Grygier, Paul A.: *Vehicle On-Center Directional and Steering Sensitivity*. SAE Paper 2005-01-0395, Warrendale, USA: SAE, 2005
- Sato et al. 1991** Sato, H.; Osawa, H.; Haraguchi, T.: The quantitative analysis of steering feel. In: *JSAE Review* 12 (1991), Nr. 2, S. 85-87
- Schalz et al. 2002** Schalz, Jörg-Peter; Anett Duhr; Marusic, Zeljko: Subjektiv-objektiv Korrelation fahrdynamischer Größen in der Praxis. In: Becker, Klaus (Hrsg.): *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II*. Renningen: expert-Verlag, 2002
- Scherf 2003** Scherf, H.: *Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme*. München ; Wien : Oldenburg-Verlag, 2003
- Schöning et al. 2006** Schöning, Volkmar; Katzwinkel, Reiner; Wuttke, Ulrich; Schwitters, Frank; Rohlf, Michael; Schuler, Thomas: Der Parklenkassistent „Park-Assist“ von Volkswagen. In:

- VDI (Hrsg.): *Integrierte Sicherheit und Fahrerassistenzsysteme* (Wolfsburg 12.-13.10 2006). Düsseldorf : VDI-Verlag, 2006 (VDI-Berichte 1960), S. 521-541
- Schuller et al. 2007** Schuller, J.; Lannoije, M.; Meys, M.: Entwurf und Realisierung des Sicherheitskonzepts der Audi Dynamiklenkung. In: VDI (Hrsg.): *Innovative Produktentwicklung* (Wiesloch 23.-24.05. 2007). Düsseldorf: VDI-Verlag, 2007 (VDI-Berichte 1971), S. 249-273
- Siegler / Regan 2006** *The Effect of Vehicle Component Changes on Steering Feel*. JSAE Paper 2006-05-0473, Tokyo: JSAE, 2006
- Silberbauer / Plankensteiner 2006** Datenbus ersetzt mechanische Lenksäule. In: *Mechatronik F&M* 114 (2006), Nr. 12, S. 58-61
- Simon 2009** Simon, Dirk: *Entwicklung eines effizienten Verfahrens zur Bewertung des Anfahrverhaltens von Fahrzeugen*. Rostock, Universität, Diss., 2009
- Snider / Osgood 1969** Snider, James G. (Hrsg.); Osgood, Charles E. (Hrsg.): *Semantic differential technique : a sourcebook*. Chicago, USA: Aldine, 1969
- Stehle 2002** Stehle, Björn: *Objektivierung der Schaltqualität von automatisierten Schaltgetrieben*. Stuttgart, Universität, Diplomarbeit, 2002 (Institut B für Mechanik, DIPL-95)
- Stoll 1992** Stoll, Helmut: *Fahrwerktechnik: Lenkanlagen und Hilfskraftlenkungen*. Reimpell, Jörnßen (Hrsg.), Würzburg: Vogel, 1992
- Sugiyama et al. 2006** Sugiyama, A.; Kurishigi, M.; Hamada, H.; Kifuku, T.: *An EPS control strategy to reduce steering vibration associated with disturbance from road wheels*. SAE Paper 2006-01-1178, Warrendale: SAE, 2006
- Theimert et al. 2005** Theimert, C.; Heißing, B.; Hipp, E.: Das Entwicklungswerkzeug Fahrsimulator in der Nutzfahrzeugtechnik. In: VDI (Hrsg.): *Nutzfahrzeuge* (Böblingen 2005). Düsseldorf : VDI-Verlag, 2005
- Toffin et al. 2007** Toffin, D.; Reymond, G. ; Kemeny, A.; Droulez, J. : Role of steering wheel feedback on driver performance: Driving simulator and modelling analysis. In: *Vehicle System Dynamics* 45 (2007), Nr. 4, S. 375-388
- VDI-Richtlinie 2206** Richtlinie VDI 2206 Juni 2004. Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme
- VDI-Richtlinie 2221** Richtlinie VDI 2221 Mai 1993. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte
- VDI-Richtlinie 2223** Richtlinie VDI 2223 Januar 2004. Methodisches Entwerfen technischer Produkte
- Velleman / Hoaglin 1981** Velleman, P.F.; Hoaglin, D.C.: *Applications, Basics, and Computing of Exploratory Data Analysis*. Duxbury Press, 1981
- Wagner 2003** Wagner, A.: *Ein Verfahren zur Vorhersage und Bewertung der Fahrerreaktionen bei Seitenwind*. Stuttgart, Universität, Diss., 2003 (Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungsmotoren und Krafffahrwesen der Universität Stuttgart, Bd. 23), Renningen: expert Verlag, 2003
- Weilkes et al. 2006** Weilkes, Michael; Bürkle, Lutz; Rentschler, Tobias: Lane-Keeping-Support: von haptischer Spurverlassenswarnung zu semi-autonomer Spurführung. In: ika (Hrsg.): 15.

- Aachener Kolloquium für Fahrzeug- und Motorentechnik* (Aachen 09.-11.10.2006). Aachen, 2006, S. 909-920
- Weir / di Marco 1978** Weir, D.H.; Marco, R.J.: *Correlation and evaluation of driver vehicle directional handling data*. SAE Paper 780010, Warrendale, USA: SAE, 1978
- Weiss 1988** Weiss, E.: *Untersuchung und Rekonstruktion von Ausweich- und Fahrspurwechselforgängen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 96). – Diss.
- Willumeit 1998** Willumeit, H.-P.: *Modelle und Modellierungsverfahren in der Fahrzeugdynamik*. Stuttgart ; Leipzig : Teubner, 1998
- Winner / Heuss 2005** Winner, Hermann; Heuss, Oliver: X-by-Wire Betätigungselemente - Überblick und Ausblick. In: Winner, Hermann (Hrsg.); Landau, Kurt (Hrsg.): *Darmstädter Kolloquium Mensch & Fahrzeug* (Darmstadt 08.-09.03.2005). Stuttgart: Ergonomia Verlag, 2005, S. 79-115
- Wolf / Bubb 2005** Wolf, H.; Bubb, H.: *Ergonomie in der Fahrwerksentwicklung. Wo und wie kann sie dort hilfreich sein?* Fahrwerk.tech, TU München, 2005
- Yao 2006** Yao, Y.: *Vehicle steer-by-wire system control*. SAE-Paper 2006-01-1175, Warrendale: SAE, 2006
- Zhang et al. 1996** Zhang, L.; Helander, M.G.; Drury, C.G.: Identifying factors of comfort and discomfort in sitting. In: *Human Factors* 38 (1996), Nr. 3, S. 377-389
- Zhao et al. 2006** Zhao, Yan; Wang, Hong; Wang, Rui: Development of dynamic parameter design and tuning system for EPS. In: IEEE (Veranst.): *International Conference on Mechatronics and Automation* (Luoyang 25.-28.06. 2006). Piscataway: IEEE Operations Center, 2006, S. 629-633
- Zöfel 2003** Zöfel, P.: *Statistik für Psychologen im Klartext*. München: Pearson Studium, 2003
- Zomotor 1991** Zomotor, Adam: *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten*. Reimpell, Jörnßen (Hrsg.), 2. Aufl., Würzburg: Vogel, 1991
- Zomotor et al. 1997** Zomotor, A.; Braess, H.; Rönitz, R.: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen – Ein Rückblick auf die letzten 20 Jahre Teil 1. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 99 (1997), Nr. 12
- Zomotor et al. 1998** Zomotor, A.; Braess, H.; Rönitz, R.: Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen – Ein Rückblick auf die letzten 20 Jahre Teil 2. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 100 (1998), Nr. 3
- Zomotor 2002** Zomotor, Zoltan A.: *Online-Identifikation der Fahrdynamik zur Bewertung des Fahrverhaltens von PKW*. Stuttgart, Universität, Fakultät Maschinenbau, Institut A für Mechanik, Diss., 2002 (Bericht aus dem Institut A für Mechanik 2002)
- Zschocke / Albers 2008a** Zschocke, Alexander K.; Albers, Albert: Links between subjective and objective evaluations regarding the steering character of automobiles. In: *International Journal of Automotive Technology* 9 (2008), No. 4, S. 473-481
- Zschocke / Albers 2008b** Zschocke, Alexander K.; Albers, Albert: A method to examine links between subjective and objective evaluations of steering torque utilising a model-based approach. In: FISITA (Veranst.): *FISITA World Automotive Congress 2008* (München 2008), Paper No. F2008-12-158

7.2 Bibliographie

- Anders 2000** Anders, U.: *Statistische Neuronale Netze*. Karlsruhe, Universität (TH), Diss., München: Verlag Franz Vahlen, 2000
- Bachmann 1996** Bachmann, Thomas: *Literaturrecherche zum Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn*. Düsseldorf: VDI Verlag, 1996 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 286).
- Badawy et al. 1998** Badawy, Aly; Zuraski, Jeff; Bolourchi, Farhad; Chandy, Ashok: *Modeling and Analysis of an Electric Power Steering System*. SAE Paper 982878, Warrendale, USA: SAE, 1998
- Barthel 2003** Barthel, Ronny: *Ergonomische Betrachtung von Lenkassistentenfunktionen zur Fahrerunterstützung in kritischen Fahrsituationen*. Darmstadt, Universität (TU), Institut für Arbeitswissenschaft, Diss., 2003
- Becker 2006** Becker, K. (Hrsg.): *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen III*. Haus der Technik Fachbuch Band 56, Renningen: expert Verlag, 2006
- Bencker 2001** Benker, Hans: *Statistik mit MATHCAD und MATLAB*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2001
- Bestle 1994** Bestle, Dieter: *Analyse und Optimierung von Mehrkörpersystemen - Grundlagen und rechnergestützte Methoden*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1994
- Beucher 2005** Beucher, O.: *Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik mit MATLAB*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2005
- Bortz / Döring 1995** Bortz, Jürgen; Döring, Nicola: *Forschungsmethoden und Evaluation*. 2. Aufl. Heidelberg: Springer-Verlag, 1995
- Brunn / Harrer 2004** Brunn, Philipp; Harrer, Manfred: *Objektivierung der Lenkungsrückmeldung*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 580). - S. 67-79
- Brunnschweiler 2005** Brunnschweiler, Daniel: *Moderne Lenksysteme*. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 107 (2005), Nr. 2
- Bugar 2001** Bugar, A.: *Analyse des Verhaltens von Pkw-Fahrern in längs- und querdynamisch kritischen Situationen und Abschätzung des Sicherheitspotenzials eines Fahrdynamikregelsystems*. Darmstadt, Universität (TU), Institut für Arbeitswissenschaft, Studienarbeit, 2001
- Camuffo et al. 2002** Camuffo, I.; Caviasso, G.; Pascali, L.; Pesce, M.; Alviano, E.: *Simulation Tools and Evaluation Criteria for Steering Wheel Feel Improvement of an Electric Power Steering System*. SAE Paper 2002-01-1593, Warrendale, USA: SAE, 2002
- Callan 2003** Callan, R.: *Neuronale Netze im Klartext*. München: Pearson Studium, 2003
- Deppermann 1989** Deppermann, K.H.: *Fahrversuche und Berechnung zum Geradeauslauf von Personenkraftwagen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989 (VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 133).
- Dürr et al. 1996** Dürr, R.; Schiehlen, W.; Zamow, J.: *Simulationsmodelle für Servolenkungen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1996 (VDI-Berichte 1283)
- Engels 1995** Engels, Alex: *Geradeauslaufkriterien für Pkw und deren Bewertung*. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 97 (1995), Nr. 6

- Fuchs 1993** Fuchs, J.: *Beitrag zum Verhalten von Fahrer und Fahrzeug bei Kurvenfahrt*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993 (VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12 Nr. 184).
- Hahn 2002** Hahn, Brian D.: *Essential MATLAB for Scientists and Engineers*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002
- Harrer et al. 2005** Harrer, Manfred; Stickel, Thomas; Pfeffer, Peter E.: *Automatisierung fahrdynamischer Messungen*. In: VDI (Hrsg.): *Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn* (Hannover 25./26.10.2005). Düsseldorf: VDI-Verlag, (VDI-Berichte 1912)
- Heathershaw 2004** Heathershaw, Andrew: *Matching of chassis and variable ratio steering characteristics to improve high speed stability*. SAE Paper 2004-01-1103, Warrendale, USA: SAE, 2004
- Henze 2004** Henze, Roman: *Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe eines Fahrermodells*. Braunschweig, Universität (TU), Diss., Aachen: Shaker Verlag, 2004 (Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik, Bd. 7)
- Holle 2004** Holle, Michael: *Fahrdynamikoptimierung und Lenkmomentrückwirkung durch Überlagerungslenkung*. Ika, 2004
- Jungnickel 1999** Jungnickel, Dieter: *Optimierungsmethoden: eine Einführung*. Berlin, Heidelberg: Springer, 1999
- Jürgensohn et al. 1997** Jürgensohn, Thomas; Jung, Raphael; Willumeit, Hans-Peter: Die "Handschrift" des Lenkers. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 99 (1997), Nr. 4, S. 216-219
- Kieffer 2003** Kieffer, Serge: *Reibungsansätze in der MKS-Simulation von Fahrwerken*. Karlsruhe, Universität (TH), Institut für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau, Diplomarbeit, 2003
- Kirchhoff et al. 2003** Kirchhoff, S.; Kuhnt, S.; Lipp, P.; Schlawin, S.: *Der Fragebogen*. 3. überarb. Aufl. Opladen: Leske + Budrich, 2003
- Kleppmann 2001** Kleppmann, Wh.: *Taschenbuch Versuchsplanung*. 2. erweit. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2001
- Klumparend 1999** Klumparend, Lars: *Variation von Fahrverhaltensparametern unter besonderer Berücksichtigung des Lenkradmoments*. Aalen, Fachhochschule, Fachbereich Maschinenbau, Diplomarbeit, 1999
- McGill et al. 1978** McGill, R.; J. W. Tukey; W. A. Larsen: Variations of Boxplots. In: *The American Statistician* 32 (1978), S. 12-16
- Matthiesen 2002** Matthiesen, S.: *Ein Beitrag zur Basisdefinition des Elementmodells „Wirkflächenpaare & Leitstützstrukturen“ zum Zusammenhang von Funktion und Gestalt technischer Systeme*. Karlsruhe, Universität (TH), Fakultät für Maschinenbau, Diss., 2002 (Forschungsberichte des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau / Albers, Albert (Hrsg.), Bd. 6)
- Miller 1996** Miller, R.G. jr.: *Grundlagen der Angewandten Statistik*. München: R. Oldenbourg Verlag, 1996
- Nelson 1989** Nelson, L. S.: Evaluating Overlapping Confidence Intervals. In: *Journal of Quality Technology* 21 (1989), S. 140-141

- Neukum / Krüger 2003** Neukum, A.; Krüger, H.P.: Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen - Untersuchungsmethoden und Bewertungskriterien. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003, S. 297-318 (VDI-Berichte 1791)
- Niemann et al. 1980** Niemann, Klaus; Richter, Karl-Heinz; Weiger, Günter; Wulf, Helmut: Entwicklungsmöglichkeiten an Lenksystemen für Kraftfahrzeuge und ihr Einfluß auf die Kurshaltung. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 82 (1980), Nr. 10
- Pfeffer / Harrer 2007** Pfeffer, Peter E.; Harrer, Manfred: Optimaler Lenkradmomentenverlauf bei stationärer Kurvenfahrt. In: VDI (Hrsg): *Reifen-Fahrwerk-Fahrbahn* (Hannover 23./24.10.2007). Düsseldorf: VDI-Verlag
- Pfeffer et al. 2005** Pfeffer, Peter E.; Johnston, D. Nigel; Sokola, Matija; Harrer, Manfred: *Energy Consumption of Electro-Hydraulic Steering Systems*. SAE-Paper 2005-01-1262, Warrendale, USA: SAE, 2005
- Poestgens 2001** Poestgens, U.: *Servolenksysteme für Pkw und Nutzfahrzeuge: leicht und sicher lenken*. ZF Lenksysteme, Landsberg/Lech: Verl. Moderne Industrie, 2001
- Post / Law 1996** Post, J.W.; Law, E.H.: *Modeling, Characterization and Simulation of Automobile Power Steering Systems for the Prediction of On-Center Handling*. SAE-Paper 960178, Warrendale, USA: SAE, 1996
- Reinelt et al. 2004** Reinelt, W.; Klier, W.; Lundquist, C.; Reimann, G.; Schuster, W.; Großheim, R.: Active Front Steering for passenger cars: system modelling and functions. In: IFAC (Veranst.): *IFAC Advances in Automotive Control* (Salerno 2004)
- de Sa 2003** de Sa, Joaquim P.: *Applied Statistics using SPSS, STATISTICA and MATLAB*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003
- Sagan 2003** Sagan, E.: Zur Beurteilung von Fahreigenschaften in fahrdynamischen Testverfahren. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003, (VDI-Berichte 1791)
- Schick et al. 2007** Schick, Bernhard; Yamamoto, Masaki; Kushiro, Ikuo; Resch, Stefan; Matawa, Robert; Hagiwara, Naoki: Optimierung des Lenkverhaltens Kundenwünsche und Zielwerte. In: *Automobiltechnische Zeitschrift* 109 (2007), Nr. 11
- Schröder 2004** Schröder, Kaspar: *Beiträge der Parameteridentifikation zur Fahrdynamikanalyse*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004 (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 12 Nr. 564). - Diss.
- Speidel et al. 2005** Speidel, Gerd; Rachel, Rüdiger; Müller, Jens; Stöhr, Patricia: DuoPML-Active Steering auf hydraulischer Basis. In: ThyssenKrupp (Veranst.): *ThyssenKrupp techforum* (2005)
- Seyed-Ghaemi 2005** Seyed-Ghaemi, A.: *Bewertungskriterien zur objektiven Festlegung des Wankverhaltens aus Fahrdynamikmessungen*. Landshut, Fachhochschule, Fachbereich Maschinenbau/Fahrzeugtechnik, Diplomarbeit, 2005
- Siegel 1985** Siegel, S.: *Nichtparametrische statistische Methoden*. mit e. Vorw. u. Flußdiagr. zur dt. Ausg. von W. Schüle (Aus d. Amerikan. übertr. von U. Rennert), 2. durchges. Aufl. Eschborn bei Frankfurt am Main: Fachbuchhandlung für Psychologie Verlagsabteilung, 1985
- Sobotka 2005** Sobotka, P.: *Standards zur objektiven Lenkungsabstimmung*. Prag, Universität (TU), Fakultät für Verkehrswesen, Diplomarbeit, 2005

- Steyer 2003** Steyer, Rolf: *Wahrscheinlichkeit und Regression*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2003
- Wick 2006** Wick, Jürg: Rundum in festen Händen. In: *Automobil Revue* (29.11.2006), Nr. 48
- Wosnitza / Jäger 2000** Wosnitza, M. (Hrsg.); Jäger, R.S. (Hrsg.): *Daten erfassen, auswerten und präsentieren - aber wie?* 3. akt. u. korr. Aufl. Landau: Verlag Empirische Pädagogik, 2000
- Zirn 2002** Zirn, Oliver: *Modellbildung und Simulation mechatronischer Systeme*. Renningen: expert-Verlag, 2002

Anhang

A Fragebögen zum subjektiven Lenkcomfort-Eindruck über die Fahrzeuge

| Werkstattbereich / Kreisel Richtgeschw. 30..50 km/h | | Fahrzeug Fahrer | Startzeit | Bewertung (nicht fahrzeugklassenspezifisch!) | | | | |
|--|------------------------------------|--|-----------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | | | Niveau | Gefallen | | | |
| Kriterium | | Beschreibung | | herausragend | gut | mittelmäßig | dürftig | sehr schlecht |
| Lenkmoment | Anlenkmoment | Kraft, die am Lenkrad im ersten Moment des Anlenkens in eine Kurve/ beim Abbiegevorgang hinein spürbar ist | niedrig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Reibung | Die Lenkung vermittelt den Eindruck, "verklebt" zu sein | gering | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Momentenverlauf | im Übergang Mitten- zu Weiterlenkbereich | eckig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Haltemoment im Weiterlenkbereich | Lenkkraftbetrag beim Abbiegen oder in Kreiseln | niedrig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Lenkwinkelbedarf / Lenkübersetzung | bei einem Abbiegevorgang | klein | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Rücklauf | Lenkungsrücklauf | nach dem Abbiegevorgang bei losgelassenem Lenkrad in die Geradeausstellung | langsam | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Lenkungsrücklauf, Lenkmoment | nach dem Abbiegevorgang aufzubringende Kraft, um die Geradeausstellung zu erreichen | niedrig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Wankreaktion | Wie schnell und stark neigt sich das Fahrzeug beim Abbiegevorgang nach außen? | klein | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Parkieren | Parkiermoment | Kraftaufwand beim Parkieren | niedrig | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | Parkierumdrehungen | Anzahl der Lenkradumdrehung beim Parkieren | wenige | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | | hoch | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | | hoch | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | | rund | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | | hoch | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | | groß | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | | schnell | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | | hoch | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | | groß | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | | hoch | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| | | | viele | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Anh. 1: Der Fragebogen zur subjektiven Bewertung und Beurteilung der zehn Fahrzeuge im Stadtverkehrsprofil.

| | | Bewertung (nicht fahrzeugklassenspezifisch!) | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|----------|--|--|--|---------------|
| | | Niveau | | | | | Gefallen | | | | |
| Fahrzeug Fahrer | | | | | | | | | | | |
| Ovalrundkurs Geschwindigkeiten 100...150 km/h | | | | | | | | | | | |
| Kriterium | Beschreibung | | | | | | | | | | |
| Lenkmoment | Mittenzentrierung, 100 km/h | gering | | | | | | | | | sehr schlecht |
| | Mittenzentrierung, 150 km/h | gering | | | | | | | | | dürrtig |
| | Reibung, 150 km/h | gering | | | | | | | | | mittelmäßig |
| | Momenteverlauf, 150 km/h | eckig | | | | | | | | | gut |
| | Haltemoment, 150 km/h | niedrig | | | | | | | | | hervorragend |
| | Spiel | klein | | | | | | | | | |
| | Lenkwinkelbedarf / Lenkübersetzung, 150 km/h | klein | | | | | | | | | |
| | Lenkpräzision, 150 km/h | gering | | | | | | | | | |
| | Lenkungsansprechen 100 km/h, Geradeausfahrt | gering | | | | | | | | | |
| | Lenkungsansprechen 150 km/h, Geradeausfahrt | gering | | | | | | | | | |
| Wankreaktion, 150 km/h | klein | | | | | | | | | | |
| Geradeauslauf | wenig | | | | | | | | | | |

Anh. 2: Der Fragebogen zur subjektiven Bewertung und Beurteilung der zehn Fahrzeuge im Autobahnprofil.

ISO-Spurwechsel, Fahrdynamikfläche Fahrzeug Fahrer
 Richt-Geschwindigkeit "Normalfahrer" 80 km/h

| | | Bewertung (nicht fahrzeugklassenspezifisch!) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|--|---|--|--|--|--|----------|------|---------|--|--|--|------|------|------------|--|--|--|---------------|--|
| | | Niveau | | | | | Gefallen | | | | | | | | | | | | | |
| Kriterium | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Fahrzeugreaktion & Lenkwinkelengab | Lenkmoment | | | | | | niedrig | | | | | | hoch | | | | | | sehr schlecht | |
| | Anlenkmoment | Beschreibung | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Momentenverlauf | Kraft, die am Lenkrad im ersten Moment des Anlenkens der Spurwechsel spürbar ist | | | | | | | eckig | | | | | | rund | | | | | |
| | Verhärten | Wie steigt die Kraft am Lenkrad bei schnellem Lenken? | | | | | | | schwach | | | | | | stark | | | | | |
| | Lenkwinkelbedarf / Lenkübersetzung | für einen Spurwechsel | | | | | | | klein | | | | | | groß | | | | | |
| | Lenkpräzision | während des Manövers | | | | | | | gering | | | | | | hoch | | | | | |
| | Einlenkwilligkeit/Gierreaktion | Wie schnell folgt das Fahrzeug bei vers. Lenkgeschwindigkeiten Ihren Lenkmanövern? | | | | | | | klein | | | | | | groß | | | | | |
| | Stabilität/Sicherheitsgefühl | Abneigung/"Widerstand" des Fahrzeugs auszubrechen | | | | | | | gering | | | | | | groß | | | | | |
| | Diagonales Tauchen | Fahrzeug neigt sich diagonal; "knickt" nach vorne ein während des Einlenkens in die Spurwechsel | | | | | | | schwach | | | | | | ausgeprägt | | | | | |
| | Wankreaktion | Wie schnell und stark sind die Fahrzeugneigungen während des Manövers? | | | | | | | klein | | | | | | groß | | | | | |
| Wankreaktion, Zeitverzögerung | Wie früh oder spät neigt sich das Fahrzeug nach außen während des Lenkvorganges? | | | | | | | früh | | | | | | spät | | | | | | |

Anh. 3: Der Fragebogen zur subjektiven Bewertung und Beurteilung der zehn Fahrzeuge im ISO-Spurwechsel.

Lebenslauf

Persönliche Daten

| | |
|----------------------|------------------------------|
| Name: | Alexander Karl Zschocke |
| Geburtsdatum: | 14.II.1979 |
| Geburtsort: | Schopfheim/Baden-Württemberg |
| Staatsangehörigkeit: | deutsch |
| Familienstand: | ledig |

Studium

| | |
|---------------|--|
| 10/99 - 07/05 | Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH) Maschinenbau, Vertiefungsrichtung Fahrzeugtechnik im Zusatzfach Betriebspädagogik |
| 09/02 - 06/03 | Trinity College Dublin, Irland Mechanical and Manufacturing Engineering tribologische Studienarbeit: <i>Wear Mechanics</i> |

Berufstätigkeit

| | |
|---------------|--|
| 07/98 - 04/99 | Wehrdienst SysInst Z 870, Bad Bergzabern |
| 05/99 - 07/99 | Mannesmann Dematic AG, Bad Bergzabern Grundpraktikum (mech. Fertigung, Gießerei, Montage und QS) |
| 09/99 | DaimlerChrysler AG, Wörth/Rhein Grundpraktikum (thermisches Fügen, Trennen und Umformen) |
| 09/01 - 08/02 | Institut für Werkstoffkunde II, Universität Karlsruhe (TH) |
| 10/03 - 09/04 | Hiwi (tribologische Versuchsdurchführungen, Lehreunterstützung) |
| 07/03 - 09/03 | Mercedes-AMG GmbH, Affalterbach Fachpraktikum (Untersuchung elastokinematischer Bauteile/Stoßdämpfer) |
| 03/04 - 09/04 | JHM Metall & Werkzeugbau GdbR, Jockgrim |
| 08/05 - 09/05 | Werkstudent/Metallarbeiter (Konstruktion/Produktion Blechverarbeitung) |
| 10/04 - 07/05 | Mercedes-AMG GmbH, Affalterbach kfz-technische Diplomarbeit: <i>Experimentelle Untersuchung des „Anfahr- und Beschleunigungszitterns“ heckgetriebener Pkw</i> Werkstudent: Meßtechnik-Betreuung im Versuch Triebstrang |
| 10/05 - 09/08 | Daimler AG, MCG, Abt. Fahrdynamik - Versuch und Analyse, Sindelfingen Doktorand auf dem Gebiet der Objektivierung subjektiver Fahreindrücke |
| 10/08 - | Dr. h.c. F. Porsche AG, Entwicklung Fahrwerk Achssysteme, Weissach Versuchingenieur Hinterachse Sportwagen |
