

**Lehrstuhl für Ergonomie
Technische Universität München**

**Ergonomische Untersuchung des
Lenkgefühls an Personenkraftwagen**

Dipl.-Ing. (Univ.) Hagen J. Wolf

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Walter

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Heiner Bubb
2. Hon.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. E.h. Hans-Hermann Braess

Die Dissertation wurde am 04.11.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 03.03.2009 angenommen.

(Leerseite)

Danksagung

Zu insbesondere Dank bin ich meinen Doktorvater und Dienstvorgesetzten Herrn Prof. Heiner Bubb, der immer Zeit und ein offenes Ohr hatte und bei Problemen jedweder Art prompt Lösungen anbot.

Gleichermaßen und speziell möchte ich dem ehemaligen Forschungsleiter der BMW Group Herrn Prof. Hans-Hermann Braess danken, der das Projekt mitinitiiert und mit stetigen Diskussionsbeiträgen bereichert hat, sowie während der gesamten Laufzeit mir unermüdlich Hinweise auf wichtige Literaturstellen gab.

Einen weiteren großen Anteil am Gelingen der Arbeit haben die am Projekt beteiligten Mitarbeiter des Bereiches „Entwicklung Fahrwerk, Fahrdynamik (EF)“ der BMW Group in München. Ohne ihre tatkräftige Unterstützung, die sie trotz anderer einnehmender beruflicher Verpflichtungen aufbringen konnten, ihre positive Einstellung zu meiner Arbeit und der finanziellen Unterstützung des Projekts wäre diese Dissertation nicht möglich gewesen.

Namentlich möchte ich hier Herrn Dr. Manfred Harrer, Herrn Dr. Erich Sagan, Herrn Karl Rötsch, Herrn Thomas Schmitt, Herrn Dr. Peter Fritz erwähnen und ihnen meinen Dank aussprechen. Ebenso danke ich Herrn Hermann Rittinghaus und Herrn Bernd Jordan für ihr Interesse und ihre Unterstützung in der frühen Phase des Projekts. Herrn Medon Decker möchte ich ganz besonders bei der Unterstützung von realen Fahrversuchen danken.

Meinen Studenten Ralf Wegener, Sebastian Blumrich, Helmuth Mayr danke ich für die schnelle und gute Durchführung der Fahrversuche. Herrn Roth danke ich für die Unterstützung beim nicht immer einfachen Aufbau der Software zur Analyse des Bildverschiebungsvektorenfeldes. Herrn Dr. Rolf Zöllner danke ich für die Ratschläge bei der Auswertung einiger Daten aus den Fahrversuchen.

Für das stets entgegengebrachte Vertrauen und die Geduld, sowie zahlreicher Hinweise und Auskünfte möchte ich mich außerdem beim Extraordnarius am Lehrstuhl für Ergonomie für das Fachgebiet Arbeitswissenschaften Herrn Prof. Heinzpeter Rühmann bedanken.

Den Mitgliedern der Verwaltung des Lehrstuhls für Ergonomie und der Technischen Universität München danke ich für ihre Hilfe und Unterstützung während meiner gesamten Zeit. An dieser Stelle möchte ich insbesondere Herrn Werner Zopf für seine fachmännische Unterstützung beim Einscannen und Überarbeiten der zahlreichen Grafiken und Bilder, die in der Dissertation verwenden wurden, danken.

Allen an dieser Stelle nicht namentlich genannten Kollegen am Lehrstuhl für Ergonomie danke ich für die stets entgegengebrachte Kollegialität.

(Leerseite)

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | Einleitung..... | 4 |
| 1.1 | Motivation | 4 |
| 1.2 | Neuwert der Arbeit..... | 9 |
| 1.3 | Vorgehensweise | 9 |
| 2 | Sachstand | 11 |
| 2.1 | Begriffsdefinition „Lenkgefühl“ | 11 |
| 2.2 | Fahrwerkstechnische Parameter des Lenkgefühls..... | 12 |
| 2.2.1 | Lenkmoment | 14 |
| 2.2.1.1 | Verlauf des Lenkmoments über dem Lenkradwinkel..... | 14 |
| 2.2.1.2 | Verlauf des Lenkmoments über der Querbeschleunigung..... | 18 |
| 2.2.1.3 | Verlauf des Lenkmoments im Grenzbereich | 20 |
| 2.2.1.4 | Rücklaufverhalten der Lenkung | 21 |
| 2.2.2 | Lenkübersetzung | 21 |
| 2.2.2.1 | Verlauf der Lenkübersetzung über dem Lenkradwinkel | 21 |
| 2.2.2.2 | Verlauf der Lenkübersetzung über die Fahrgeschwindigkeit..... | 22 |
| 2.2.3 | Lenkungsreibung und Lenkungshysterese..... | 23 |
| 2.2.4 | Lenkungsdämpfung..... | 24 |
| 2.2.5 | Lenkungsspiel und Lenkungselastizität | 25 |
| 2.2.6 | Schwimmwinkel und Schwimmwinkeländerung | 26 |
| 2.2.7 | Allgemeine Fahrzeugreaktion auf die Lenkradeingabe | 29 |
| 2.2.8 | Wankreaktion..... | 29 |
| 2.2.9 | Gierreaktion | 30 |
| 2.2.9.1 | Gierwinkelgeschwindigkeit bzw. Gierrate | 30 |
| 2.2.9.2 | Gierverstärkung | 30 |
| 2.2.9.3 | Verhalten der Gierreaktion auf die Lenkradeingabe..... | 31 |
| 2.2.10 | Querbeschleunigung | 34 |
| 2.2.10.1 | Querbeschleunigungsverhalten..... | 34 |
| 2.2.10.2 | Verlauf der Querbeschleunigung auf die Lenkradeingabe | 34 |
| 2.2.11 | Verlauf Gierantwort zur Querbeschleunigung..... | 37 |
| 2.3 | Versuche zur Korrelationsermittlung von subjektiver Fahrzeugbeurteilung und objektiven Kenngrößen | 38 |
| 2.4 | Fahrermodelle für die Fahrzeugquerführung | 43 |
| 2.5 | Menschliche Parameter des Lenkgefühls | 50 |
| 2.5.1 | Der Begriff des Komforts | 51 |
| 2.5.2 | Informationsaufnahme (Wahrnehmung)..... | 53 |
| 2.5.2.1 | Kinästhetische Wahrnehmung | 57 |
| 2.5.2.2 | Optische Wahrnehmung | 69 |
| 2.5.2.3 | Akustische Wahrnehmung..... | 75 |
| 2.5.2.4 | Haptische Wahrnehmung..... | 77 |
| | Lenkgefühl – Lennkraftwahrnehmung..... | 82 |
| | Lenkgefühl – Wahrnehmung von Lenkwinkel und Lenkwinkelgeschwindigkeit..... | 89 |
| | Lenkgefühl – Center-Point-Feeling..... | 90 |
| | Lenkgefühl – Fahrbahnkontakt und Rückmeldung | 93 |
| | Lenkgefühl – Lenkungsstößigkeit, Lenkradschwingungen und Lenkradvibration | 97 |

| | | |
|---------------------|--|-----|
| 2.5.2.5 | Zeitliche Aspekte der Wahrnehmung und Zeiterleben in Bezug auf das Lenkgefühl | 100 |
| 2.5.3 | Informationsverarbeitung | 111 |
| 2.5.3.1 | Modelle der Informationsverarbeitung..... | 111 |
| 2.5.3.2 | Lenkgefühl auf Basis innerer Modelle | 113 |
| 2.5.3.3 | Der Mensch als Regler (Regelkreisparadigma) | 116 |
| 2.5.3.4 | Regelstrategien und Regelverhalten des Fahrers für die Fahrzeugquerführung | 119 |
| 2.5.3.5 | Informationsrückmeldung | 131 |
| 2.5.4 | Informationsumsetzung (Hand-Arm-System)..... | 135 |
| 2.5.4.1 | Längen- und Kraftservomechanismus der Muskulatur beim Lenken und die Bedeutung von Lenkmoment und Lenkwinkel ... | 136 |
| 2.5.4.2 | Vom Menschen aufbringbare Lenkwinkel und Lenkwinkelgeschwindigkeiten | 141 |
| 2.5.4.3 | Vergleich eines Stick-Bedienelements mit einem konventionellen Lenkrad..... | 148 |
| 2.5.4.4 | Auswirkung von Stellteileigenschaften bei der Informationsumsetzung durch das Hand-Arm-System | 148 |
| Dämpfung | 149 | |
| Tote Zone..... | 149 | |
| Spiel..... | 149 | |
| Reibung..... | 149 | |
| Massenträgheit..... | 150 | |
| 2.5.5 | Anthropometrische Aspekte | 151 |
| 2.5.5.1 | Position der Hände auf dem Lenkrad..... | 152 |
| 2.5.5.2 | Sitz- und Pedalerieposition relativ zum Lenkrad | 156 |
| 2.5.5.3 | Lenkraddurchmesser und Lenkübersetzung..... | 157 |
| 2.5.5.4 | Weitere Parameter der Lenkradgeometrie..... | 159 |
| 2.5.5.5 | Lenksäulenlage..... | 159 |
| 3 | Versuche..... | 161 |
| 3.1 | Versuchsdurchführung..... | 163 |
| 3.2 | Übersicht der durchgeführten Versuche | 163 |
| 3.3 | Detailbeschreibung der ausgewählten Versuche | 166 |
| 3.3.1 | Versuch 1 – Querbeschleunigungsmessung in Kopfnähe | 166 |
| 3.3.2 | Versuch 2 – Bildverschiebungsvektorenfeld bei Kurvenfahrt | 169 |
| 3.3.2.1 | Grundlagen | 169 |
| 3.3.2.2 | Einstellungsmöglichkeiten der Bildverschiebungssoftware..... | 174 |
| 3.3.2.3 | Draufsicht in der Bildverschiebungssoftware | 175 |
| 3.3.2.4 | Versuche mit der Software – Geradeausfahrt | 180 |
| 3.3.2.5 | Versuche mit der Software – Verstellauswirkung der Fahrgeschwindigkeit | 182 |
| 3.3.2.6 | Versuche mit der Software – Verstellauswirkung des Offsets..... | 183 |
| 3.3.2.7 | Versuche mit der Software – Verstellauswirkung der Höhe über Grund..... | 185 |
| 3.3.2.8 | Zusammenfassung der Ergebnisse und Rückschlüsse | 186 |
| 3.3.3 | Versuch 3 – Berührungsflächen Hand-Lenkrad bei verschiedenen Lenkradkranzdicken | 193 |
| 3.3.4 | Versuch 4 – Realfahrversuch mit vier unterschiedlichen Lenkungen und Fahrzeugen | 197 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 3.3.4.1 | Erwartungshaltung an vorgegebene Fahrzeuge | 204 |
| 3.3.4.2 | Subjektive Lenkungsbeurteilung und objektive Fahrzeugkenngrößen | 211 |
| 3.3.4.3 | Zusammenhang subjektiver Beurteilungen und objektiver Lenkungskriterien | 217 |
| 3.3.4.4 | Verbale Beurteilung von Fahrzeuglenkungen durch Kunden | 219 |
| 3.3.4.5 | Wichtung vorgegebener Kriterien in Bezug auf die Lenkung | 221 |
| 3.3.4.6 | Vergleich von Kunden- und Expertenurteilen | 225 |
| 3.3.5 | Versuch 5 – Kennzahlenidentifikation mit Hilfe von Daten aus der Fahrzeugpresse | 229 |
| 3.3.6 | Versuch 6 – Wahrnehmungsschwellen für die Lenkkraftwahrnehmung | 237 |
| 3.3.6.1 | Versuchsaufbau | 237 |
| 3.3.6.2 | Versuchsablauf | 241 |
| 3.3.6.3 | Probandenkollektiv | 242 |
| 3.3.6.4 | Versuchsergebnisse und Diskussion | 244 |
| 4 | Maßnahmen für die Lenkungsauslegung und Konsequenzen für Durchführung von Lenkgefühlsversuchen | 247 |
| 4.1 | Ergonomisches Auslegungskonzept einer Fahrzeuglenkung mit Lenkwinkel- und Lenkmomentenregelung | 247 |
| 4.1.1 | Kriterien und Daten für die Auslegung einer Fahrzeuglenkung unter ergonomischen Aspekten | 248 |
| 4.1.1.1 | Auslegung bezogen auf die geometrischen anthropometrischen Verhältnisse | 248 |
| 4.1.1.2 | Auslegung bezogen auf das Lenkgefühl im erweiterten Sinn in bestimmten Fahrsituationen und Fahrmanövern | 249 |
| 4.1.2 | Diskussion einzelner ausgewählter Maßnahmen zur möglichen Verbesserung des Lenkgefühls | 255 |
| 4.1.2.1 | Situationsabhängiges Center-Point-Feeling | 255 |
| 4.1.2.2 | Ausregeln der Abweichung bei Kurvenfahrt des vom Fahrer vorherbestimmten Kurs (Kurvenassistent) | 257 |
| 4.1.2.3 | Verbesserung des Gefühls für den Fahrbahnkontakt | 259 |
| 4.2 | Konsequenzen für die Durchführung von Lenkgefühlsversuchen | 260 |
| 5 | Zusammenfassung und Ausblick | 262 |
| 5.1 | Zusammenfassung | 262 |
| 5.2 | Ausblick | 279 |
| 6 | Verzeichnisse | 282 |
| 6.1 | Glossar | 282 |
| 6.2 | Abbildungsverzeichnis | 287 |
| 6.3 | Tabellenverzeichnis | 293 |
| 6.4 | Literaturverzeichnis | 295 |

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Kauf eines Automobils wird von einer Vielzahl von Motiven beeinflusst, zu denen bestimmte Kriterien gehören, die das gewählte Produkt aus Sicht des Käufers erfüllen soll. Die Straßenlage und das Fahrverhalten werden von 81% aller Käufer als wichtiges bzw. äußerst wichtiges Kaufkriterium betrachtet und sind somit neben der Sicherheit, der Qualität, der Wirtschaftlichkeit und dem niedrigen Treibstoffverbrauch das fünft wichtigste Kriterium (Braess und Seiffert 2003, S. 9). Die Straßenlage und vor allem das Fahrverhalten eines Kraftfahrzeugs werden zu einem nicht unerheblichen Teil durch die Lenkung mit beeinflusst. Die subjektive Beurteilung beider Kriterien ergibt sich aus dem persönlichen Lenkgefühl. Trotz großer Fortschritte und hohen Aufwandes in der Automobilforschung ist der Mechanismus für die Entstehung eines Lenkgefühls beim Führen von Kraftfahrzeugen - insbesondere von Personenkraftwagen (Pkw) – noch weitestgehend unbekannt. Zwar existieren im Bereich der Fahrwerksauslegung zahlreiche Empfehlungen und Kriterien, wie eine Lenkung für bestimmte Fahrsituationen ausgelegt werden sollte, nur sind diese nicht immer genau quantifiziert, d.h. konkret mathematisch beschrieben und in bestimmten Punkten auch widersprüchlich. Ferner beziehen diese Empfehlungen auch nicht immer den Regler Mensch und somit ergonomische Aspekte in die Überlegungen mit ein, sodass zukünftig „die Zusammenhänge der menschlichen Wahrnehmung, der menschlichen Urteilsfindung und der objektiven fahrdynamischen Größen [...] noch intensiver zu untersuchen“ (Sagan und Unterstraßer 2003) sind.

Dennoch sind Lenkungen von modernen Fahrzeugen der Mittel- und Oberklasse in dem Maße abgestimmt, dass sie von der Fachpresse meist lobend hervorgehoben werden und bei den Kunden sehr häufig ein gutes Lenkgefühl vermitteln. Auch befinden sich Lenkungen frontgetriebener Fahrzeuge, die in der Vergangenheit häufig das Problem hatten, störende Antriebseinflüsse auf die Lenkung zu übertragen, heute auf einem ähnlich hohen Niveau wie Lenkungen heckgetriebener Fahrzeuge, bei denen dieses Problem systembedingt nicht auftrat. Insofern existieren wirklich schlechte Lenkungen bei modernen Fahrzeugen nicht.

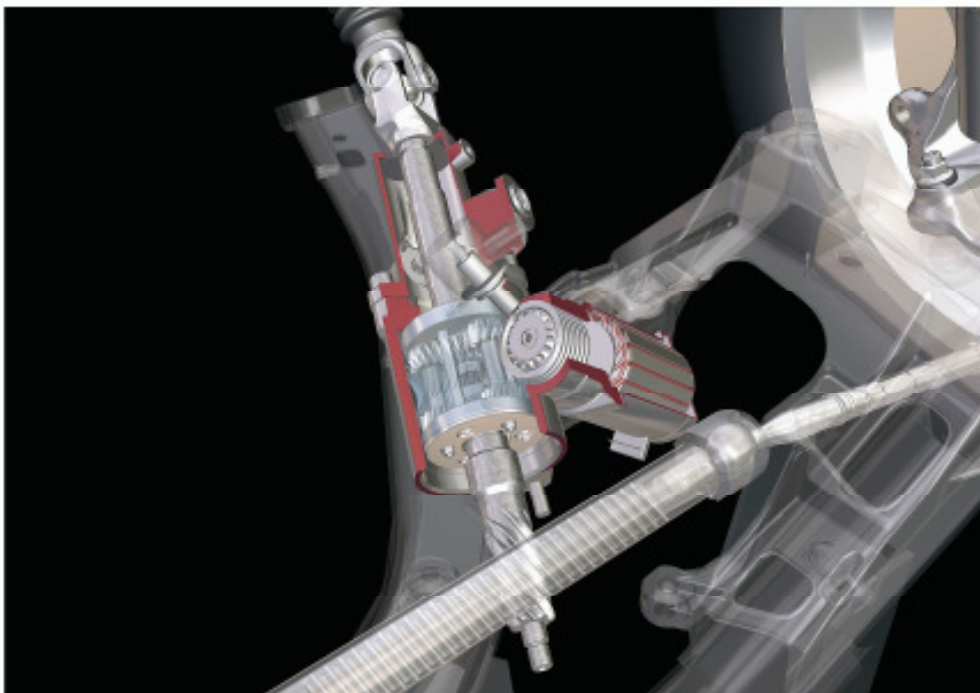


Abbildung 1: Überlagerungsgetriebe der Aktivlenkung von BMW (Bild: BMW)

Zum jetzigen Zeitpunkt ist der Großteil der Pkw, die auf dem Markt erhältlich sind, mit hydraulischen Zahnstangen-Servolenkungen ausgerüstet, wobei neuere Fahrzeuge zunehmend mit einer elektrischen Servolenkung (EPS = Electrical Power Steering) ausgerüstet sind (z.B. VW Golf, Audi A3, BMW Z4, BMW 1er). Ebenso gibt es seit Sommer 2003 die Möglichkeit, die Fahrzeuge der BMW 5er-Reihe optional mit einer aktiven Lenkung (auch Additionslenkungen oder Überlagerungslenkungen genannt) zu kaufen. Ende 2006 ist diese Überlagerungslenkung auch im Lexus LS erhältlich. Aktive Lenkungen (siehe Abbildung 1), die nicht mit einem aktiven Lenkrad zu verwechseln sind, ermöglichen durch eine Verstellung der Lenkübersetzung neue Funktionen, wie eine Unterstützung beim Einparken durch geringere Lenkwinkel, die ein Übergreifen an der Lenkung nicht mehr erforderlich macht oder der Ausgleich von Seitenwindstörungen bei Autobahnfahrt durch selbsttätiges Lenken. Die Lenkübersetzung lässt sich nahezu beliebig verändern.

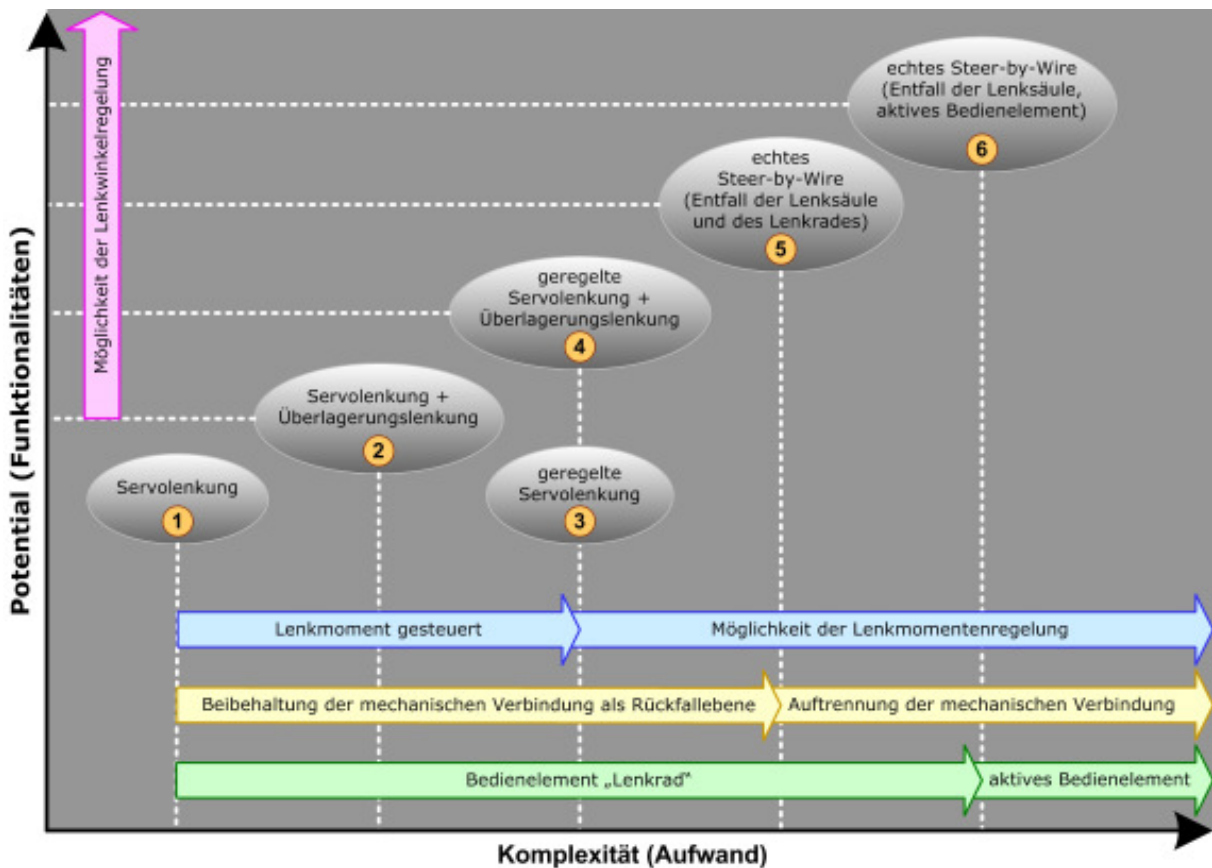


Abbildung 2: Evolutionäre Weiterentwicklung der Fahrzeuglenkung (in Anlehnung an Fleck 2003)

Die aktive Lenkung erlaubt die Regelung des Lenkwinkels (z.B. in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit), die elektrische Servolenkung die Regelung des Lenkmoments (z.B. in Abhängigkeit der Lenkgeschwindigkeit). Die Realisierung beider Regelsysteme in einem System ist die Voraussetzung für eine volle Steer-by-Wire-Funktionalität. In Abbildung 2 ist in Anlehnung an Fleck (2003) dargelegt, wie Steer-by-Wire-Systeme bzgl. Funktionalität und Aufwand einzuteilen sind und welche Fortschritte in der Entwicklung zukünftig erwartet werden können. Die meisten heute auf dem Markt verfügbaren Fahrzeuge besitzen eine Servolenkung mit einer drehzahl- oder geschwindigkeitsabhängigen Servounterstützung (Abbildung 2 Nr. 1). In beiden Fällen wird das Lenkmoment gesteuert, weil es abhängig von der Motordrehzahl bzw. der Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeugs verändert wird, ohne Zustandsgrößen am Lenkrad (Lenkwinkel, Lenkwinkelgeschwindigkeit) mit zu berücksichtigen. Der nächste Schritt wäre, das Lenkmoment in Abhängigkeit von den zuvor genannten Zustandsgrößen zu regeln (Abbildung 2 Nr. 3). Eine Regelung lässt sich zwar

grundsätzlich auch mit einer hydraulischen Servolenkung realisieren, ist aber durch den Übergang vom elektrischen (Sensorik) zum hydraulischen System mit größeren Schwierigkeiten und kostentreibenden technischen Aufwand verbunden. Eine Realisierung der Lenkmomentenregelung mit einer rein elektrischen Servolenkung ist an dieser Stelle leichter zu handhaben (*Stoll 1992, S. 221*).

Ein weiterer Entwicklungsschritt ist die Realisierung der Regelung des Lenkwinkels mit Hilfe einer Überlagerungslenkung, wobei das Lenkmoment noch konventionell (d.h. in Abhängigkeit von der Drehzahl oder Fahrgeschwindigkeit) gesteuert wird (Abbildung 2 Nr. 2). Um eine volle Steer-by-Wire-Funktionalität zu erhalten und die damit verbundenen Vorteile voll nutzen zu können, muss in einem übernächsten Schritt neben dem Lenkwinkel zusätzlich das Lenkmoment geregelt werden (Abbildung 2 Nr. 4). Dies wird aller Voraussicht nach durch eine Kombination von Überlagerungslenkungen und elektrischen Servolenkungen möglich sein (EPS).

Ist das verwirklicht, stellt sich die Frage, ob eine mechanische Verbindung zwischen dem Lenkrad und den Vorderrädern überhaupt noch erforderlich ist, denn eine Auftrennung der mechanischen Verbindung würde systembedingte Vorteile (besserer Einstiegscomfort, besser ablesbare Instrumente, Minderung des Verletzungsrisikos, etc.) mit sich bringen (Abbildung 2 Nr. 5). Eine Möglichkeit, die durch diese Auftrennung entsteht, wäre das Bedienelement „Lenkrad“ gegen ein Stick-Bedienelement (als aktives Bedienelement gestaltet) zu ersetzen (Abbildung 2 Nr. 6).

Ein Hauptproblem ist allerdings, dass damit die mechanische Rückfallebene im Falle eines Systemausfalls nicht mehr vorhanden ist. Da von der Gesetzgebung die Forderung eines redundanten Systems zu erwarten ist, bleibt es fraglich, ob die Auftrennung der mechanischen Verbindung sinnvoll wäre. *Isermann (2003)* betont, dass ein zweifach redundantes System (Duplex) für ein Brake-By-Wire-System ausreichend ist, für ein Steer-By-Wire-System aber wahrscheinlich eine dreifache Redundanz notwendig ist (Triplex).

Durch die größere notwendige Redundanz erhöhen sich der technische Aufwand, das Gewicht und die folglich die Kosten des gesamten Steer-By-Wire-Systems, was als Nachteil zu sehen ist. Ebenso hängt ein Serieneinsatz eines Stick-Bedienelementes von der Kundenakzeptanz ab, so dass nicht sicher vorhergesagt werden kann, ob und zu welchem Zeitpunkt das Bedienelement „Lenkrad“ abgelöst werden wird. Klar ist jedoch, dass die volle Steer-By-Wire-Technologie schon vor dieser Evolutionsstufe grundsätzlich technisch denkbar ist. Entscheidend ist aber auch die Freigabe des Gesetzgebers, der in Deutschland eine mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und den Vorderrädern noch immer vorschreibt.

Abbildung 3 zeigt auf Basis des Jahres 2001 und der Einschätzung der Fa. ZF Lenksysteme den Stückzahlanteil der verschiedenen Lenksysteme, wie elektromechanische Servolenkung (EPS), elektrohydraulische Servolenkung (EHPS), hydraulische bzw. konventionelle Servolenkung (HPS), manuelle Servolenkung und ein „echtes“ Steer-By-Wire. Zu erkennen ist, dass der Anteil der ohnehin nicht allzu verbreiteten elektrohydraulischen Servolenkung in etwa gleich bleibt, während der Anteil der elektromechanischen Servolenkung auf Kosten der Anteile von manuellen und hydraulischen Servosystemen stark zunimmt. Allerdings können elektromechanische Servolenkungen in größeren und schweren Fahrzeuge erst demnächst eingesetzt werden, da die Servomotore durch das höhere Fahrzeuggewicht auch größere Zahnstangenkräfte aufbringen müssen. Es ist nicht auszuschließen, dass bis in das Jahr 2010 der Anteil der hydraulischen Servolenkungen viel geringer sein kann, als in der Abbildung dargestellt.

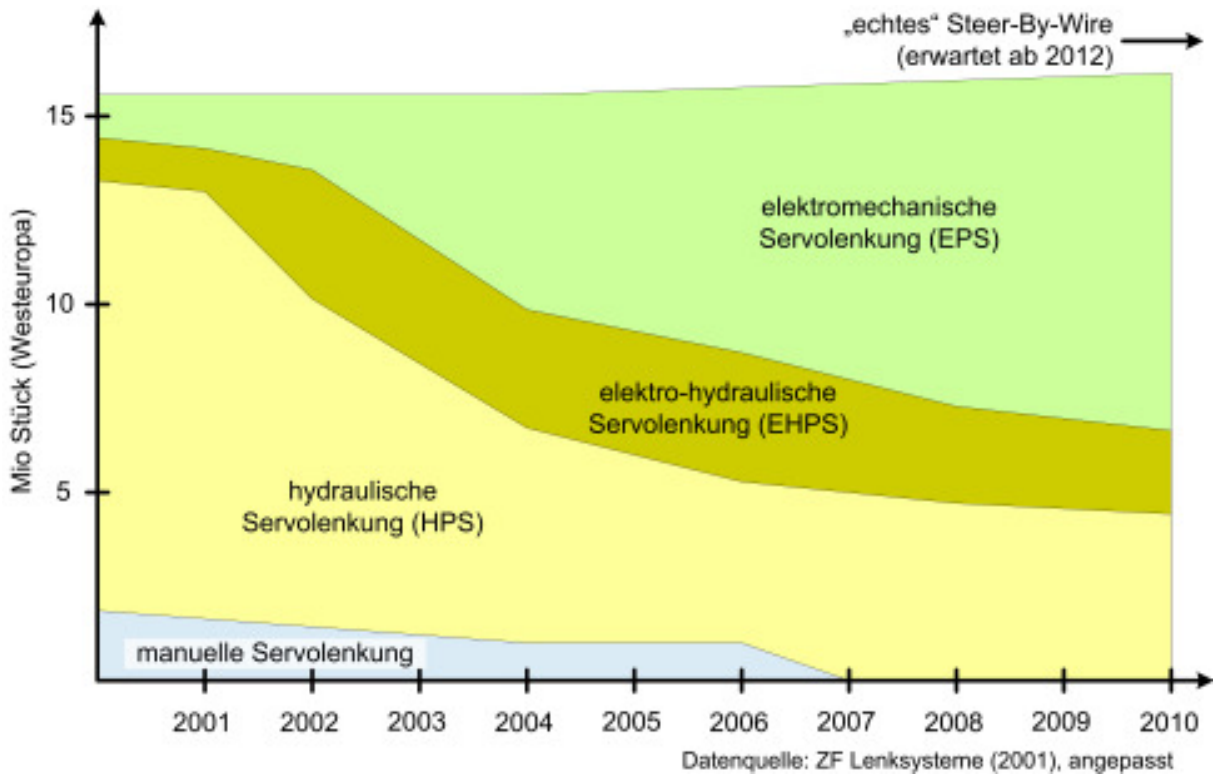


Abbildung 3: Prognose des Stückzahlenanteils von Lenksystemen in Westeuropa auf Basis von 2001 (in Anlehnung an Wallentowitz 2002 und Barthenheier 2004)

In der Abbildung war ursprünglich die Einführung eines „echten“ Steer-By-Wire-Systems für das Jahr 2003 angegeben. Da der Gesetzgeber dieses System bislang nicht zulässt und eine mechanische Verbindung zwischen Lenkrad und Rädern vorgeschrieben ist, wird die Abbildung dahingehend angepasst, dass aller Voraussicht nach ein echtes Steer-By-Wire frühestens ab dem Jahr 2012 zu erwarten ist.

Die neuen Möglichkeiten der Steer-By-Wire-Technologie bringen neben Vorteilen und Chancen das Risiko mit sich, die bisher erreichten hohen Anforderungen an ein gutes Lenkgefühl nicht mehr erfüllen zu können. Offensichtlich genügt es z.B. nicht, die Eigenschaften hydraulischer Servolenkungen auf elektrische Servosysteme zu übertragen, denn die ersten auf dem Markt befindlichen elektrischen Servolenkungen werden nicht selten von der Fachpresse im Vergleich zu konventionellen hydraulischen Servolenkung relativ häufig als negativ und rückmeldungsarm beurteilt.

Ganz allgemein ergibt sich ein höheres Risiko bei der Einführung von Steer-By-Wire-Systemen durch den vergrößerten Abstimmungsspielraum bei der Auslegung der Lenkung und durch die im Vergleich zu der konventionellen Lenkung geringere Erfahrung mit den neuen Systemen. Das liegt in der höheren Zahl der von Entwicklungsseite einstellbaren Parameter begründet (Möglichkeit der Regelung von Lenkmoment und Lenkwinkel ggü. der Steuerung). Zudem kommt hinzu, dass der vergrößerte Abstimmungsspielraum mehr Aufwand in der Versuchsphase während der Entwicklung eines Automobils bedeuten kann. Die Abstimmung eines Fahrwerks inklusive der Lenkung ist auch in Zeiten moderner Simulationstechniken mit einem erheblichen Aufwand an weltweiten Versuchsfahrten verbunden. Der organisatorische und zeitliche Aufwand dafür ist enorm und führt zu hohen Kosten. Bis heute werden Fahrzeuge zu einem sehr großen Teil subjektiv von firmeninternen Testfahrern beurteilt. Dabei muss jedoch gesichert sein, dass das Expertenurteil mit ausreichender Genauigkeit mit dem Urteil der Kunden übereinstimmt.

Ist dies gewährleistet, dann kann das Expertenurteil das Kundenurteil zumindest teilweise ersetzen und es kann zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung eine Aussage getroffen werden, ob das Fahrzeug bzgl. seiner fahrdynamischen Eigenschaften den Kundenvorstellungen entspricht. In diesem Bericht soll exemplarisch untersucht werden, ob es grundsätzlich möglich ist, dass ein Expertenurteil das Kundenurteil zum Großteil widerspiegelt oder ob die Abweichungen hier zu groß sind.

Ein zusätzlicher Weg zur Objektivierung der subjektiven Eindrücke war und ist es, Korrelationen zwischen den objektive Messgrößen und den subjektiven Empfindungen der fahrenden Personen zu finden. Würden solche Korrelationen gefunden, könnten Beurteilungen durch reale Fahrversuche erheblich reduziert werden, da bereits frühzeitig im Entwicklungsprozess die entsprechenden Variablen virtuell so eingestellt werden können, dass später weniger Abstimmungsarbeit notwendig ist und eine positive Beurteilung durch den Kunden wahrscheinlicher wäre.

Ein weiterer Vorteil subjektive Urteile an objektive Kennzahlen zu knüpfen ist, dass in einer frühen Entwicklungsphase konzeptionelle Auslegungen, die in einer späteren Phase nur noch schwer und mit hohem Kostenaufwand oder gar nicht mehr zu ändern sind, mit größerer Planungssicherheit festgelegt werden können. Der Radstand eines Fahrzeugs kann hier als Beispiel aufgeführt werden. Ist die Planungssicherheit bezüglich der konzeptionellen Auslegung zu Beginn größer, dann ist das Risiko negativer Auswirkungen auf das Produkt durch spätere Änderungen geringer.

Es muss folglich das Ziel sein, das Lenkgefühl bzgl. ergonomischer Aspekte genauer zu durchleuchten, um daraus neue Auslegungsmaßnahmen für die Lenkung und Assistenzsysteme formulieren zu können, die eine positive Auswirkung auf das Lenkgefühl und eine Steigerung der aktiven Fahrsicherheit (Verhinderung von Unfällen und gefährlichen Situationen) bedingen. Die Grundlage dafür ist ein tiefer gehendes Verständnis des Lenkgefühlsmechanismus. Die hier durchgeführte wissenschaftliche Untersuchung versucht demnach folgende Fragen klären:

- Wie ist der Sachstand in der einschlägigen Literatur zum Thema, welcher Wissenstand ist dort vorhanden und welche Sachverhalte sind noch ungeklärt?
- Inwieweit geben fahrwerkstechnische Betrachtungsweisen des Lenkgefühls Hinweise auf Sachverhalte und Zusammenhänge, die für eine weitere ergonomische Betrachtung von Bedeutung sein können?
- Welche Rolle spielen die ergonomischen Teilgebiete, wie die informationstechnischen, psychophysischen und anthropometrischen Aspekte (Parameter des Hand-Arm-Systems)?
- Welche Empfehlungen für eine Lenkungsauslegung können bereits im Vorfeld seitens der Ergonomie definiert werden?
- In welchen Bereichen lohnt es sich, weitere Untersuchung durchzuführen, um Wissenslücken bzgl. des Lenkgefühls zu schließen?
- Welche Erkenntnisse gibt es in anderen wissenschaftlichen Bereichen (z.B. Teleaktion) und wie sind Sie bei der Erforschung des Lenkgefühls hilfreich?
- Wie groß ist der Übereinstimmungsgrad von Experten- und Normalfahrern (Kunden)?
- Stehen bestimmte Subjektivurteile in Verbindung mit objektiv messbaren Fahrdynamik- bzw. Fahrwerksgrößen?
- Gibt es eine Abhängigkeit des Lenkgefühls vom Fahrertyp und gibt es unterschiedliche Erwartungen an die Lenkung in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps?

1.2 Neuwert der Arbeit

Der Neuwert dieser Arbeit spiegelt sich zum einem darin wider, dass bei der Führung des Kraftfahrzeugs durch den Fahrer der gesamten Regelkreis Mensch-Maschine (beim Pkw also Fahrer-Fahrzeug) in die Überlegungen zum Lenkgefühl einbezogen wird. Das hat zur Folge, dass der Schwerpunkt der Untersuchung die Fahrerwahrnehmung des Fahrzeugverhaltens und der Fahrzeugreaktion ist und nicht, wie beim überwiegenden Teil der dazu durchgeführten wissenschaftlichen Untersuchungen, die das Fahrzeugverhalten als solches ohne menschliche Wahrnehmung oder nur die Fahrerwahrnehmungen am Lenkrad betrachten. Zum anderen spiegelt sich der Neuwert der Arbeit darin, den Wissensstand über das Zusammenwirken neuerer Lenkungstechnologien (z.B. Lenkungen mit elektrischer Servounterstützung oder Überlagerungslenkungen) und den Fahrerwahrnehmungen und Fahrerreaktionen weiter zu erhöhen und zu präzisieren.

Darüber hinaus werden Vorschläge aus vorangegangenen wissenschaftlichen Arbeiten zum Lenkgefühl, in welchen Bereichen es sich lohnt weitere Untersuchungen durchzuführen, aufgegriffen. Dazu zählt unter anderem der Vorschlag nach einer fahr- und lenkgeschwindigkeitsabhängigen Lenkung.

Ein weiterer Neuwert ist darin zu sehen, dass bereits während der Versuchsfahrten der Fahrer seine Subjektiveindrücke wiedergibt und diese aufgezeichnet werden. Bisher ist es eher üblich, die Subjektiveindrücke nach einer gewissen Zeit im stehenden Fahrzeug mit Hilfe von Fragebögen zu erfassen.

1.3 Vorgehensweise

Entsprechend der oben genannten Fragestellung ist die Vorgehensweise in dieser Arbeit (Abbildung 4). Zunächst wird geklärt, was unter dem Begriff „Lenkgefühl“ zu verstehen ist (Abbildung 4 Nr. 1 und Kapitel 2.1). Danach folgt die Zusammenstellung einschlägiger wissenschaftlicher Berichte, die sich vorrangig mit der fahrwerkstechnischen (Abbildung 4 Nr. 2 und Kapitel 2.2) und somit weniger mit der ergonomischen Lenkungsauslegung beschäftigten, wenngleich diese beiden Aspekte nicht immer voneinander zu trennen sind.

Die darauf folgenden Kapitel (ab 2.5) erörtern die ergonomische Betrachtungsweise des Lenkgefühls, wobei vorwiegend ein systemergonomischer Ansatz verfolgt wird. Zu den zuvor betrachteten fahrwerkstechnischen Parametern werden die menschlichen Parameter (Abbildung 4 Nr. 3) in gleicher Weise erörtert. Hierunter fallen die anthropometrischen, psychophysischen und systemergonomischen Aspekte. Im Anschluss daran wird ein Vergleich zwischen einem Stick-Bedienelement und einem konventionellen Lenkrad vorgenommen. Damit soll erörtert werden, welche Ergebnisse vom Stick-Bedienelemente (Abbildung 4 Nr. 4) ein tieferes Verständnis des Lenkgefühls ermöglichen.

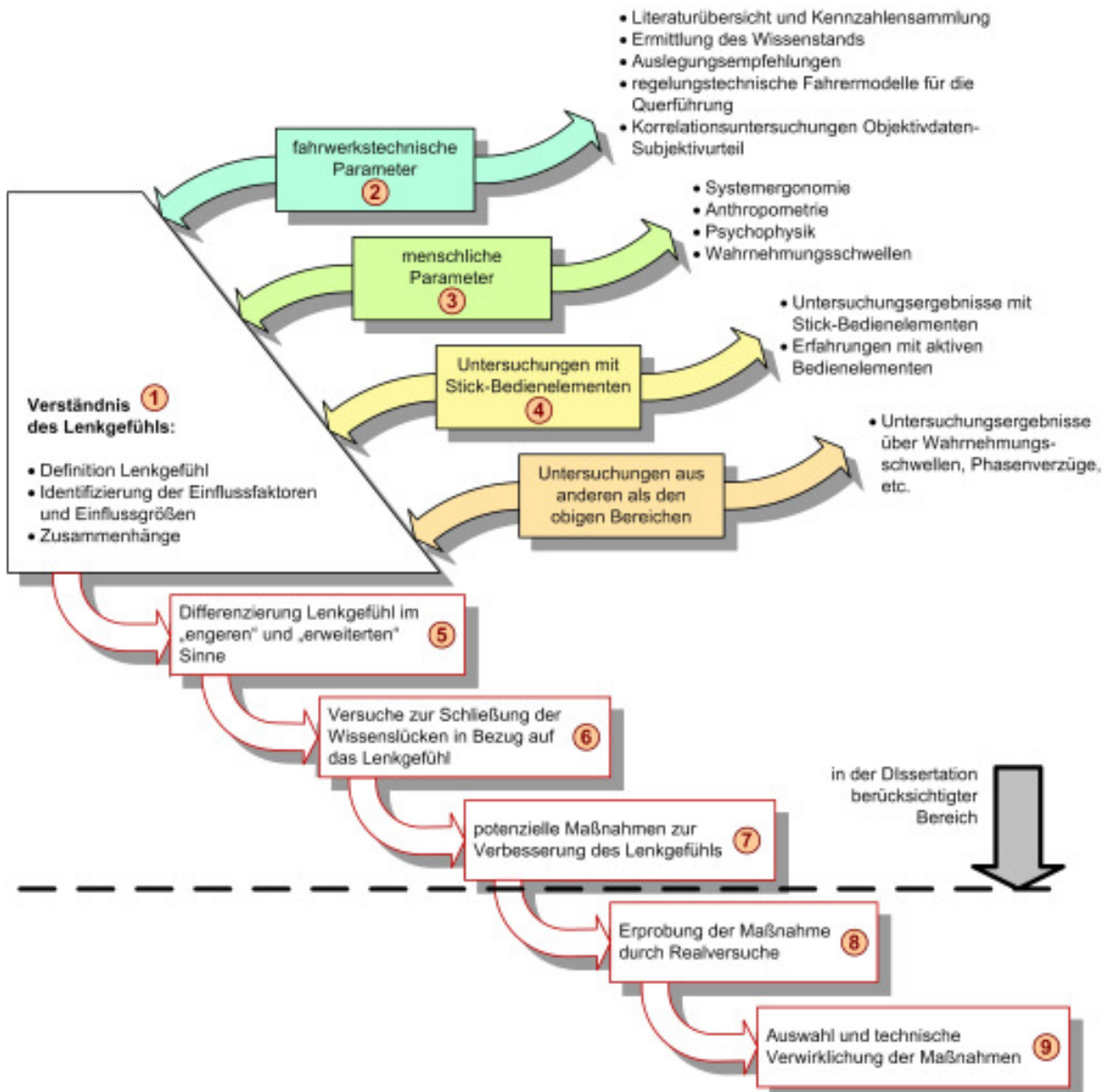


Abbildung 4: Vorgehensmethodik bei der Untersuchung des Lenkgefühls

Im Kapitel 3 werden alle zum Lenkgefühl durchgeführten Versuche besprochen. Dazu wird der Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung erläutert und die Versuchsergebnisse interpretiert. Die Versuche dienen zur Schließung von Lücken in Bezug auf das Lenkgefühl (Abbildung 4 Nr. 6) und die Erhöhung der Wissensstände in diesem Bereich.

In Kapitel 4 werden Vorschläge dargelegt, wie die Lenkung aus Sicht der Ergonomie noch weiter verbessert bzw. um neue Funktionen erweitert werden kann. Der Fokus liegt dabei weniger auf der technischen Realisierbarkeit der vorgeschlagenen Maßnahmen. Im Detail wird nur auf wenige Einzelmaßnahmen eingegangen.

Der nächste Schritt, der mit dieser Arbeit aus zeitlichen und organisatorischen Gründen nicht mehr durchgeführt werden kann, ist es die vorgeschlagenen Maßnahmen technisch in einem Experimentalfahrzeug zu realisieren und die Wirkung auf das Lenkgefühl mit Hilfe von Probanden zu erproben (Abbildung 4 Nr. 8). Daraufhin kann entschieden werden, welche Maßnahmen in einem Serienfahrzeug sinnvoll eingesetzt werden können (Abbildung 4 Nr. 9).

2 Sachstand

2.1 Begriffsdefinition „Lenkgefühl“

In der umfangreichen Literatur zum Thema Lenkgefühl fällt auf, dass der Begriff „Lenkgefühl“ an sich zumeist unterschiedlich interpretiert wird, was häufig zu Missverständnissen und unterschiedlichen Auffassungen führt. Die Trennung des Begriffs vom Handling erfolgt zumeist auch nicht scharf genug. In keinem Fall darf das Lenkgefühl im psychologischen Sinne als Emotion (Angst, Freude, etc.) verstanden werden. Beim Lenkgefühl handelt es sich um die Wahrnehmung des dynamischen Verhaltens des technischen Systems „Fahrzeug“ auf die durch den Menschen hervorgerufenen Eingaben am Bedienelement „Lenkrad“ und die dortigen Vorgänge bei der Erfüllung der Lenkaufgabe (siehe Abbildung 5), sowie Störungen der Lenkung „von unten nach oben“. Die Rückmeldungen können zeitlich verzögert oder unmittelbar mit der Aktion erfolgen.

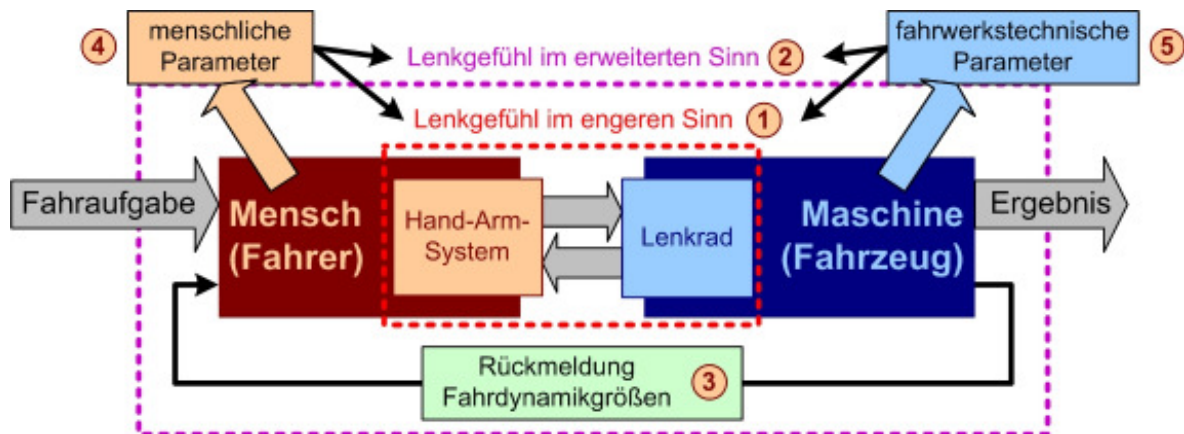


Abbildung 5: Definition des Lenkgefühls im engeren und erweiterten Sinn

Versuchsfahrer und Spezialisten der Fahrwerksentwicklungsabteilungen in den Automobilfirmen definieren das Lenkgefühl meist streng und im engeren Sinn (Abbildung 5 Nr. 1) als ein Gefühl, das durch das Bedienelement „Lenkrad“ vermittelt wird. Bestandteile sind vorwiegend der eingestellte Lenkradwinkel und die fühlbare Lenkkraft. Es handelt sich also um Informationen, die „von unten nach oben“ durch die Lenkung an den Fahrer übermittelt werden. Ein Hauptaugenmerk liegt demgemäß auf der haptischen Wahrnehmung von Lenkkraft- und Lenkwinkelverläufe. Anstelle der Lenkkraftwahrnehmung lässt sich häufig der Begriff der Lenkmomentenwahrnehmung finden, was aber gleichbedeutend ist. Es wird noch dargelegt werden, was zusätzlich beachtet werden sollte, wenn von der Lenkmomentenwahrnehmung gesprochen wird.

Um das Lenkgefühl im vollen Umfang erfassen und erklären zu können, ist es nicht ausreichend, sich auf das Bedienelement „Lenkrad“ alleine zu beschränken. Das im vorherigen Abschnitt erwähnte Verständnis des Lenkgefühls, das sich hauptsächlich auf die haptische Wahrnehmung stützt, muss um die Betrachtung des gesamten Systems Fahrer-Fahrzeug erweitert werden. Neben der Wahrnehmung am Bedienelement „Lenkrad“ kommt die Wahrnehmung über das gesamte dynamische Verhalten des Fahrzeugs auf eine Lenkeingabe (Abbildung 5 Nr. 3) hinzu (Fahrzeugreaktion). Vor allem die kinästhetische Wahrnehmung (siehe 2.5.2.1 „Kinästhetische Wahrnehmung“), aber auch die optische Wahrnehmung (2.5.2.2 „Optische Wahrnehmung“) gewinnen zusätzlich an Bedeutung.

Die nachfolgenden Kapitel orientieren sich am Mensch-Maschine-Paradigma. Auf der Seite der Maschine werden zunächst die sog. fahrwerkstechnischen Parameter (Abbildung 5 Nr. 5) in ihrer Auswirkung auf das Lenkgefühl näher erläutert. Dabei kommen zunächst

ergonomische Aspekte weniger bzw. überhaupt nicht in Betracht. Auf der Seite des Menschen werden dann die menschlichen Parameter (Abbildung 5 Nr. 5), die beim Lenkgefühl eine tragende Rolle spielen, unter ergonomischen Gesichtspunkten näher betrachtet.

2.2 Fahrwerkstechnische Parameter des Lenkgefühls

Unter die fahrwerkstechnischen Parameter fallen Größen und Faktoren, die die Lenkeigenschaften bzw. das fahrdynamische Verhalten eines Fahrzeugs bestimmen und somit einen Einfluss auf das Lenkgefühl des Fahrers haben können, wobei nicht alle eine Auswirkung besitzen. Bis heute ist teilweise ungeklärt, welche der Parameter einen Einfluss auf das Lenkgefühl besitzen und wie sie letztlich wirken.

Grundsätzlich sind an eine Fahrzeuglenkung nach *Hennecke et al.* (2003) folgende Anforderungen zu stellen, die sich durch ihr Vorhandensein positiv oder Fehlen negativ auf das Lenkgefühl auswirken können:

- Kleiner Wendekreis, niedrige Parkierkräfte, kleine Lenkwinkel am Lenkrad.
- Leichtgängigkeit, Feinfühligkeit, Zielgenauigkeit, guter Geradeauslauf, ausreichende Direktheit, spontanes Ansprechen.
- Ausgeprägter Straßenkontakt, Rückmeldung Kraftschluss Reifen/Fahrbahn.
- Selbstständiges Rückstellen in Mittellage, stabilisierendes Verhalten bei allen Fahrmanövern.

Harrer (2006) sieht folgende Anforderungen zum Erreichen eines optimalen Lenkverhaltens:

- Lenkpräzision (Präzision aus der Nulllage heraus und Linearität bis in den Bereich hoher Querschleunigung),
- Lenkcomfort (adäquate Lenkmomente und Lenkwinkel),
- dynamisches Verhalten (gutes dynamisches Ansprechen) und
- Feedback (von Nutzinformatoren).

In der wissenschaftlichen Literatur gibt es eine Vielzahl von Untersuchungen, die den Ansatz besitzen, Korrelationen zwischen den objektiven Messgrößen bzw. der Veränderung von Lenkungsparametern und der subjektiven Beurteilung einer Lenkung durch den Fahrer zu finden. Eine sehr gute Übersicht über derartige Versuche enthalten vor allem die Arbeiten von *Stamer* (1997) und *Buschardt* (2003). Dort bestätigt sich, dass das häufige Ergebnis solcher Versuche ist, dass meist nur schwache oder gar keine Korrelationen zu finden sind. Dennoch wurden in einzelnen Arbeiten stärkere Korrelationen gefunden. Ein Hauptproblem ist, aus der Vielzahl der relevanten Parameter diejenigen herauszufiltern, die das Lenkgefühl maßgeblich prägen und beeinflussen.



Abbildung 6: Einflüsse auf das Lenkverhalten vorderachsgelenkter Pkw (nach Braess 2001, S. 18)

Abbildung 6 enthält nach Braess (2001, S. 18) Einflussfaktoren, die sich auf das Lenkverhalten eines vorderachsgelenkten Personenkraftwagen auswirken. Durch den Einfluss auf das Lenkverhalten besitzen diese Faktoren ebenso einen Einfluss auf das Lenkgefühl. In Abbildung 7 ist eine Einteilung von Einflussgrößen vorgenommen, zu denen wissenschaftliche Untersuchungen vorgenommen wurden. Die Einteilung unterscheidet zwischen dem Lenkgefühl im engeren und erweiterten Sinn. Entsprechend der Einteilung beinhalten die nachfolgenden Kapitel eine Zusammenfassung der zugehörigen wissenschaftlichen Untersuchungen.

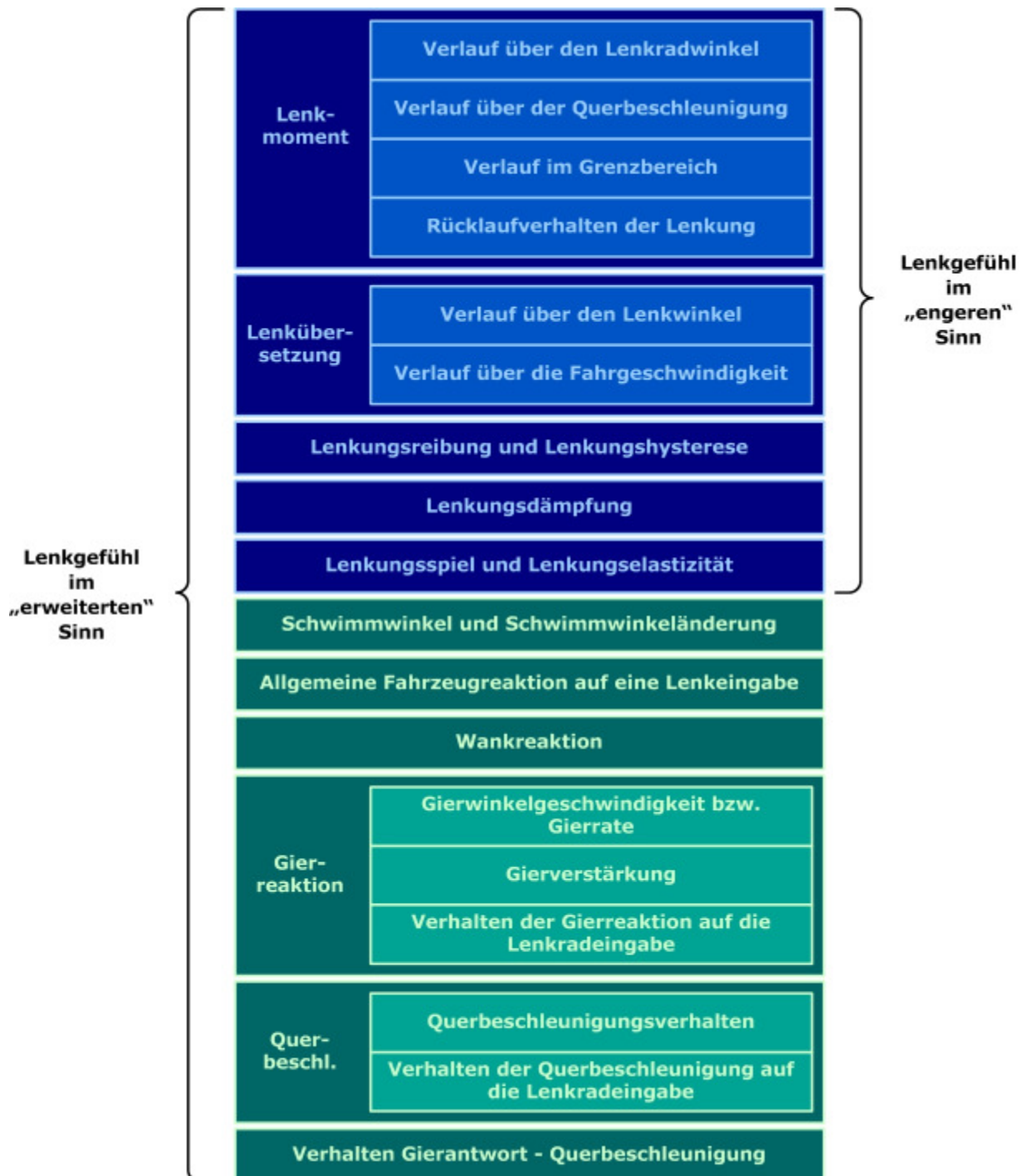





Abbildung 7: Fahrwerkstechnische Parameter und deren Verhaltensweisen mit Einfluss auf das Lenkgefühl

Am Ende jeden Kapitels sind nochmals die wichtigsten Ergebnisse zu den einzelnen Parametern in einem Kasten mit Symbolik kurz zusammengefasst. Die Symbole sind wie folgt zu deuten:

-  potenzielle Maßnahme für positive Fahrzeugbewertung, Entwicklungsziel bei der Fahrzeugentwicklung
-  widersprüchliche bzw. nicht eindeutige Aussagen, unklarer Sachverhalt
-  Eigenschaften, die zu einer negativen Fahrzeugbeurteilung führen können

2.2.1 Lenkmoment

2.2.1.1 Verlauf des Lenkmoments über dem Lenkradwinkel

Abbildung 8 zeigt einen typischen Hystereseverlauf des Lenkmoments über dem Lenkwinkel mit den wichtigsten Parametern, zu denen im nachfolgenden Text Empfehlungen für deren Auslegung aus der einschlägigen Literatur aufgeführt sind. Beim Anlenken (Lenkradwinkel = 0) muss vom Fahrer über den Hebel des Lenkrades das Anlenkmoment (Abbildung 8 Nr. 1) aufgebracht werden.



Abbildung 8: Typische Merkmale einer Lenkmoment-Lenkwinkel-Hysterese

Das größte Lenkradmoment (Abbildung 8 Nr. 2) ist das Moment, das sich zwischen einem Lenkradwinkel von null und dem größten Lenkradwinkel beim Fahren (Abbildung 8 Nr. 6) ergibt. Lenkt der Fahrer aus dem maximalen Lenkradwinkel zurück, muss er das maximale Haltemoment aufbringen (Abbildung 8 Nr. 3). Die Lenkung würde bei einem Loslassen (auch versehentlich) selbsttätig bis auf ein Lenkmoment von null (Abbildung 8 Nr. 4) zurücklaufen, jedoch nicht zwangsläufig bis auf einen Lenkwinkel (Ausnahme: aktive Lenkungsrückstellung) von null oder über die Mitte hinaus. Der Lenkwinkel, der bei einem Lenkmoment von null anliegt, ist der verbleibende Restwinkel am Lenkrad (Abbildung 8 Nr. 5), der wiederum zusammen mit dem Lenkwinkelbereich des selbsttätigen Rücklaufs (Abbildung 8 Nr. 4) den größten Lenkradwinkel beim Fahren ergibt (Abbildung 8 Nr. 6).

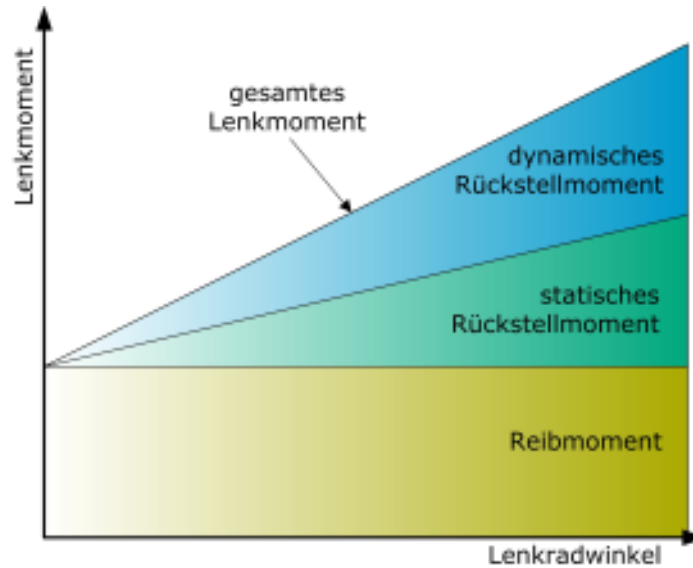


Abbildung 9: Qualitative Darstellung der Anteile am Lenkmoment über dem Lenkradwinkel (nach Deppermann 1989a)

In Abbildung 9 ist nach Deppermann (1989a) der qualitative Verlauf des Lenkmoments über dem Lenkwinkel dargestellt. Es setzt sich anteilig aus dem über dem Lenkwinkel konstanten Reibmoment und dem über dem Lenkwinkel zunehmenden statischen und dynamischen Rückstellmoment zusammen. Die Rückstellmomente ergeben sich aus den drei am Rad angreifenden Kräfte (Hoch-, Seiten- und Längskraft). Das statische Rückstellmoment bewirkt die so genannte Gewichtsrückstellung. Sie ergibt sich aus der Hochkraft an den gelenkten Vorderrädern, die durch die Vorderachslast bestimmt wird und der geometrischen Lage der Schwenkachse. Das dynamische Rückstellmoment ergibt sich aus den angreifenden Längs- und Seitenkräften und ist somit abhängig von der Fahrgeschwindigkeit und weiteren fahrdynamischen Größen.

Über den empfohlenen Verlauf des stationären Lenkmoments über den Lenkwinkel unterhalb des Grenzbereichs gibt es in der Literatur keine Widersprüchlichkeiten. Abbildung 10 visualisiert die nachfolgend erläuterten Empfehlungen in einem Lenkmoment-Lenkwinkel-Diagramm. Dettki (1997) empfiehlt einen zunehmend degressiven Verlauf über den Lenkradwinkel. Sato et al. (1991) und Sato et al. (1990) empfehlen ein aufzubringendes Lenkmoment beim Richtungswechsel von 0,98 bis 1,96 Nm. Fjurukawa (1990) und Waldmann (1974a) kommen zu dem Entschluss, dass eine leichtgängige Lenkung als angenehmer empfunden wird als eine schwergängige. Dabei bemerken Friedrich et al. (2001), dass sportliche Fahrer gegenüber komfortbetonten Fahrern eher etwas höhere Rückstellmomente bevorzugen.

Buschardt (2003) ermittelte für die Federkonstante des Rückstellmoments empirisch einen Wert von $0,033 \text{ Nm/}^\circ$, damit sich eine Steer-By-Wire-Lenkung wie eine konventionelle Lenkung anfühlt. Der von Good (1979) empfohlene Wertebereich von $0,087 \text{ Nm/}^\circ$ bis $0,175 \text{ Nm/}^\circ$ stellte sich dafür als zu hoch heraus.

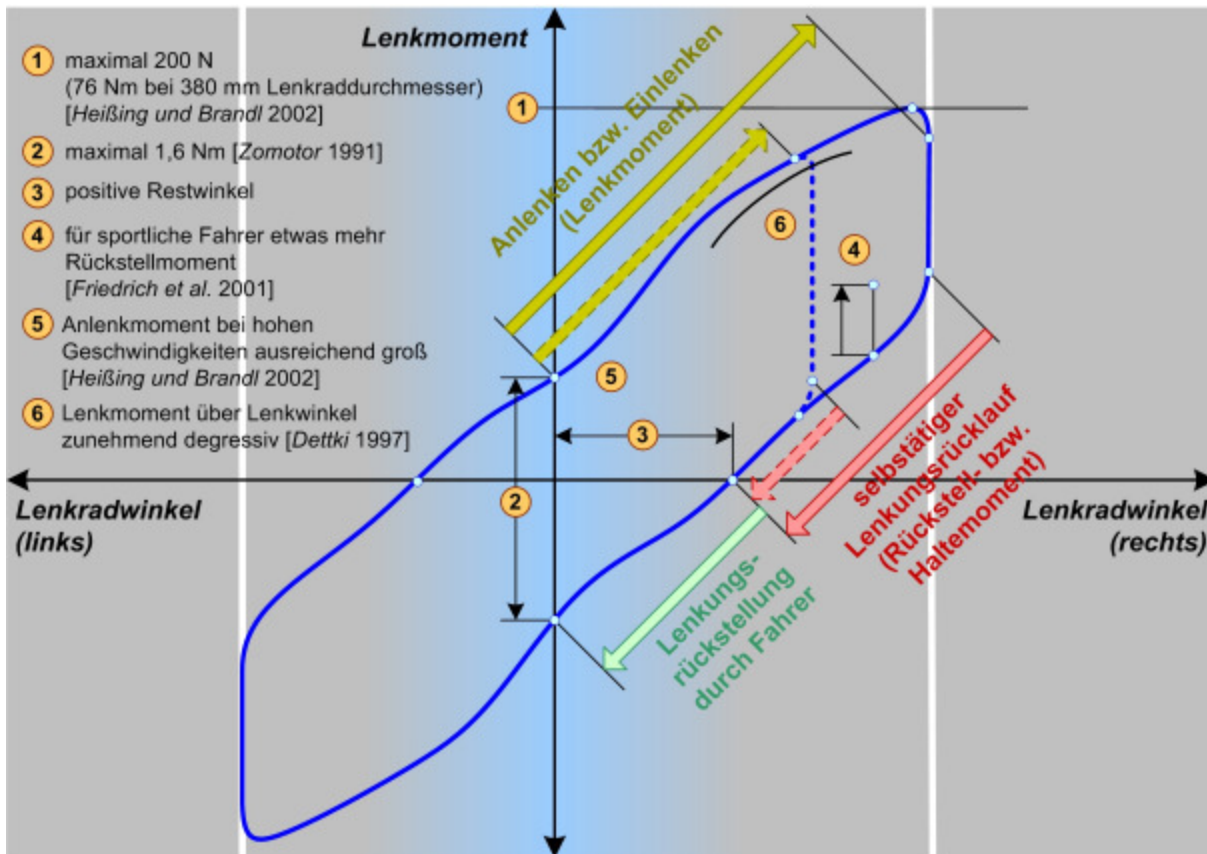


Abbildung 10: Empfohlene optimale Werte für den Verlauf des Lenkmoments über dem Lenkwinkel

Zahlreiche Empfehlungen für die Auslegung des Lenkmoments über dem Lenkradwinkel formulieren *Heißing und Brandl* (2002). Die Rückstellmomente müssen groß genug sein, um die Hysterese der Radaufhängung und des Lenkungsstrangs überwinden zu können und um eine exakte Mittenzentrierung zu ermöglichen. Ebenso muss das Anlenkmoment bei hohen Geschwindigkeiten ausreichend groß sein, damit das Fahrzeug gegen Störungen (z.B. Fahrbahnstörungen, Störung vom Fahrer selbst) unempfindlich bleibt. Lenk- und Haltemomente sollten sich nicht wesentlich voneinander unterscheiden. Die Lenkmomente für das Parkieren sollten möglichst klein sein. Die Handkraft sollte einen Wert von 200 N nicht überschreiten. Das Lenkmoment sollte sich beim Erreichen des Endanschlages nicht umkehren. Schwankungen und Störungen des Lenkmoments aufgrund des Nachlenkens bei Kurvenfahrt sollten für den Fahrer nicht spürbar sein.

Zomotor (1991) kommt zu dem Ergebnis, dass für eine feinfühligere Lenkung das Lenkmoment bei einem Lenkwinkel von null einen Wert von 1,6 Nm nicht überschreiten sollte. *Stoll* (1992) und *Reimpell und Sponagel* (1988) sehen in einer zeitverzögerten und zu geringen Reifenreaktion (Seitenkraftaufbau, Rückstellmoment) beim Anlenken aus der Mittellage mit kleinen Lenkwinkel heraus eine wesentliche Ursache für ein beanstandetes und unbefriedigendes Lenkgefühl, weil damit auch die mit der Seitenkraft (bzw. dem Rückstellmoment) verbundenen Lenkkräfte zu niedrig sind und der Fahrer sie zeitverzögert wahrnimmt.

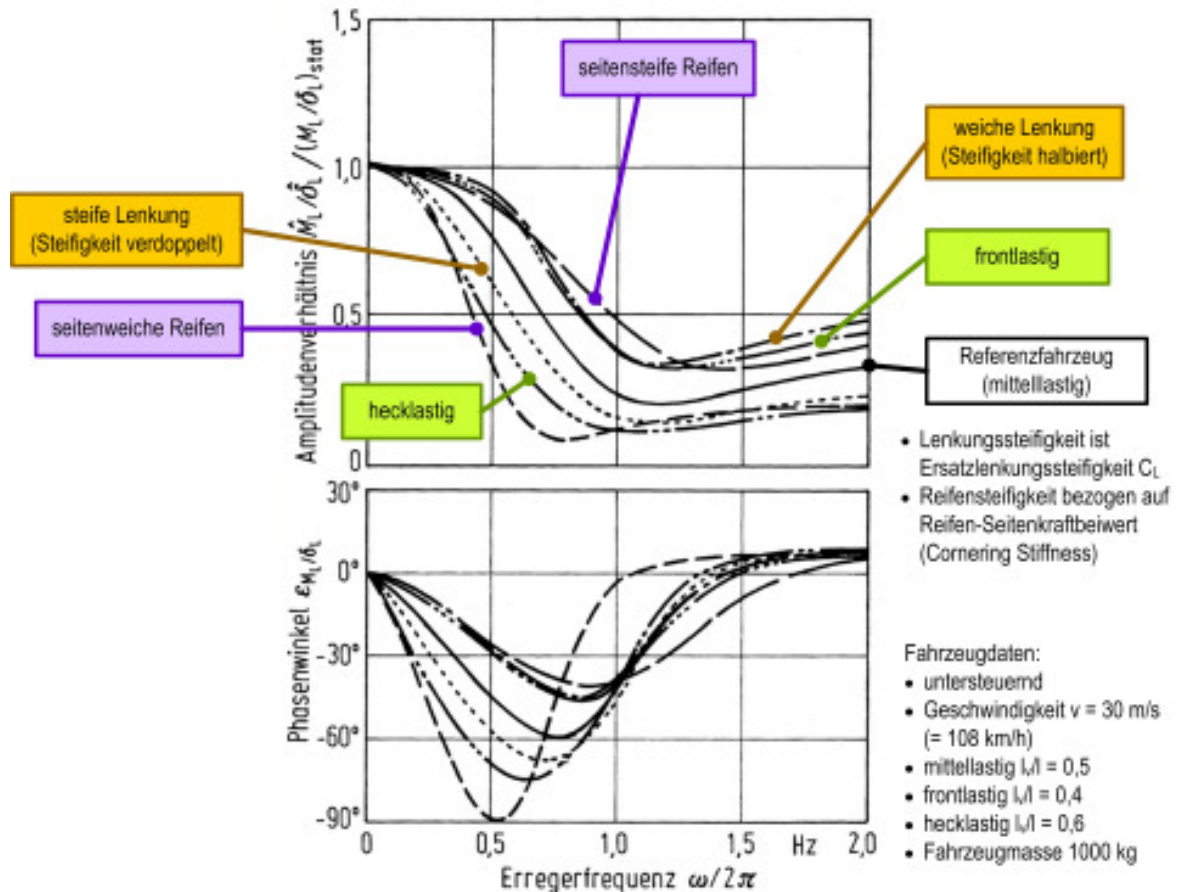






Abbildung 11: Frequenzgänge des Lenkmoments gegenüber dem Lenkwinkel bei verschiedenen Auslegungsvarianten (nach Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 611)

Abbildung 11 zeigt basierend auf der theoretischen Untersuchung von Wallentowitz und Mitschke (2004) die einzelnen Frequenzgänge (Bode-Diagramm) des Lenkmoments gegenüber dem Lenkwinkel mit verschiedenen Parametern. Werden seitenweiche und seitensteife Reifen miteinander verglichen so fällt auf, dass bei seitenweichen Reifen, das Amplitudenverhältnis des Lenkmoments gegenüber dem Lenkwinkel mit zunehmender Erregerfrequenz sehr stark abfällt. Der Phasenverzug nimmt zunächst ebenfalls ab, erreicht bei 0,5 Hz seinen größten Wert und verringert sich dann wieder auf nahezu null. Seitensteife Reifen schneiden bezüglich des Lenkgefühls also vergleichsweise besser ab. Das gilt gleichermaßen für frontlastige Fahrzeuge gegenüber hecklastigen Fahrzeugen. Zu den frontlastigen Fahrzeugen sind beispielsweise frontgetriebene Fahrzeuge mit quer eingebautem Dieselmotor zu zählen. Zu den hecklastigen Fahrzeugen zählen solche mit Mittel- oder Heckmotor mit acht, zehn oder zwölf Zylindern. Auffällig ist ebenso, dass die Verläufe der weicheren Lenkung besser abschneiden als die der steiferen Lenkung.

- Lenkmoment über Lenkwinkel zunehmend degressiv
- Lenkmoment beim Richtungswechsel zwischen 0,98 und 1,96 Nm
- leichtgängige Lenkung
- Federkonstante von 0,033 Nm/° für synthetische Lenkmomente, wenn SbW-Lenkung sich wie konventionelle Lenkung anfühlen soll
- Anlenkmomente bei hohen Geschwindigkeiten ausreichend groß
- sportliche Fahrer bevorzugen etwas höhere Rückstellmomente
- Lenkmomente für Parkieren möglichst klein (Handkräfte unterhalb 200 N)
- Lenk- und Haltemomente sollten in etwa gleich sein

-  Lenkmomentsumkehr bei Erreichen des Endanschlags
-  spürbare Schwankungen und Störungen des Lenkmoments bei Kurvendurchfahrt durch Nachlenken
-  zeitverzögerter und zu geringer Lenkkraftaufbau
-  Federkonstante über $0,087 \text{ Nm/}^\circ$ für synthetische Lenkmomente, wenn SbW-Lenkung sich wie konventionelle anfühlen soll

2.2.1.2 Verlauf des Lenkmoments über der Querbeschleunigung

Neben der Charakterisierung der Lenkung durch eine Darstellung von Lenkmoment und Lenkwinkel in einem Diagramm, ist ebenso die Darstellung der Querbeschleunigung über dem Lenkmoment häufig zu finden (Abbildung 13).

Eine konkrete Parameterempfehlung bezüglich des Lenkmoments in Abhängigkeit von der Querbeschleunigung liefert *Mitschke* (1990). Er empfiehlt für den Gradienten Lenkmoment-Querbeschleunigung einen Wert, der zwischen 15 Nm/g und 38 Nm/g liegen sollte. *Good* (1979) empfiehlt einen Lenkmomentgradienten zwischen 15 Nm/g und 28 Nm/g .

Aurell et al. (2000) sprechen generell von einer kleinen anzustrebenden Hysterese zwischen dem Lenkmoment und der Querbeschleunigung. Wie schon zuvor erwähnt, sollte die Annäherung der Haftgrenze durch ein Abnehmen des Gradienten Lenkmoment-Querbeschleunigung signalisiert werden (*Heißing und Brandl* 2002). *Uchida und Miyoshi* (1989), sowie *Yamaguchi et al.* (1985) halten einen linearen Zusammenhang zwischen Lenkmoment und Querbeschleunigung für eine optimale Informationsübertragung für ideal.

Ebenso plädieren *Hackenberg und Heißing* (1982) für ein proportionales Verhalten von Lenkmoment und Querbeschleunigung mit einem Wert von 20 Nm/g . Einen Vorschlag für einen Verlauf des Lenkmomentes über der Querbeschleunigung unterbreiten *Sato et al.* (1990). Sie schlagen bei einem Lenkmoment von null eine Restquerbeschleunigung im Bereich von $0,10$ bis $0,13 \text{ g}$ vor. Bei einer Querbeschleunigung von null sollte das Lenkmoment eine Zone in der Größe von 2 mal $0,98 \text{ Nm}$ umfassen. Ein zu kleiner Lenkmoment-Querbeschleunigungsgradient führt zu einer ungenaueren Spurfolge. Ist er zu hoch, führt er zu einer zu geringen Lenkungsaktivität des Fahrers beim Spurwechsel (*Segel* 1964 und *Huang* 2004).

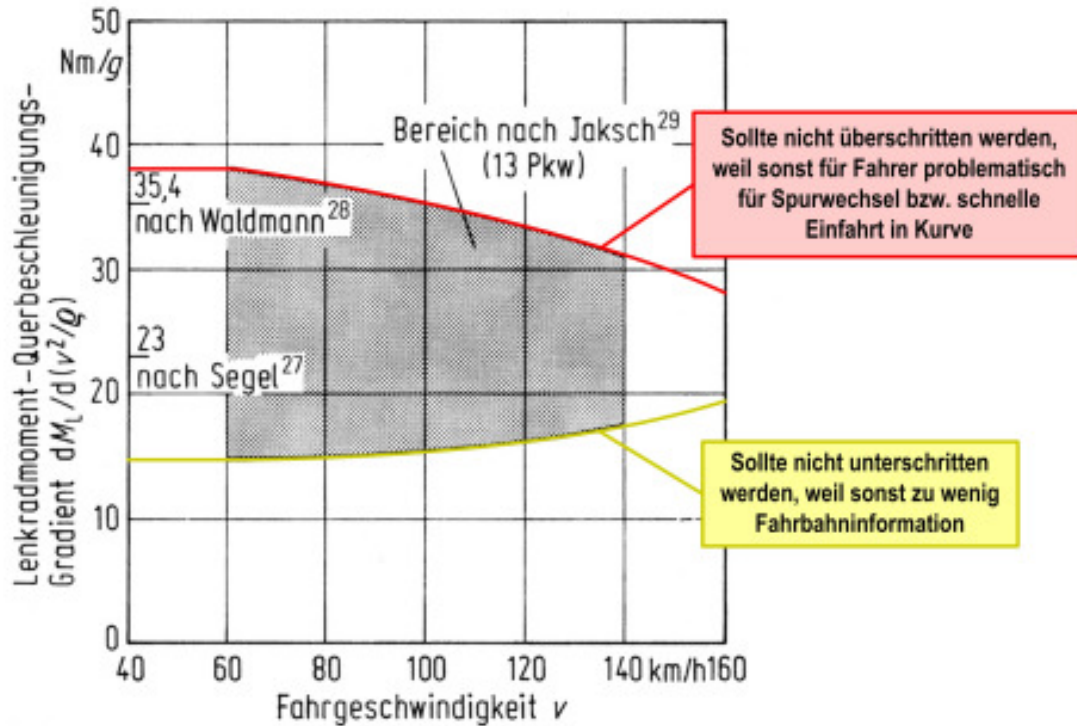


Abbildung 12: Empfohlene Gradienten Lenkradmoment-Querbeschleunigung nach Jaksch (1983), Segel (1965) und Waldmann (1971) (aus Mitschke und Wallentowitz 2004)

Die Empfindlichkeit des Lenkarbeits-Gradienten (Gradient aus dem Produkt von Lenkmoment und Lenkarbeit dividiert durch die Querbeschleunigung) beim ISO-Spurwechsel sollte nach Ansicht von Jaksch (1979) in einem Bereich zwischen $2,5$ bis $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ g}^2/(\text{°} \cdot \text{Nm})$ liegen. Weitere Empfehlungen für den maximalen Wert des Gradienten Lenkradmoment-Querbeschleunigung, z.T. in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit, enthält die Abbildung 12. Die dort angegebenen Werte sollten nicht überschritten werden, weil der Fahrer sonst Schwierigkeiten beim Fahrspurwechsel auf Autobahnen und bei der schnellen Einfahrt in Kurven bekommen könnte (Jaksch 1980, Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 576). Ebenso sollte ein Wert von 15 Nm/g nicht unterschritten werden, da sonst der Gradient so gering wird, dass der Fahrer keine ausreichende Fahrbahninformation erhält (Jaksch 1983, Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 576). Abbildung 13 visualisiert so weit wie möglich die zuvor erwähnten Empfehlungen für die Lenkungsauslegung in einem Lenkradmoment-Querbeschleunigungs-Diagramm.

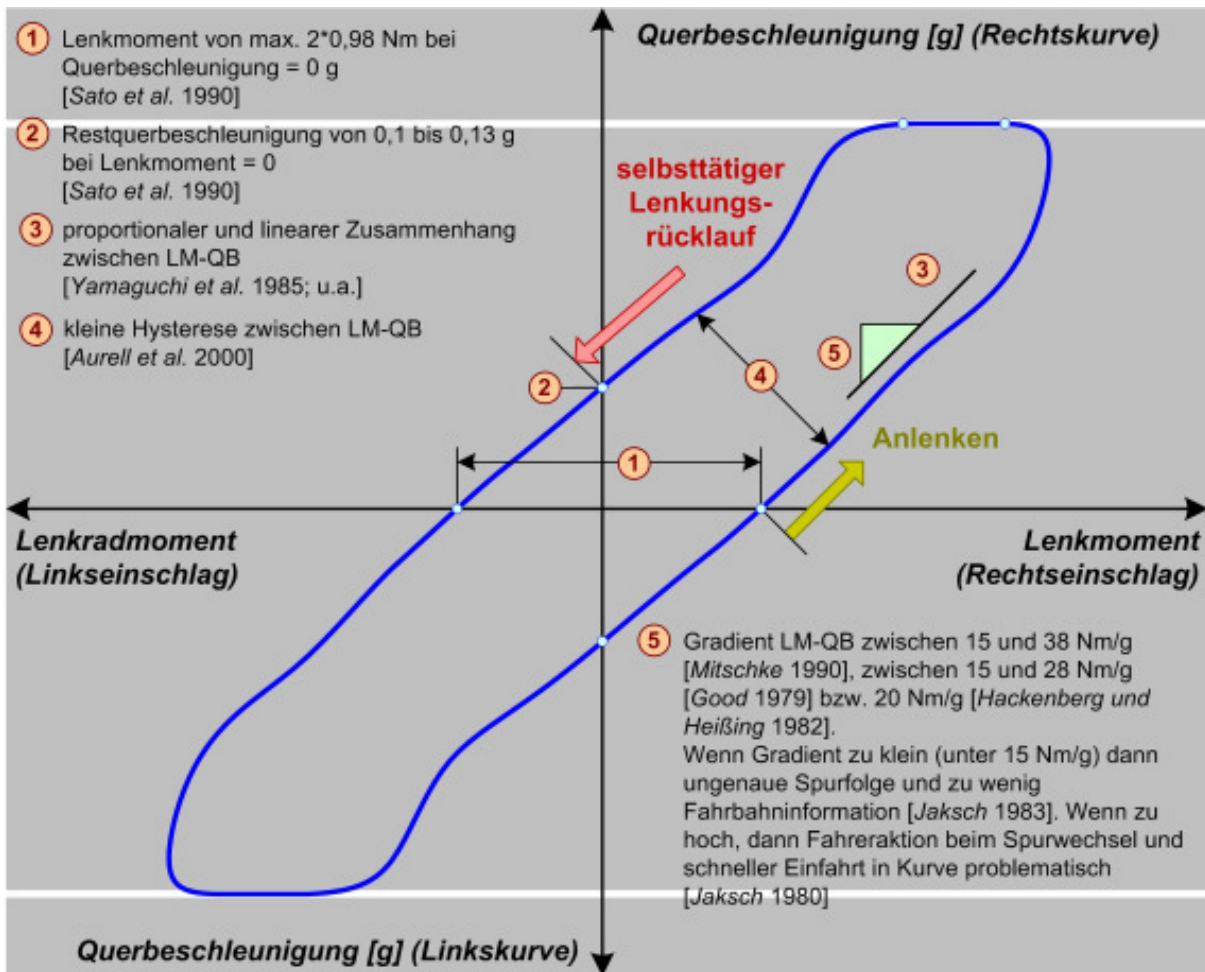










Abbildung 13: Empfohlene optimale Werte für den Verlauf der Querbeschleunigung über dem Lenkmoment (quasi-stationär)



-  Gradient Lenkmoment / Querbeschleunigung zwischen 15 Nm/g bis 38 Nm/g
-  Gradient Lenkmoment / Querbeschleunigung zwischen 15 Nm/g bis 28 Nm/g
-  proportionaler Gradient Lenkmoment / Querbeschleunigung bei 20 Nm/g
-  kleine Hysterese zwischen Lenkmoment und Querbeschleunigung
-  Querbeschleunigung 0,1 bis 0,13 g bei Lenkmoment von null
-  Lenkmoment 0 bis 1,96 Nm bei einer Querbeschleunigung von null
-  ungenaue Spurfolge und zu wenig Fahrbahinformation, wenn Gradient zu klein
-  zu geringe Lenkungsaktivität des Fahrers beim Spurwechsel und bei schneller Einfahrt in die Kurve, wenn Gradient zu hoch

2.2.1.3 Verlauf des Lenkmoments im Grenzbereich

Im Gegensatz zum vorherigen Punkt existieren unterschiedliche Auffassungen über den Verlauf des Lenkmoments im Grenzbereich. *Bielaczek* (1998) kommt zu der Erkenntnis, dass die Akzeptanz für eine früh weich werdende Lenkung hoch ist. Der gleichen Ansicht sind *Heißing und Brandl* (2002). Die Annäherung an die Haftgrenze sollte durch die Abnahmen des Gradienten Lenkmoment zur Querbeschleunigung verdeutlicht werden. Im Gegensatz dazu steht die Aussage von *Webhofer* (1991) und von *Bubb* (1985), dass aus den drei untersuchten Varianten steif werdendes Lenkmoment, gleich bleibendes und weich werdendes, das steif werdende Lenkmoment am besten beurteilt wurde. Die unterschiedlichen Ergebnisse ergeben

sich offensichtlich daraus, dass viele Fahrer die Nichtlinearität im Grenzbereich noch nicht erlebt haben (*Bubb und Bolte* 1987) und deswegen keine zuverlässige Aussage zum Verhalten des Lenkmoments im Grenzbereich treffen können.







Huang (2004) diskutiert drei Möglichkeiten der Lenkmomentenänderung im Grenzbereich (weich werdend, linear bzw. steifigkeitskonstant und steif werdend) wie folgt. Eine weich werdende Lenkung ist für die meisten geübten Fahrer am besten geeignet, weil dieser Lenkmomentverlauf dem heutiger Fahrzeuge entspricht. Eine steif werdende Lenkung beurteilt *Huang* (2004) als eine für den Fahrer zu deutenden Barriere, die er nicht überschreiten darf. Ein lineares und somit in seiner Steifigkeit unverändertes Lenkmoment hält er für unerfahrene Fahrer für sinnvoll, allerdings sollte nach seiner Auffassung der Fahrer kurz vor dem Erreichen des Grenzbereichs durch haptische und akustische Rückmeldung gewarnt werden, da sonst das Fahrzeug schnell außer Kontrolle geraten kann. Ein linearer Verlauf des Lenkmoments im Grenzbereich sollte daher vermieden werden.

-  widersprüchliche Erkenntnisse
-  linearer Lenkmomentenverlauf im Grenzbereich

2.2.1.4 Rücklaufverhalten der Lenkung

Unter dem Lenkungsrücklauf ist das Zurücklenken der Lenkung in Richtung der Nullstellung durch die sog. Rückstellmomente zu verstehen. Die Rückstellmomente setzen sich anteilig aus dem Produkt der am Reifenlatsch angreifenden Längs-, Seiten- und Hochkraft zusammen und den zu den einzelnen Kräften gehörenden Hebelarmen zusammen.

Über die Auslegung des Rücklaufverhaltens der Lenkung treffen *Heißing und Brandl* (2002) folgende Aussagen. Die Rückstellmomente sollten nur positiv sein. Negative, also eindrehende Rückstellmomente sind unerwünscht. Überschwingungsamplituden, die beim Rücklaufen der Lenkung zur Mittellage hin auftreten können, sollten sich schnell abbauen und möglichst gering sein. *Sato et al.* (1990) empfehlen bei einem Loslassen der Lenkung in der Kurvenfahrt eine Rest-Querbeschleunigung von 0,1 bis 0,13 g (Lenkmoment von null).

-  Rückstellmoment nur positiv
-  geringe Überschwingungsamplitude und schneller Abbau der Amplitude
-  Restquerbeschleunigung von 0,1 bis 0,13 g bei Loslassen der Lenkung in der Kurve
-  Rückstellmomente groß genug zur Überwindung der Hysterese von Radaufhängung und Lenkradstrang
-  Rückstellmomente groß genug für exakte Mittenzentrierung
-  negatives eindrehendes Rückstellmoment

2.2.2 Lenkübersetzung

2.2.2.1 Verlauf der Lenkübersetzung über dem Lenkradwinkel

Die Variation der statischen Lenkübersetzung über dem Lenkradwinkel ist gerade im Zusammenhang mit der aktiven Lenkung (auch Überlagerungslenkung oder Additionslenkung genannt) von Interesse. *Heathershaw* (2000) untersuchte im Wesentlichen drei Verläufe der Lenkübersetzung über den Lenkradwinkel, wie in Abbildung 14 qualitativ dargestellt. Einen Verlauf mit großer indirekter Lenkübersetzung (ca. 18:1 in Mittellage) der mit großen Lenkradwinkeln etwas abnimmt und einen Verlauf mit kleinerer direkter Lenkübersetzung (ca. 13:1 in Mittellage).

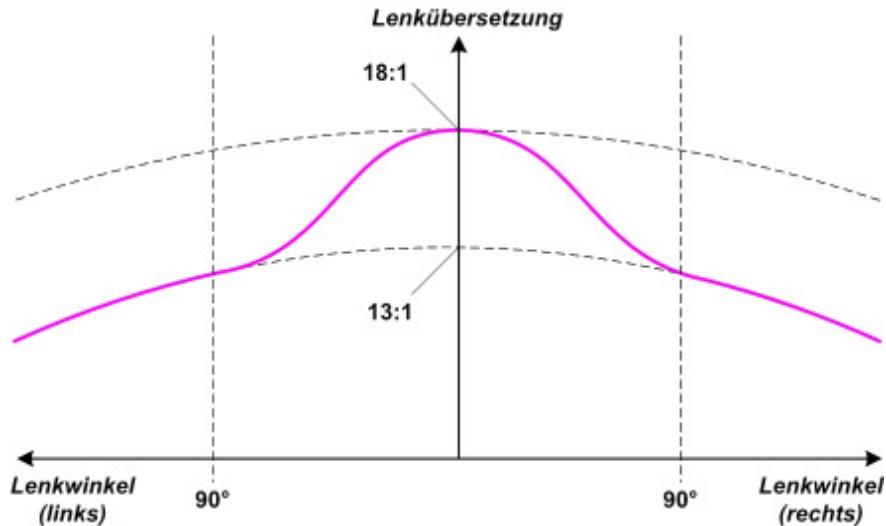









Abbildung 14: Qualitativer Verlauf einer günstigen variablen statischen Lenkübersetzung über dem Lenkradwinkel (nach Heathershaw 2000)

Quasi als Kombination aus beiden untersuchte er noch einen Verlauf einer Lenkübersetzung, die um die Mittellage eine größere indirektere (ca. 18:1) Lenkübersetzung besitzt und bis 90° Lenkradwinkel steil bis auf ca. 13:1, dann nur noch geringfügig zu den großen Lenkradwinkeln abfällt. Genau dieser Verlauf wurde subjektiv am besten beurteilt. Färber und Färber (1987) merken an, dass ein Lenkradwinkel über 120° möglichst zu vermeiden ist.

Waldmann (1974a) kommt bei seiner Untersuchung zum Geradeauslauf mit Versuchsfahrern zu der Erkenntnis, dass für das Geradeausfahren hohe, also indirekte Lenkübersetzungen besser geeignet sind, wohingegen für kurvenreiche Strecken direktere Lenkübersetzungen bevorzugt werden. Bei der spektralen Leistungsdichte des Lenkwinkels führen hohe Teilleistungen bei niedrigen Frequenzen zu besseren Subjektivurteilen (Waldmann 1974a, Mitschke 1984, Kreil und Schweizer 1968).

Bei allen Untersuchungen ist hinzuzufügen, dass es sich hier um die statische Lenkübersetzung handelt und nicht um die dynamische, welche vor allem um die Lenkungsnulllage einen völlig anderen Verlauf annimmt.




-  indirektere Lenkübersetzung für Geradeauslauf
-  direktere Lenkübersetzung für kurvenreiche Strecken
-  hohe Teilleistungen bei niedrigen Frequenzen der spektralen Leistungsdichte des Lenkwinkels
-  Lenkübersetzung in Mittellage bei ca. 18:1
-  schnelles Abfallen der Übersetzung bis 90° Lenkradwinkel auf 13:1
-  geringes Abfallen der Lenkübersetzung von 13:1 über 90° Lenkradwinkel
-  Lenkradwinkel über 120°

2.2.2.2 Verlauf der Lenkübersetzung über die Fahrgeschwindigkeit

Friedrich et al. (2001) untersuchten, inwieweit sich die Lenkübersetzung über die Fahrgeschwindigkeit ändern muss, um zu einer subjektiven guten Fahrzeugbeurteilung zu gelangen. Das Resultat ist, dass die Lenkung bei etwa 80 km/h konventionell ausgelegt werden sollte, unter dieser Geschwindigkeit direkter und darüber indirekter. Es muss hierbei erwähnt werden, dass Friedrich et al. (2001) Empfehlungen für ein „echtes“ Steer-By-Wire-System abgeben. Gemäß Schulze (1981) besteht durch eine geschwindigkeitsabhängige

Lenkungsübersetzung die Möglichkeit, die Querdynamik von der Längsdynamik des Fahrzeugs im stationären Bereich zu entkoppeln. Normalerweise enthalten die Formeln, die die Querdynamik beschreiben, die Fahrgeschwindigkeit. Somit ist die Querdynamik abhängig von der Längsdynamik. Durch eine $1/v$ -Beziehung der geschwindigkeitsabhängigen Lenkübersetzung (je höher die Fahrgeschwindigkeit, desto indirekter reagiert die Lenkung auf Lenkbewegungen) müsste die Abhängigkeit der Querdynamik von der Fahrgeschwindigkeit kompensierbar sein.

Ferner ist noch zu erwähnen, dass *Heißing und Brandl* (2002) empfehlen, dass zugunsten der Geradeausstabilität die erforderlichen Lenkwinkel mit zunehmender Geschwindigkeit progressiv ansteigen sollen.

-  Lenkung bis etwa 80 km/h konventionell übersetzt, über 80 km/h indirekter übersetzt und unter 80 km/h direkter übersetzt
-  erforderlicher Lenkwinkel progressiv mit Fahrgeschwindigkeit ansteigend
-  geschwindigkeitsabhängige Lenkungsübersetzung

2.2.3 Lenkungsreibung und Lenkungshysterese

Bezüglich der Zielvorgaben für die Auslegung der Lenkungsreibung bzw. der Lenkungshysterese existieren unterschiedliche Auffassungen. Während *Dettki* (1997) generell Nichtlinearitäten, wie die Lenkungsreibung als negativ beurteilt, sieht *Rühmann* (1993b) in einer gewissen Reibung eine Funktion gegen Störungen seitens der Straße, des Fahrzeugs und des Fahrers selbst. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch *Arkenbosch* (1992), *Braess* (1970), *Junker* (1990) und *Perret* (1964).

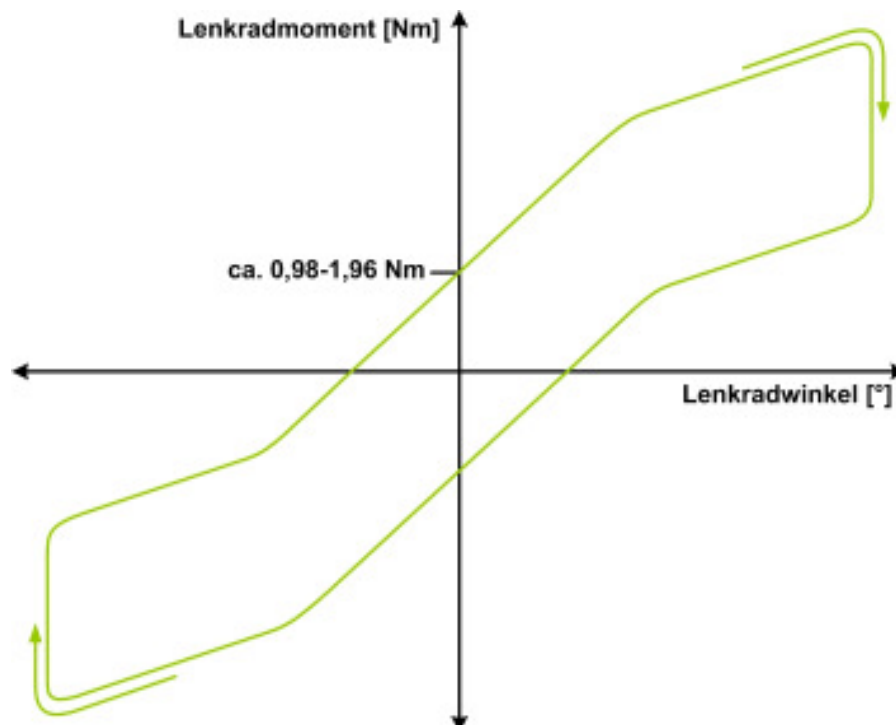














Abbildung 15: Lenkungshysterese (Lenkmoment – Lenkradwinkel) mit empfohlenen Werten nach *Sato et al.* (1990)

Lozia und Zardecki (2002) sehen in der Lenkungsreibung einen möglichen Grund für die Ermüdung nach langer Fahrzeit. *Aurell et al.* (2000) empfehlen eine kleine Hysterese zwischen Lenkmoment und Querbeschleunigung und die Versuche von *Fjurukawa et al.*

(1990) ergaben, dass eine leichtgängige Lenkung als angenehm empfunden wird. Eine konkretere Empfehlung als die vorherigen unterbreitet *Fuchs* (1993). Er schlägt vor, die Reibung in der Lenkung so auszulegen, dass beim Loslassen des Lenkrads durch den Fahrer in Kurvenfahrt immer kleine und positive Restwinkel zurückbleiben. Dadurch soll im Lenkungsrücklauf ein Überschwingen der Lenkung vermieden werden, wie es *Jaksch et al.* (1974), *Perret* (1964), *Segel* (1964) und *Stoll* (1992) durch entsprechende Auslegung der Lenkungsreibung vorschlagen. Jedoch darf dabei die Reibung nicht so groß werden, dass ein Rücklauf der Lenkung behindert wird (*Arkenbosch et al.* 1992, *Gies und Marusic* 1998). Ebenso kann eine zu große Reibung im Lenksystem zu Slip-Stick-Effekten führen (*Deppermann* 1989a) und einen negativen Einfluss auf das Center-Point-Feeling bewirken (*Buschardt* 2003).

Sato et al. (1990) ermittelten optimale Werte für die subjektive Beurteilung des Lenkverhaltens anhand von zwei Hysteresekurven (Abbildung 15 und Abbildung 13). Danach sollten die Momente bei einem Lenkwinkel von null Grad zwischen 0,98 und 1,96 Nm betragen. Bei einer Querbeschleunigung von 0 g sollte die Momente in einem Bereich von 0 bis 1,96 Nm liegen. Bei einem Lenkmoment von null sollte eine Querbeschleunigung von ca. 0,1 bis 0,13 g vorhanden sein.

Nach *Waldmann* (1974b) und *Waldmann* (1975) ist es wichtig, dass der Fahrer die Rückstellmomente von den Momenten der Reibung noch deutlich unterscheiden kann. Gemäß *Buschardt* (2003) ist der negative Effekt einer Lenkungsreibung umso größer, je geringer das Trägheitsmoment der Lenkung und je kleiner die effektive Lenkübersetzung (Lenkraddurchmesser mit berücksichtigt) ist. Darüber hinaus schlägt er vor, die Lenkungsreibung ebenso wie die Dämpfung, synthetisch über die Fahrgeschwindigkeit zu verändern.

-  Lenkmoment 0,98 und 1,96 Nm bei einem Lenkwinkel von null
-  leichtgängige Lenkung
-  beim Loslassen der Lenkung in der Kurve kleine positive Lenkungsrestwinkel
-  Eliminierung von Fahrbahnstörungen durch gewisse Reibung
-  Reibung in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit veränderlich
-  Unterscheidbarkeit der Rückstellmomente von den Reibmomenten
-  widersprüchliche Aussagen zur Lenkungsreibung (reibungsfrei vs. reibungsbehaftet)
-  negativer Effekt der Lenkungsreibung unterstützt durch geringes Trägheitsmoment der Lenkung und kleine effektive Lenkübersetzung
-  Behinderung des Lenkungsrücklaufs durch zu große Lenkungsreibung
-  Slip-Stick-Effekte durch zu große Lenkungsreibung
-  negativer Einfluss auf das Center-Point-Feeling durch zu große Lenkungsreibung
-  Ermüdung des Fahrers nach längerer Fahrzeit durch zu große Reibung






2.2.4 Lenkungsdämpfung

Im Vergleich zur Lenkungsreibung existieren für Auslegung der Lenkungsdämpfung weniger Empfehlungen. *Bubb* (1977a) sieht in einer gewissen Lenkungsdämpfung die Möglichkeit, zu heftige Lenkreaktion und Lenkbewegungen, die aus dem Handtremor resultieren abzumildern. Ebenso ist er der Ansicht, dass eine bestimmte Dämpfung günstig für niederfrequente Aufgaben ist.

Den Nachteil einer zu hohen Dämpfung sieht *Buschardt* (2003) im negativen Einfluss auf das Center-Point-Feeling. Zusätzlich schlägt er noch vor, die Lenkungsdämpfung in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit synthetische zu verändern. Um dem Fahrer bei einer Steer-By-Wire-Lenkung das Gefühl für eine konventionelle Lenkung zu ermöglichen, sollte das

Dämpfungsmaß im Geschwindigkeitsbereich zwischen 40 und 70 km/h einen Wert von $0,005 \text{ Nm}^* \text{ s} / ^\circ$ haben.

Für eine hinreichende Stabilität (Hurwitz-Determinanten) des Fahrzeugs bei losgelassenem Lenkrad sollte nach *Braess* (1970) die Lenkungsämpfung nicht zu hoch (mögliches aperiodisches Abschwingen) und nicht zu klein sein (mögliches periodisches Aufschwingen). Voraussetzung ist ein Mindestnachlauf von $2,5$ bis 3° und ein Lenkradträgheitsmoment unterhalb von etwa $0,1 \text{ Nm}^* \text{ s}^2$. Allerdings sollte beachtet werden, dass die Werte sich auf ein Fahrzeug der damaligen Zeit (um 1970) und eine Höchstgeschwindigkeit von ca. 160 km/h beziehen.





-  Abmilderung von heftigen Lenkreaktionen und Lenkbewegungen aufgrund des Handtremors durch Dämpfung
-  Dämpfungsmaß zwischen 40 und 70 km/h bei $0,005 \text{ Nm}^* \text{ s} / ^\circ$, wenn bei SbW-Lenkungen ein Gefühl einer konventionellen Lenkung erzeugt werden soll
-  bei losgelassenem Lenkrad Lenkungsämpfung etwa $0,17 \text{ Nm}^* \text{ s} / ^\circ$ (Lenkradträgheitsmoment unterhalb $0,1 \text{ Nm}^* \text{ s}^2$ und Mindestnachlauf von $2,5$ bis 3°)
-  synthetische Veränderung der Lenkungsämpfung mit der Fahrgeschwindigkeit
-  zu hohe Dämpfung mit negativem Einfluss auf das Center-Point-Feeling

2.2.5 Lenkungsspiel und Lenkungselastizität

Unter Lenkungsspiel ist ein mechanisches Spiel zu verstehen, dass bei Lenkungen modernen Fahrzeugen nicht mehr auftritt. Die Empfehlungen bezüglich des Lenkungsspiels lassen ein klares Bild erkennen. Ein zu großes mechanisches Spiel wird generell als schlecht empfunden (*Reynolds* 1998). *Lozia und Zardecki* (2002) sehen neben einer großen Lenkungsreibung auch in einem großen Lenkungsspiel einen Grund für die Ermüdung nach langer Fahrtzeit. Lenkungsspiel stellt eine Nichtlinearität dar. Deswegen empfehlen *Dettki* (1997), *Buschardt* (2003) und ebenso *Heißing und Brandl* (2002) das Lenkungsspiel völlig zu vermeiden.

Die Lenkungselastizität ergibt sich im wesentlichen aus den Verbindungsteilen und der Lenkungslagerung. Es werden zwei Lenkungssteifigkeiten und damit zwei Lenkelastizitäten unterschieden. Zum einen die Lenkungssteifigkeit von oben nach unten, die mit Hilfe blockierter Räder bestimmt wird und zum anderen die Lenkungssteifigkeit von „unten nach oben“, die mit blockiertem Lenkrad ermittelt wird. Beide Lenkungssteifigkeiten sind nicht gleich groß. Der Unterschied ergibt sich aus dem Getriebewirkungsgrad, der je nach Krafteinleitung von unten nach oben bzw. von oben nach unten unterschiedlich ausfällt (*Döhring* 1961).

Eine Zusammenfassung von wissenschaftlichen Untersuchungen im Bereich der Lenkungselastizität liefert *Buschardt* (2003). Eine Erkenntnis seiner Arbeit ist, dass bei zu großer Elastizität der Informationsfluss zum Fahrer zu stark gedämpft ist. Außerdem verschlechtern sich die Zielgenauigkeit und die Kurshaltung bei Seitenwind. Allerdings liegt der Vorteil in einer gewissen Dämpfung darin, dass Lenkungsstöße zum Fahrer abgemildert übertragen werden können. *Buschardt* (2003) nennt vor allen die Arbeiten von *Wohnhaas* (1994), *Bergmann* (1971) und *Neureder* (2001), die sich intensiv mit dem Thema Lenkungselastizität beschäftigt haben.

-  gewisses Maß an Elastizität mildert Lenkradstöße ab
-  Lenkungsspiel
-  schlechte Zielgenauigkeit und Kurshaltung bei Seitenwind bei zu großer Elastizität
-  Informationsfluss von „unten nach oben“ gestört

2.2.6 Schwimmwinkel und Schwimmwinkeländerung

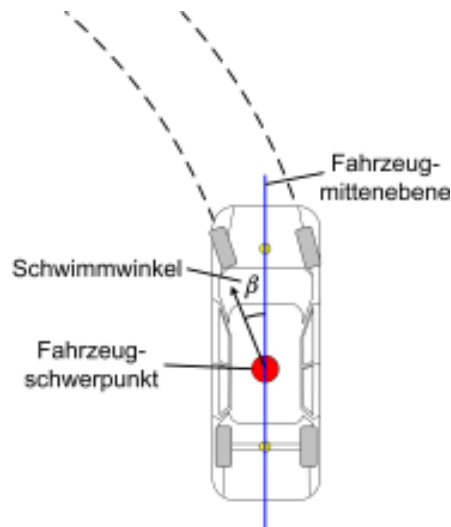


Abbildung 16: Definition des Schwimmwinkels

Der Schwimmwinkel ist der Winkel zwischen der Fahrzeugmittenebene und dem Geschwindigkeitsvektor im Fahrzeugschwerpunkt (siehe Abbildung 16). Im zweiten Diagramm der Abbildung 17 ist nach *Nordeen* (1965) der in einem linearen Modell berechnete Verlauf des Schwimmwinkels auf die Erhöhung des Lenkradwinkels in $0,5^\circ$ -Schritten bei 60 mph zur erkennen. Auffällig ist, dass der Schwimmwinkel zunächst positiv ist, sich dann aber erwartungsgemäß ein konstant negativer Wert einstellt. Ursache hierfür ist, dass sich die Querbefleunigung – wie im vierten und untersten Diagramm der Abbildung 17 zu erkennen – erst allmählich aufbaut.

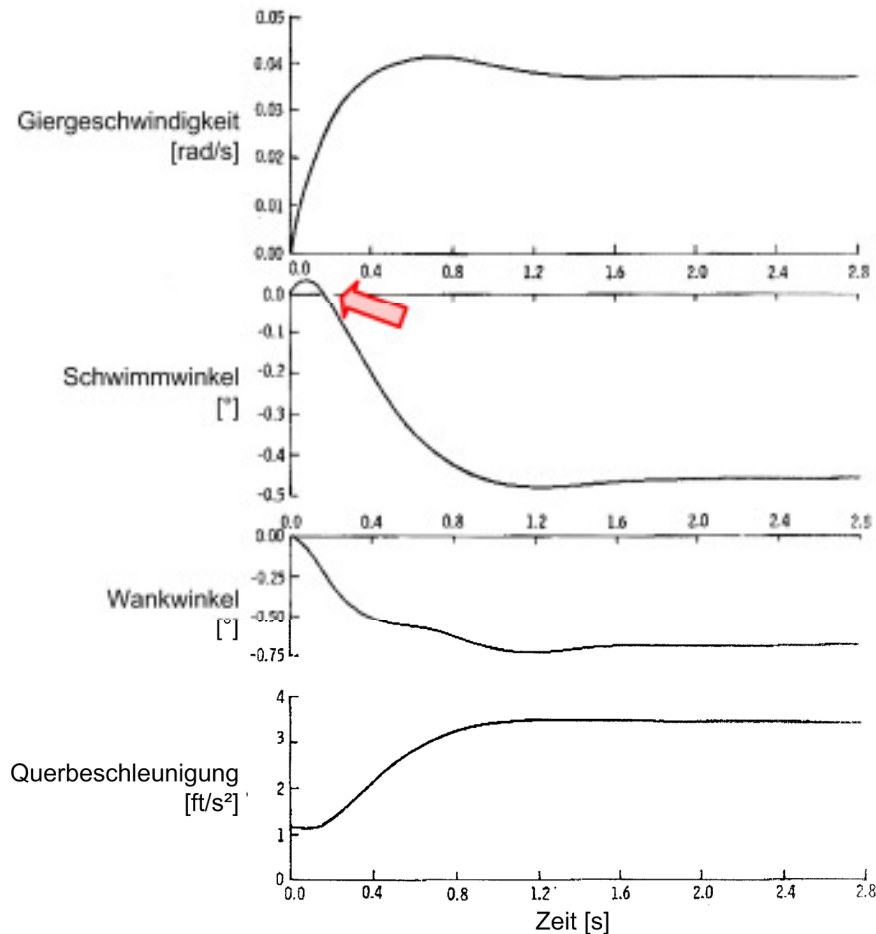


Abbildung 17: Theoretischer Verlauf des Roll- und Schwimmwinkels, sowie der Querbeschleunigung und der Gierwinkelgeschwindigkeit bei Kurvenfahrt (Nordeen 1965)

Bezüglich der Auslegung des Schwimmwinkels existieren verschiedene Aussagen. Das liegt wahrscheinlich daran, dass der Schwimmwinkel selbst von zahlreichen Parametern, wie Radstand, Fahrgeschwindigkeit, Schräglaufwinkel der Räder, usw. abhängt. Während *Lincke et al.* (1973) feststellen, dass das Fahrverhalten umso besser beurteilt wird, je geringer der stationäre Schwimmwinkel ist und *Riedel und Gnadler* (1996) im Schwimmwinkel einen großen Einfluss auf die subjektive Beurteilung sehen, kommt *Bergman* (1969) zu der Erkenntnis, dass es nur eine schwache Korrelation zwischen kleinem Schwimmwinkel und einer subjektiv besseren Bewertung gibt.

Stamer (1997) ergänzt hierzu, dass eine alleinige Schwimmwinkelreduktion nicht automatisch zu einer besseren Bewertung des Lenkverhaltens führt. Offensichtlich hatten bei den Versuchen andere Faktoren einen größeren Einfluss auf die subjektive Bewertung. Als Anhaltswert schlägt er bei einer Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h und einer Lenkwinkelrampe von 30° einen maximalen Schwimmwinkel von 1° vor. Berichte aus jüngster Zeit, die sich mit dem Thema Schwimmwinkel auseinandersetzen, sind mit der Ausnahme von *Riedel und Arbingner* (1997 und 2000) wenig zu finden. Das mag daran liegen, dass die stationären Schwimmwinkel heutiger Fahrzeuge weniger von Bedeutung sind als beispielsweise noch in den 70er Jahren. Durch steifere Reifen (niederer Querschnitt, erhöhte Steifigkeit der Seitenwände) sind die Schwimmwinkel in den vergangenen Jahren durchschnittlich kleiner geworden.

Zwar kommen einige Autoren überraschenderweise zum dem Schluss, dass aus Gründen der Stabilität möglichst kleine Schwimmwinkel anzustreben sind, jedoch sieht *Huang* (2004) in

einem kleinem Schwimmwinkel eine negative Auswirkung auf das Subjektivurteil für die Fahragilität.

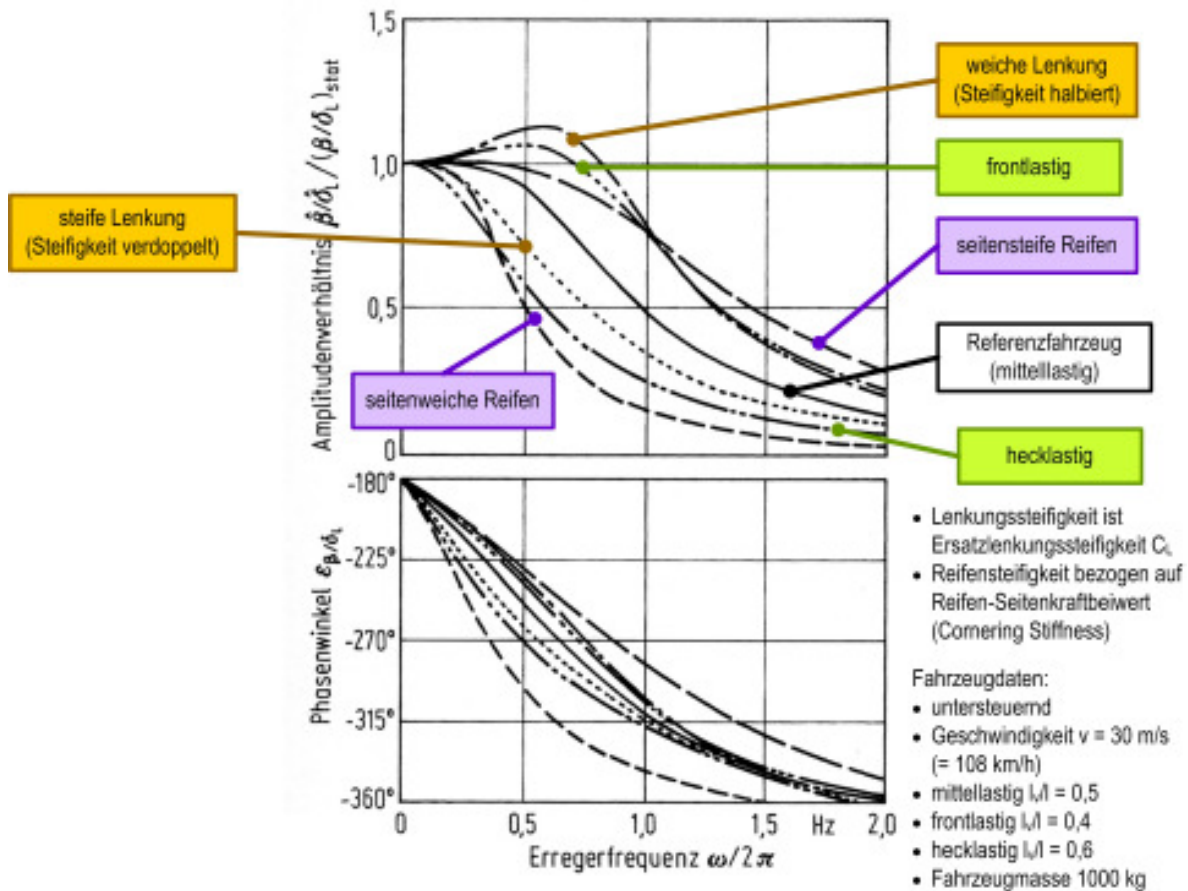





Abbildung 18: Frequenzgänge des Schwimmwinkels gegenüber dem Lenkwinkel bei verschiedenen Auslegungsvarianten (nach Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 611)

In Abbildung 18 sind basierend auf Wallentowitz und Mitschke (2004) die Verläufe der einzelnen Frequenzgänge des Schwimmwinkels gegenüber dem Lenkwinkel mit den dort angegebenen Varianten zu sehen. Dabei ist zu bemerken, dass der Schwimmwinkel gegenüber dem Lenkwinkel einen sehr großen Phasenverzug aufweist (-180°), der mit zunehmender Frequenz auf bis zu -360° ansteigt. Beim Amplitudenverhältnis werden eine weiche Lenkung, ein frontlastiges Fahrzeug und seitensteife Reifen dem Ziel eines über die Erregerfrequenz konstanten Amplitudenverhältnisses von eins am ehesten gerecht.

Zur Auswirkung der Schwimmwinkeländerung über der Zeit, ausgedrückt durch die Schwimmwinkelbeschleunigung und die Schwimmwinkelgeschwindigkeit, ist in der Literatur nichts Wesentliches darüber zu finden, wie die Wirkung auf das Lenkgefühl ist. Es wird jedoch immer wieder darauf hingewiesen, dass der Schwimmwinkel und seine zeitlichen Ableitungen einen Einfluss auf das Fahrgefühl an sich haben (siehe u.a. Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 573). Mitschke und Wallentowitz (2004, S. 573) sind der Meinung, wenn der Schwimmwinkel eine wichtige Informationsquelle darstellt, dann darf nicht der Schwimmwinkel der Fahrzeugschwerpunktes genommen werden, sondern der Schwimmwinkel auf Höhe des Fahrers auf der Fahrzeuglängsachse, welcher dann bei einem vorderachsgelenkten konventionellen Fahrzeug deutlich größer sein kann.





-  bei 100 km / h Lenkwinkelrampe von 30° und maximaler Schwimmwinkel von 1°
-  geringer stationärer Schwimmwinkel
-  schwache Korrelation mit subjektiven Empfinden

2.2.7 Allgemeine Fahrzeugreaktion auf die Lenkradeingabe

In der Literatur lässt sich eine ganze Reihe von Empfehlungen finden, wie sich ein Fahrzeug auf eine Lenkradeingabe verhalten sollte. *Aurell et al.* (2000) sehen ganz allgemein einen Vorteil in einer geringen Ansprechzeit des Fahrzeugs auf eine Lenkbewegung. Genauere Aussagen treffen hierzu *Fujinami et al.* (1995). Sie konnten festhalten, dass Fahrzeuge, die eine zu geringe aber auch zu große Ansprechzeit besitzen, subjektiv als schlecht beurteilt werden. *Braess* (1976) ist in seiner Aussage dazu konform. Er sieht in zu kurzen Fahrzeugreaktionen einen Nachteil. *Heißing und Brandl* (2002) treffen zwei Empfehlungen, die bei gleichzeitiger Umsetzung eine sehr genaue Abstimmung am Fahrwerk erfordern. Demzufolge sollte die Fahrzeugreaktion spontan und proportional bereits auf kleine Lenkbewegungen erfolgen, im scheinbaren Gegensatz dazu stellen *Heißing und Brandl* (2002) fest, dass zu hektische Überreaktionen des Fahrzeugs unerwünscht sind. Die getroffenen Aussagen weisen ein weiteres Mal darauf hin, dass zwischen einer zu kurzen und zu großen Ansprechzeit ein Optimum für die subjektiv Beurteilung des Lenkverhaltens eines Fahrzeuges liegen muss.






Matsushita et al. (1980) fanden einige Korrelationen zwischen der subjektiven Bewertung der Fahrzeugdynamik und den Messwerten beim Spurwechsel. Relativ stark korrelierten die Peakwerte der Gierrate und der Querbeschleunigung mit dem subjektiven Empfinden.

Stockmar (1978) stellt fest, dass parallel einschlagende Vorderräder zu einem schnelleren Ansprechen auf kleine Lenkwinkel führen. Ein solches Paralleleinschlagen kommt deswegen auch bei Rennwagen (z.B. in der Rennserie „Formel 1“) zum Einsatz (*Flegl et al.* 2003, S. 782).

-  „spontane“ und proportionale Fahrzeugreaktion auf Lenkbewegungen
-  zu kurzes Ansprechverhalten
-  zu lange Ansprechzeit
-  hektische Fahrzeugreaktion auf Lenkradeingabe

2.2.8 Wankreaktion

Die Wankreaktion, ausgedrückt durch die Wankwinkel, Wankwinkelgeschwindigkeit und Wankwinkelbeschleunigung, ist die Reaktion der Karosserie, ausgelöst durch ihre nicht starre Ankoppelung an das Fahrwerk. *Fuchs* (1993) kommt zu dem Entschluss, dass große Wankwinkel generell negativ empfunden werden. Genauere Aussagen liefern *Heißing und Brandl* (2002). Sie empfehlen ebenfalls nur geringe Wankwinkel, sehen aber in einem Wankwinkel von null die Gefahr, dass das Gefühl für den Seitenkraftaufbau verloren gehen kann. Deshalb sollten sich Wankwinkel und Wankgeschwindigkeit proportional zur Querbeschleunigung aufbauen. Eine Wankreaktion, bei der sich das Fahrzeug in die Kurve legt, wird meist als unangenehm empfunden. Ferner fordern *Heißing und Brandl* (2002), dass keine induzierte Lenk- und Gierbewegungen durch zu heftige Wankbewegungen entstehen dürfen.




-  kleine Wankwinkel (Ausnahme Vorwarnung an Fahrer für hohe Querbeschleunigungen)
-  zu große Wankwinkel
-  In-die-Kurve-Legen des Fahrzeugs
-  Wankbewegung verfälscht Querbeschleunigungseindruck
-  zusätzliche Lenk- und Gierbewegungen durch zu heftige Wankbewegungen

2.2.9 Gierreaktion

2.2.9.1 Gierwinkelgeschwindigkeit bzw. Gierrate

Stamer (1997) testete verschiedene Übertragungsverhalte von Fahrzeugen im Simulator. Dabei kommt er zu dem Schluss, dass Fahrzeuge mit einem reinen P-Verhalten beim doppelten Ausweichmanöver subjektiv am besten beurteilt wurde und Fahrzeuge mit PDT₂-Verhalten am schlechtesten. Auch bei anderen Fahrmanöversversuchen schnitten Fahrzeuge mit PDT₂-Verhalten schlechter ab, als Fahrzeug mit reinem P-Verhalten.

Bei einer Vorhaltlenkung (Lenkwinkelvorhalt) (siehe auch Niemann *et al.*, 1980) kann durch eine entsprechende Verstärkung des Vorhaltgliedes eine Verkürzung der Gierreaktion ermöglicht werden, jedoch sollte dies nicht zu hoch ausfallen, da sich dadurch der Fahrer unsicher fühlen kann, was eine negatives Lenkgefühl bedeutet (Huang 2004). Einen Beweis erbringen die Simulatorversuche von Reichelt und Strackerjahn (1992), die bei einer zu großen Überhöhung der Giergeschwindigkeit ein erhöhtes Unfallrisiko nachweisen.

-  P-Verhalten des Fahrzeugs beim doppelten Ausweichmanöver
-  PDT₂-Verhalten des Fahrzeugs
-  zu starke Überhöhung der Giergeschwindigkeit (kürzere Gierreaktionszeit)

2.2.9.2 Gierverstärkung

Zur Gierverstärkung liegen zahlreiche Untersuchungsergebnisse vor. Weir und DiMarco (1978) halten einen Gierverstärkungsfaktor zwischen 0,14 und 0,38 [1/s] bei 80 km/h für ideal (s. Abbildung 19). Im Einklang hierzu empfehlen McRuer und Klein (1975) einen Verstärkungsfaktor von 0,2 bis 0,4 [1/s] bei 50 mph (80 km/h). Einzig Stamer (1997) zieht die Erkenntnis aus seinen Simulatorversuchen, dass ein konstanter Verstärkungsfaktor von 0,4 bis 0,44 [1/s] bei allen Geschwindigkeiten zwischen 50 und 150 km/h ideal ist. Zudem stellt er noch fest, dass sich die Versuchspersonen bereits bei sehr niedriger Geschwindigkeit eine hohe Gierverstärkung wünschen. Die Begründung dafür sieht er in dem daraus resultierenden geringeren Lenkaufwand. Die hohe Gierverstärkung kann durch eine kleinere (direktere) Lenkübersetzung erreicht werden. Damit zeigt sich einmal mehr ein Nutzen in einer geschwindigkeitsabhängigen Lenkübersetzung. Daten heutiger Fahrzeug, die nicht zur Veröffentlichung bestimmt sind, befinden sich im optimalen Bereich, die in Weir und DiMarco (1978) für die Gierverstärkung bestimmt wurden.

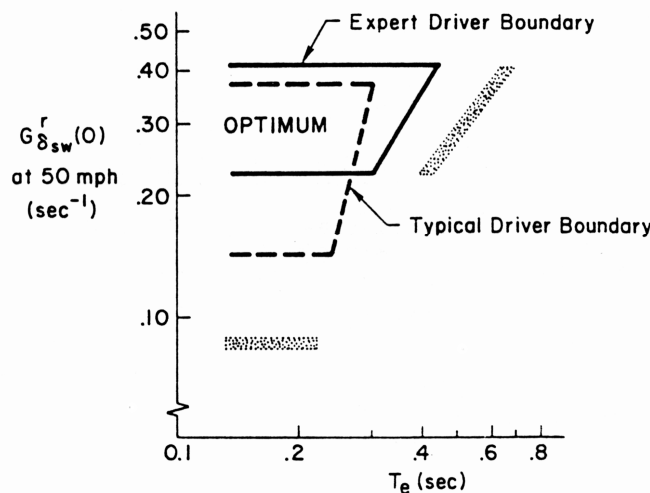





Abbildung 19: Optimaler Bereich der Gierverstärkung für 80 km/h nach Weir und DiMarco (1978)

-  hohe Gierverstärkung schon bei niedriger Fahrgeschwindigkeit
-  Verstärkungsfaktor bei 80 km/h zwischen 0,14 und 0,4 [1/s]
-  Verstärkungsfaktor konstant im Bereich 0,4 und 0,44 [1/s] zwischen 50 und 150 km/h (sportliche Fahrzeuge)

2.2.9.3 Verhalten der Gierreaktion auf die Lenkradeingabe

Für das Gierverhalten des Fahrzeugs auf eine Lenkradeingabe gibt es eine Vielzahl von Empfehlungen, die nicht ganz einheitlich sind. Bei einer Testfahrt mit einem Fahrzeug, das über eine mitlenkende Hinterachse (nicht zu verwechseln mit einer Vierradlenkung) verfügt, stellten *Krüger und Neukum* (2001, S. 259) fest, dass bei funktionsfähiger Hinterachslenkung, die Lenkdynamik der Probanden ruhiger war als mit ausgeschaltetem System. Als Grund wird angegeben, dass die querdynamische Reaktion auf eine Lenkradeingabe etwa nach 60 ms einsetzte und mit zunehmender Querbeschleunigung konstant blieb. Mit deaktiviertem System hingegen stieg die Verzögerungszeit auf 180 ms an. Die subjektive Beurteilung war dementsprechend schlechter. *Higuchi et al.* (1996) kommen zu einem ähnlichen Ergebnis. Fahrzeuge mit einer geringen Phase zwischen Gier- und Querbeschleunigungsantwort wurden subjektiv besser beurteilt. Eine geringe Ansprechzeit der Gierantwort auf die Lenkradeingabe empfehlen auch *Aurell et al.* (2000).

Im Widerspruch zu den zuvor genannten Empfehlungen steht die Aussage von *Fujinami et al.* (1995). Sie geben an, dass zu große aber auch zu geringe Ansprechzeiten zu einer subjektiv schlechten Bewertung führen. *Braess* (1976) ist aufgrund seiner Erfahrungen der Auffassung, dass zu kurze Reaktionszeiten des Fahrzeugs als nachteilig anzusehen sind.

Neben diesen Empfehlungen existieren noch zahlreiche andere Aussagen, die nicht in Widerspruch zu den obigen oder zu einander stehen. *Heißing* (2002) schlägt vor, dass das Gierverhalten direkt proportional zum Lenkwinkel sein soll. *Bantle und Braess* (1977) empfehlen, dass die Überhöhung des Giergeschwindigkeitsamplitudengangs im Bereich der Giereigenfrequenzen nicht zu hoch sein darf. *Fjurukawa et al.* (1990) kommen zu dem Entschluss, dass die Bewertung der Zeitkonstante der Gierwinkelgeschwindigkeit bei Fahrzeugen mit PT_1 -Verhalten von der Fahrsituation, d.h. von der Art des Ausweichmanövers abhängen.

Der Verlauf der Gierantwort auf eine Lenkradeingabe, scheint maßgeblich das subjektive Empfinden beim Lenkgefühl zu beeinflussen. Es wird deutlich, dass eine gewisse kurze Reaktion der Gierantwort zu einer positiven subjektiven Bewertung führt, im Gegenzug aber zu kurze Fahrzeugreaktionen als Nachteil gesehen werden. Offensichtlich werden dann gewisse menschliche Grenzen überschritten, wobei nicht genau bekannt ist, welche dies sind.

Es muss also ein gewisser Optimalbereich existieren, in dem das Fahrzeug zumindest subjektiv nicht allzu schlecht beurteilt wird. Inwieweit dieser Optimalbereich abhängig vom Fahrertyp und Fahrmanöver ist, lässt sich nicht genau sagen. *Fjurukawa et al.* (1990) stellten zwar bei der Gierantwort eine Abhängigkeit der subjektiven Beurteilung vom Fahrmanöver fest, im Gegensatz dazu aber nicht bei der Querbeschleunigungsantwort.

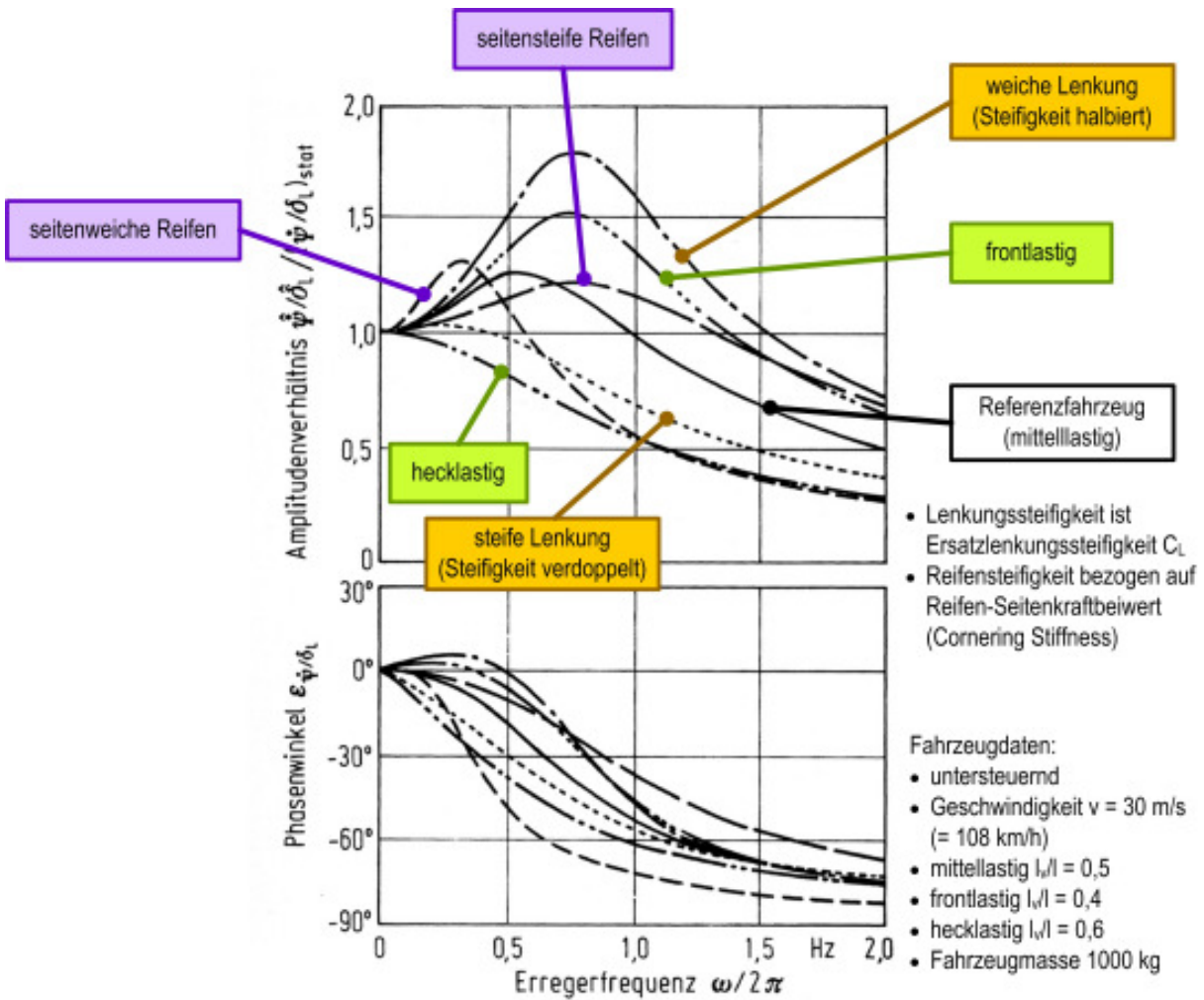


Abbildung 20: Frequenzgänge der Gierwinkelgeschwindigkeit gegenüber dem Lenkwinkel bei verschiedenen Auslegungsvarianten (nach Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 611)

Den Verlauf verschiedener Frequenzgänge der Gierwinkelgeschwindigkeit gegenüber dem Lenkwinkel bei unterschiedlichen Parametereinstellungen zeigt die Abbildung 20. Dem idealen Verlauf (Amplitudenverhältnis von eins und Phasenwinkel von null) kommt im Falle des Verlaufs der Gierwinkelgeschwindigkeit der seitensteife Reifen sehr nahe. Eine weiche Lenkung ist im Phasenverlauf günstiger, im Amplitudenverlauf aber bei ca. 0,7 Hz ungünstig. Im Vergleich von heck- und frontlastigen Fahrzeugen schneidet das frontlastige Fahrzeug etwas besser ab. Nachteilig bezüglich des Phasenwinkels sind seitenweiche Reifen, was aber in der Praxis nicht von wesentlicher Bedeutung ist, da Reifen moderner Fahrzeuge durch sehr niedere Querschnitte und verstärkte Seitenwände ohnehin über eine große Seitensteifigkeit verfügen.

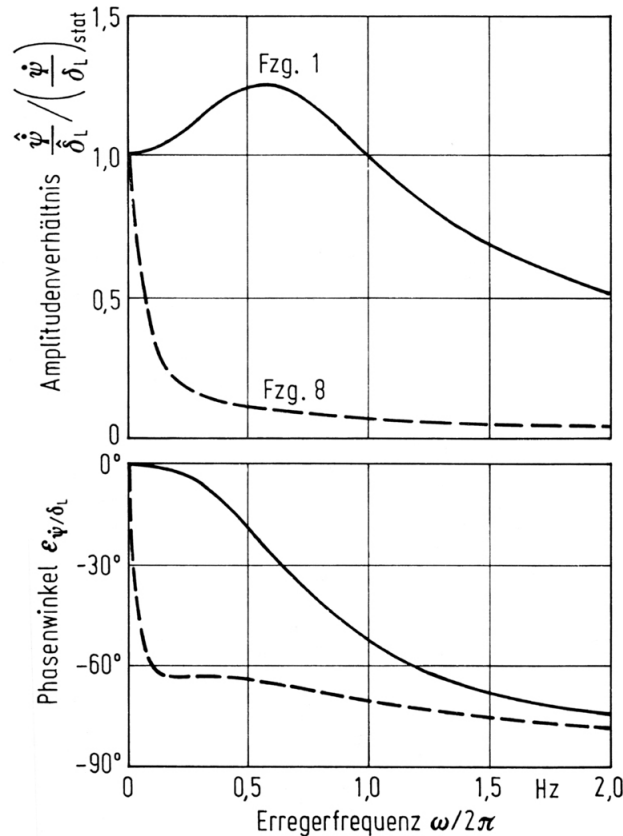










Abbildung 21: Theoretischer Vergleich des Frequenzganges der Gierwinkelgeschwindigkeit gegenüber dem Lenkwinkel zwischen unbeladenem und beladenem Fahrzeug (Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 612)

Abbildung 21 zeigt den Einfluss einer Fahrzeugbeladung auf den Frequenzgang der Gierwinkelgeschwindigkeit gegenüber dem Lenkwinkel nach einer theoretischen Untersuchung von Mitschke und Wallentowitz (2004, S. 612). Beim beladenen Fahrzeug Nr. 8 (Fahrzeugmasse 1400 kg) sind gegenüber dem nicht beladenen Fahrzeug Nr. 1 (Fahrzeugmasse 1000 kg) ein deutlicher Abfall des Amplitudenverhältnisses und ein steil abfallender Phasenverzug zu erkennen. Damit sind das Fahrverhalten und auch das Lenkgefühl alleine durch eine Beladung deutlich verändert.







-  Phasenverzug der Gierantwort zwischen 60 und 180 ms
-  Gierverhalten proportional zum Lenkwinkel
-  unklar, ob Bewertung der Zeitkonstante situationsabhängig
-  unklarer Einfluss der menschlichen Grenzen
-  Überhöhung des Giergeschwindigkeitsamplitudengangs im Bereich der Giereigenfrequenzen zu hoch
-  zu geringe und zu hohe Phasenverzüge der Gierantwort
-  starker Amplitudenabfall und großer Phasenverzug durch schwere Fahrzeugbeladung
-  früher Abfall des Phasenverzugs und unharmonischer Verlauf des Amplitudenverhältnisses bei seitenweichen Reifen

2.2.10 Querschleunigung

2.2.10.1 Querschleunigungsverhalten

Zum Querschleunigungsverhalten lieferte *Stamer* (1997) zahlreiche Beiträge. Gemäß seinen Untersuchungen führt ein schnelles Ansprechen des Fahrzeugs in der Querschleunigung zu kürzeren Lenkreaktionszeiten. Außerdem wird ein Vorhalt in der Querschleunigung aus Komfortgründen abgelehnt. Ergänzend untersuchte er noch verschiedene Übertragungsverhalte der Querschleunigung bei unterschiedlichen Fahrmanövern. Beim Ausweichmanöver wurden Fahrzeuge mit einem PDT₂-Verhalten am schlechtesten beurteilt und Fahrzeuge mit reinem P-Verhalten beim doppelten Ausweichmanöver am besten.

Der Eindruck, den der Fahrer vom zeitlichen Verlauf der Querschleunigung hat, wird durch das Wanken verfälscht.

- | | |
|---|---|
|  | schnelles Ansprechen der Querschleunigung |
|  | reines P-Verhalten des Fahrzeugs beim doppelten Ausweichmanöver |
|  | unklar, ob Simulatorversuch auf Realität übertragbar |
|  | Vorhalt in der Querschleunigung |
|  | Wanken verfälscht Subjektiveindruck über Querschleunigungsverlauf |
|  | PDT ₂ -Verhalten des Fahrzeugs bei Ausweichmanöver |

2.2.10.2 Verlauf der Querschleunigung auf die Lenkradeingabe

Stamer (1997) empfiehlt eine Peak-Response-Zeit, also einen Zeitverzug der Maximalwerte, von Lenkradeingabe und Querschleunigung von null. Seiner Ansicht nach würde das zu kürzeren Lenkreaktionen führen. *Braess* (1976) sieht aber in einer zu kurzen Fahrzeugreaktion Nachteile. *Fjurukawa et al.* (1990) konnten ermitteln, dass kleinere Zeitkonstanten der Querschleunigungsantwort bei Fahrzeugen mit PT₁-Verhalten unabhängig von der Fahraufgabe besser beurteilt werden. Im Gegensatz dazu konnte er bei der Gierantwort eine Unabhängigkeit von der Fahraufgabe nicht ausschließen. Nach *Bantle und Braess* (1977) sollte der Querschleunigungs-Amplitudengang nicht schon bei zu niedrigen Frequenzen abfallen. *Rönitz et al.* (1997) geben dazu einen Wert von 1 Hz an.

Dazu zeigt die Abbildung 22 wie das am ehesten erreicht werden kann. Dort ist basierend auf der theoretischen Untersuchung von *Mitschke und Wallentowitz* (2004) dargelegt, welchen Einfluss verschiedene Varianten auf den Verlauf des Frequenzgangs der Querschleunigung gegenüber dem Lenkwinkel haben.

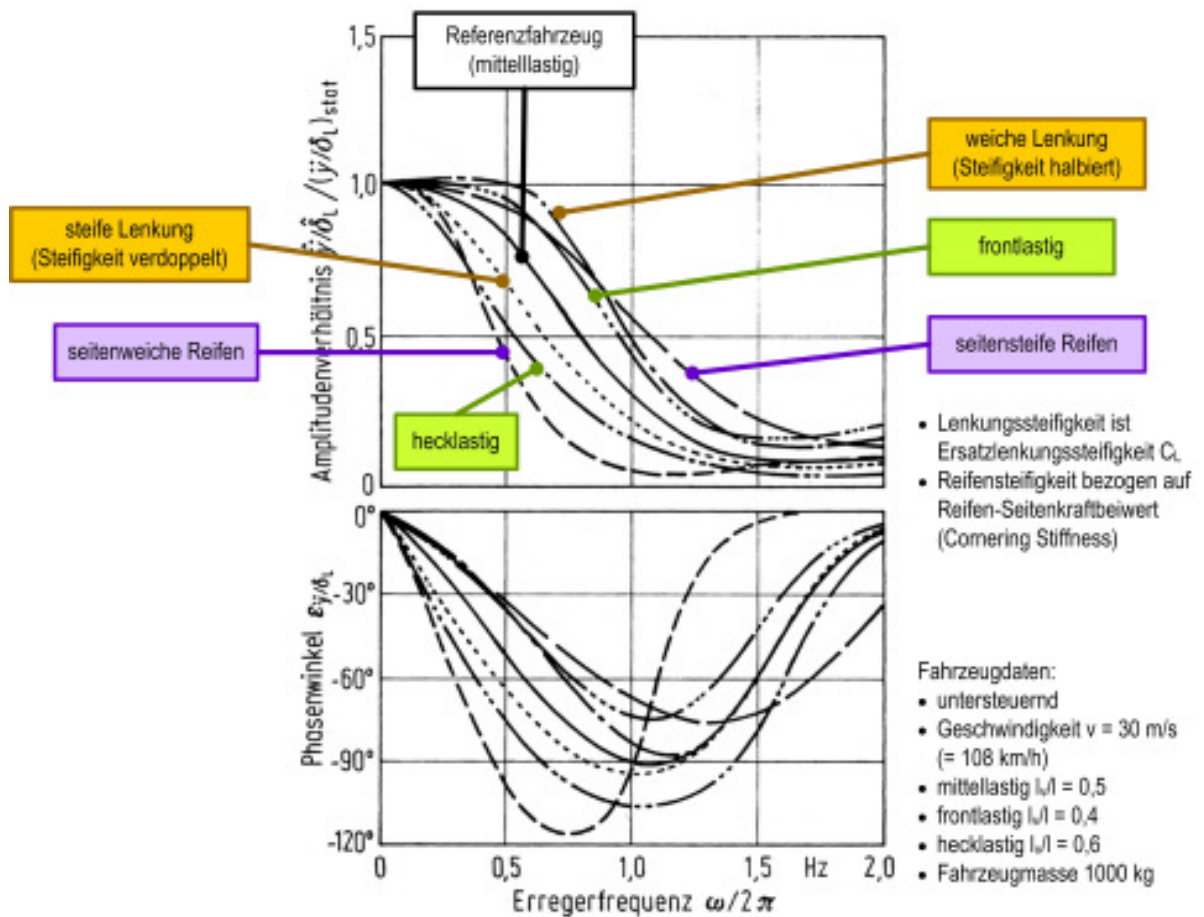


Abbildung 22: Frequenzgänge der Quereschleunigung gegenüber dem Lenkwinkel bei verschiedenen Auslegungsvarianten (nach Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 611)

Eine weichere Lenkung, frontlastige Fahrzeuge und seitensteife Reifen erfüllen am ehesten die zuvor erwähnte Anforderung von *Bantle und Braess (1977)* und *Rönitz et al. (1977)* nach einem nicht zu frühen Amplitudenabfall der Quereschleunigung möglichst erst ab 1 Hz. Ebenso erfüllen diese untersuchten Varianten am ehesten die Forderung nach einem Phasenwinkel von null, wie im unteren Teil des Diagramms zu sehen.

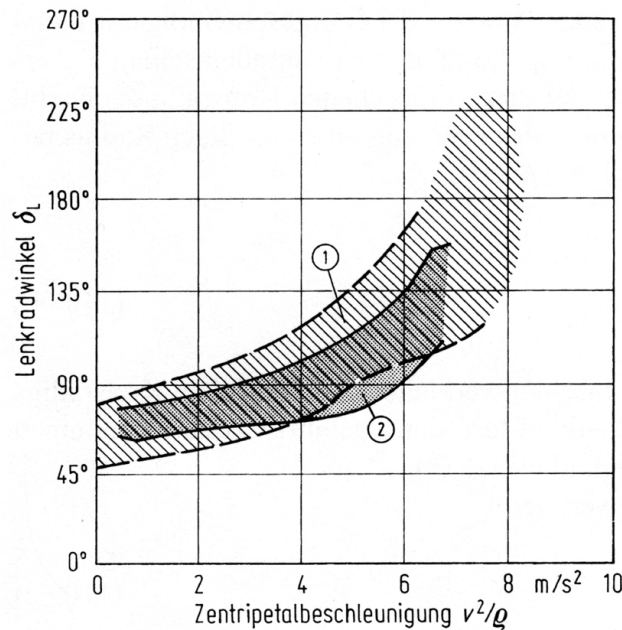








Abbildung 23: Optimales Kennfeld von Lenkradwinkel und Querbeschleunigung zur Vermeidung von negativer Subjektivbewertung (aus Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 572)

Abbildung 23 zeigt zwei Kennfelder zweier unterschiedlicher Untersuchungen über den optimalen Lenkradwinkel in Abhängigkeit der Querbeschleunigung bei stationärer Kreisfahrt (trockene Fahrbahn, Radius $r = 40$ m). Optimal bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das Subjektivurteil des Fahrers in dem angegebenen Bereich zumindest nicht negativ ausfällt (Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 572). Eine weitere Voraussetzung ist, dass es sich um untersteuernde Fahrzeuge handelt, was ein Großteil der auf dem Markt befindlichen Fahrzeuge erfüllt. Das Kennfeld Nr. 1 basiert auf einer Untersuchung von Rompe und Heißing (1984) und schließt bis auf einen kleinen Teil das Kennfeld Nr. 2 (Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 572) ein. Zu erkennen ist, dass der Lenkradwinkel zwischen einem Bereich von 0 bis ca. 6 m/s^2 proportional, jedoch nicht 1:1, mit der Querbeschleunigung zunehmen sollte. Oberhalb von 6 m/s^2 und damit in der Nähe des Grenzbereichs ist der Verlauf unspezifischer, jedoch zeichnet sich ab, dass der Lenkradwinkel über der Querbeschleunigung zumindest nicht linear wie außerhalb des Grenzbereichs weiter ansteigen sollte.

-  kleinere Zeitkonstanten der Querbeschleunigungsantwort
-  proportionaler Anstieg des Lenkradwinkels über der Querbeschleunigung und kein linearer Verlauf in der Nähe des Grenzbereichs
-  Zeitverzug der Peak-Response-Zeiten bei null
-  zu kurze Fahrzeugreaktion nachteilig
-  früher Abfall Amplitudengangs der Querbeschleunigung bei niedrigen Frequenzen (bis ca. 1 Hz), v.a. begünstigt bei hecklastigen Fahrzeugen und seitenweichen Reifen
-  unharmonischer Verlauf des Phasenwinkels bei hecklastigen Fahrzeugen und seitenweichen Reifen

2.2.11 Verlauf Gierantwort zur Querbewegung

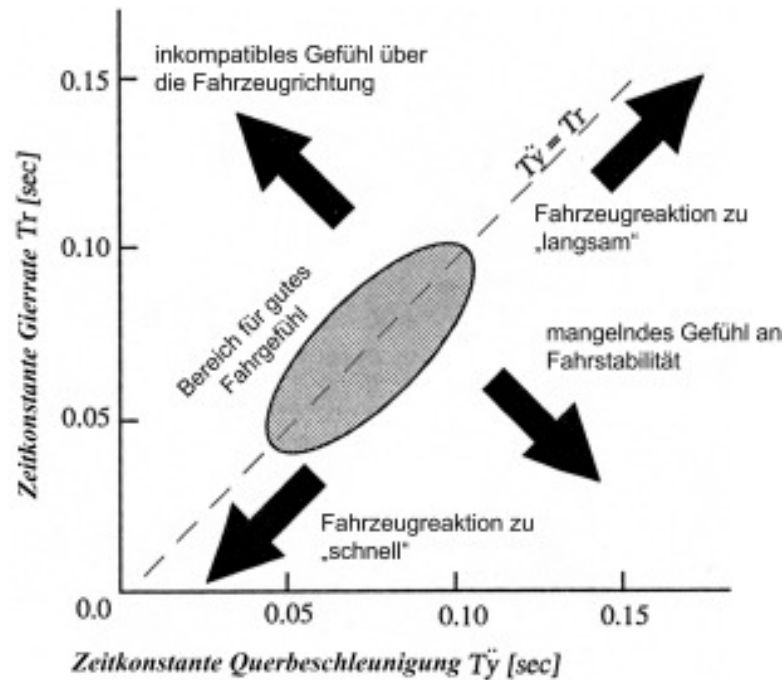






Abbildung 24: Einfluss unterschiedlicher Zeitkonstanten der Gierrate und Querbewegung (Fujinami et al. 1995)

Gegenstand einiger Untersuchungen war nicht nur den Verlauf der Gierantwort oder der Querbewegung aufgrund einer Lenkradeingabe gesondert zu betrachten, sondern auch die Verläufe der Gierantwort und der Querbewegung nach einer Lenkradeingabe miteinander zu vergleichen. Stamer (1997) hält aufgrund seiner Untersuchungen einen Zeitverzug der Peak-Response-Zeiten gleich null für ideal, was einer Fahrt „wie auf Schienen“ entspräche. Das bedeutet, dass die Spitzenwerte der Querbewegung und der Giergeschwindigkeit zeitgleich erreicht werden. Diesbezüglich führten auch Fujinami et al. (1995) Versuche durch. Dabei stellte sich heraus, dass das subjektive Urteil umso schlechter ausfällt, je größer der Unterschied der Zeitkonstanten von Querbewegung und Gierantwort (siehe Abbildung 24) ist. Ferner konnten sie noch eine weitere wichtige Erkenntnis gewinnen. Sie stellten den Zeitverzug der Querbewegung und Gierreaktion auf eine Lenkradeingabe so ein, dass die beiden Werte immer gleich waren. Insgesamt wurde zunächst nur der Wert dieses Zeitverzugs verändert. Im Diagramm von Abbildung 24 ergibt sich dadurch eine 45-Grad-Linie. In einem zweiten Schritt wurde zusätzlich noch die Phase zwischen Querbewegung und Gierreaktion variiert. Ergebnis war, dass ein Zeitverzug (für Querbewegung und Gierantwort gleich groß) auf die Lenkradeingabe zwischen 50 und 100 ms subjektiv am besten beurteilt wurde, sogar mit leichten Phasenverzügen zwischen Querbewegung und Gierreaktion. In Abbildung 24 wird der Bereich, der subjektiv am besten beurteilt wurde als „Bereich für gutes Fahrgefühl“ bezeichnet und als Ellipse gekennzeichnet. In diesem Versuch bestätigt sich die in anderen Versuchen gefundene Aussage, dass zu kurze Fahrzeugreaktionen und Zeitverzögerungen von mehr als 100 – 200 ms als nachteilig gesehen werden. Es muss noch erwähnt werden, dass neben der oberen zeitlichen Grenze, womöglich noch eine untere zeitliche Grenze (ca. 50 ms) existiert. Also auch ein zu schnell ansprechendes Fahrzeug wird subjektiv schlechter beurteilt. Dies ist ein klarer Widerspruch zu den gefundenen Erkenntnissen von Stamer (1997), die besagen, dass die Verzugszeiten möglichst bei null liegen sollen.

-  Zeitverzug der Peak-Response-Zeiten bei null
-  Zeitverzug auf Lenkradeingabe zwischen 50 und 100ms
-  großer Unterschied der Zeitkonstanten von Querschleunigung und Gierantwort
-  PDT₂-Verhalten des Fahrzeugs bei Ausweichmanöver

2.3 Versuche zur Korrelationsermittlung von subjektiver Fahrzeugbeurteilung und objektiven Kenngrößen

In der Vergangenheit gab es immer wieder Bestrebungen mit Hilfe wissenschaftlicher Experimente festzustellen, ob die subjektive Beurteilung des Fahrzeug- und damit des Lenkverhaltens mit objektiven Kenngrößen korreliert. In Tabelle 1 ist basierend auf *Huang* (2004) aufgelistet, welche objektive Kenngröße auf Korrelation mit dem subjektiven Empfinden untersucht wurde. Es fällt auf, dass nur wenige Untersuchungen die objektive Kenngröße „Gierwinkelbeschleunigung“ als maßgeblich für die subjektive Empfindung einstufen (z.B. *Bolte* 1991). Weiterhin ist zu bemerken, dass von *Huang* (2004) keine Untersuchungen mit objektiven Kenngrößen angegeben wurden, die sich auf das Lenkgefühl im engeren Sinne beziehen. Zu diesen objektiven Kenngrößen gehören unter anderem die viskose Dämpfung, die Coulombsche Reibung, die Rückstellkraft und noch weitere.

Eine Korrelationsuntersuchung zum weiter vorne beschriebenen Lenkgefühl im engeren Sinn führte *Barthenheier* (2004) durch, wobei die objektiven Kenngrößen Dämpfung, Reibung und linearer Anteil des Rückstellmoments als Einflussgrößen identifiziert wurden. Aufgrund der Daten wurden den Parametern Trägheit und nichtlinearer Anteil des Rückstellmoments nur eine geringe Bedeutung zugemessen. Ziel des Versuches war es, den Zusammenhang des Alters, des Geschlechts, der Fahrsituation und des Fahrerotyps mit dem subjektiven Empfinden zu untersuchen. Dazu wurden Hypothesen aufgestellt, die durch entsprechende Versuche überprüft wurden. *Barthenheier* (2004) kommt zu folgenden Ergebnissen:

- Die Hypothese, dass der Fahrer ein reales stationäres Lenkradmoment von einem synthetischen Lenkradmoment im Normalfahrbereich (Querschleunigung unterhalb 5 m/s²) in der Bewertung solcher Systeme unterscheiden kann, wurde widerlegt. Damit ist es möglich ein reales Lenkradmoment durch ein synthetisches zu ersetzen, ohne dass das der Fahrer merkt.
- Die Hypothese, dass mit steigender Fahrgeschwindigkeit höhere Lenkradmomente bevorzugt werden, konnte widerlegt werden.
- Bei der Beurteilung der Lenkradmomentenvarianten treten keine Abhängigkeiten von Alter und Geschlecht auf. Jedoch konnte die Hypothese, dass fahrdynamische Größen existieren, die eine Differenzierung zwischen den Teilkollektiven „Alter“ und „Geschlecht“ zulassen nicht widerlegt werden (*Barthenheier* 2004, S. 112).
- Bezüglich des Komforts bevorzugen ältere Fahrer höhere dissipative Anteile im Lenkmoment.
- Bezüglich der empfundenen Sicherheit bei Überlandfahrten werden niedrigere Rückstellmomente bevorzugt.
- Bezüglich der Sportlichkeit wünschen sich männliche Fahrer größere Rückstellmomente, weibliche Fahrer eher niedrigere (als Ursache wird die unterschiedliche Auffassung von Sportlichkeit und Fahrspaß gesehen).
- Für eine Vorhersage einer subjektiven Beurteilung scheint das Verhältnis zwischen einem energiespeichernden und einem energiedissipierenden Charakter zu sein.

| | | Gierwinkelfehler | Gierwinkelgeschwindigkeit | Gierwinkelbeschleunigung | Querabweichung | Quergeschwindigkeit | Querbeschleunigung | Fahrbahn-Krümmung | Schwimmwinkel |
|------|-------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|----------------|---------------------|--------------------|-------------------|---------------|
| 1965 | Bundorf | X | | | | | | | |
| 1973 | Lincke et al. | | | | | | | | X |
| 1976 | McRuer & Klein | X | | X | | | | X | |
| 1977 | Bisimis et al. | | X | | | | | | |
| 1978 | Donges | X | | X | | | | X | |
| 1978 | Weir & DiMarco | | X | | | | | | |
| 1979 | Jaksch | | X | | | | X | | |
| 1980 | Niemann et al. | | | | | | X | | |
| 1982 | Allen | X | | X | | | | | |
| 1984 | Norman | | | | | | X | | |
| 1987 | Godthelp | | | | X | | | | |
| 1990 | Mitschke | | | | | | | | X |
| 1991 | Bränneby et al. | | X | | | | | | |
| 1991 | Bolte | | | X | | | | | |
| 1991 | Mitschke et al. | | X | | | | | | |
| 1991 | Zomotor | | X | | | | X | | X |
| 1992 | Neculau | | | | | | | X | |
| 1992 | Reichelt & Strackerjahn | X | X | X | X | | X | | |
| 1992 | Yuhara et al. | | X | | | | X | | |
| 1993 | Farrer | X | X | X | | | | | |
| 1994 | Tan et al. | | | X | | | | | |
| 1996 | Riedel & Gnadler | | | | | | | | X |
| 1997 | Apel & Mitschke | X | | X | | | | X | |
| 1997 | Dettki | | X | | | | | | |
| 1997 | Willumeit & Jürgensohn | | | X | | | | | |
| 1997 | Yuhara et al. | X | | X | | | | | |
| 1998 | Kusaka & Higuchi | | | X | | | | | |
| 1998 | Yamazaki & Kamata | | | X | | | | | |
| 2000 | Aurell et al. | | X | | | | | | |
| 2000 | Naab | | | X | | | | X | X |
| 2000 | Riedel & Arbinger | | | | | | | | X |
| 2000 | Segawa et al. | | X | | | | X | | |
| 2000 | Yoshimoto et al. | | | X | X | | | | |
| 2001 | Eckstein | | | | | | X | X | |
| 2007 | Harrer | | X | | | | X | | |

Tabelle 1: Übersicht (Auswahl) von Korrelationsuntersuchungen von 1965 bis 2007 zwischen objektiven Größen und subjektiver Beurteilung des Fahrverhaltens (basierend auf Huang 2004, S. 102)

Durch diese und andere wissenschaftliche Arbeiten wird deutlich, dass der Ansatz Korrelationen zwischen objektiven messbaren Kenngrößen und der subjektiven Beurteilung des Lenkverhaltens eines Fahrzeugs zu finden, häufig nur schwache oder gar keine Zusammenhänge zum Vorschein bringt. Stärkere Korrelationen scheint es in Verbindung mit dem zeitlichen Aspekten der Wahrnehmung der Informationen im Rahmen der Lenkaufgabe zu geben. Die nachfolgenden Kapitel werden sich eingehender mit dem Aspekt der menschlichen Wahrnehmung beschäftigen.

Tabelle 2 zeigt nach *Harnett* (2002), wie sich Veränderungen bestimmter Lenkungsparameter, wie Grad der Servounterstützung oder Lenkungsreibung an Lenksäule oder Zahnstange auf die subjektive Lenkungsbeurteilung auswirken. *Harnett* (2002) geht dabei von einer Referenzlenkung aus, die bereits durch eine interne Firmenbeurteilung als sehr gute Lenkung eingestuft wurde. Es lässt sich festhalten, dass eine zusätzliche Versteifung der Lenkung durchwegs etwas bessere subjektive Beurteilungen zur Folge hat. Die Steifigkeit wurde dabei gegenüber der Referenzlenkung mit $0,250 \text{ Nm/}^\circ$ auf etwa $0,2750 \text{ Nm/}^\circ$, also etwa 10% angehoben. Alle anderen erprobten Maßnahmen haben vor allem im Bereich der Rückmeldung bzw. des Lenkgefühls eine deutlich schlechtere subjektive Beurteilung zur Folge.

Weiterhin ist bemerkenswert, dass sich ein zusätzliches Lenkungsspiel (bei modernen Lenkungen kann man von einer Spielfreiheit ausgehen) nur im Bereich der Mittenlage deutlich negativ auswirkt. Betrachtet man die subjektiven Beurteilungen bezogen auf die Rückmeldung und das Lenkgefühl, so kann die Aussage getroffen werden, dass weicher eingestellte Lenkungen, zusätzliche Reibung, hohe Servounterstützung und Lenkungsspiel zu einer deutlich negativen Beurteilung führt. Wie im Verlauf dieser Arbeit noch deutlich werden wird, benötigt der Fahrer für ein gutes Lenkgefühl in der Mittellage einen deutlich spürbaren und ausreichend großen Lenkkraftanstieg.

| subjektives Beurteilungskriterium | | Änderung gegenüber Referenzlenkung | | | | | |
|---|----------------------------------|------------------------------------|---------|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| | | weicher | steiler | zusätzliche Lenksäulenreibung | zusätzliche Zahnstangenreibung | maximale Servounterstützung | Erhöhung des Lenkungsspiel |
| Agilität („lethargisch“ bis „agil“) | Mittenlage | - | + | -- | -- | + | -- |
| | bei mittlerer Querbeschleunigung | - | + | - | = | + | - |
| | bei hoher Querbeschleunigung | - | + | - | - | + | - |
| Lenkwinkelbedarf („weniger“ bis „mehr“) | Mittenlage | - | = | - | - | = | -- |
| | bei mittlerer Querbeschleunigung | - | = | = | = | = | = |
| | bei hoher Querbeschleunigung | = | = | + | - | = | = |
| Rückmeldung Lenkgefühl („nicht ausreichend“ bis „adäquat“) | Mittenlage | -- | + | -- | -- | - | -- |
| | bei mittlerer Querbeschleunigung | - | + | -- | - | - | -- |
| | bei hoher Querbeschleunigung | - | + | -- | = | -- | - |
| empfundenes Lenkmoment („niedrig“ bis „hoch“) | Mittenlage | = | = | -- | - | = | = |
| | bei mittlerer Querbeschleunigung | = | = | -- | - | - | = |
| | bei hoher Querbeschleunigung | = | = | - | - | -- | = |
| empfundener Lenkmomentgradient („flach“ bis „steil“) | Mittenlage | - | + | -- | - | = | - |
| | bei mittlerer Querbeschleunigung | - | + | - | - | + | - |
| | bei hoher Querbeschleunigung | - | = | - | - | -- | - |
| empfundener Lenkmomentenabfall („weniger“ bis „steil“) („niedrig“ bis „hoch“) („früh“ bis „spät“) | Grenzbereich | + | + | - | = | -- | = |
| | Progressivität | = | + | - | = | k.A. | = |
| | Timing | = | - | - | = | k.A. | = |
| Vorhersagbarkeit des Grenzbereichs | | = | = | -- | = | -- | = |
| Sicherheitsgefühl im Grenzbereich | | - | + | -- | = | -- | - |

| | | | |
|---|--------------|----|---------------------|
| + | etwas besser | - | etwas schlechter |
| = | gleich | -- | deutlich schlechter |

Tabelle 2: Verstellauswirkung bestimmter Lenkungsparameter auf das Subjektivurteil des Fahrers (basierend auf Harnett 2002)

Kudritzki (1989, S. 55) untersuchte, wie die linearen Korrelationskoeffizienten von subjektiver Beurteilung und Gierbeschleunigung, sowie Querbeschleunigung von der Zeitverschiebung gegenüber dem Lenkwinkelmaximum abhängen. Wie in der nachfolgenden

Abbildung zu erkennen, hat bei einer Korrelationsrechnung im Zeitbereich der Koeffizient der Gierbeschleunigung bei ca. 400 ms vor dem Lenkwinkelmaximum den höchsten Wert (ca. 0,8), der Koeffizient der Querbeschleunigung bei ca. 150 ms (ca. 1,0) nach dem Lenkwinkelmaximum, wobei er bis ca. 400 ms einen noch sehr hohen Wert besitzt. Für die Fahrzeugauslegung würde es demnach bedeuten, innerhalb der Zeitabschnitte mit hohen Korrelationskennwerten den Verlauf von Querbeschleunigung und Gierbeschleunigung genau zu betrachten. Den Ergebnissen liegt der Schluss nah, dass der Fahrer das Wahrnehmen der Querbeschleunigung im einen engeren Zeitrahmen beurteilt und ggü. der Gierbeschleunigung toleranter ist.

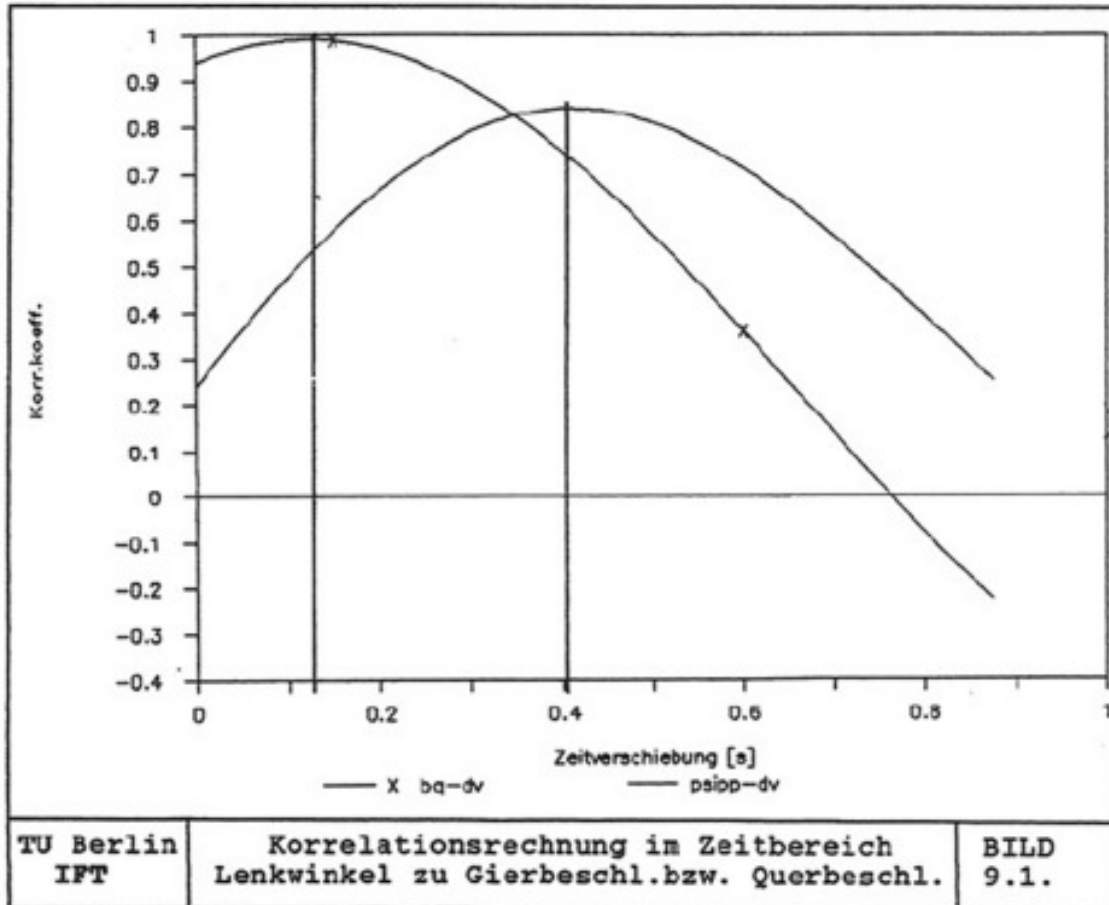


Abbildung 25: Korrelation von Beurteilung und Zeitverzug von Lenkwinkel gegenüber der Gier- und Querbeschleunigung (Kudritzki 1989, S. 55)

2.4 Fahrermodelle für die Fahrzeugquerführung

Seit den 40er Jahren gibt es bis heute Bestrebungen, das Verhalten des Fahrers bei der Fahrzeugquerführung durch sog. Fahrermodelle zu beschreiben. *Henze* (2004) gibt eine Übersicht über derartige Modelle und nimmt zunächst eine Unterteilung zwischen quantitativen und qualitativen Modelle. Qualitative Modelle sind alle Modelle, die auf der Verkehrspsychologie basieren und nicht mathematisch, sondern nur verbal theoretisch beschrieben werden können. Hingegen sind quantitative Fahrermodelle mathematisch beschrieben und für Simulationen geeignet. Sie existieren für die Fahrzeuglängs- und Fahrzeugquerregelung. Gemäß *Henze* (2004) kann man zwischen vier Arten von Modellen unterscheiden. Einige Modelle verwenden eine oder mehrere Differentialgleichungen zur Beschreibung, wobei andere Modelle die menschliche Entscheidungsstruktur mit Hilfe von Fuzzy-Logik (possibilistisch) nachbilden (*Käppler und Godthelp* 1989, *Kramer* 1986, *Nagai et al.* 1987, *Jürgensohn* 1997, *Xi und Qun* 1994). Das gilt ebenso für Ansätze, die neuronale Netze für die Fahrermodelle verwenden. Weitere Fahrermodelle basieren auf Wahrscheinlichkeiten (probabilistisch), auch mehrdimensional, die bisher aber nur für die Längsdynamik existieren. Als letztes sind noch hybride Fahrermodelle zu nennen, welche „das Erkennen von Informationen, Entscheiden und Reagieren gleichzeitig nachbilden“ (*Henze* 2004, S. 20).

Die Vorgehensweise, den Fahrer durch qualitative Modelle zu beschreiben, erwies sich für das Lenkgefühl jedoch nicht als zielführend, sodass es seit den 90er Jahren nur noch Bemühungen gibt den Menschen im Kraftfahrbereich als kontrollierenden und beobachtenden und nicht mehr regelnden Mensch anzusehen (*Jürgensohn* 1997, S. 133). In Abbildung 26 ist basierend auf *Jürgensohn* (1997) dargestellt, wie diese Modelle in Form eines „Stammbaus“ zusammenhängen und wie sie zu unterscheiden sind. Ein wesentliches Unterscheidungsmerkmal sind die Ausgangsgrößen der Regelmodelle. Bis auf einige Ausnahmen ist die Ausgangsgröße der meisten Modelle der Lenkwinkel. Einige Modelle haben als Ausgangsgröße das Lenkmoment (*Wohl* 1961, *Fiala* 1966) oder die Lenkwinkelgeschwindigkeit (*Sheirko* 1972, *Hayhoe* 1978). Auf die Bedeutung des Lenkmoments im Vergleich zum Lenkwinkel als Informations- und Regelgröße für den Fahrer wird weiter unten in der Arbeit noch ausführlich eingegangen werden.

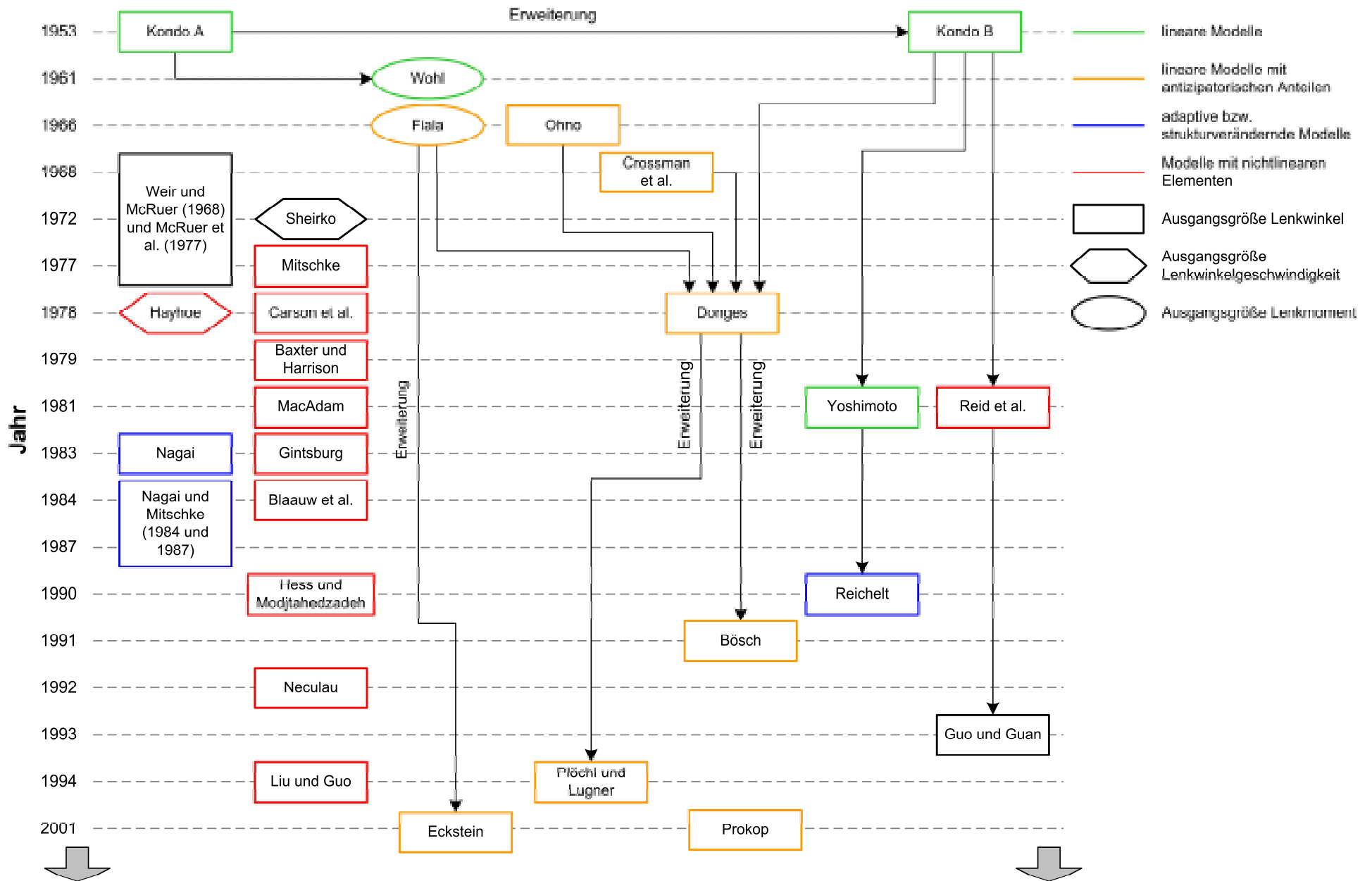


Abbildung 26: „Stammbaum“ von regelungstechnischen Fahrermodellen bis 2001 für die Fahrzeugquerführung (basierend auf Jürgensohn 1997)

Jürgensohn (1997) unterscheidet vier verschiedene Klassen von Modellen, die unterschiedliche Eingangsgrößen berücksichtigen (siehe Abbildung 26), wobei die meisten Modelle als Eingangsgröße die Regelung des Fahrers nach dem seitlichen Abstand, dem Gierwinkelfehler oder der Bahnkrümmung der Kurve einbeziehen. Durch die Einteilung nach der Eingangsgröße in vier Klassen werden rein lineare Modelle, lineare Modelle mit antizipatorischen Anteilen, adaptive bzw. strukturverändernde Modelle und lineare Modelle mit nichtlinearen Elementen unterschieden. Modelle mit antizipatorischen Anteilen berücksichtigen die Voraussicht des Fahrers (Antizipation). Die linearen Modelle mit nichtlinearen Elementen berücksichtigen beispielsweise die Lenkungshysterese oder die menschlichen Wahrnehmungsschwellen. Adaptive oder strukturverändernde Modelle schalten während der Simulation zwischen Regelung (closed-loop) und Steuerung (open-loop) hin und her, z. B. bei angenommener Änderung der Umweltbedingungen wie vereiste Fahrbahn (Jürgensohn 1997, S. 151). Damit soll der Eigenschaften des Fahrers je nach Situation mehr zu regeln bzw. zu steuern Rechnung getragen.

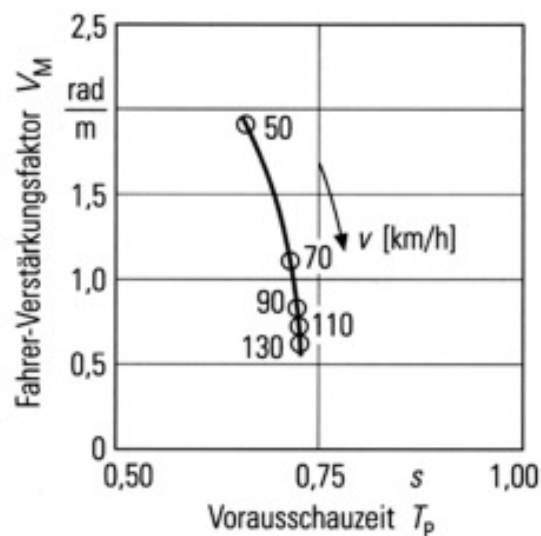


Abbildung 27: Fahrerverstärkungsfaktoren für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Vorausschauzeiten (aus Mitschke und Wallentowitz 2004 S. 658, basierend auf Risse 1991)

Abbildung 27 macht deutlich, welche Probleme mit regelungstechnischen Fahrermodellen auftreten können, sobald ein für alle Fahrsituationen passendes Modell gefunden werden soll. Problem bei allen Modellen ist, dass sie den Fahrerverstärkungsfaktor und die Fahrervorausschauzeit beinhalten. Der Fahrerverstärkungsfaktor wird von der Fahrgeschwindigkeit und der Vorausschauzeit beeinflusst und kann erheblich je nach gebildeter Voraussicht und Fahrgeschwindigkeit variieren. Abbildung 27 zeigt beispielhaft unterschiedliche Verstärkungsfaktoren für unterschiedliche Geschwindigkeiten bei nahezu gleicher Vorausschauzeit. In diesem Fall ergibt sich für den Fahrerverstärkungsfaktor ein Wert, der um das 4-fache schwankt. Nun sollte aber noch erwähnt werden, dass die Geschwindigkeitsunterschiede noch höher sein können als in der Abbildung. Ferner kann die Vorausschauzeit bis zu 4 Sekunden betragen. Durch die Streubreite der beschreibenden Werte für den Fahrer sind die meisten Fahrermodelle für die Querführung nur für bestimmte Fahrersituationen und Fahrmanöver anwendbar.

Auffällig ist auch, dass viele Modelle die Rückmeldung des Lenkmoments an den Fahrer nicht beinhalten. Wie später noch gezeigt wird, sind solche Modelle für Untersuchungen und Erklärungen in Bezug auf das Lenkgefühl im engeren Sinne (Empfindungen des Fahrers direkt an der Lenkung) nur eingeschränkt gültig und anwendbar, da die Wahrnehmung des Lenkmoments durch den Fahrer ein wesentlicher Bestandteil des Lenkgefühls ist.

Die genannten Modelle sind als Anwendung zur Erklärung des Phänomens des Lenkgefühls für den Teilaspekt des „engeren“ Lenkgefühls (Vorgänge und Wahrnehmung am Lenkrad) geeignet. Der Grund dafür ist darin zu suchen, dass Fahrermodelle eher mit dem Ziel erstellt worden sind, in Simulationsprogramme und damit für Fahrzeugsimulatoren Verwendung zu finden, um damit Experimente zum Fahrzeugverhalten durchzuführen. Ein Hauptproblem von Fahrzeugsimulatoren ist, dass sie aus technisch-konzeptionelle keine vollständige realistische Abbildung einer realen Kurvendurchfahrt eines Kraftfahrzeugs erlauben und damit für eine Betrachtung des Lenkgefühls im erweiterten Sinne bedingt geeignet sind. Problematisch ist dabei weniger die optische Simulation, die eine ausreichende Qualität aufweisen, sondern eher die kinematische Simulation. Die häufig auftretende Simulatorkrankheit ist ein Hinweis auf das mangelnde Zusammenspiel zwischen optischer und kinematischer Simulation.

Die nachfolgenden Tabellen zeigen im Überblick die Fahrermodelle für die Quermodelle seit dem Jahr 1953 mit dem ersten Modell von *Kondo* (1953). Die Tabellen geben an, welchen Mathematischen Typs die Modelle sind, welche relevanten Größen sie berücksichtigen, welche Ausgangsgrößen sie besitzen und für welche Fahrsituation sie gelten.

| | | verbal beschrieben bzw. Korrelationen (qual. Modelle) | klassisches Modell (Fuzzy-Logik) | neurales Netz | adaptives Modell | Vorausschaumodell | Zwei-Ebenen-Modell (Open- und Closed-Loop-Anteile) | linear | quasi-linear | nicht-linear | diskontinuierlich | Absatzhaltig oder zeitdiskrete Form | Parameterbestimmung durch Optimierungskriterium | Krümmung des Spurverlaufs (Straßenkrümmung bzw. gedachte Sollspur) | Gierwinkelfehler / aktueller Gierwinkel | Schwänkel | Querabweichung im Schwerpunkt (aktuelle Querlage) | Querlage in Vorausschauentfernung | Querbeschleunigung | Gierwinkelgeschwindigkeit | Schwänkelwinkel | Markwinkel | Kurswinkelfehler, Quergeschwindigkeit, Querbeschleunigung | Lenkmoment | Lenkwinkel | Lenkwinkelgeschwindigkeit | Lenkmoment / Lenkkräft | normales Kurvenfahren | Spurwechselmanöver | Ausweichen Hindernis | Spurhaltung (Geradausfahrt) | Seitenwind | schiefeleisende Bremsse | μ-Sprung (doppelt oder einfach), Gleitreibung | Besonderheiten / Modellannahmen | | | |
|------|---------------------|---|----------------------------------|---------------|------------------|-------------------|--|--------|--------------|--------------|-------------------|-------------------------------------|---|--|---|-----------|---|-----------------------------------|--------------------|---------------------------|-----------------|------------|---|------------|------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------|------------|-------------------------|---|---------------------------------|---|---|--|
| 1953 | Kondo | | | | | x | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1961 | Wohl | | | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | Führungsgröße Gierwinkel bezogen auf eine Gerade bei Ausfahrt bzw. Einfahrt in Kurve. Reaktionszeit konstant bei 0,5s | | |
| 1966 | Crossman et al. | | | | | | | | | x | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Fiala | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | |
| | Ohno | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | |
| 1969 | Crossmann & Szostak | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Anlehnung an Flow-Chart (Produktionssysteme) | | |
| | Kondo & Ajimine | | | | | | | | | | | | | | x | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | McRuer | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Weir & McRuer | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1970 | Braess (1970b) | | | | | x | | | | | | | | | x | x | x | x | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Kroll | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | für Notsituationen | |
| | Kroll & Roland | | | | | | | | | x | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1971 | Johannsen | | | | | | | | x | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Berücksichtigung von Schwellwerten und Entscheidungselementen | |
| 1972 | Niemann | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Sheirko | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | |
| 1977 | Donges | | | | | | | | | | | | | x | x | x | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | |
| | Loth | | | | | x | | | | | | | | | x | x | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | McRuer et al. | | | | | x | x | | | | | | | x | x | x | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | |
| | Mitschke | | | | | x | x | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1978 | Donges | | | | | x | | | | | | | | x | x | x | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | |
| | Cerson et al. | | | | | | | | | x | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Berücksichtigung der Wahrnehmungsschwellen als Nichtlinearität |
| | Mitschke | | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Wolf & Barret | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabelle 3: Chronologische Übersicht von Modellen für die Fahrzeugquerführung

| | | verbal beschrieben bzw. Korrelationen (qual. Modelle) | possibilistisches Modell (Fuzzy-Logik) | neuronales Netz | adaptives Modell | Vorausschaumodell | Zwei-Ebenen-Modell (Open- und Closed-Loop-Anteile) | linear | quasilinear | nichtlinear | diskontinuierlich | Abschaltbegleider oder zeitdiskrete Form | Parameterbestimmung durch Optimierungskriterium | Krümmung des Spurverlaufs (Straßenkrümmung bzw. gedachte Sollspur) | Gewinkelfehler / aktueller Gelenkwinkel | Sichtwinkel | Querabweichung im Schwerpunkt (aktuelle Querlage) | Querlage in Vorausschauentfernung | Querbeschleunigung | Gelenkwinkelgeschwindigkeit | Schwinneinwinkel | Wankwinkel | Kurswinkelfehler, Quergeschwindigkeit, Gierbeschleunigung | Lenkmoment | Lenkwinkel | Lenkwinkelgeschwindigkeit | Lenkmoment / Lenkkraft | normales Kurvenfahren | Spurwechselmanöver | Ausweichen Hindernis | Spurhaltung (Geradeausfahrt) | Seitenwind | schiefe Bremse | μ -Sprung (doppelt oder einfach), Glatteis | Besonderheiten / Modellannahmen | | | |
|------|-------------------------|---|--|-----------------|------------------|-------------------|--|--------|-------------|-------------|-------------------|--|---|--|---|-------------|---|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------|------------------|------------|---|------------|------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|------------------------------|------------|----------------|--|---------------------------------|--|---|---|
| 1979 | Baxter & Harrison | | | | x | | | | | x | | | | | x | x | x | | | | | | | x | | | | | | | | | | Fahrer als nichtlineares Glied durch Hysterese, Fahrzeug als lineares Glied. | | | | |
| | Hayhoe | | | | | | | | | x | | x | | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | |
| | Wallentowitz | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1981 | Liebermann & Goldblatt | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reid et al. | | | | x | x | | | | x | | x | | | x | x | | x | | | | | | x | | | | | x | | | | | | | | | |
| | MacAdam | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1982 | Allen | | | | | | | | | | | | | | x | x | x | | | | | | | | | | | x | x | | | | | | | | | |
| | Garrot et al. (1982a) | | | | x | | | | | | | | | | x | x | x | | | | | | | x | | | | x | | x | | | | | | | Neuromuskuläre Verzögerungszeit bei 0,2s angenommen. | |
| | Garrot et al. (1982b) | | | | x | | | | | | | | | | x | x | x | | | | | | | x | | | | x | | x | | | | | | | | |
| | Kramer & Rohr | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1983 | Girlsburg | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Wilumeit et al. | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1984 | Blaauw et al. | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Godthelp et al. (1984a) | | | | x | x | | | | | | | | x | x | x | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | Abtastung der Information in unregelmäßigen Zeitabständen. Time-to-Line-Cross-(TLC)-Konzept | |
| | Godthelp et al. (1984b) | | | | x | x | | | | | | | | x | x | x | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | |
| 1985 | Kramer | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1986 | Braun | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | für Nutzfahrzeugdynamik |
| | Hom | | | | | x | | | | | | | | x | x | x | | | | | | | | x | x | | | | | | | | | | | | | |
| 1988 | Mitschke | | | | x | x | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Nagai & Mitschke | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | |
| 1990 | Neculau et al. | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | mehrere Querabweichung in unterschiedlichen Vorausschauentfernung |
| | Hess & Modjehedzadeh | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Reichelt | | | | x | x | | | | | | | | | x | x | x | | | | | | | x | x | | | | | | | | | | | | Rückgekoppeltes Modell. Zusätzlicher Lenkwinkel durch Schreckreaktion | |
| | Riedel | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | x | x | | | | | | | | | Modellanpassung durch mehrere Simulationsschleifen. | |

Tabelle 4: Chronologische Übersicht von Modellen für die Fahrzeugquerführung (Fortsetzung)

| | | verbal beschrieben bzw. Korrelationen (qual. Modelle) | positionalistisches Modell (Fuzzy-Logik) | neuronales Netz | adaptives Modell | Vorausschaumodell | Zwei-Ebenen-Modell (Open- und Closed-Loop-Anteile) | linear | quasilinear | nichtlinear | diskontinuierlich | Abtasthaltung oder zeitdiskrete Form | Parameterbestimmung durch Optimierungskriterium | Krümmung des Spurverlaufs (Straßenkrümmung bzw. gedachte Solispur) | Gierwinkefehler / aktueller Gierwinkel | Sichtwinkel | Querabweichung im Schwerpunkt (aktuelle Querlage) | Querlage in Vorausschauentfernung | Querbeschleunigung | Gierwinkelgeschwindigkeit | Schwinkewinkel | Wankwinkel | Kurswinkefehler, Quergeschwindigkeit, Gierbeschleunigung | Lenkmoment | Lenkwinkel | Lenkwinkelgeschwindigkeit | Lenkmoment / Lenkkraft | normales Kurvenfahren | Spurwechselmanöver | Ausweichen Hindernis | Spurhaltung (Geradausfahrt) | Selbstlenkend | schiefe Bremse | μ -Sprung (doppelt oder einfach), Glattfahrs | Besonderheiten / Modellannahmen | | | |
|------|---------------------|---|--|-----------------|------------------|-------------------|--|--------|-------------|-------------|-------------------|--------------------------------------|---|--|--|-------------|---|-----------------------------------|--------------------|---------------------------|----------------|------------|--|------------|------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------|---------------|----------------|--|---------------------------------|--|--|---|
| 1991 | Bösch | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Fujioka & Takubo | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Kageyama & Pacejka | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Fahrverhalten v. a. durch Risikoempfinden beeinflusst. Kurs so gewählt, dass Risiko minimiert. | |
| | Kornhauser | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | neuronales Netz für Querbeschleunigungsregelung autonomer Autobahnfahrzeuge. | |
| | Pommerleau | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Risse | | | | x | | | | | | | | | | | x | x | x | | | | | | | | x | x | | | | | | | | | | x | Rückgekoppeltes Modell. Zusätzlicher Lenkwinkel durch Schreckreaktion |
| 1992 | Taniguchi et al. | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Feratic et al. | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1993 | Neculau | | | | x | | | | | | | | x | | x | x | x | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | mehrere Querabweichungen in unterschiedlichen Vorausschauentfernungen | |
| | Kageyama & Watanabe | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Neusser et al. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1994 | Xi & Qun | | x | | | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ohne Kurswahl | |
| | Liu & Guo | | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1995 | Plöchl & Lugner | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Mitschke & ApeI | | | | | | | | | | | | | | x | x | x | | | | | | | | | | | x | | | | | | | | | | |
| 1996 | Onken | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Kopf | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | MacAdam & Johnson | | | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1997 | ApeI | | | | | | | | | | | | | x | x | x | x | | | | | | | | | | x | x | | | | | | | | | | |
| | Wolter et al. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Unschärfen der Wahrnehmung und Abarbeitung von Handlungsprogrammen berücksichtigt |
| 2002 | Wagner et al. | x | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2003 | Wagner | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabelle 5: Chronologische Übersicht von Modellen für die Fahrzeugquerführung (Fortsetzung)

2.5 Menschliche Parameter des Lenkgefühls

Parallel zu den in den vorangegangenen Kapiteln besprochenen fahrwerkstechnischen Parametern, die einen nicht unerheblichen Einfluss auf das Lenkgefühl haben, existieren noch zahlreiche menschliche Parameter, die ebenfalls einen Einfluss auf das Lenkgefühl besitzen.

Vorweg sollte erwähnt werden, dass in allen nachfolgenden Kapiteln von 2.5 eine strenge Unterscheidung zwischen „erweitertem“ und „engerem“ Lenkgefühl wie in den vorangegangenen Kapiteln nicht mehr erfolgt und auch nicht mehr sinnvoll ist, da davon auszugehen ist, dass der Mensch eine solche Unterscheidung nicht mehr vornimmt. Desweiteren spielen Zeitaspekte der Fahrzeugreaktion eine große Rolle, womit eine gesonderte Betrachtung des „engeren“ Lenkgefühls nicht mehr sinnvoll ist.

Die Ergonomie kommt bei den menschlichen Parametern somit mehr zum Tragen als bei den fahrwerkstechnischen Parametern, weshalb nachfolgend gezielt das Lenkgefühl mit Hilfe von Methoden und Ergebnissen der Ergonomie betrachtet wird. Dabei ist die Vorstellung des in drei Stufen Informationen verarbeitenden Menschen das zentrale Element. Wie in Abbildung 28 zu erkennen ist, nimmt der Fahrer eines Pkw Informationen auf, verarbeitet diese und setzt Informationen an der Lenkung um. Für die Informationsaufnahme sind die Wahrnehmung und die Eigenschaften der beteiligten Sinnesorgane von Bedeutung und für die Informationsumsetzung die Eigenschaften des Hand-Arm-Systems und die geometrischen Verhältnisse beim Lenken (Anthropometrie). Der gesamte Ablauf des Informationsprozesses, bestehend aus Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung und Informationsumsetzung, wird durch die Aufgabenstellung (Art der Regelstrecke) und die möglichen bzw. notwendigen Regelstrategien beeinflusst.

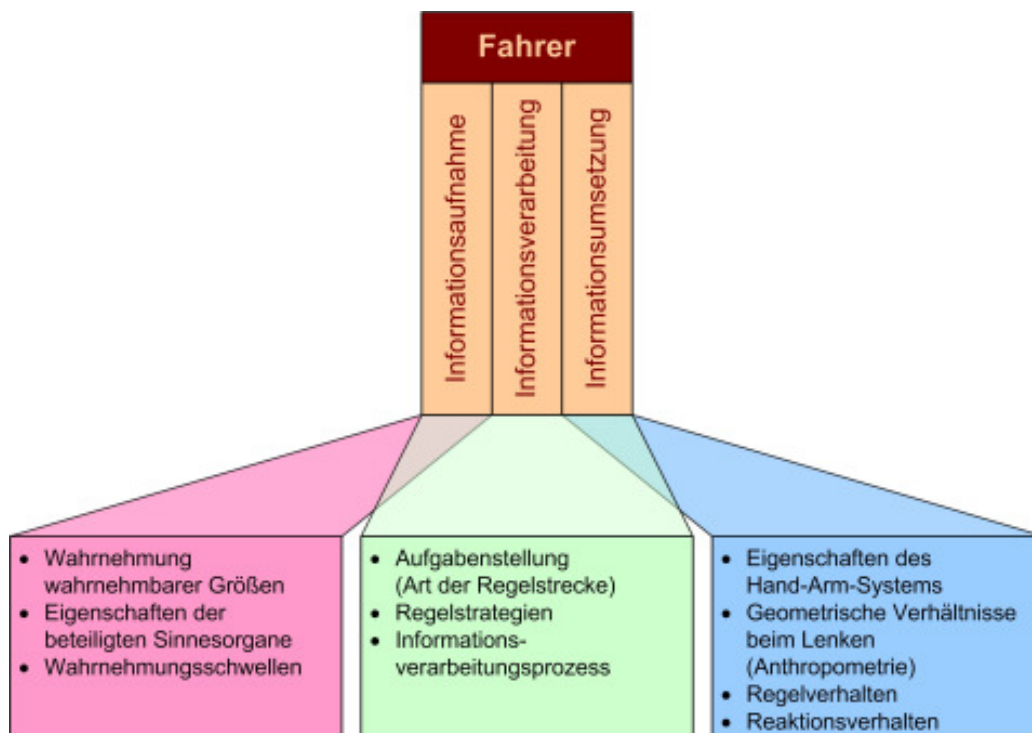


Abbildung 28: Informationsverarbeitungsprozess beim Lenken eines Fahrzeugs und zugehörige menschliche Parameter

Alle drei Teilprozesse werden in den nachfolgenden Kapiteln näher erörtert, zunächst muss aber noch der Begriff des Komforts geklärt werden, weil dieser gerade in Zusammenhang mit der Fahrzeugführung von hoher Bedeutung für den Fahrer ist. Lenkkomfort und Lenkgefühl hängen unmittelbar zusammen. Der Lenkkomfort wirkt vor allem bei der

Informationsaufnahme und bei der Informationsumsetzung. Fehlt ein gewisses Maß an Lenkkomfort, so ist auch das subjektive Urteil über das Lenkgefühl weniger positiv. Im nachfolgenden Kapitel wird der Komfortbegriff näher erläutert.

In der vorliegenden Arbeit werden Expertenfahrer von Normalfahrern soweit erforderlich voneinander unterschieden. Expertenfahrer sind solche, die aufgrund ihres Berufes sich intensiv mit der Lenkung und dem Handling eines Fahrzeugs auseinandersetzen und deren Wissensstand dadurch höher ist. Bei Normalfahrern wird zwar auch von hochgeübten Fahrern ausgegangen, die Jahreskilometerleistung und der Wissensstand werden jedoch als geringer angenommen.

2.5.1 Der Begriff des Komforts

Der Begriff des Komforts ist wissenschaftlich nicht genau definiert. Nach *Bubb* (2003b) bedeutet er soviel wie Behaglichkeit, Bequemlichkeit und Zufriedenheit, bezieht sich aber auch auf den Luxus einer Ausstattung. Somit ist „Komfort“ eine Umschreibung für das Gefallen oder die Ästhetik, die eine bestimmte Person mit einer bestimmten Tätigkeit (z.B. Cabrio fahren) oder einem bestimmten Gegenstand in Verbindung bringt. Wird beispielsweise ein Stuhl als komfortabel bezeichnet, so bezieht sich das auf das Gefallen des Designs und die Vorstellung, dass der Stuhl bequem ist.

Diskomfort ist hingegen etwas, was beim Menschen Unbehaglichkeiten im Sinne des Erleidens hervorruft. Dies kann durch

- § die Anthropometrie (unkomfortable Körperhaltungen, Zwangshaltungen, etc.),
- § das Klima (z.B. hohe Temperatur und Luftfeuchte),
- § den Schall (störende Geräusche),
- § das Licht (Helligkeit, Farbstich, etc.)
- § und den Geruch (z.B. übel riechender Gegenstand) hervorgerufen werden.



Abbildung 29: Diskomfortpyramide zur Wichtung einzelner möglicher Diskomfortwirkungen auf den Menschen

Gemäß einer Untersuchung von *Krist* (1993) bewirken die zuvor genannten Faktoren eine unterschiedlich starke Diskomfortwirkung. Mit Hilfe einer Befragung konnte eine Reihenfolge gefunden werden, die sich in einer Pyramide (Abbildung 29) bildlich darstellen lässt. Diese Pyramide wird als Diskomfortpyramide und manchmal fälschlicherweise als Komfortpyramide bezeichnet. Demzufolge wird auch klar, warum nur der Diskomfort mit angewandten Methoden der Psychophysik zu untersuchen ist, da der Komforteindruck vorwiegend von individuellen Einflüssen wie

- § den Vorstellungen,
- § der Stimmung,

- § den Eindrücken auf die Sinnesorgane
- § und der Tagesform abhängig ist (*Bubb* 2002a, S. 13).

Diese für den individuellen Komforteindruck maßgeblichen Einflüsse lassen sich durch wissenschaftliche Betrachtung kaum objektivieren und allgemeingültig auf alle Menschen übertragen.

Weiterhin muss erwähnt werden, dass Komfort und Diskomfort zwei zueinander orthogonale Dimensionen sind, was bedeutet, dass sie voneinander unabhängig sind. So können sowohl ein hoher Komfort und ein hoher Diskomfort gleichzeitig vorhanden sein. Beispielsweise kann die Fahrt mit einem reinrassigen Roadster bei bestimmten Fahrern einen hohen Komfort (= Gefallen) hervorrufen, obwohl durch harte Federung, Sonneneinstrahlung, Lärm und Zugigkeit ebenso ein hoher Diskomfort vorhanden ist. Es bleibt nun letzten Endes jedem einzelnen überlassen abzuwägen, welchen Diskomfort er im Zusammenhang mit einer für ihn komfortablen Tätigkeit für akzeptabel hält, was allerdings eher unbewusst geschehen wird.

Diese Vorstellung des menschlichen Abwägens, welchen Diskomfort er für das Durchführen einer in seinen Augen komfortablen Handlung in Kauf genommen wird, führt häufig zu dem falschen Schluss wie ihn *Herzberg* (1958) aufstellt, dass Komfort die Abwesenheit von Diskomfort ist, also das beides voneinander abhängig ist (*Bubb* 2003). Folglich sollte es ein Ziel sein, den Diskomfort so weit als möglich zu vermindern und den Komfort gleichzeitig zu maximieren.

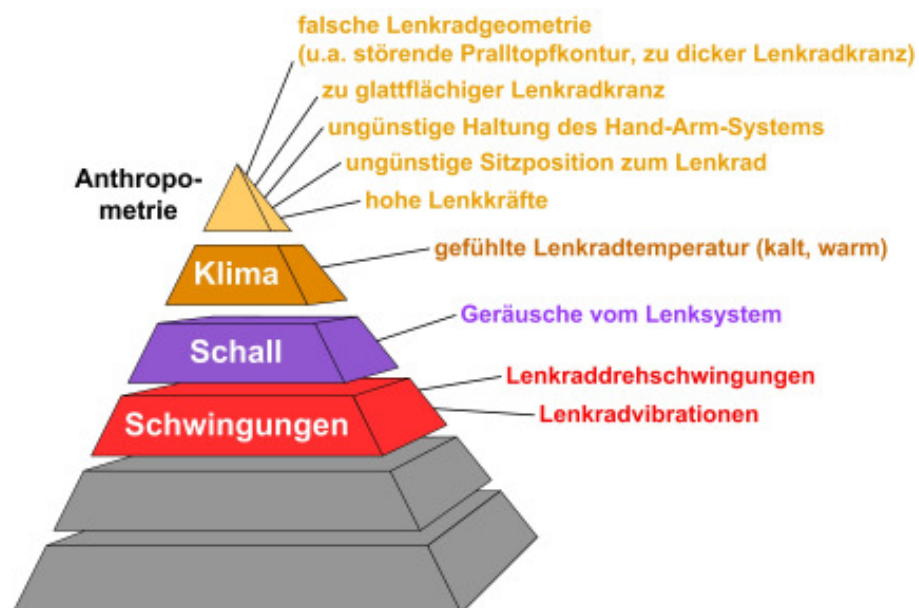


Abbildung 30: Diskomfortpyramide mit möglichen Diskomfortwirkungen beim Lenken eines Kraftfahrzeugs

Ein Automobil kann beim Fahrer auf allen Pyramidenebenen einen Diskomfort bewirken, die Lenkung nur auf den drei Ebenen der Schwingungen, des Schalls, des Klimas und Anthropometrie (siehe Abbildung 30).

Einen Diskomfort seitens der **Anthropometrie** kann durch ungünstige Haltung des Hand-Arm-Systems (z.B. länger dauernde Haltung außerhalb der Komfortwinkel), durch eine ungünstige Sitzposition zum Lenkrad (z.B. seitliche verdreht, seitlich versetzt) oder durch unzulängliche Lenkradgeometrie (z.B. störende Pralltopfkontur) hervorgerufen werden. Die Haptik ist nicht als eigenes Segment in der Pyramide zu finden, kann jedoch dem Anthropometrie-Diskomfort zugeordnet werden. Beim Lenken kann ein Diskomfort durch zu hohe Lenkkräfte bzw. Rückstell- und Haltekräfte hervorgerufen werden.

Diskomfortwirkungen seitens des **Klimas** können bei Lenkrad nur durch ein zu warmes bzw. kaltes Lenkrad hervorgerufen sein. Nicht zuletzt ein Grund, warum manche Hersteller eine Lenkradheizung anbieten.

Störender als ein Diskomfort der durch die Anthropometrie hervorgerufen wird, ist gemäß der Komfortpyramide der **Schall**. Der Begriff „Schall“ meint im Zusammenhang mit der Betätigung der Lenkung Geräusche die aus dem Lenksystem (z.B. durch die Servopumpe) heraus als störend empfunden. Bezogen auf eine hydraulische Servolenkung nennt *Stoll* (1992, S. 60-61) sieben Arten von Geräuschen (Schall), die im Innenraum des Fahrzeugs hörbar sein können. Im Einzelnen ist das

- das Heulen oder Schreien der Servopumpe,
- das Zischen oder Rattern der Ventile,
- das Leitungsschlagen,
- das Abschaltzischen bei hydraulischer Lenkbegrenzung,
- sowie Brumm- und Dröhngeräusche unterschiedlicher Ursache.

Die letzte und somit größte Diskomfortwirkung kann beim Lenken durch Schwingungen aller Art hervorgerufen werden. Das können Lenkraddreherschwingungen, die durch die Räder (z.B. bremsinduziertes Schwingen) oder durch Fahrbahnstörungen erzeugt werden, sein oder Lenkradvibrationen. Gemäß der größten Diskomfortwirkung sollten Schwingungen am Lenksystem eine hohe Beachtung zugemessen werden, weil dadurch die Stößigkeit mit ins Spiel kommt.

2.5.2 Informationsaufnahme (Wahrnehmung)

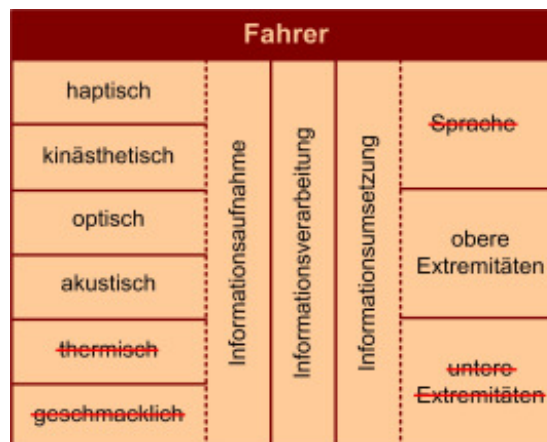


Abbildung 31: Informationsverarbeitungsschema des Menschen für den Fahrer eines Kraftfahrzeugs

Die Informationsaufnahme steht am Anfang des menschlichen Informationsverarbeitungsprozesses, der sich, wie zu Beginn des Kapitels dargelegt, in die Phasen der Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung und der Informationsumsetzung einteilen lässt. Die Informationsaufnahme bzw. die Wahrnehmung selbst kann, wie in der Ergonomie häufig zu finden, in sechs Informationsaufnahmekanäle unterteilt werden (Abbildung 31). Die Einteilung orientiert sich an den einzelnen Sinnen des Menschen und die Aufnahmekanäle werden deshalb auch als Sinneskanäle bezeichnet, deren Aufgabe es ist, dem Menschen zu ermöglichen, sich ein möglichst genaues Abbild der Umgebung machen zu können. Die nachfolgenden Kapitel werden die einzelnen Sinneskanäle näher beschreiben. Die Beurteilung der Lenkung, des Lenkverhaltens und der Fahreigenschaften eines Kraftfahrzeugs wird folglich also wesentlich durch die Sinneseindrücke bestimmt.

| Sinnesorgan | | Auge | Gleichgewichtssinn | Ohr | Haut | Sehnen- und Gelenkrezeptoren |
|-----------------------------|----------------------|--|--------------------|--------------|--------------------|---|
| Information über | | optisch | vestibulär | akustisch | taktil | propriozeptiv |
| absolute Bewegung | Längsdynamik | v | a_x | - | a_x | a_x |
| | Querdynamik | $\dot{\psi}, \beta, \kappa$ | $a_y, \ddot{\psi}$ | - | $a_y, \ddot{\psi}$ | $a_y, \ddot{\psi}$ |
| Bewegung relativ zur Umwelt | Längsdynamik | $\Delta s, \Delta v$ | - | - | - | - |
| | Querdynamik | $\Delta y, \Delta \psi, \Delta \gamma$ | - | - | - | - |
| Umwelt | Straße | b, κ_{Str}, α | - | - | - | - |
| | Verkehrsteilnehmer i | $v_i, \Delta y_i, \dots$ | - | - | - | - |
| Regelstrecke | Sollwertvorgabe | δ_{LR} | - | - | F_{FP}, F_{BP} | $\delta_{LR}, \alpha_{FP}, \alpha_{BP}, F_{FP}, F_{BP}$ |
| | Zustandsgröße | - | - | $L_{P, FzG}$ | M_{LR} | M_{LR} |

Tabelle 6: Informationsaufnahme einzelner Parameter beim Fahren (nach Eckstein 2001, S. 16)

Tabelle 6 zeigt nach Eckstein (2001, S. 16) die von den einzelnen menschlichen Sinnesorganen wahrgenommen bzw. in Zusammenhang mit der Wahrnehmung stehenden Parameter für die Längs- und Querdynamik, aus der Umwelt und der zugehörigen Regelstrecke. Die Darstellung macht deutlich, dass der überwiegende Teil der Informationen vom optischen Sinneskanal aufgenommen werden.

In der Tabelle 6 stehen folgenden Abkürzungen für die entsprechenden Parameter:

- | | | | |
|------------------------|--|---------------|--|
| δ_{LR} | eingestellter Lenkradwinkel | v | Geschwindigkeit |
| M_{LR} | Lenkmoment am Lenkrad | Δv | Differenzgeschwindigkeit zum Vordermann |
| $L_{P, FzG}$ | Schalldruckpegel des Fahrgeräuschs | v_i | Geschwindigkeit andere Verkehrsteilnehmer |
| b | Straßenbreite | Δy | Querabweichung des Fahrzeugs |
| α_{FP} | Fahrpedalwinkel (Gaspedalwinkel) | Δs | Abstand zum Vordermann bzw. Abstandsänderung zum Vorfahrenden |
| α_{BP} | Bremspedalwinkel | ψ | Gierwinkel (in Ableitungen Geschwindigkeit und Beschleunigung) |
| α | Straßensteigung | $\Delta \psi$ | Gierwinkeländerung |
| a_y | Querbewegung | F_{FP} | Fahrpedalkraft, Gaspedalkraft |
| a_x | Längsbewegung | F_{BP} | Bremspedalkraft |
| β | Schwimmwinkel | | |
| $\Delta \gamma$ | Kurswinkelfehler | | |
| κ, κ_{Str} | Krümmung der des Straßenverlaufs (Kurve) | | |

| Information | visuell | vestibulär | haptisch | akustisch |
|------------------------------------|---------|------------|----------|-----------|
| Spurabweichung | X | | | |
| Quergeschwindigkeit | X | | | |
| Fahrgeschwindigkeit | X | | | X |
| Längs- und Querbeschleunigung | | X | X | |
| Winkel Fahrzeuglängsachse-Sollkurs | X | | | |
| Giergeschwindigkeit | X | | | |
| Gierbeschleunigung | | X | | |
| Neigungswinkel | X | X | | |
| Lenkwinkel | X | | X | |
| Kräfte an Stellgliedern | | | X | |
| Fahrgeräusche | | | | X |

Tabelle 7: Zuordnung von Fahrinformationen und Sinneskanälen des Menschen (nach Schweigert 2003)

Tabelle 7 enthält nach Schweigert (2003) eine Übersicht über die Informationen, die beim Autofahren von den Informationskanälen des Menschen aufgenommen werden. Der Begriff visuell ist gleichbedeutend mit der optischen Informationsaufnahme und „vestibulär“ umschreibt die kinästhetische Wahrnehmung. Zu bemerken ist, dass gemäß der Darstellung von Schweigert (2003) der Lenkwinkel nicht nur haptisch sondern auch optisch wahrgenommen wird. Ebenso wird die Giergeschwindigkeit nach obiger Tabelle nur optisch und nicht zusätzlich vestibulär (kinästhetisch) aufgenommen. Ob letzteren auch tatsächlich so ist, bedarf noch weiterer Klärung.

Die nachfolgende Abbildung 32 zeigt das Informationsverarbeitungsmodell des Menschen bezogen auf die Lenkaufgabe, welches für die Erklärung der zeitlichen Aspekte bezogen auf den Regler „Mensch“ hilfreich ist.



Abbildung 32: Prinzip der Informationsaufnahme durch den Fahrer bzgl. der Lenkaufgabe

Die Informationsaufnahme erfolgt im Rahmen der Lenkaufgabe über den optischen, kinästhetischen, akustischen und haptischen Sinn. Der thermische und geschmackliche Sinn spielen bei der Erfüllung der Lenkaufgabe durch den Menschen keine Rolle. Die Eigenschaften der einzelnen Sinneskanäle werden in den nachfolgenden Kapiteln näher erläutert. Die Information über den anliegenden Druck am Sitz wird vom Menschen haptisch über die Druckrezeptoren der Haut aufgenommen (Abbildung 32 Nr.1). Ebenso werden die Beschaffenheit der Lenkradoberfläche (Abbildung 32 Nr. 2), die Winkelstellung des Lenkrades (Abbildung 32 Nr. 4) und die dort anliegenden Kräfte (Abbildung 32 Nr. 5) haptisch wahrgenommen. Die Wahrnehmung des eingestellten Lenkwinkels erfolgt, unter Einschränkungen, auch optisch.

Eine exakte Wahrnehmung der Winkellage des Fahrzeugs ist durch die kinästhetische Informationsaufnahme nicht möglich, sondern es wird die Resultierende (Abbildung 32 Nr. 5) aus Erdbeschleunigung (Abbildung 32 Nr. 6) und Querschleunigung (Abbildung 32 Nr. 7) wahrgenommen. Die zusätzliche Informationsaufnahme durch den optischen Kanal ermöglicht dem Fahrer eine viel genauere Bestimmung des Wankwinkels (Abbildung 32 Nr. 10).

Die Gierwinkelbeschleunigung (Abbildung 32 Nr. 8) und Querschleunigung können hingegen sehr exakt durch den kinästhetischen Sinn wahrgenommen werden. Ob die Gierwinkelgeschwindigkeit (Abbildung 32 Nr. 9) auch über den kinästhetischen Sinneskanal erfolgen kann, klärt das Kapitel 2.5.2.1 „Kinästhetische Wahrnehmung“, sie kann aber aus der optischen Wahrnehmung mit Hilfe der Bildverschiebungsvektoren vom Fahrer bestimmt werden. Der akustische Kanal ist bei der Erfüllung der Lenkaufgabe nur mit der Wahrnehmung der Fahrwerksgeräusche (Reifenquietschen, Reifenpoltern, Wasserverdrängung bei Nässe, usw.) (Abbildung 32 Nr. 12) und Windgeräusche (Fahrtwindgeräusche) (Abbildung 32 Nr. 11) beteiligt. Nachdem sämtliche Informationen im Rahmen der Lenkaufgabe aufgenommen wurden, werden diese durch den Menschen verarbeitet. Die Informationsumsetzung erfolgt durch die Armmuskulatur am Bedienelement Lenkrad.

Bei der Sinneswahrnehmung sind zwei Typen von Schwellen zu unterscheiden. Zum einen die Differenzschwelle und zum anderen die Absolutschwelle. Der Differenzschwellwert gibt denjenigen Wert an, um den sich ein vorhandener Wert ändern muss, damit diese Änderung durch den Menschen wahrnehmbar ist. Differenzwahrnehmungsschwellen folgen in der Regel dem Weberschen Gesetz, das besagt, dass eine Reizänderung umso größer sein muss, je größer der Ausgangsreiz (Grundreiz) ist, um als verändert wahrgenommen zu werden. Beim Lenken wäre das die Wahrnehmung eines sich ändernden Lenkmoments. Der Absolutschwellwert gibt denjenigen Wert an, der notwendig ist, um eine Größe ausgehend von einem Betrag von null wahrnehmen zu können. Beim Lenken wäre das das erste Wahrnehmen eines von null ansteigenden Lenkmoments. Allerdings ist nicht gänzlich ausgeschlossen, dass das Webersche Gesetz auch für anderen Größen am Lenkrad, wie z.B. dem Lenkwinkel gültig besitzt.

Die nachfolgenden Kapitel erörtern detaillierter die Eigenschaften der einzelnen Wahrnehmungskanäle.

2.5.2.1 Kinästhetische Wahrnehmung

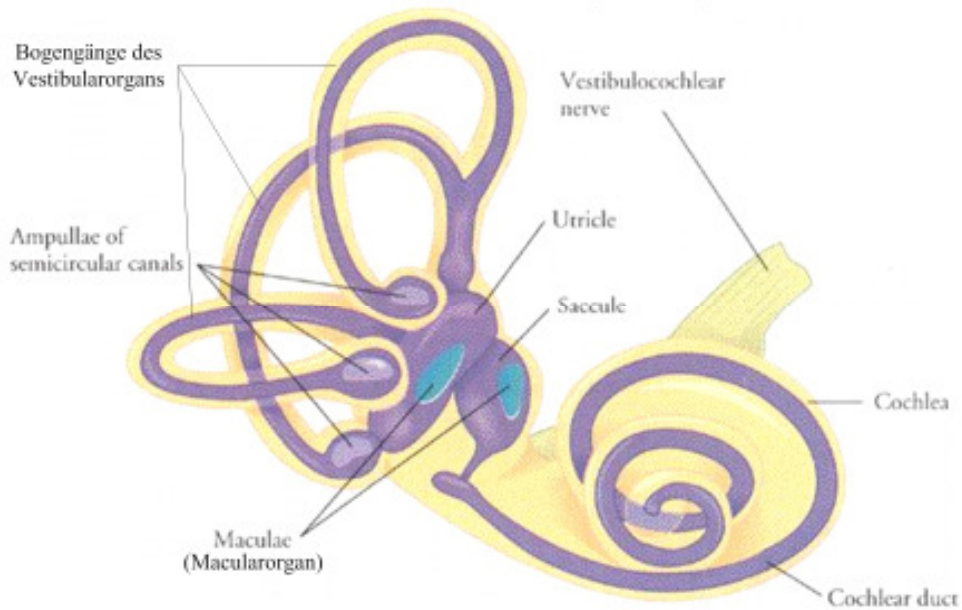


Abbildung 33: Vestibularorgan, Macularorgan und räumlich-funktionale Anbindung an die Gehörschnecke
(Bild: <http://www.gened.arizona.edu/jallen/psy101lectures/sensation/Vestibular.jpg>)

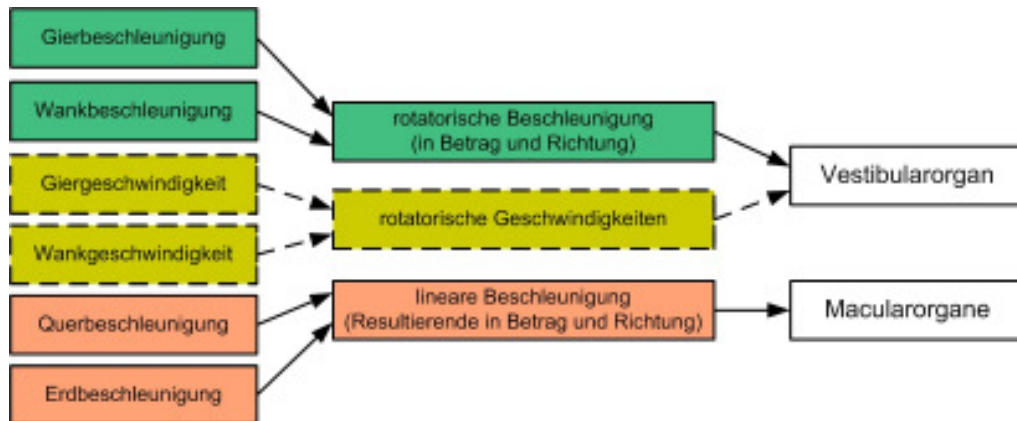


Abbildung 34: An der kinästhetische Wahrnehmung beteiligte Organe

Unter der kinästhetischen Wahrnehmung ist der Sinneseindruck des menschlichen Organismus über die Lage und Verschiebung des eigenen Körpers im Raum zu verstehen. Er wird auch als Gleichgewichtssinn bezeichnet. Die notwendigen Informationen werden maßgeblich durch die Macularorgane und das Vestibularorgan aufgenommen (siehe Abbildung 33 und Abbildung 34). Bei der kinästhetischen Wahrnehmung ergänzen sich beide Organe in hohem Maße. Die Macularorgane nehmen lineare Beschleunigungsinformationen auf und vermitteln deshalb die Wahrnehmung der Gravitationsrichtung der Erde (Erdbeschleunigung). Treten Beschleunigungen in mehreren Raumrichtungen auf, wie das beim Durchfahren einer Kurve der Fall ist (neben der Erdbeschleunigung zusätzlich Quereschleunigung), nehmen die Macularorgane nur noch die Resultierende wahr (Abbildung 35). Lineare Geschwindigkeiten sind durch die menschliche kinästhetische Wahrnehmung nicht erfassbar. Beispielsweise ist ein Fühlen oder Abschätzen der Geschwindigkeit eines Flugzeuges ohne Außensicht (optische Informationsaufnahme) nicht möglich.

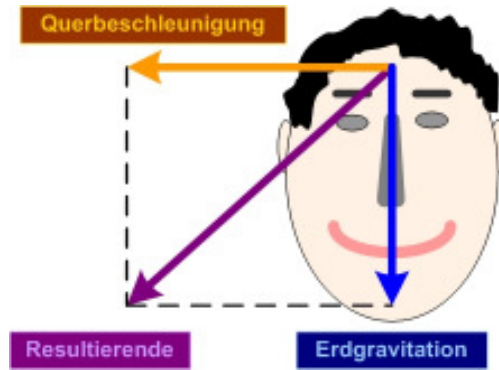


Abbildung 35: Auf den Gleichgewichtssinn einwirkende resultierende Kraft aus Querbeschleunigung und Erdgravitation

In diesem Zusammenhang kommt immer wieder die Frage auf, ob eine Neigung des Kopfes zur Seite (zum Inneren oder Äußeren zur Kurve) eine Veränderung der kinästhetischen Wahrnehmung und somit des Lenkgefühls im erweiterten Sinne bewirkt. Diese Frage dürfte im Zusammenhang mit dem Lenken eines Kraftfahrzeugs eher verneint werden, wenn man in die Überlegung das Reafferenzprinzip von v. Holst (1957) (Abbildung 36) mit einbezieht.

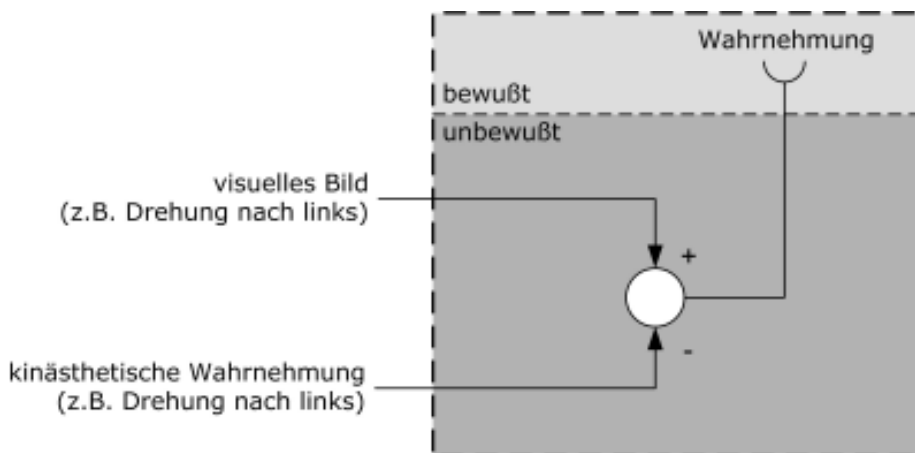


Abbildung 36: Reafferenzprinzip nach v. Holst (1957)

Das Prinzip besagt, dass der Mensch unterscheiden kann, ob sich die Welt dreht oder ob er sich selbst in der Welt bewegt und dass die Kopfneigung relativ zum Oberkörper über die Halsmuskulatur quasi gemessen wird. In beiden Fällen dreht sich das optische Abbild der Welt auf dem Augenhintergrund. Das Ausmaß der Kopfneigung bei der Kurvendurchfahrt ist beim Fahrer relativ gering. Zu dem Ergebnis kommt eine Untersuchung, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführt wurde (siehe Kapitel 3.3.1 „Versuch 1 – Querbeschleunigungsmessung in Kopfnähe“). Der Fahrer hält seinen Kopf beim Anlenken einer Kurve (auch mit hoher Querbeschleunigung) deutlich ruhiger als die Mitfahrer.

Das Vestibularorgan ist für die Wahrnehmung rotatorischer Körperbewegungen von Bedeutung. Es werden Rotationsbewegungen durch drei flüssigkeitsgefüllte und senkrecht aufeinander stehende Bogengänge wahrgenommen. Um die zugehörigen Rotationsachsen sind alle Beschleunigungen wahrnehmbar (zugehörige Fahrzeugbewegungen, wie Rollen bzw. Wanken, Gieren und Nicken). Inwieweit Drehgeschwindigkeiten vom Menschen durch das Vestibularorgan wahrnehmbar sind, ist aus der wissenschaftlichen Literatur nicht klar zu entnehmen, weil die Trennung zwischen Gierwinkelgeschwindigkeit und Gierwinkelbeschleunigung dort nicht scharf genug vorgenommen und häufig vermischt wird. In der einschlägigen Literatur werden sowohl Wahrnehmungsschwellen für

Winkelgeschwindigkeiten als auch Winkelbeschleunigungen angegeben. Hierzu ist die Untersuchung von *Goldberg und Fernandez* (1971) zu erwähnen, die zu dem Ergebnis kommen, dass die Cupula (Sinneskörper, der unter der Flüssigkeitsbewegung ausgelenkt wird) nicht auf die momentane Winkelbeschleunigung, sondern die momentane Winkelgeschwindigkeit reagiert und sich somit ähnlich wie ein Torsionspendel mit hoher Dämpfung verhält.

Relativ gut bekannt ist hingegen der Effekt des „Drehwurms“. Er entsteht dadurch, dass sich die Flüssigkeit im Vestibularorgan nach einer bestimmte Zeit durch Reibungseffekte nahezu mit der gleichen Geschwindigkeit wie die Sinneshärchen im entsprechenden Bogengang bewegt, so dass keine Relativgeschwindigkeit mehr vorhanden ist. Bei einem plötzlichen Stopp der Rotationsbewegung läuft die Flüssigkeit aufgrund der Trägheit weiter und reizt durch Auslenkung die Sinneshärchen. Der optische Sinneskanal liefert die Information, dass der Körper nicht mehr rotiert. Dadurch wird dem Körper eine Drehung seiner selbst vorgespielt, die tatsächlich nicht vorhanden ist. In einem realen Fahrzustand dürfte dieser Effekt nur äußerst selten auftreten, wie beispielsweise bei mehrfacher Umrundung eines Kreisverkehrs.

Ob nun eine Wahrnehmung der Rotationsgeschwindigkeit seitens des Vestibularorgan möglich ist oder nicht, bedarf also noch weiterer Klärung. Um auf der sicheren Seite zu sein, sollte aber davon ausgegangen werden, dass dies der Fall ist. Eine Wahrnehmung der Gierwinkelgeschwindigkeit ist aufgrund der Physiologie dann nicht mehr möglich, wenn es zu keiner Reizung der Sinneshärchen in den Bogengängen des Vestibularorgans mehr kommt. Das liegt dann vor, wenn es zwischen der Flüssigkeit und der Wand keine Relativgeschwindigkeit und somit keine Auslenkung der Härchen mehr gibt. Beim Einlenken von einer Geraden in eine Kurve würde im ersten Moment die Flüssigkeit in den Bogengängen aufgrund der Trägheit verharren, während sich das Vestibularorgan selbstverständlicherweise aufgrund der Fahrzeugbewegung mitdreht (Auslenkung und Reizung der Sinneshärchen).

Durch die auftretende Reibung zwischen Wand und Flüssigkeit würde dann im weiteren Verlauf die Flüssigkeit auf die Gierwinkelgeschwindigkeit des Fahrzeugs bzw. der Bogengangwand beschleunigen und das solange bis keine Relativgeschwindigkeit mehr vorliegt. Es ist also möglich, dass das Fahrzeug bzw. die Bogengangwand eine konstante Gierwinkelgeschwindigkeit erreicht haben und somit die Gierwinkelbeschleunigung gleich null ist, die Flüssigkeit dem aber nachhinkt und auf den entsprechenden Wert der Winkelgeschwindigkeit beschleunigt und die Sinneshärchen weiter ausgelenkt werden.

Es lässt sich nicht so ohne weiteres abschätzen, wie lange dieser Nachlaufeffekt andauert und wie diese kinästhetische Sinneswahrnehmung mit der optischen Wahrnehmung der Bildverschiebungsvektoren seitens des Menschen beurteilt wird. Demzufolge sollte nun deutlich werden, dass den Winkelbeschleunigungen (bzgl. Gieren und Rollen) eine höhere Bedeutung als den Winkelgeschwindigkeiten zugemessen werden sollte. Die relevanten Wahrnehmungsschwellen des kinästhetischen Sinns beschränken sich bei der Fahrzeugquerdynamik auf transversale Längsbeschleunigungen (Querbeschleunigungen), Gierbeschleunigungen und Rollbeschleunigungen (Wanken).

Zu den Schwellwerten bezüglich der Gierbeschleunigung wurden schon von Beginn der 20er Jahre an zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Die Werte für die Schwellwerte der Gierbeschleunigung aus den einzelnen Untersuchungen sind Tabelle 8 (*Guedry* 1974) zu entnehmen. Die dort enthaltenen Daten sind jedoch nicht jünger als aus dem Jahr 1965. Es ist hingegen bekannt, dass später auf Raumflügen einige Experimente zu den menschlichen Wahrnehmungsschwellen durchgeführt wurden.

| Schwellwerte Gierbeschleunigung [$^{\circ}/s^2$] | | | | |
|--|----------------|----------------|-------------------|----------------------------|
| Forschungsgruppe (Jahr) | minimal | maximal | Mittelwert | Bandbreite (n-fach) |
| van Wulfften, Palthe (1922) | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 1,00 |
| Dodge (1923) | 1 | 2 | 1,5 | 2,00 |
| Tumarkin (1937) | 0,2 | 0,2 | 0,2 | 1,00 |
| Christian (1939) | 0,13 | 2 | 1,065 | 15,38 |
| Graybiel et al. (1948) | 0,12 | 0,2 | 0,12 | 1,67 |
| Groen und Jongkees (1948) | 0,18 | 2 | 1,09 | 11,11 |
| MacCorquodale (1948) | 0,1 | 0,15 | 0,125 | 1,50 |
| DeVries (1949) | 0,9 | 4 | 2,45 | 4,44 |
| Graybiel et al. (1949) | 0,035 | 4 | 2,0175 | 114,29 |
| Hallpike et al. (1952) | 0,2 | 2 | 1,1 | 10,00 |
| Hilding (1953) | 0,25 | 3 | 1,625 | 12,00 |
| DeVries und Schierbeek (1953) | 0,9 | 1,7 | 1,3 | 1,89 |
| Hallpike et al. (1953) | 0,2 | 0,7 | 0,45 | 3,50 |
| v. Békésy (1955) | 0,4 | 1,5 | 0,95 | 3,75 |
| Mann und Ray (1956) | 0,035 | 0,13 | 0,0825 | 3,71 |
| Mann und Ray (1956) | 0,06 | 0,035 | 0,0475 | 1,71 |
| Montandon und Russbach (1956) | 0,5 | 1 | 0,75 | 2,00 |
| Roggeveen und Nijhoff (1956) | 1,3 | 1,8 | 1,55 | 1,38 |
| Hallpike et al. (1957) | 0,2 | 1 | 0,6 | 5,00 |
| Johnson (1959) | 0,2 | 0,5 | 0,35 | 2,50 |
| Clark und Stewart (1962) | 0,12 | 0,17 | 0,145 | 1,42 |
| v. Diringshofen et al. (1964) | 0,26 | 1 | 0,63 | 3,85 |
| Meiry (1965) | 0,1 | 0,2 | 0,15 | 2,00 |
| Median (50%/50%) | 0,2 | 1,0 | 0,63 | - |
| 95. Perzentil | 0,990 | 3,900 | 1,97825 | - |
| 5. Perzentil | 0,035 | 0,132 | 0,08625 | - |

Tabelle 8: Ermittelte Wahrnehmungsschwellwerte der Gierbeschleunigung (nach Guedry 1974)

Wie in der Tabelle 8 zu erkennen ist, unterscheiden sich die ermittelten Schwellwerte voneinander erheblich (bis zu einer Zehnerpotenz). Bei den meisten Forschungsgruppen sind Wertebereiche angegeben, innerhalb derer sich die Schwellwerte für die Wahrnehmung der Gierbeschleunigung bewegen. Die Bandbreiten sind teilweise sehr groß. Um aus diesen Daten einen geeigneten Wert für die Wahrnehmungsschwelle ermitteln zu können, müssen geeignete statistische Kennzahlen angewendet werden.

Für die maximalen und minimalen Werte sind jeweils der Median und das 95. Perzentil aus den verschiedenen Literaturangaben berechnet. Der Median ist der Wert, bei dem genauso viel Fälle einer Verteilung oberhalb wie unterhalb liegen (Bortz 1993, S. 38). Der Medianwert darf nicht mit dem Mittelwert (arithmetisches Mittel) verwechselt werden. Beim 95. Perzentil sind 95% aller Fälle einer Verteilung unterhalb des zugehörigen Wertes. Sollen Schwellwerte in ein Diagramm mit entsprechenden Fahrzeugmesswerten (z.B. bzgl. der

Querbewegung) aufgetragen werden, sollte das 95. Perzentil verwendet werden, weil dadurch gewährleistet ist, dass die entsprechenden kinästhetischen Reize vom überwiegenden Teil der Fahrer (95%) bereits bemerkt werden. Wichtig ist, dass sich die beiden Perzentil-Werte und der Median nicht aus den einzelnen Versuchen ergeben, sondern es werden alle in der Tabelle erwähnten Untersuchungsergebnisse als eine Stichprobe angesehen.

Zusätzlich sollte erwähnt werden, dass es jüngere Untersuchungen gibt (siehe nachfolgend), die aufgrund verbesserter Messtechnik und modernerer Versuchsdurchführung unter Umständen besser anwendbare Ergebnisse und Werte liefern als die in der Tabelle 8.

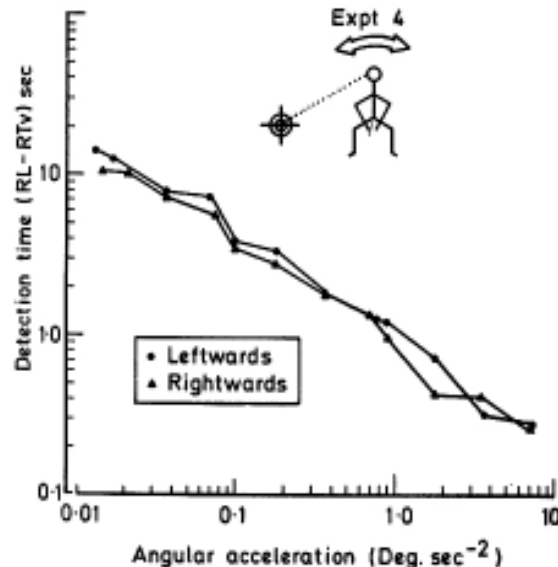


Abbildung 37: Wahrnehmungszeit in Abhängigkeit der Wankbeschleunigung bei optischer Fixation (Gundry 1978a)

Eine Untersuchung für Wahrnehmungsschwelle für Wankbeschleunigungen führte Gundry (1978a) anhand männlicher Militärangehöriger durch. Die Ergebnisse sind in der Abbildung 37 zu sehen. Dort ist in einer logarithmierten Darstellung ein deutlicher proportionaler Zusammenhang zwischen Wankbeschleunigung und der benötigten Detektierungszeit erkennbar. Je größer die Wankbeschleunigung, desto geringer die Detektierungszeit. Unter der Voraussetzung der linearen Extrapolation (in einer logarithmischen Darstellung) kann für die Zielzeit von 100 bis 150 ms eine Mindestbeschleunigung von in etwa 10 °/s² angegeben werden.

Zur Wahrnehmung von Giergeschwindigkeit in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz und der Aufgabenstellung führten Kolev et al. (2000) durch. In Abbildung 38 ist als Ergebnis zu sehen, dass die Wahrnehmungsschwelle nur wenig von der Frequenz und Aufgabenstellung abhängt.

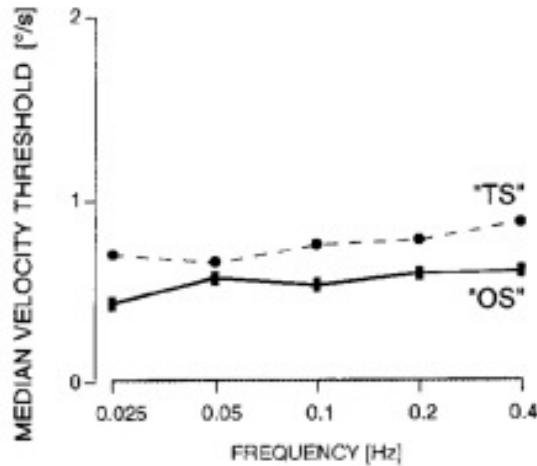


Abbildung 38: Wahrnehmungsschwellen der Giergeschwindigkeit in Abhängigkeit der Frequenz und zweier verschiedener Aufgaben (Kolev et al. 2000)

Ebenso wie Kolev et al. (2000) kommen Muragushi et al. (2006) zu dem Schluss, dass die Wahrnehmungsschwellen für die Giergeschwindigkeit nahezu unabhängig von der Frequenz sind (siehe Abbildung 39). Jedoch untersuchten Muragushi et al. (2006) die beiden Frequenzen 0,5 und 1 Hz mit einer sinus- und dreiecksförmigen Erhöhung der Giergeschwindigkeit und des Gierwinkels. Kolev et al. (2000) untersuchten niedrigere Anregungsfrequenzen. Als Wahrnehmungsschwellwert für die Giergeschwindigkeit ermittelten Muragushi et al. (2006) im Vergleich zu Kolev et al. (2000) einen niedrigeren Wert von ca. 0,09 °/s.

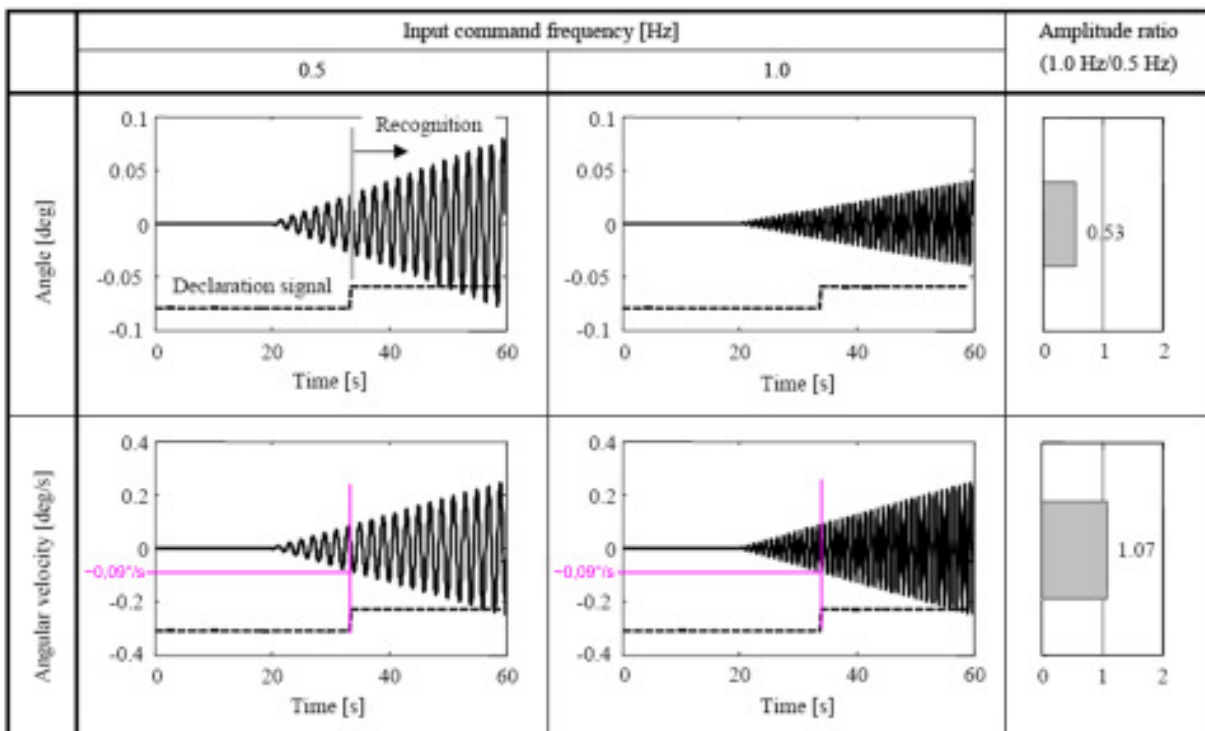


Abbildung 39: Versuchsergebnisse für die Wahrnehmung einer sinus- und dreiecksförmig ansteigenden Gierbewegung (Muragushi et al. 2006)

Desweiteren verglichen Muragushi et al. (2006) die in ihren Versuchen ermittelten Wahrnehmungsschwellen für die rotatorischen Fahrzeugbewegungen Nicken, Rollen, Gieren und die linearen Fahrzeugbewegungen in vertikaler und lateraler (Querbeschleunigung) Richtung. Bei diesem Vergleich wird zwischen visuellen Informationen (visual information)

und kinästhetischen, haptischen Informationen (body sensory information) unterschieden. Betrachtet man die ermittelten Wahrnehmungsschwellen für die unterschiedenen Informationskanäle, so lässt sich folgendes daraus schließen:

1. Die Wahrnehmungsschwellen für das Nicken und Gieren sind bei visueller Informationsaufnahme größer als bei reiner haptisch-kinästhetischer Informationsaufnahme. Demzufolge ist die optische Wahrnehmungsschwelle für diese Bewegungsformen des Fahrzeugs vorrangig.
2. Die Wahrnehmungsschwellen für das Wanken (Rollen) des Fahrzeugs ist nach visuellen Informationen und haptisch-kinästhetischen Informationen nahezu gleich, die optische Wahrnehmungsschwelle liegt aber deutlich über den Werten für denen der visuelle Information von Gieren und Nicken. Dennoch kann nicht so ohne weiteres behauptet werden, dass die Wahrnehmung des Rollens schlechter ist bzw. später erfolgt als die Wahrnehmung von Nick- und Gierbewegungen.
3. Für die Wahrnehmung von vertikaler und lateraler Bewegung (Querbewegung) ist die Wahrnehmungsschwelle der haptisch-kinästhetischen Informationen sehr gering.
4. Ein Vergleich zwischen den gefundenen Wahrnehmungsschwellen für die rotatorischen Fahrzeugbewegungen (Gieren, Nicken, Wanken) und linearen Fahrzeugbewegungen (vertikal und lateral) ist nicht möglich, da es sich um zwei unterschiedliche physikalische Bezugsgrößen handelt (Winkelgeschwindigkeit vs. Beschleunigung).

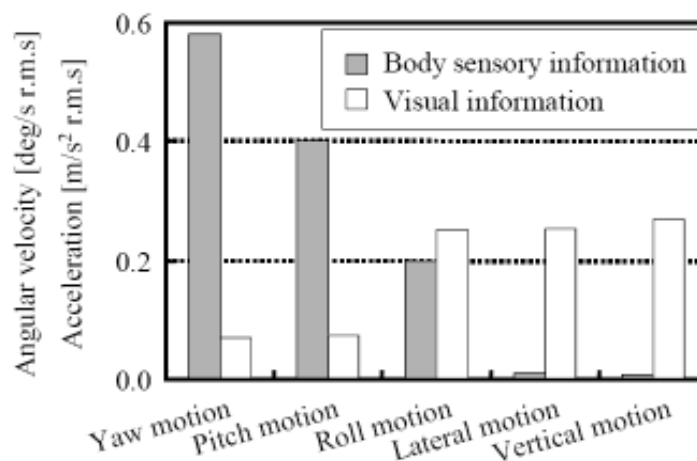


Abbildung 40: Wahrnehmungsschwellen für die Fahrzeugbewegungsgröße Gieren, Nicken, Rollen, Vertikal- und Querbewegung unterschieden für rein visuelle und haptisch-kinästhetische Information (Muragushi et al. 2006)

Für die Wahrnehmung von Querbewegung stellte Gundry (1978b) in einem Diagramm Schwellwerte aus verschiedenen Untersuchungen zusammen (siehe Abbildung 41). Im Diagramm wurde nach den drei Raumrichtungen x, y und z, sowie für drei Versuchskonstellationen „ohne optische Informationsaufnahme“, „Szenerie mitbewegt“ und „feste Umgebung bzw. keine besondere Konstellationen“ unterschieden. Für die Fahrzeugquerbeschleunigung sind also aufgrund der Versuchskonstellationen nur die Versuche mit der Nr. 20 und 22 (in der Abbildung farblich hervorgehoben) von Bedeutung für die Vertikaldynamik (z-Richtung) die Verläufe der Nummern 10, 14-16, 18, 19 und 21, wobei sich im letzteren Fall keine eindeutigen Werte entnehmen lassen.

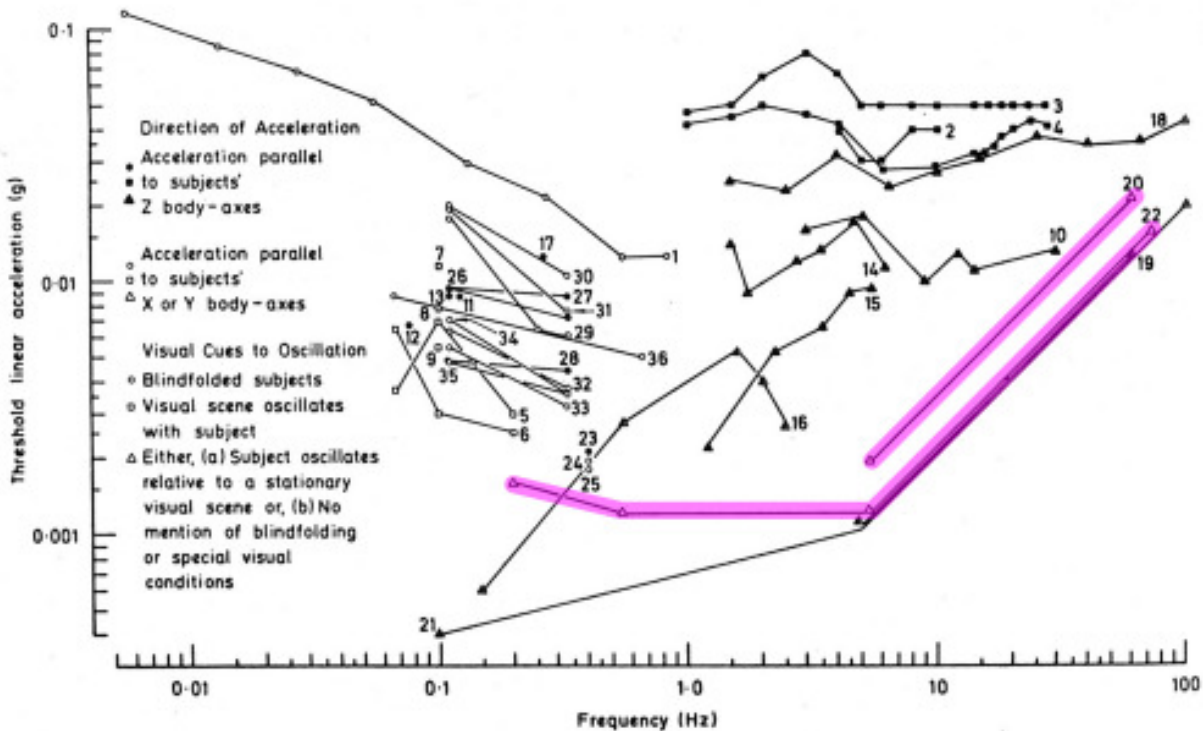


Abbildung 41: Zusammenstellung von Untersuchung von Querbeschleunigungs-Wahrnehmungsschwellen (Gundry 1978b)

Die Tabelle 9 beinhaltet die von Heißing et al. (2000, S. 13) zusammengestellten Schwellwerte für die drei translatorischen und die drei rotatorischen Bewegungsformen im Raum. Die angegebenen Wertebereiche basieren auf unterschiedlichen Untersuchungen.

| Bewegungsform | Schwellwert |
|------------------|--------------------------------|
| Gieren | 0,05 bis 5 °/s ² |
| Rollen (Wanken) | 0,1 bis 0,2 °/s ² |
| Nicken | 0,1 bis 0,2 °/s ² |
| longitudinal (x) | 0,02 bis 0,8 m/s ² |
| transversal (y) | 0,05 bis 0,1 m/s ² |
| Vertikal (z) | 0,02 bis 0,05 m/s ² |

Tabelle 9: Kinästhetische Wahrnehmungsschwellen nach Heißing et al. (2000, S. 13)

Buschardt (2003) gibt den Bereich für die Wahrnehmungsschwelle der Querbeschleunigung mit 0,10-0,18 m/s² an. Grundlage dafür sind die Untersuchungen von Bolte (1991a), Helm (1978) und Tomaske (1983). Wie zu erkennen ist, schließt der Bereich an den von Heißing (2000) an, der Werte zwischen 0,05 und 0,1 m/s² als Wahrnehmungsschwelle für die Querbeschleunigung angibt (Tabelle 9). Benson (1986) kommt bei seiner Untersuchung mit einem Verschiebeschlitten für Beschleunigung, Geschwindigkeit und Versatz entlang der einzelnen Achsen zu den in der Tabelle 10 angegebenen Werte.

| | x | y | z |
|------------------------------------|--------|--------|-------|
| Beschleunigung [m/s ²] | 0,0625 | 0,0569 | 0,154 |
| Geschwindigkeit [m/s] | 0,0590 | 0,0537 | 0,145 |
| Versatz [mm] | 87,4 | 75,1 | 215,0 |

Tabelle 10: Wahrnehmungsschwellen für Linearbewegungen nach Benson et al. (1986)

Die Messungen entlang der z-Achse sind für Kraftfahrzeug jedoch nicht relevant, da im Liegen gemessen wurde und die Gravitationsrichtung entlang der x-Achse verlief. Weitere Ergebnisse sind, dass keine Abhängigkeit der Wahrnehmungsschwelle von Geschlecht und Körpergewicht ermittelt werden konnte.

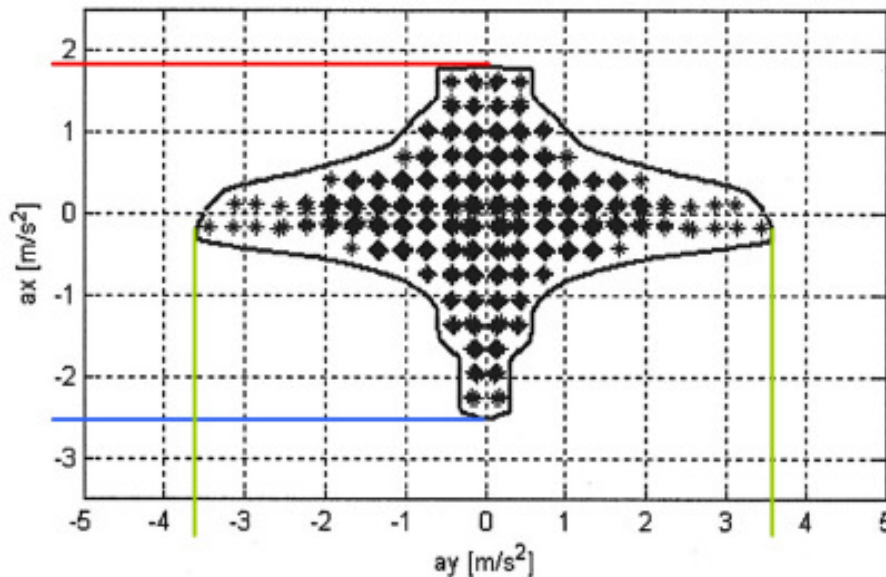


Abbildung 42: Übliche Querb beschleunigungsnutzung in Längs- und Querrichtung für Normalfahrer (Wegscheider und Prokop 2005)

Abbildung 42 zeigt die üblicherweise genutzten Quer- und Längsb beschleunigungen bei Normalfahrt durch einen Normalfahrer. Die maximale Bremsverzögerung liegt bei etwa 2,5 m/s², die Längsb beschleunigung bei etwa 1,8 m/s² und die Querb beschleunigung liegen im normalen Fahrbetrieb nicht über 3,5 m/s². Festzuhalten bleibt auch, dass der Fahrer größere – jedoch noch im Normalbereich liegenden – Beschleunigungen und Verzögerungen in Quer- und Längsrichtung nicht nutzt (Schmetterlingsform). Auch bei Vollbremsungen ist auffällig, dass der Fahrer selten bremst und dabei gleichzeitig lenkt.

Clark und Stewart (1969) ermittelten eine Verteilung für die Wahrnehmung der Gierbeschleunigung. Das Ergebnis ist in Abbildung 43 zu sehen, wobei einer Winkelbeschleunigung von 0,71-0,8 °/s² dem 90. Perzentil entspricht, d.h. bei 90% aller Probanden ist die Wahrnehmungsschwelle mit den angegebenen Werten erreicht bzw. bereits überschritten. Die Art der Darstellung als Perzentil eignet sich für die Bestimmung von Wahrnehmungswerten besser als die Angabe von Durchschnittswerten bzw. Wertebereichen, weil für die entsprechende Verwendung ein entsprechender Perzentilwert gewählt werden kann.

Sollen z.B. 95% der Bevölkerung eine Winkelbeschleunigung bei Kurvenfahrt spüren, so sollte das 95. Perzentil gewählt werden. Ist es jedoch beispielsweise das Ziel, dass in einem Simulator unterschwellige Rückstellbewegungen durchzuführen, so sollte das 5% gewählt

werden. Bei größeren Werten als 95% bzw. bei kleineren als 5% muss überlegt werden, ob eine technische Realisation möglich ist oder dies wirtschaftlich vertretbar ist.

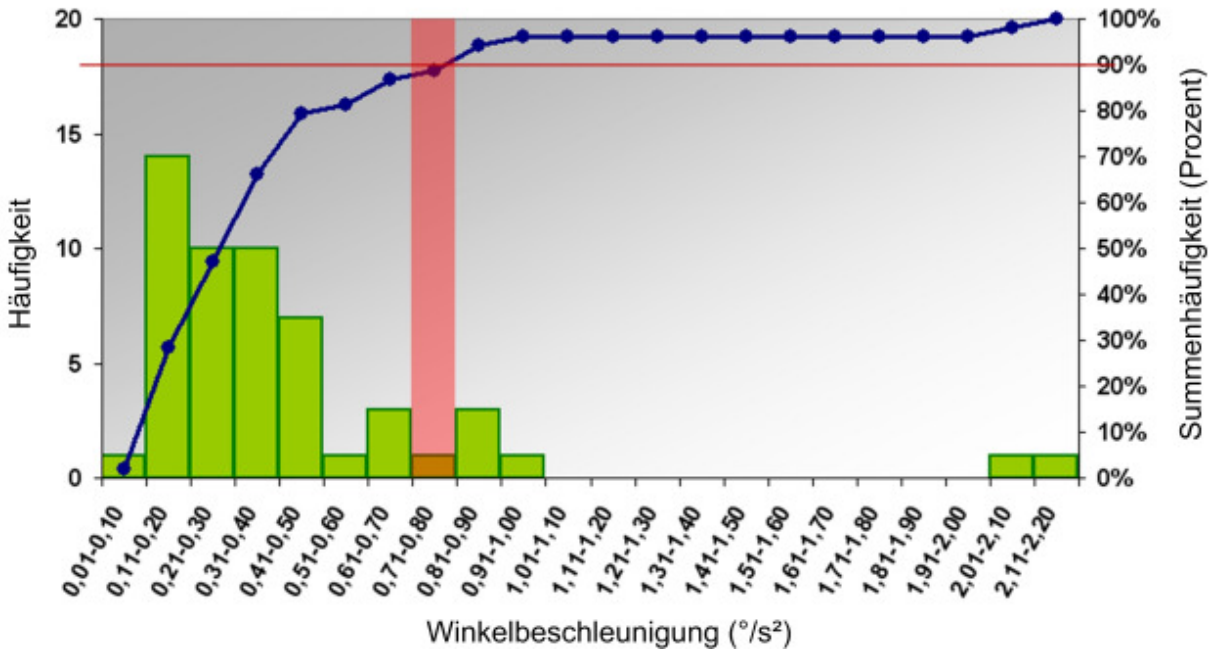


Abbildung 43: Verteilung der Wahrnehmungsschwelle für Gierbeschleunigungen von 53 männlichen Probanden (basierend auf Clark und Stewart 1969)

Mit Hilfe der Absolutschwelle (für Gier- und Querschleunigung, evtl. Rollbeschleunigung) lässt sich der Zeitverzug zwischen Lenkradeingabe (Anlenken aus Geradeausfahrt) und Wahrnehmung bestimmen. Die Abbildung 44 zeigt den realen Giergeschwindigkeitsverlauf eines Fahrzeugs nach einer konstant gehaltenen Lenkwinkel eingabe. Beide Verläufe wurden mit Hilfe der Zeitachse aufeinander gelegt. Durch das Einzeichnen der Absolutwahrnehmungsschwelle für die Gierwinkelgeschwindigkeit (ca. 0,5 °/s) lässt sich die Zeit bestimmen, die vergeht bis der Mensch nach seinem Lenkbefehl die Gierbewegung des Fahrzeugs über den kinästhetischen Informationsaufnahmekanal wahrnimmt.

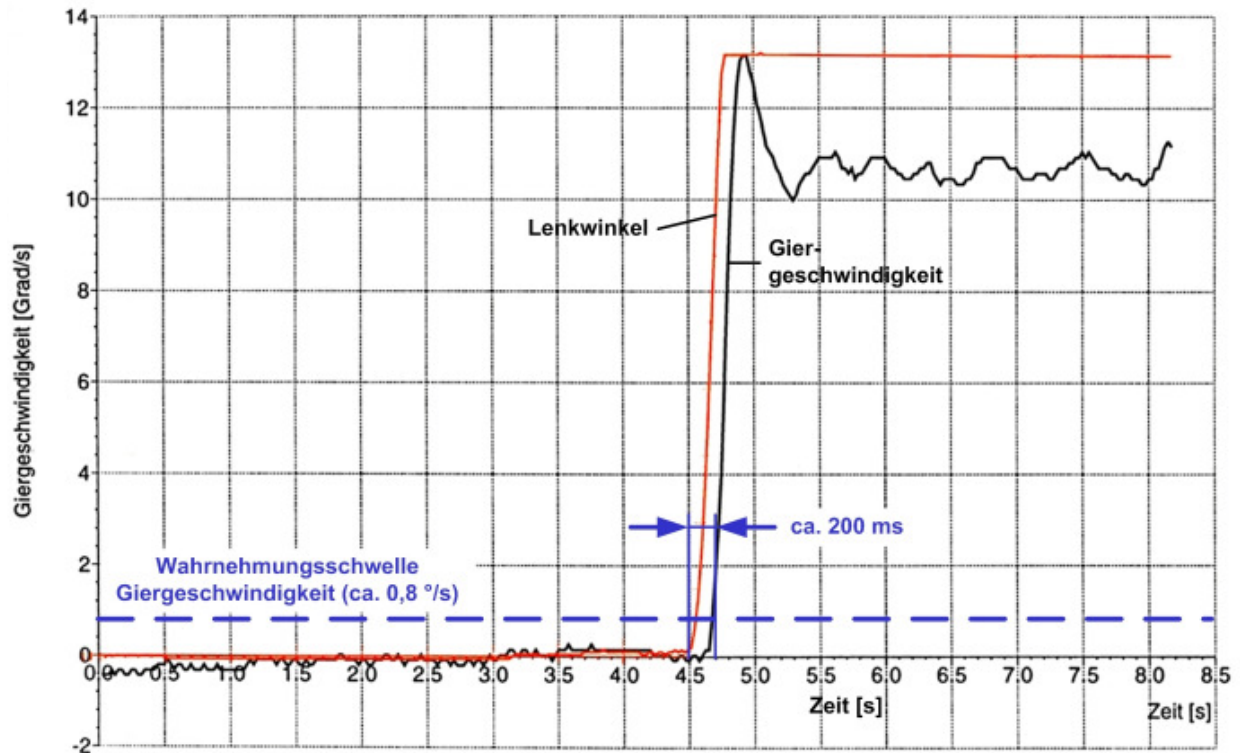


Abbildung 44: Phasenverzug der Giergeschwindigkeit auf die Lenkeingabe (rot) (basierend auf Riedel und Arbinger 1997)

Im vorliegenden Fall beträgt dieser Zeitraum in etwa 200 ms. Aus anderen Untersuchungen ist bekannt, dass ein Zeitverzug ab etwa 100 ms (konservative Werteangabe) vom Menschen als verzögerte Maschinenreaktion wahrgenommen wird. Ist die Verzögerung unterhalb dieses Wertes, so wird dies vom Menschen als sofortige Reaktion wahrgenommen. Im vorliegenden Fall würden sehr wahrscheinlich die Gierreaktion des Fahrzeugs als verzögert wahrgenommen werden. Ein zeitlicher Verzug im Bereich zwischen 100 ms und etwa 2 s wird vom Menschen noch als tolerabel angesehen und hängt von der Art der Tätigkeit ab. Beim Lenken ist davon auszugehen, dass mit zunehmender Überschreitung der 100 ms-Grenze das Lenkverhalten ebenfalls zunehmend negativ beurteilt wird. Die Zeitaspekte der menschlichen Wahrnehmung werden in Kapitel 2.5.2.5 „Zeitliche Aspekte der Wahrnehmung“ näher erörtert. Dort sind auch typische Verläufe der Gierbeschleunigung, des Gierwinkels und der Querschleunigung über der Zeit wie in Abbildung 44 zu finden.

Inwieweit die Wahrnehmung und die zugehörigen Schwellwerte von Rollbeschleunigungen (Wanken) für das Lenkgefühl relevant sind, lässt sich aus der Fachliteratur nicht eindeutig identifizieren, da einige Autoren den Einfluss des Fahrzeugwankverhaltens auf das Lenkgefühl für unwichtig halten, wohingegen andere dem Wanken eine größere Bedeutung zuschreiben (Riedel und Arbinger 1997). Mitschke und Wallentowitz (2004, S. 767) weisen darauf hin, dass der Wankwinkel häufig als eine Komfortgröße gesehen wird.

Ohne Widersprüchlichkeiten scheint die Erkenntnis zu sein, dass zu große Wankbewegungen in der subjektiven Beurteilung der fahrenden Person abgelehnt werden. Nicht zuletzt gibt es heute auf dem Markt Systeme, die den Wankwinkel begrenzen (Active Body Control (ABC) von Daimler oder Dynamic Drive von BMW).

In dem zuvor genannten Zusammenhang scheint der in der Vergangenheit zu beobachtende Trend zum Kauf von Geländefahrzeugen (z.B. BMW X5 oder Mercedes ML-Klasse) und Vans (z.B. VW Touran) widersprüchlich zu sein. Bei solchen Fahrzeugtypen fallen die Auslenkungen der Wankbewegung auf Kopfhöhe des Fahrers durch den höher liegenden Aufbau bedingt in der Regel größer aus. Gemäß den genannten Untersuchungen müsste dies

demnach durch den Fahrer negativ beurteilt werden. Nun werden aber gerade solche Fahrzeugtypen mit dem Argument der höheren Sitzposition von potenziellen Käufern bevorzugt ausgewählt. Eine weitere Erklärungsmöglichkeit lässt sich aus Abbildung 45 ableiten. Werden Wankfedersteifigkeit und Wankdämpfung variiert und wird dabei der zeitliche Verlauf der Querschleunigung auf Höhe des Fahrerkopfes gemessen, so ergibt in erster Linie eine Erhöhung der Wankfedersteifigkeit ein deutlich erkennbares früheres und steileres Ansprechen der Querschleunigung. Als Folge wird ebenso die Wahrnehmungsschwelle für die Querschleunigung (ca. 0,01 g) eher überschritten. Das etwas schnellere Ansprechen der Querschleunigung auf einen Lenkbefehl hat vermutlich einen positiven Einfluss auf das Lenkgefühl.

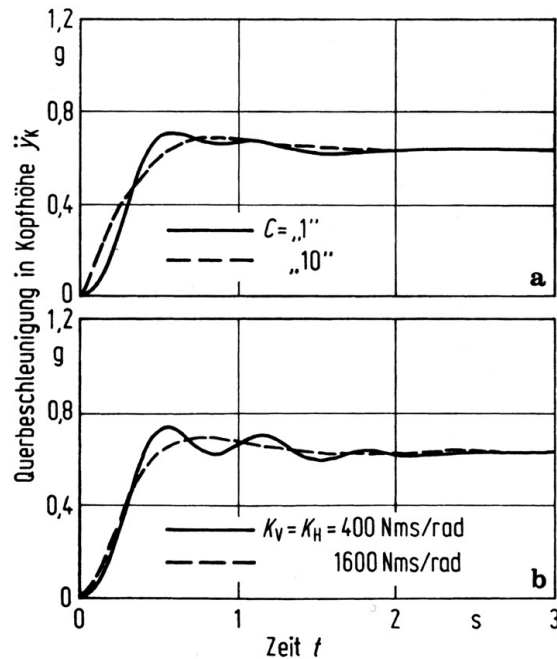


Abbildung 45: Einfluss unterschiedlicher Wankfedersteifigkeit (a) und Wankdämpfung (b) auf den zeitlichen Verlauf der Querschleunigung in Kopfnähe (Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 768)

Es stellt sich nun die Frage, ob eine Wankstabilisierung ebenso einen Einfluss auf die Wahrnehmung der Fahrzeuggierbewegung durch den Fahrer hat? In der nachfolgenden Abbildung 46 sind mehrere Diagramme (Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 766) enthalten, die den zeitlichen Verlauf der Gierwinkelgeschwindigkeit und des Wankwinkel auf einen Lenkwinkelsprung zeigen. Wie schon beim zuvor erwähnten Versuch wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Wankfedersteifigkeiten und Wankdämpfungen untersucht. Dabei lässt sich feststellen, dass sich der Verlauf der Gierwinkelgeschwindigkeit über der Zeit vor allem während der ersten 300 ms nicht erkennbar unterscheidet. Das wiederum lässt den Schluss zu, dass eine vorhandene Wankstabilisierung keinerlei Auswirkung auf die Wahrnehmung der Gierwinkelgeschwindigkeit haben kann, sehr deutlich aber auf die Wahrnehmung der Querschleunigung.

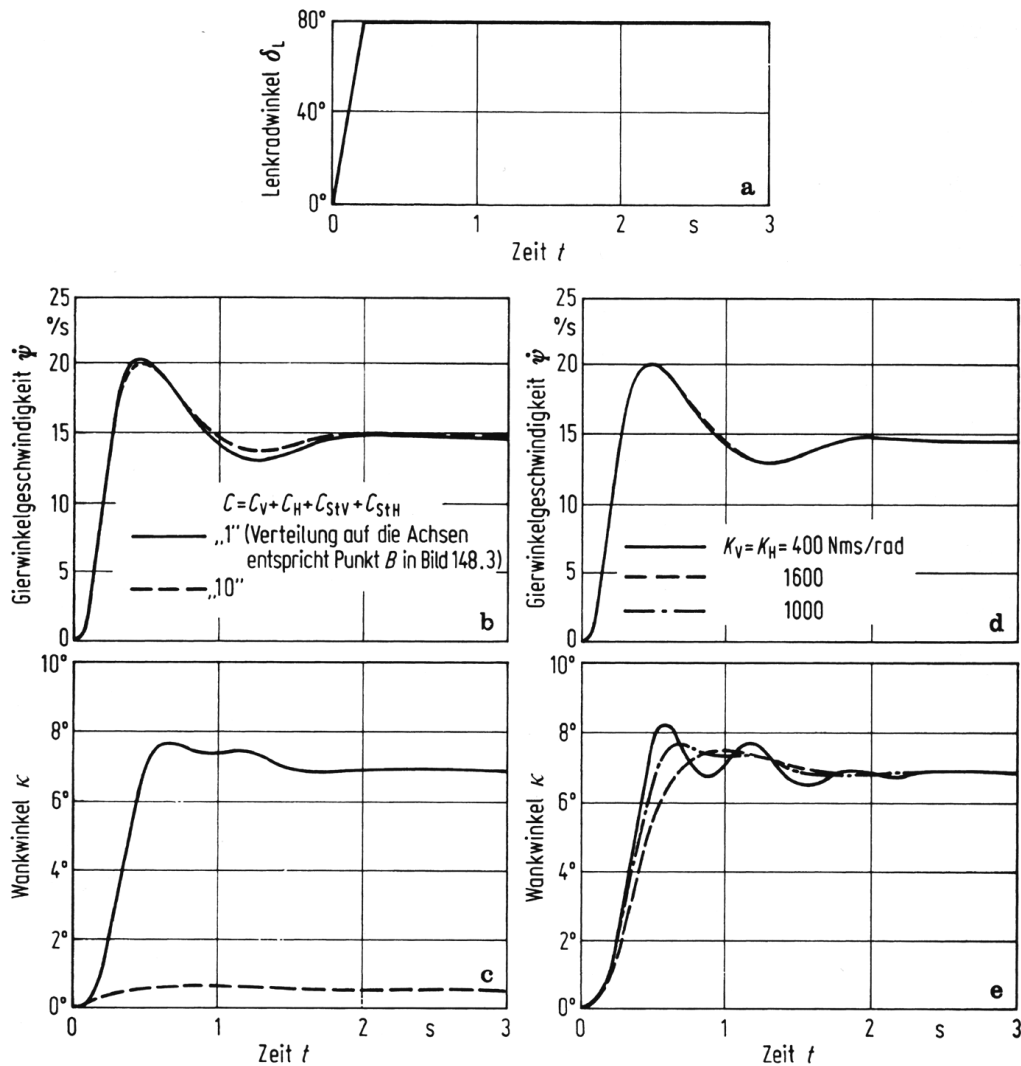


Abbildung 46: Einfluss unterschiedlicher Wankdämpfungen (b) und Wankfedersteifigkeiten (d) auf die Gierwinkelgeschwindigkeit bei einer Lenkwinkelrampe auf 80° (a) (Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 766)

2.5.2.2 Optische Wahrnehmung

Die visuelle Wahrnehmung ist im Vergleich zu den anderen Informationsaufnahmeorganen für den Menschen einer der wichtigste Sinneskanal, da etwa 90% (der genaue Wert hängt von der Aufgabe ab und kann letztlich nicht exakt angegeben werden) der Information über diesen Kanal aufgenommen wird (Rockwell 1971). Das führt jedoch in manchen Fällen jedoch zu einer Überschätzung der Bedeutung dieses Sinneskanal, weil nicht exakt gesagt werden kann, welche aufgenommene visuelle Information tatsächlich relevant ist und verarbeitet wird.

Abbildung 47 zeigt das sog. Bildverschiebungsvektorenfeld bei einer Kurvenfahrt nach links eines Pkw (Gordon 1966). Die Vektoren kennzeichnen die Verschiebung der Kreuzungspunkte eines gedachten Gitternetzes in der Ebene nach einer bestimmten Zeit. Vektoren die sehr nahe am Fahrzeug liegen sind wesentlich länger als Vektoren, die weiter entfernt vom Fahrzeug liegen. Auffällig ist vor allem, dass die Vektoren entlang des gedachten Sollkurses kürzer ausfallen, als Vektoren auf gleicher Höhe und gerader Richtung zur aktuellen Fahrzeuglage.

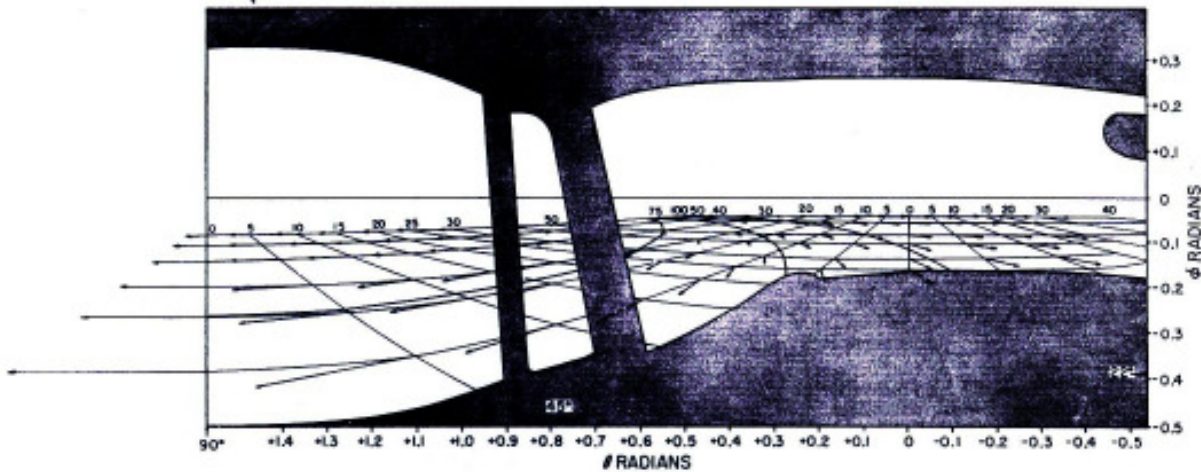


Abbildung 47: Bildverschiebungsvektoren nach Gordon (1966)

Das Bildverschiebungsfeld, das der Fahrer durch Blick (siehe Abbildung 48) durch die Seitenscheiben dargeboten wird, ist heute stärker eingeschränkt als in der Darstellung von Gordon (1966) zu sehen, da heutige Fahrzeuge höher angesetzte Motorhauben (aus Gründen des Fußgängerschutzes) und flachere Frontscheiben besitzen und somit die A-Säulen flacher und Gürtellinien höher sind als bei Fahrzeugen zur Zeit der Veröffentlichung von Gordon (1966). Weiterhin sind die A-Säulen voluminöser, häufig aus Gründen der Crachsicherheit, als zur Zeit der Veröffentlichung von Gordon (1966) üblich.

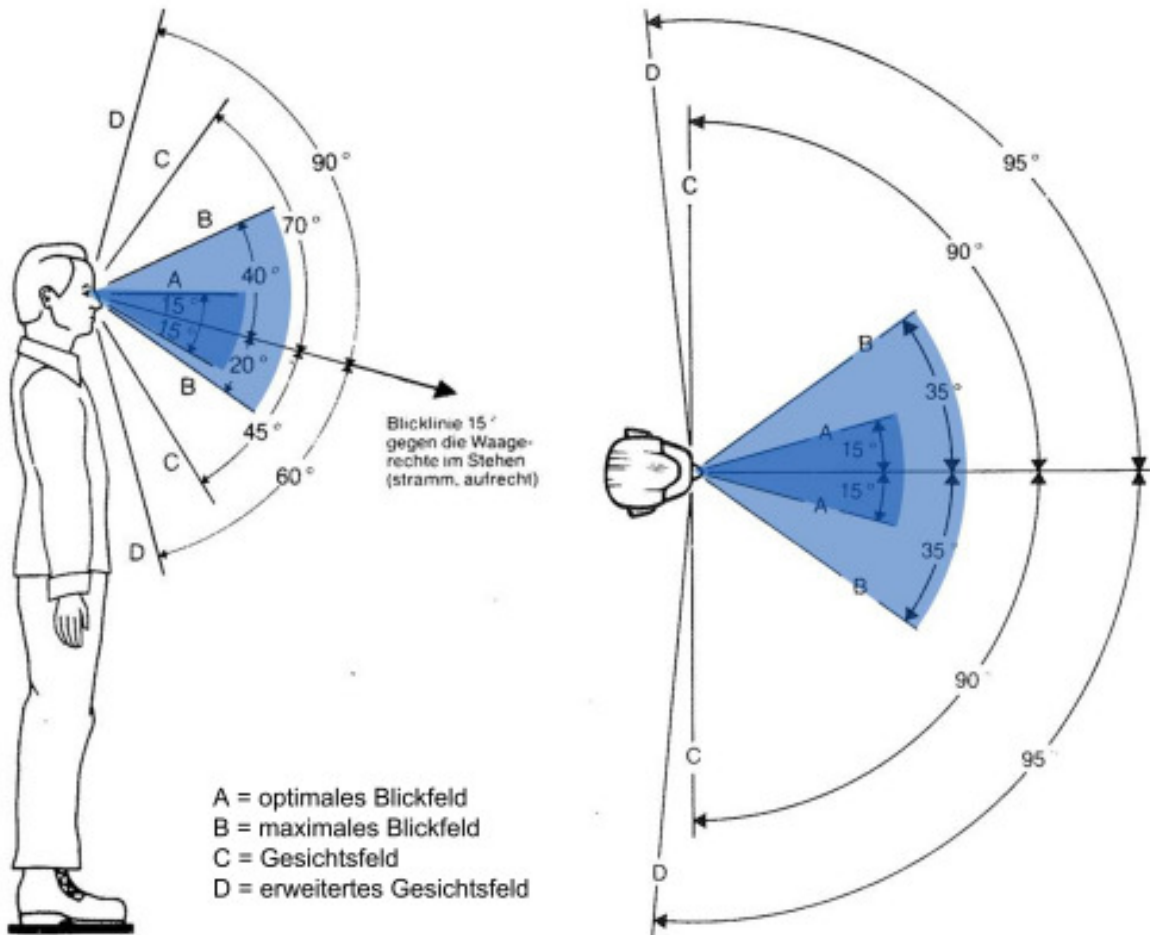


Abbildung 48: Blick- (A, B) und Gesichtsfeld (C, D) bei strammem und aufrechtem Stehen (Lange 1991)

Eine wichtige Erkenntnis im Zusammenhang mit der Wahrnehmung von Bewegung ist, dass sich die Sehschärfe des Menschen im peripheren Sehfeld verringert, wobei zusätzlich noch die Farbsehfähigkeit abnimmt. Der Scharfsehbereich (fovealer Bereich) liegt in einem Bereich von ca. einem Grad bei dem der Mensch nur leicht unscharf sieht, was praktisch aber bei normalen Sehaufgaben (wie z.B. dem Autofahren) zum Scharfsehbereich gezählt werden kann.

Sehr wichtig für die Wahrnehmung von Bewegung ist der optische Fluss. Er ergibt sich aus dem Gradienten der Bewegung (Goldstein 2002, S. 331). Dieser optische Fluss besitzt ein Zentrum aus dem alle Verschiebungslinien fließen und auf den sich der Betrachter aktuell zubewegt. Bei einer absoluten Geradeausbewegung bzw. Geradeausfahrt liegt dieses Zentrum frontal und mittig in der Sehrichtung und die Fließlinien strömen geradlinig aus dem Zentrum.

Nach Gibson (1979, deutsch 1982) ist das optische Fließen eine selbstproduzierte Information, die dem Betroffenen hilft, seine zukünftigen Bewegungen im Raum besser abschätzen zu können (Goldstein 2002, S. 332). Jedoch betont er, dass bei einem kurvenreichen Straßenverlauf die Vorstellung des Ineinanderlegens des Zentrums des Auseinanderfließens auf den virtuellen Kurvenmittenpunkt (siehe Abbildung 49) nicht ausreicht und der Fahrer weitere Informationen nutzt. Warren (1995) stellt mit Hilfe eines Versuchs fest, dass unter günstigen Bedingungen, die Bewegungsrichtung mit einem Fehler von 0,5 bis 1 Grad genau geschätzt werden kann. Als Basis für diese Schätzung dient das Zentrum des Auseinanderfließens.

Die nachfolgende Abbildung 49 zeigt basierend auf der Untersuchung von Lee (1974) drei denkbare geometrische Situationen der Lage des Zentrums des Auseinanderfließens und des Kurvenmittenpunktes. Im Fall (a) liegen bei Kurvendurchfahrt (ohne Übersteuer- oder Untersteuertendenz) die beiden zuvor angesprochenen Punkte aufeinander. Im Fall (b) verlässt das Fahrzeug die Fahrbahn mit zu großem Kurvenradius, was z.B. bei einem starken Untersteuern der Fall ist. Damit liegt das Zentrum des Auseinanderfließens weiter links. Der Fall (c) verdeutlicht, dass der Fahrer beim Anfahren der Kurve versucht, das Zentrum des Auseinanderfließens auf die Kurvenmitten zu „drücken“.

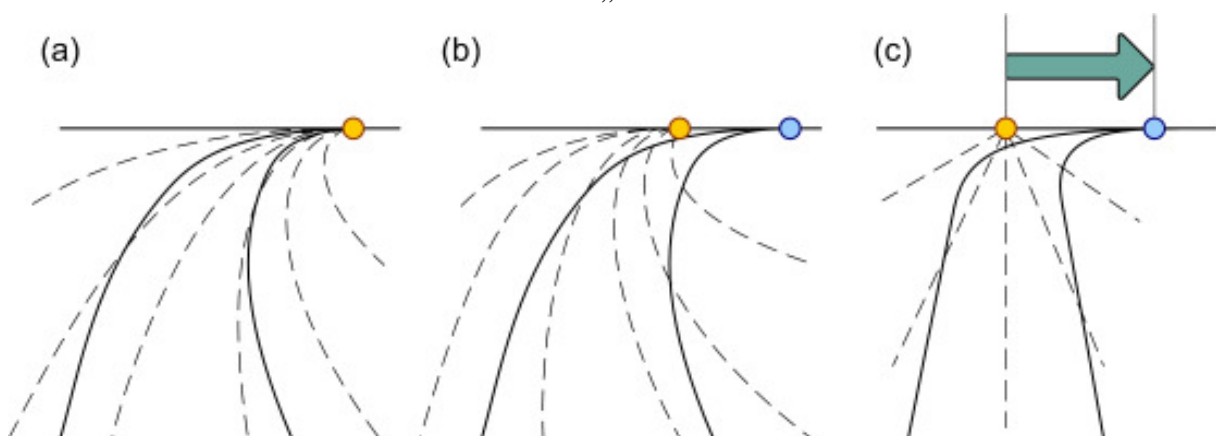


Abbildung 49: Zentrum des Auseinanderfließens beim Fahren durch eine Rechtskurve bzw. bei Geradeausfahrt und Kurvenmittenpunkt (basierend auf Lee 1974)

Die Bildverschiebungslinien sind in der Abbildung exemplarisch für verschiedene Punkte aufgetragen. Inwieweit die Bildverschiebungslinien verschiedenen Gesetzmäßigkeiten unterliegen müssen ist bei dieser Darstellung noch nicht berücksichtigt. Solche Sachverhalte sollen im Kapitel 3.3.2 „Versuch 2 – Bildverschiebungsvektorenfeld bei Kurvenfahrt“ geklärt werden.

In Anlehnung an die in Abbildung 49 ist in Abbildung 50 die häufig anzutreffende Fahrsituation dargestellt, wenn die Sicht auf den Kurvenmittenpunkt und auf das Zentrum des

Auseinanderfließens verstellt ist (z.B. durch Bauten oder landschaftliche Objekte). Die Frage ist dann, auf was sich der Fahrer beim Einfahren in die Kurven bezieht. Vermutlich schätzt der Fahrer die Lage der beiden Punkten in seinem aktuellen Sichtfeld trotz der Verdeckung so wie Abbildung 50 dargestellt.

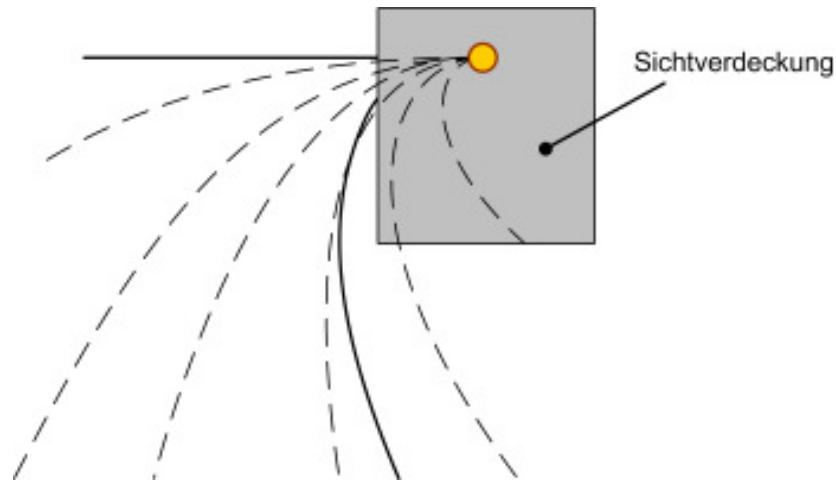


Abbildung 50: Zentrum des Auseinanderfließens einer langgezogenen Kurve für den Fall der Sichtverdeckung

Land und Lee (1995) vermuten, dass der Fahrer dann keine Kurskorrektur vornimmt, wenn das Zentrum des Auseinanderfließens mit der Mitte der angefahrenen Kurven nicht mehr übereinstimmt (*Goldstein* 2002, S. 335). Allerdings kann dies nur für relativ große und langgestreckte Kurven gelten, auf die der Fahrer einen unverstellten Blick hat. Bei der Geradeausfahrt stellten sie fest, dass die Fahrer tendenziell links vom Zentrum des Auseinanderfließens blicken. Vermutlich tun die Fahrer das, weil sie tatsächlich links von der Fahrzeugmitte sitzen. Die Blickuntersuchung bei Kurvenfahrt ist ein weiterer Hinweis darauf, dass es neben der Information über das Zentrum des Auseinanderfließens noch weitere Informationen existieren müssen, die der Fahrer nutzt, so wie es *Land und Lee* (1994) vermutet haben.

Wie in Abbildung 51 dargestellt, konnten *Land und Lee* (1994) durch Blickuntersuchungen feststellen, dass der Fahrer beim Anfahren einer Kurve auf den Scheitelpunkt der Kurve blickt, der sich aus seiner aktuellen Sicht ergibt. Aufbauend auf *Land und Lee* (1994), gibt es Untersuchungen von *Mars* (2006) und *Lappe et al.*, die sich mit dem Blickverhalten des Fahrers beim Kurvenfahren auseinandersetzen. Wie schon zuvor angesprochen, ist der Scheitelpunkt vermutlich neben dem Zentrum des Auseinanderfließens eine weitere wichtige Information, womit der Fahrer den weiteren Kurs festlegt. Der sichtbare Scheitelpunkt, der sich aus der Fahrersicht ergibt, entspricht nicht unbedingt dem tatsächlichen Scheitelpunkt. Bei Kurven mit enger werdendem Kurvenradius („Hundekurven“), liegt der Scheitelpunkt unter Umständen weiter vom Fahrzeug entfernt in der Kurve als der durch die aktuelle Sicht vom Fahrer erkannten Scheitelpunkt (virtueller Scheitelpunkt), was dazu führen kann, dass der Fahrer die Kurve zu früh anfährt und dann am tatsächlichen Scheitelpunkt Probleme, wie nicht mehr zu haltende Spur, usw., bekommen kann.

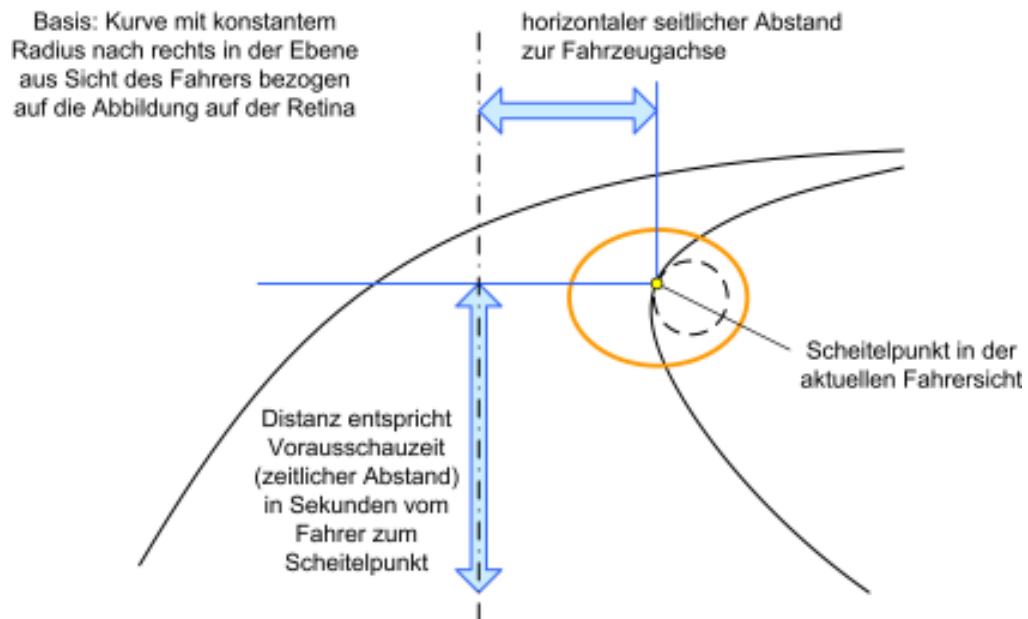


Abbildung 51: Hauptblickbereich auf den Scheitelpunkt einer Kurve aus der Sicht des Fahrers (basierend auf Land und Lee 1994)

Weiterhin scheint der Fahrer bei langgezogenen Kurven zu versuchen, den sich aus seiner Sicht ergebenden Scheitelpunkt der Kurve an einer fixen Stelle in seinem Blickfeld zu halten, sobald er die Aufgabe des Kurvendurchfahrens als ideal erfüllt ansieht. Wie in Abbildung 51 dargestellt, stellt der Fahrer den horizontalen Abstand und den zeitlichen Abstand in Sekunden zum Scheitelpunkt ein. Allerdings bleibt der Scheitelpunkt bei einer gleichmäßig gekrümmten Kurve immer im konstanten Abstand zum Fahrzeug. Endet die Kurve, dann löst sich der Scheitelpunkt durch Größerwerden der Scheitelkrümmung auf und geht in eine gerade Linie über. Dieser Vorgang erfolgt mehr oder minder fließend. Der Fahrer erkennt dann keinen Scheitelpunkt mehr, womit er das Ende der Kurve detektiert.

Mit Hilfe einer 3D-Computeranimation wird die Abhängigkeit des Bildverschiebungsfeldes von Fahrzeug- und Fahrdynamikparametern (u.a. Sitzhöhe über Grund, Untersteuergradient, Fahrgeschwindigkeit) geklärt. Die Beschreibung des Modells und der durchgeführten Versuche ist dem Kapitel 3.3.2 „Versuch 2 – Bildverschiebungsvektorenfeld bei Kurvenfahrt“ zu entnehmen. Die Computeranimation baut auf der Überlegung von Gordon (1966) auf und ermöglicht eine dynamische und variable Darstellung der Bildverschiebungsvektoren in Abhängigkeit bestimmter Parameter.

Ebenso wie beim kinästhetischen Sinn existieren beim optischen Sinn Wahrnehmungsschwellen, die einer statistischen Verteilung folgen und die nicht für jeden Menschen gleich sind. Die statische Wahrnehmungsschwelle beträgt eine Winkelminute ($1'$) und bezieht sich auf ruhende Objekte und ist somit für das Lenkgefühl weniger von Bedeutung als die dynamische Wahrnehmungsschwelle von einer Winkelminute pro Sekunde ($2'/s$) (Lindsay und Norman 1972), die für sich bewegende Objekte bedeutsam ist. Es sollte in jedem Fall beachtet werden, dass sich die Wahrnehmungsschwellen auf einen Visus (Sehfähigkeitswert) von eins beziehen, was bedeutet, dass das erreichte Auflösungsvermögen eine Bogenminute beträgt. Ein Visus von zwei bedeutet eine bessere Auflösung und entspricht $0,5'$. Die Visi der Bevölkerung sind verteilt und 41,73% bzw. 47,82% der Bevölkerung ($n=9468$) haben einen schlechteren Sehfähigkeitswert für das Nah- bzw. Weitsehen (Schmidtke und Schober 1967, S. 20).

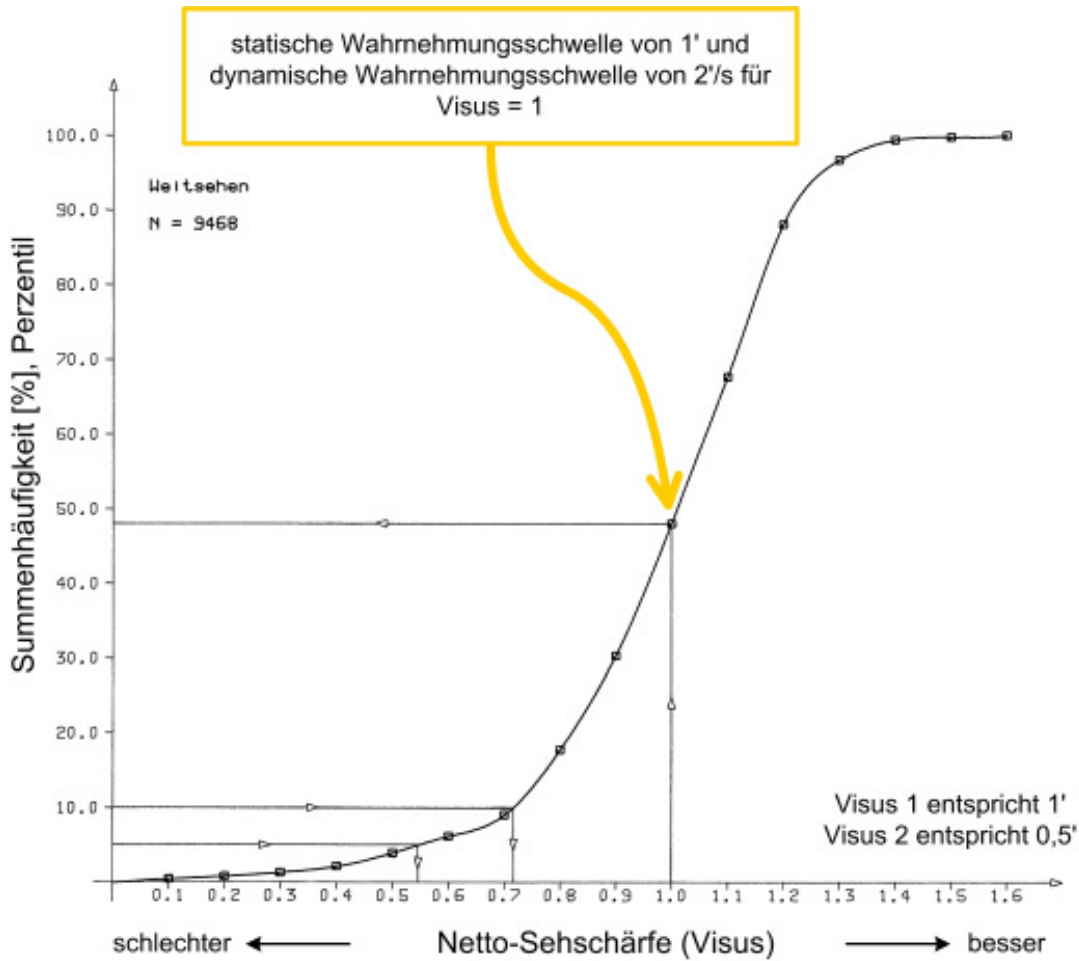


Abbildung 52: Summenhäufigkeit (Perzentil) der Netto-Sehschärfe (Visus) für das Weitsehen aus 9468 Vpn (Schmidtke und Schober 1967)

Nachfolgende Abbildung 53 zeigt die Zeit, die eine Person benötigt, um eine bestimmte Geschwindigkeitsänderung mit einem bestimmten Abstand zweier aufeinanderfolgender Fahrzeug zu bestimmen (Todosiev 1963). Dabei braucht das Wahrnehmen von Abstandsvergrößerungen etwas länger Zeit, als die Wahrnehmung von Abstandsverringeringen, was im Falle des Abschätzens von Abstandveränderungen beim Autofahren als günstiger zu bewerten ist.

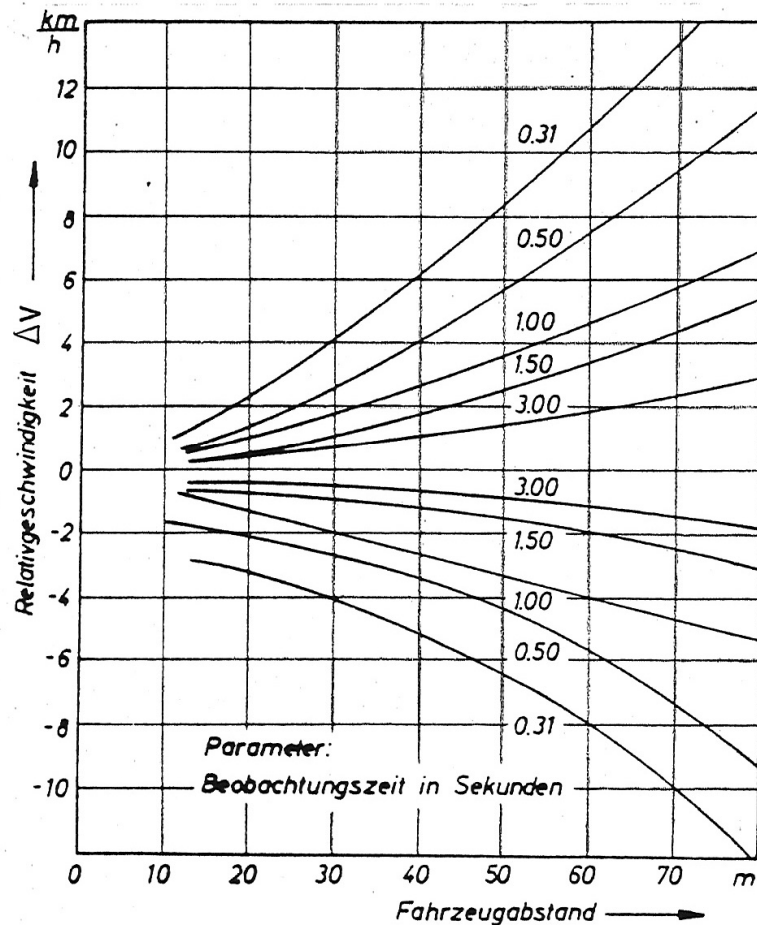


Abbildung 53: Schwellwerte für die Wahrnehmung von Relativgeschwindigkeiten aufeinanderfolgender Fahrzeuge (nach Todosiev 1963)

2.5.2.3 Akustische Wahrnehmung

Die akustische Wahrnehmung des Menschen ist in ähnlicher Weise komplex wie die Wahrnehmung über die verbleibenden Sinneskanäle. Beim Kurvenfahren und Lenken ist die Frage entscheidend, welche Informationen durch die akustische Wahrnehmung vom Menschen aufgenommen werden können. Dazu zählen im Wesentlichen zwei Informationen. Zum einen der akustische Eindruck über die gefahrene Geschwindigkeit (Wind- bzw. Umströmungsgeräusche) und zum anderen die momentanen Kraftschlussverhältnisse der Reifen (Quietsch- und Rubbelgeräusche).

Zur Erfüllung der Lenkaufgabe kann das Geräusch der Reifen einen unmittelbar bevorstehenden kritischen Fahrzustand anzeigen. Jedoch wird nicht jeder kritische Fahrzustand, wie das Erreichen der Reifenhaftgrenze, durch ein quietschendes oder rubbelndes Reifengeräusch angezeigt. Ob und wann ein Reifen zu quietschen beginnt, hängt von einer ganzen Reihe von Einflussfaktoren und -größen ab. Dazu zählt unter anderem das Fabrikat des Reifens, die Geometrie des Profils, die Reifenmischung und insbesondere die Oberflächenbeschaffenheit der Fahrbahn. Bei regennasser und vor allem schneebedeckter Fahrbahn kann ein Fahrzeug durchaus ohne akustische Voranzeige in einen instabilen Fahrzustand wie Unter- oder Übersteuern geraten.

Eine akustische Voranzeige des Erreichens der Haftgrenze stellt demnach keine zuverlässige und alleinige Information dar. Diesem Sachverhalt muss dadurch Rechnung getragen werden, dass eine Informationsübertragung des Haftungszustandes der Reifen zum Menschen über einen zusätzlichen Informationskanal erfolgen muss, wobei eine Übertragung über den

haptischen Informationsaufnahme kanal dem Fahrer die schnellste Reaktion ermöglicht. Das kann durch eine Änderung des Lenkmoments geschehen. Unabhängig vom gewählten Informationsweg und der Art, wie die Informationen dargeboten werden, sollte deren Übertragung ausnahmslos immer dann erfolgen, wenn die entsprechende Situation eintritt. Der Mensch erwartet durch seine „inneren Modelle“ diese Konstanz, um schneller und effektiver reagieren zu können. Mehrere zur Auswahl stehende und für die Situation adäquat erscheinende „innere Modelle“ haben zur Folge, dass der Mensch sozusagen während der Informationsverarbeitung entscheiden muss, welches Modell auszuwählen ist. Die Informationsumsetzung (Reaktion) verzögert sich dadurch und gegebenenfalls kann das zur Auswahl eines weniger geeigneten oder unzureichenden „inneren Modells“ führen, was wiederum Fehlreaktionen oder falsche Handlungen hervorrufen kann.

Wie schon erwähnt, ist die zweite akustische Information, die über die momentan gefahrene Geschwindigkeit. Sie lässt sich für den Menschen aus dem gesamten Fahrgeräuschbild ableiten. Zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen den zugehörigen Informationsaufnahme kanälen und der Geschwindigkeitsabschätzung durch den Menschen führte *Evans* (1970) Versuche durch. Die Testpersonen sollten als Beifahrer bei unterschiedlichen Versuchsvarianten die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs abschätzen. In der ersten Variante sollten sie als unbehinderter Mitfahrer die Geschwindigkeit abschätzen. In einer zweiten Variante wurden ihnen die Augen verbunden. Bei der dritten Versuchsvariante wurde das Hörempfinden durch Kopfhörer gedämpft. Die vierte Variante war die Kombination aus Variante 2 und 3. Ergebnis war, dass die langsamen Fahrgeschwindigkeiten bei allen Varianten unterschätzt wurden, also tatsächlich schneller gefahren als von den Versuchspersonen geschätzt. Fehlte die akustische Wahrnehmung, dann wurde die Geschwindigkeit auch im höheren Bereich unterschätzt. Es bestätigt sich der Effekt, dass Personen, die sich in einem Fahrzeug mit guter Schallisolierung befinden, die Geschwindigkeit häufig unterschätzen. Zum gleichen Ergebnis kommt *Bubb* (1977b).

Hartwich (1971) konnte in einem anderen Versuch ermitteln, dass die akustische Wahrnehmung bei Testfahrern einen auf den Regelkreis Fahrer-Fahrzeug stabilisierenden Effekt hat. Nach den Aussagen von *Bubb* (1977b) ist die akustische Wahrnehmung für eine richtige Einschätzung der Fahrzeuggeschwindigkeit von hoher Bedeutung.

Alle angesprochenen Untersuchungen kommen zum dem Schluss, dass sich der Mensch ein umso besseres Bild seiner Umwelt machen kann, je mehr Informationskanäle bei der Wahrnehmung beteiligt sind.

2.5.2.4 Haptische Wahrnehmung

Wie in Abbildung 54 ersichtlich besteht der haptische Sinn aus zwei Komponenten, nämlich dem Hautsinn und der Tiefensensibilität (Propriozeption). Letzteres wird häufig auch als kinästhetische Wahrnehmung bezeichnet, wobei dieser Begriff in diesem Bericht anderweitig definiert wird und deswegen im Zusammenhang mit der haptischen Wahrnehmung nicht weiter verwendet werden soll.

| Haptischer Sinn | | |
|---|--|---|
| Komponenten | Oberflächensensibilität (Hautsinn) | Propriozeption (Tiefensensibilität) |
| Lage der Sinneszellen | Haut | Muskeln, Sehnen und Gelenke |
| Allgemeine Wahrnehmung von | Druck, Hautdehnung, Vibration, Kontakt mit der Umwelt, Objektkanten, Bewegung, berührter Objekte | Stellung und Bewegung des Körpers, aufgebrauchte Kräfte Beschleunigung oder Fixierung |
| Wahrnehmung in Bezug auf das Lenkgefühl | Lenkkradvibrationen, Lenkraddrehschwingungen, Lenkradoberflächenstruktur, kleine Lenkradbewegungen (Hautdehnung) | Aufgebrauchte Kräfte zum Halten bzw. Bewegen des Lenkrades, größere Lenkradbewegungen mit größeren Amplituden (Lenkraddrehschwingungen) |

Abbildung 54: Zwei Komponenten des haptischen Sinns (basierend auf Doerr 2003)

Vom Hautsinn werden Empfindungen, wie Berührung, Druck, Vibration, Kitzel, Wärme, etc. über die Mechanorezeptoren, Thermorezeptoren und Nocirezeptoren (Schmerz) aufgenommen (Müller-Limmroth 1993, S. 43). Die Wahrnehmung über den Hautsinn erfolgt über vier verschiedene Rezeptorarten. Im Einzelnen sind das die Merckelscheiben, die Ruffini-, Meissner- und Pacinikörperchen.

In Abbildung 55 ist zu erkennen, welche Eigenschaften die zuvor erwähnten Mechanorezeptoren besitzen. Die Merckelscheiben und Ruffinikörperchen reagieren in einem Bereich zwischen 0 und 10 Hz am besten und registrieren die Intensität von Druck, statischer Kraft und Scherung. Die Meissnerkörperchen messen in einem Bereich von 20-50 Hz die Geschwindigkeit, mit der sich eine gespürte Kraft ändert und analog dazu wird seitens der Pacinikörperchen die Beschleunigung in einem Frequenzbereich von 100-300 Hz gemessen. Letztere sind auch maßgeblich für das Empfinden von Vibration verantwortlich. Auffällig ist, dass die Frequenzbereiche 10-20 Hz und 50-100 Hz Zonen sind, in denen keine Mechanorezeptorenart ihre Stimulationsfrequenz besitzt. In diesen Bereichen müsste sich dadurch die Wahrnehmung der Mechanorezeptoren verschlechtern.

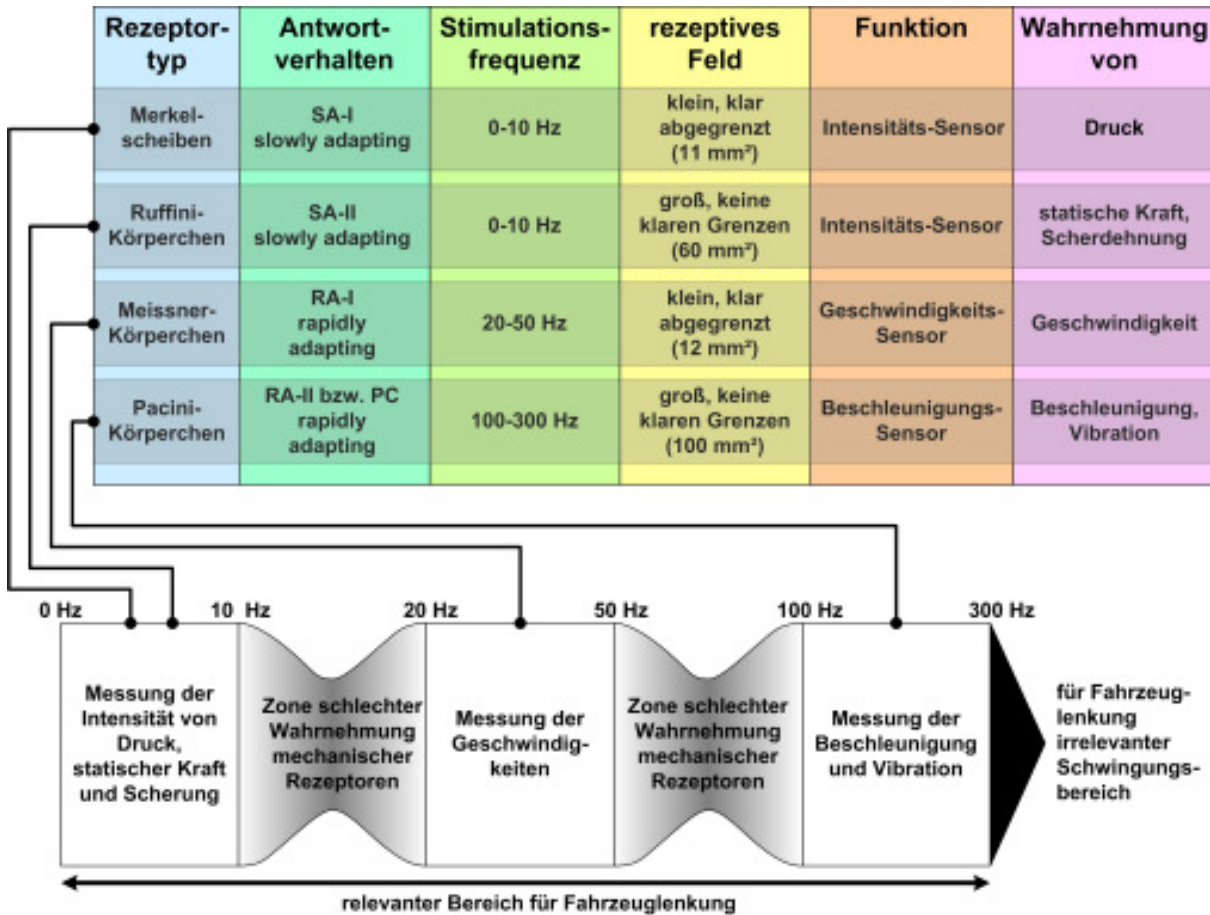


Abbildung 55: Hautrezeptoren des Menschen und ihre Eigenschaften (in Anlehnung an Doerrer 2003)

Die rezeptiven Felder sowie die Dichte der zuvor erwähnten vier verschiedenen Hautrezeptoren sind in Abbildung 56 zu sehen. Für das Greifen eines Lenkrades kommen nur bestimmte Areale der Hand mit der Lenkradoberfläche in Berührung. Die Finger spielen bei der Wahrnehmung von Lenkradbewegungen nur eine untergeordnete Rolle, wobei sich jedoch bei sehr dicken Lenkradkränzen die Fingerauflage verbessert. Von wichtiger Bedeutung ist die Wahrnehmung der Pacini- bzw. Ruffini-Körper. Ihre rezeptiven Felder nehmen einen relativ großen Bereich der Kontaktfläche der an zum Lenkrad ein, wengleich die Dichte der Körperchen auf der Haut gering ausfällt. Somit sind die Frequenzbereiche zwischen 0 und 10 Hz, sowie 100 und 300 Hz für die Lenkauslegung von Bedeutung.

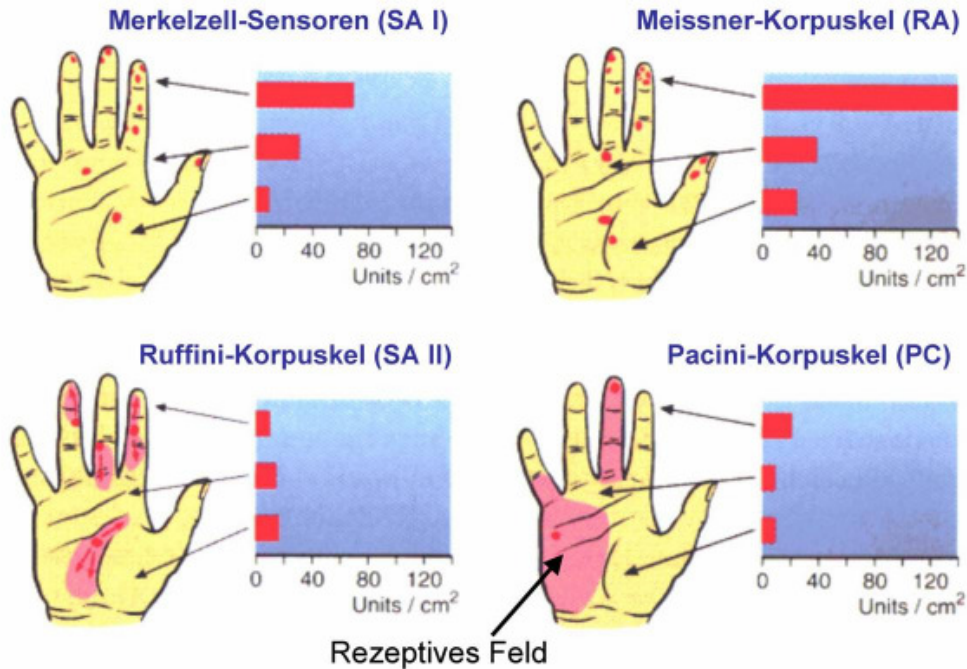


Abbildung 56: Rezeptive Felder und Dichte der einzelnen Hautrezeptoren auf der menschlichen Hand (Handwerker 2004)

Nachfolgend sind die Eigenschaften der Mechanorezeptoren nach Müller-Limmroth (1993) zusammengestellt. Demnach liegt die Wahrnehmungsschwelle für einen punktförmigen Druck bei $3 \cdot 10^{-9}$ Joule. Die Schwellwerte für einen Vibrationsreiz sind frequenzabhängig (siehe Abbildung 57). Es sind Frequenzen zwischen 10 und 1000 Hz für rasch adaptierende Mechanorezeptoren aufnehmbar. Bei einer Frequenz von 10 Hz können über die Mechanorezeptoren der Haut Amplituden von 0,1 mm wahrgenommen werden (Goble *et al.* 1996). Die empfindlichste Frequenz liegt bei etwa 220 Hz mit einer Amplitude von ca. $1 \cdot 10^{-4}$ mm. „Frequenzunterschiede von 10% sind gut unterscheidbar“ (Müller-Limmroth 1993, S. 43). In Abbildung 57 ist die Abhängigkeit der Vibrationsschwellen von der Frequenz bei punktförmigem Druck dargestellt. Demnach nimmt die Sensibilität mit niedrigeren Frequenzen relativ stark ab. Jedoch ist davon auszugehen, dass die Aufnahme dieser niedrigeren Frequenzen zunehmend von den Stellungsrezeptoren der Gelenke übernommen wird. Leider sind aus dem Diagramm die Wahrnehmungsschwellen für sehr niedrige Frequenzen, wie sie bei der Lenkaufgabe vorkommen (< 10 Hz), nicht erkennbar.

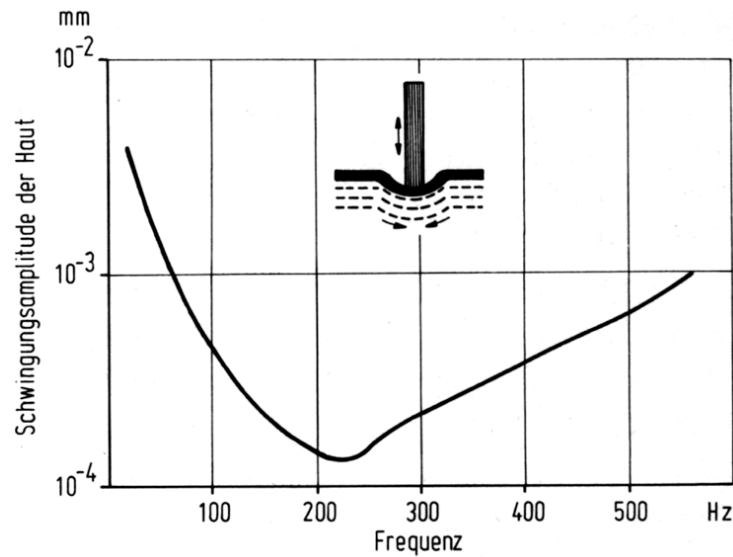


Abbildung 57: Darstellung der Frequenzabhängigkeit der Vibrationsschwellen (Müller-Limmroth 1993, S. 44)

Nach Müller-Limmroth (1993) vermittelt die unter die Haptik fallende Tiefensensibilität (Propriozeption) ein Lage-, Bewegungs- und Kraftempfinden. Folglich sind die Sehnenrezeptoren für die Kraftempfindung maßgeblich (siehe hierzu Kapitel 2.5.4.1 „Längen- und Kraftservomechanismus der Muskulatur beim Lenken und die Bedeutung von Lenkmoment und Lenkwinkel“). Ihre Unterschiedsschwelle liegt bei bereits 0,005%. Die Wahrnehmung der Gelenksstellungen und deren Änderung sind gleichermaßen empfindlich. Kraiss (1970) kommt bei seinen Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass das Kraftempfinden für die Propriozeption maßgeblich zu sein scheint, was aber durch Experimente nicht bewiesen sei.

Bei der Verwendung des Diagramms in Abbildung 57 zur Lenkungsauslegung muss beachtet werden, dass im Fahrbetrieb zahlreiche Schwingungen auftreten und dadurch das Lenkrad nicht schwingungsfrei ist (z.B. durch motorerregte Schwingungen). Ebenfalls ist zu beachten, dass sich das Diagramm auf punktförmige und zur Hautoberfläche senkrechte Schwingungen bezieht. Am Lenkrad treten hingegen vornehmlich Scherdrücke auf. Ferner wird auch das Lenkrad unterschiedlich stark festgehalten, sodass sich das Schwingungsempfinden dadurch ändert.

An den Fingerspitzen werden Amplituden größer als 0,1 als lästig empfunden (Blume und Boelcke 1990). Gemäß Schmidt (1979) können haptische Reize ca. vier mal schneller verarbeitet werden. Die Reaktionszeit auf einen haptischen Reiz liegt bei ca. 50 ms, bei allen anderen Reizen (optisch, akustisch, etc.) bei ca. 200 ms.

Abbildung 58 zeigt eine Kurve gleicher Wahrnehmung von Lenkradvibrationen eines Probandenkollektivs bezogen auf eine Frequenz von 63 Hz und 1 m/s^2 bei einem Lenkraddurchmesser von 325 mm (Giacomin et al. 2004). Der Lenkraddurchmesser ist im Vergleich zu den Lenkraddurchmessern handelsüblicher Fahrzeuge relativ klein. Als Messgröße über der Frequenz dient die RMS-gemittelte Lenkradbeschleunigung. Es ist zu bemerken, dass bei höheren Frequenzen mehr Beschleunigung für das gleiche subjektive Empfinden benötigt wird. Ein solcher Verlauf lässt sich auch in der Akustik finden, wo beispielsweise die Phonlinie die Linien gleicher empfundener Lautstärke sind.

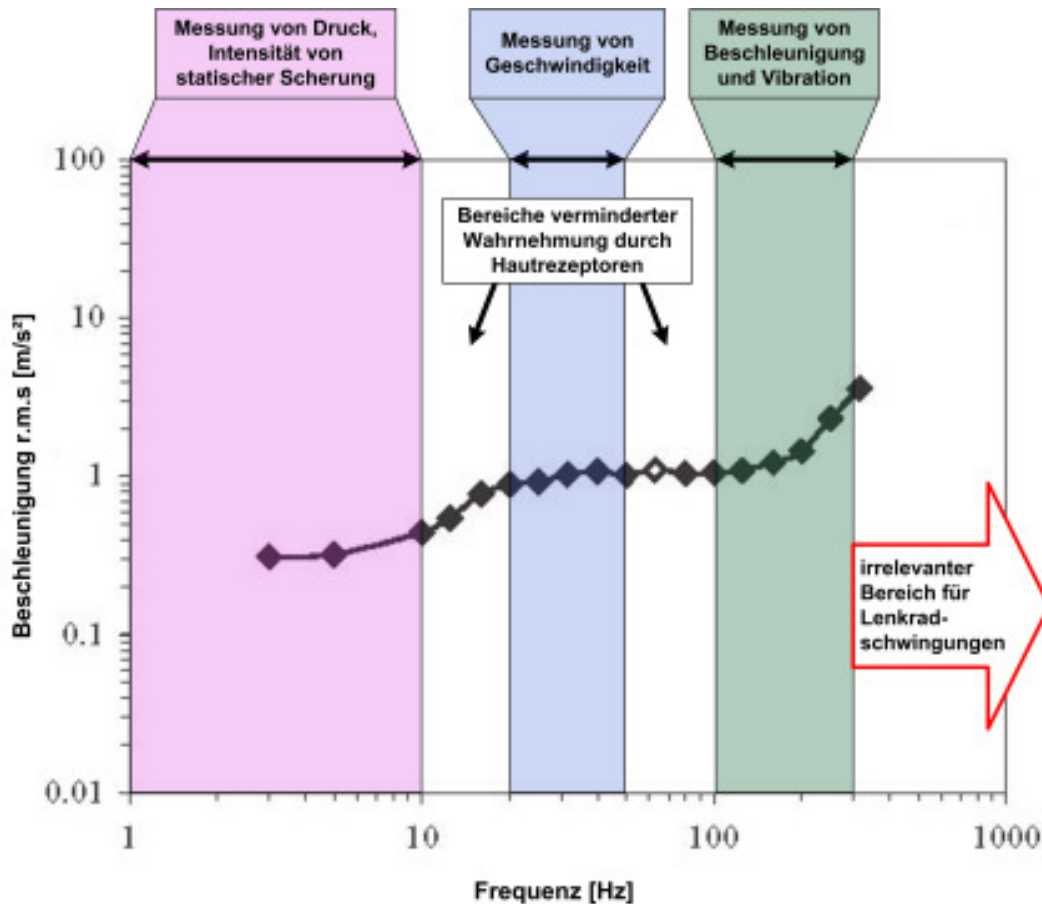


Abbildung 58: Kurve gleicher Wahrnehmung bezogen auf 63 Hz und 1 m/s² ohne Pause für die Versuchsprobanden bei einem Lenkraddurchmesser von 325 mm (basierend auf Giacomini et al. 2004)

Mit Hilfe der Kurven gleicher Wahrnehmung und den Stimulationsfrequenzbereichen der Hautrezeptoren lässt sich eine mögliche Begründung finden, warum manche Lenkungen subjektiv als rückmeldungsarm bezeichnet werden, was vor allem bei der Nachbildung der charakteristischen Eigenschaften konventioneller hydraulischer Servolenkung mit elektromechanischen Servolenkung auffällt. Ursache könnte dann sein, dass z.B. Fahrbahnunebenheiten nicht mit ausreichender Lenkraddrehbeschleunigung an den Fahrer „von unten nach oben“ übermittelt werden und die zugehörigen Frequenzen in den bereits oben erwähnten Bereichen verminderter Rezeptorwahrnehmung liegen. Eine Lösung wäre es demnach, Rückmeldungen über Lenkkräfteänderungen in die Stimulationsfrequenzbereiche der Hautsensoren zu verlegen und entsprechend die Lenkraddrehbeschleunigungen zu erhöhen.

Im Zusammenhang mit der haptischen Wahrnehmung soll noch der Begriff des „Popometers“ geklärt werden, denn dieser Begriff wird sehr häufig benutzt, v.a. in der automobilen Fachpresse, und führt auch in der Wissenschaft zu Fehleinschätzungen. Der Ausdruck „nach dem Popometer fahren“ soll die fortgeschrittene Eigenschaft und Feinfühligkeit des Fahrers für die Beurteilung des Querbeschleunigungsverhaltens eines Fahrzeugs beschreiben. Wie zuvor angesprochen, kann der Fahrer die Querbeschleunigung sowohl kinästhetisch mit Hilfe des Gleichgewichtssinn (Macularorgane) als auch haptisch durch Scherung der Gesäß- und Rückenhaut auf dem Sitz bzw. über den Druck an den Seitenwangen des Sitzes spüren. Das bedeutet, dass der Eindruck über die Querbeschleunigung durch haptische und kinästhetische Wahrnehmung entsteht. Dennoch wird letzteres häufig übersehen, wobei davon auszugehen ist, dass die kinästhetische Wahrnehmung den größten Anteil an der Wahrnehmung, v.a. in Bezug auf die Genauigkeit,

hat. Der Grund für das Außerachtlassen des kinästhetischen Kanals könnte sein, dass der Mensch zwar durch Attribution auf den haptischen Sinneseindruck des „Popometers“ in gewisser Weise zurückgreifen kann, dies aber jedoch für das Macularorgan nicht möglich ist.

Lenkgefühl – Lenkkraftwahrnehmung

Die Wahrnehmung der Lenkarbeit durch den menschlichen Organismus erfolgt dem ergonomischen Verständnis nach über den haptischen Informationsaufnahmekanal. Die Lenkarbeit setzt sich physikalisch aus dem Lenkwinkel und dem Lenkmoment zusammen. Diese beiden Informationen werden durch das Bedienelement Lenkrad von der Maschine auf den Menschen übertragen und sind bei der Entstehung des Lenkgefühls von entscheidender Bedeutung (Abbildung 59).

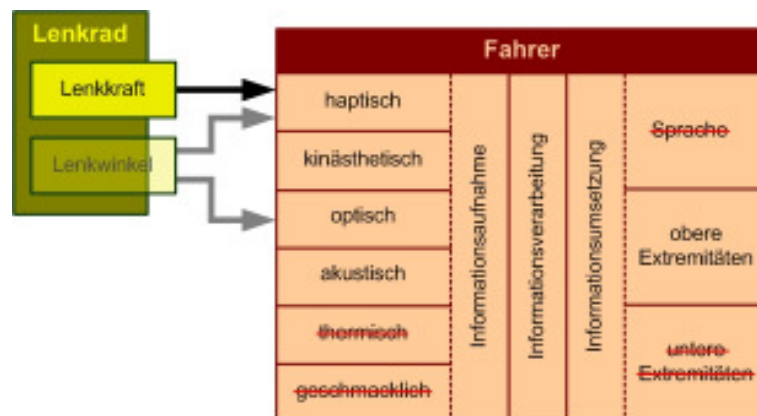


Abbildung 59: Schematische Darstellung der Lenkkraftwahrnehmung

Der Lenkwinkel wird vorwiegend über den haptischen Informationskanal wahrgenommen, der die Körperteilstellung der Arme mit Hilfe der Gelenksrezeptoren registriert. Eine optische Wahrnehmung des Lenkwinkels ist über die Stellung des Lenkrads ebenso in Grenzen möglich. Das Lenkmoment wird nicht direkt wahrgenommen. Es ergibt sich aus dem Lenkraddurchmesser und der Lenkkraft, die über die Anspannung der Muskulatur als auch über die Hautrezeptoren an den Fingern wahrgenommen wird. Zum Thema der Lenkkraftwahrnehmung fertigte *Buschardt* (2003) (Abbildung 60) eine wissenschaftliche Arbeit an, die sich mit synthetischen Lenkmomenten auseinandersetzt. Dabei gelangt er zu sehr wichtigen Erkenntnissen, die bei der Lenkungsauslegung von Bedeutung sind (*Buschardt* 2003, S. 157 und Abbildung 60):

- Die Wahrnehmungsschwellen bei der Lenkmomentenänderung (Differenzschwelle) sind individuell unterschiedlich.
- Die mittlere Absolutwahrnehmungsschwelle nimmt mit abnehmender Frequenz zu.
- Für eine sichere Differenzwahrnehmung ist eine Lenkmomentenänderung von 0,8 Nm notwendig (entspricht einer Lenkkraft von ca. 2 N bei 400 mm Lenkraddurchmesser).
- Lenkmomentenerhöhung und Lenkmomentreduktion um den gleichen Betrag bei festem Lenkwinkel wird offensichtlich unterschiedlich wahrgenommen.
- Lenkvibrationen werden im Frequenzbereich von 200 bis 300 Hz am stärksten wahrgenommen (siehe auch Abbildung 57). Dieser Bereich (rote Zone in Abbildung 60) ist beispielsweise für haptische Warnungen bei HC-Systemen am geeignetsten. Dabei sollte das Lenkmoment für eine sichere Wahrnehmung eine Amplitude von mindestens 1,0 bis 1,2 Nm haben.
- Das Erkennen von Lenkmomentänderungen erfolgt bei bewegtem Lenkrad etwas eher als bei festen Lenkwinkeln.

- Bei kleinen bis mittleren Lenkmomenten spielt das Ausgangslenkmoment entgegen dem Gesetz von Weber keine Rolle.
- Bei größeren Ausgangslenkmomenten geht die Sensitivität für eine Lenkmomentenänderung gemäß dem Webersche Gesetz zurück.
- Bei niedrigeren Frequenzen steigt die mittlere absolute Wahrnehmungsschwelle relativ stark an (blaue Zone in Abbildung 60). In diesem Bereich nimmt der Mensch das Lenkmoment nur noch sehr gedämpft wahr. Eine Verbesserung der Wahrnehmung könnte laut *Buschardt* (2003) ein Tiefpassfilter mit entsprechendem Verlauf bringen.

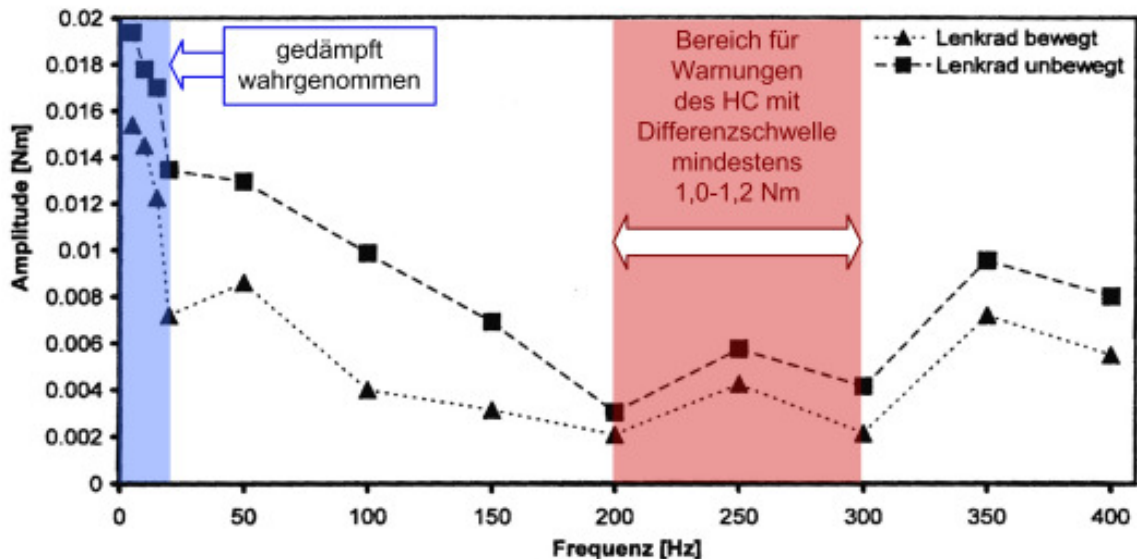


Abbildung 60: Mittlere absolute Wahrnehmungsschwellen beim taktilen Vibrationsempfinden von periodischen Lenkmomentänderungen (*Buschardt* 2003, S. 156)

Diese Untersuchung über das synthetische Lenkmoment ist im Zusammenhang mit einer aktiven Lenkung deswegen von Bedeutung, weil hier während einer Änderung der Lenkübersetzung eine spürbare Änderung der Lenkmomente hervorrufen kann. Das wiederum kann sich störend auf das Lenkgefühl auswirken, weil die zuvor erwähnte Lenkmomenteninformation vom Fahrer nicht eindeutig zugeordnet werden kann. Die Angabe von *Buschardt* (2003), dass für eine sichere Lenkmomentenwahrnehmung (Differenzschwelle) mindestens 0,8 Nm notwendig sind, kann sich nur auf einen bestimmten und unbekanntem Lenkraddurchmesser beziehen.

Üblicherweise liegt der Lenkraddurchmesser (Außendurchmesser) eines Pkws in Europa in etwa bei 380 mm (siehe *Stoll* 1992, S. 115 und Abbildung 157). Die als Sonderausstattung unter dem Namen „Sportlenkrad“ angebotenen Lenkräder besitzen gegenüber herkömmlichen Serienlenkrädern des selben Fahrzeugs meist einen geringeren Lenkraddurchmesser. Gemäß der Erkenntnis von *Buschardt* (2003) ist unter der Annahme eines Lenkraddurchmessers von 380 mm also für die sichere Wahrnehmung eine Lenkkraft von 2,1 N notwendig. *Mann und Popken* (2004) verwendeten bei ihren Versuchen zu einem Querführungsassistenten zur Lenkaufforderung an den Fahrer eine Lenkkraft von 1,5 N, was für die Wahrnehmung durch die Probanden ausreichend war. Damit liegen beide genannten Untersuchungen im etwa gleichen Bereich.

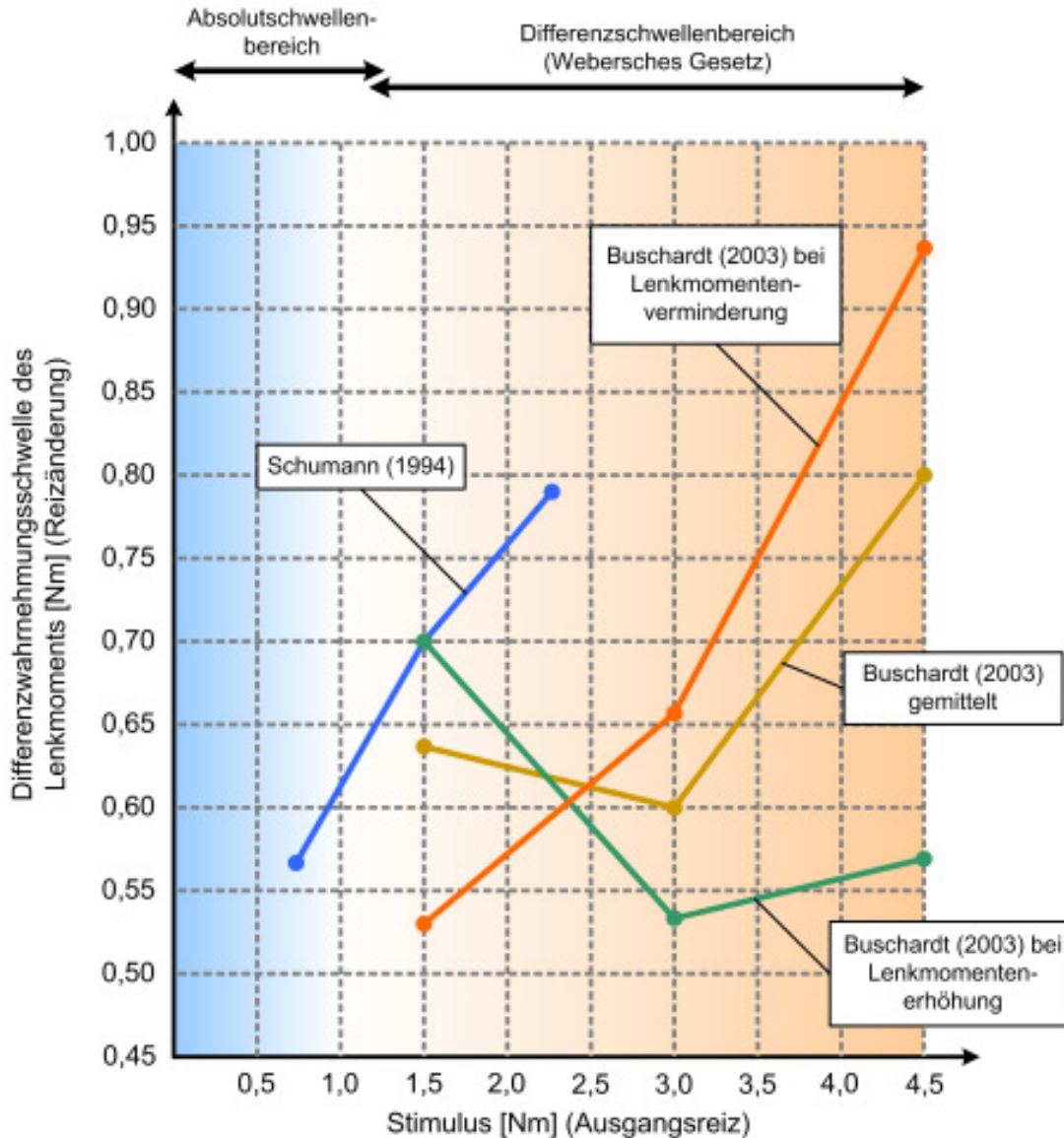


Abbildung 61: Differenzwahrnehmungsschwelle (JND) für das Lenkmoment aus den Untersuchungen von Buschardt (2003) und Schumann (1994) und basierend auf der Interpretation von Barthenheier (2004)

Abbildung 61 zeigt die Interpretation von Barthenheier (2004, S. 14) der Versuche zur Differenzwahrnehmungsschwelle des Lenkmoments von Schumann (1994) und Buschardt (2003). Barthenheier (2004) geht davon aus, dass die deutlich unterschiedlichen Verläufe der beiden Untersuchungen auf die Aussage von Hojos (1993) zurückzuführen sind, dass das Webersche Gesetz für geringe Unterschiedsschwellen keine Gültigkeit mehr besitzt. Diese Aussage muss kritisch hinterleuchtet werden, da bei den Untersuchungen das Problem auftritt, dass der Fahrer keine Momente spüren kann, sondern nur Kräfte, die sich über den Lenkraddurchmesser aus dem Lenkmoment ergeben. Die beiden Untersuchungen von Schumann (1994) und Buschardt (2003) lassen sich somit nur dann vergleichen und in ein gemeinsames Diagramm zum Vergleich einzeichnen, wenn gewährleistet ist, dass beide Untersuchungen mit dem gleichen Lenkraddurchmesser vollzogen wurden, oder die angegebenen Verläufe auf einen bestimmten Lenkraddurchmesser normiert wurden.

Ebenso ist die Aussage, dass das Webersche Gesetz bei niedrigen Differenzschwellen keine Gültigkeit mehr hat, richtig zu interpretieren, nämlich so, wie in Abbildung 61 dargestellt, dass das Gesetz eben nur für Differenzschwellenwerte gilt. Ist der Ausgangsreiz so niedrig, dass von einer Absolutschwelle ausgegangen werden kann, so gilt natürlich das Webersche Gesetz

nicht mehr. Das bedeutet, dass die zugehörigen Messungen und die Methode angepasst sein müssen.

Weiterhin bleibt zur Interpretation von *Barthenheier* (2004) (Abbildung 61) zu sagen, dass der gemittelte Verlauf der Differenzwahrnehmungsschwellen von *Buschardt* (2003) aus den beiden Verläufen der Lenkmomentverminderung bzw. Lenkmomentenerhöhung eigentlich nutzlos ist, da beide Fälle gleichzeitig nicht auftreten und ein Mittelung in diesem Zusammenhang auch nicht sinnvoll wäre. Aus der erwähnten Vorgehensweise wird deutlich, dass es zielführender ist, für die Differenzwahrnehmungsschwellen der Lenkkraft Häufigkeitsverteilungen (Perzentile) zu bestimmen. Eine solche Perzentilierung wird nachfolgend erläutert.

Abbildung 62 zeigt eine hypothetisch-qualitative Häufigkeitsverteilung der Lenkmomentswahrnehmung, die der Annahme zu Grunde liegt, dass die Wahrnehmung des Lenkmoments individuell unterschiedlich ist. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, dass in verschiedenen wissenschaftlichen Berichten unterschiedliche Schwellwerte gefunden wurden. Gemäß der Darstellung würde ein Lenkmoment von 0,5 Nm bereits von 50% aller Versuchspersonen erkannt. Die Darstellung entspricht der in der Anthropometrie üblichen Perzentilierung von Körpermaßen.

Ein Versuch zur Verteilung der Lenkkraftwahrnehmungsschwellen wird in Kapitel 3.3.6 „Versuch 6 – Wahrnehmungsschwellen für die Lenkkraftwahrnehmung“ näher erläutert.

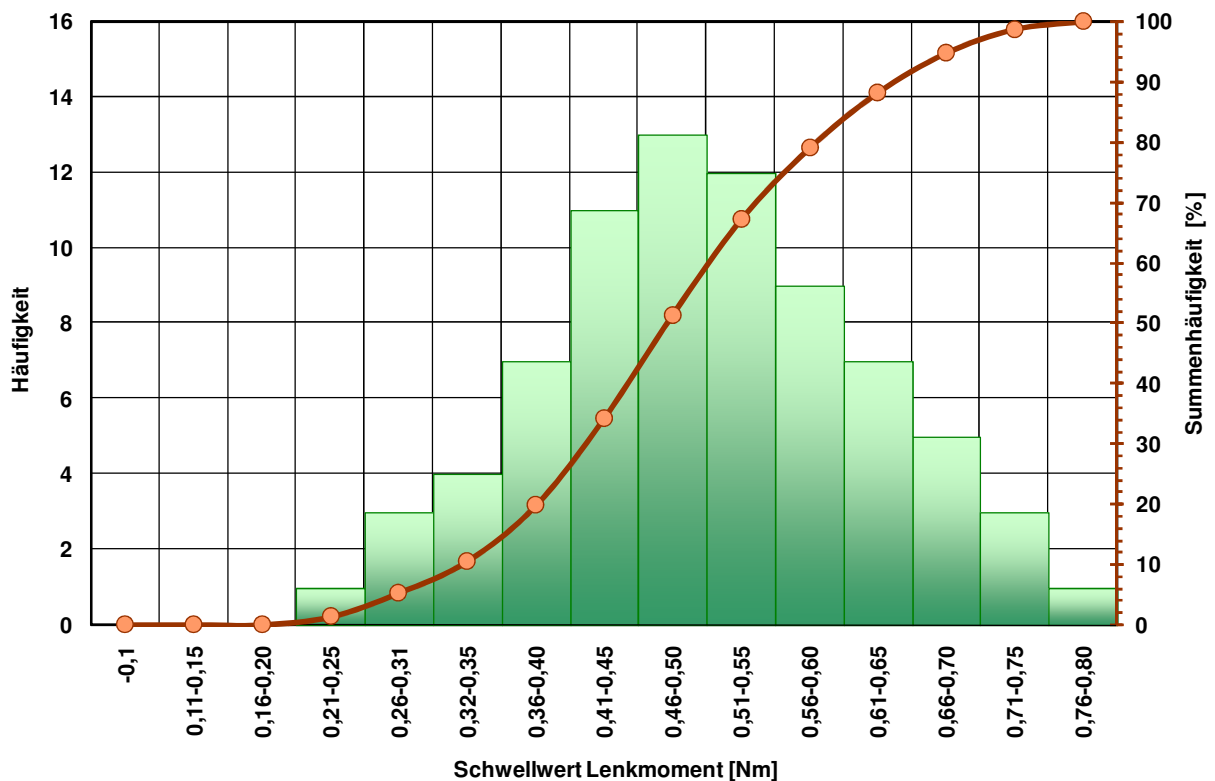


Abbildung 62: *Hypothetisch-qualitative Häufigkeitsverteilung der Differenzwahrnehmungsschwellen des Lenkmoments eines fiktive Probandenkollektivs*

Wie in Kapitel 2.2 „Fahrwerkstechnische Parameter des Lenkgefühl“ deutlich wurde, ist das zeitliche Verhalten der Reaktion eines technischen Systems auf eine Eingabe durch den Menschen für die subjektive Beurteilung von großer Bedeutung. Vor allem das zeitliche Verhalten der Gierreaktion und der Querschleunigung auf eine Lenkeingabe korrelieren relativ stark mit dem subjektiven Empfinden. Ähnlich hierzu wurde durch die Arbeiten von *Hisaoka et al.* (1996), *Deppermann* (1989a) und *Helm* (1978) festgestellt, dass auch der Phasenverzug zwischen dem gewählten Lenkwinkel und der Wahrnehmung des

Rückstellmoments der Lenkung stark mit dem subjektiven Empfinden korreliert. Der Phasenverzug ergibt sich aus der Lenkungshysterese (siehe Abbildung 64). *Hisaoka et al.* (1996) konnten darüber hinaus ermitteln, dass das Übertragungsverhalten zwischen Lenkwinkel und Gierwinkelgeschwindigkeit bzw. zwischen Lenkwinkel und Querbeschleunigung in die subjektive Beurteilung mit eingeht. Ein weiteres Mal wird deutlich, dass der zeitliche Zusammenhang der einzelnen Wahrnehmungen für die Lenkungsbeurteilung maßgeblich zu sein scheint. *Helm* (1996) bestätigt die Erkenntnis beim Durchlenken, dass das Rückstellmoment bei einer konventionellen Lenkung gegenüber dem Lenkwinkel vorausseilt. Die Lenkwinkelgeschwindigkeit hingegen eilt nach. Allerdings wird hier betont, dass es in Fahrsituationen vereinzelt zu deutlichen Abweichungen davon kommen kann. *Buschardt* (2003, S. 42) ergänzt, dass die angesprochenen zeitlichen Verzögerungen von technischen Vorbedingungen abhängen, die nicht so ohne weiteres veränderbar sind.

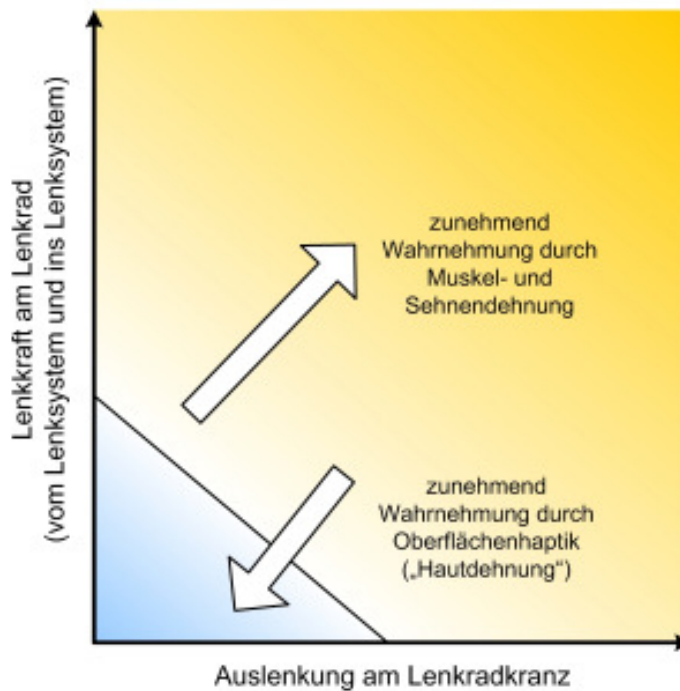


Abbildung 63: Hypothetische Darstellung der Kraftwahrnehmung am Lenkrad in Abhängigkeit der Krafthöhe und des Auslenkungsweges am Lenkradkranz

Bei der Lenkkraftwahrnehmung ist zu unterscheiden, ob diese durch die Oberflächensensibilität erfolgt bzw. durch die Propriozeption über die Dehnung der Sehnen und Muskelspindeln. Bei kleinen Wegen am Lenkrad, die bei weiten Kurven und Geradeausfahrt dürfte die Wahrnehmung hauptsächlich durch die Oberflächensensibilität erfolgen, da die Dehnung von Muskeln und Sehnen nicht ausreichend groß ist. Dafür dürften größere Kräfte nahezu unabhängig von der Wegänderung tendenziell eher durch Muskel- und Sehnendehnung wahrgenommen werden.

Newberry et al. (2007) untersuchten die Wahrnehmungsschwellen (v.a. die Differenzwahrnehmungsschwellen) für den Lenkwinkel und die Lenkkraft. In einem ersten Versuch wurden die Differenzwahrnehmungsschwelle für die Lenkkraft ermittelt, wobei drei verschiedene Ausgangskräfte untersucht wurden. Als Ergebnis konnten *Newberry et al.* (2007) folgenden Werte (Median-Mittelwert) ermitteln:

- Für eine Ausgangskraft von 5,25 N wurde eine Unterschiedsschwelle von 16,5% (0,87 N) gefunden,
- für 10,5 N eine Differenzschwelle von 15,0 % (1,58 N) und
- für 21 N eine Unterschiedsschwelle von 11,5 % (2,42 N).

Zunächst erscheint es bei der Betrachtung der prozentualen Unterschiedswerte so, dass die Probanden mit zunehmender Lenkkraft sensibler auf Unterschiede reagieren. Allerdings ist das bei den Absolutwerten (in [N]) nicht der Fall und die Wahrnehmung von Kraftunterschieden folgt dem Gesetz von Weber. Es sollte noch erwähnt werden, dass nicht alle Probanden mit dem gleichen Lenkwinkel den Versuch durchführten, sondern es wurde durch ein spezielles Verfahren der Winkel für jeden Probanden ermittelt, bei dem sich die Probanden bei der Beurteilung der Lenkkraftdifferenz am leichtesten tun.

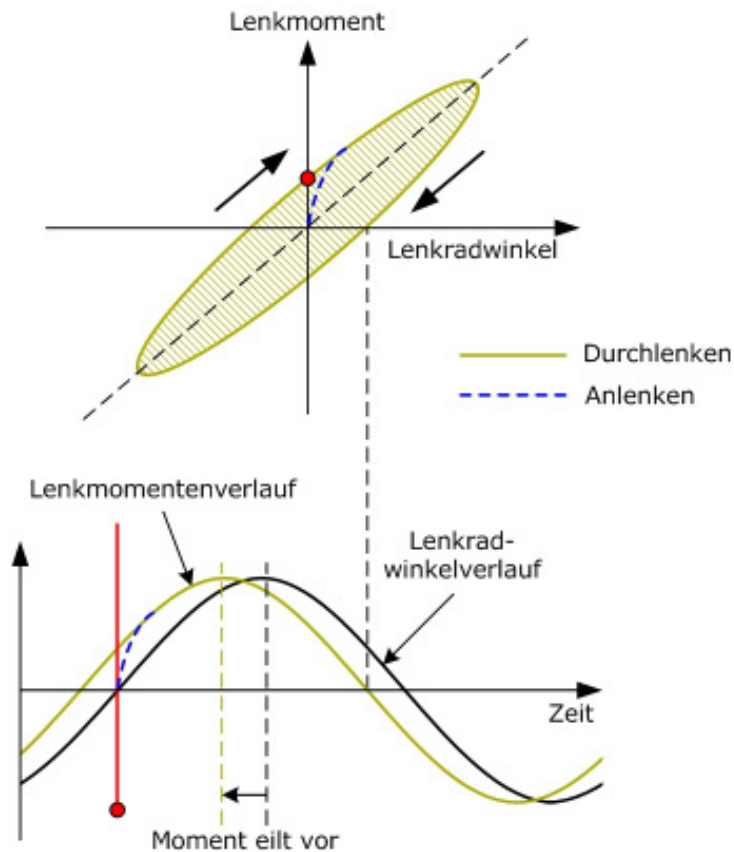


Abbildung 64: Phasenverzug zwischen Lenkradwinkel und Lenkmoment beim Anlenken und Durchlenken ohne Erreichen des Lenkanschlags (in Anlehnung an Fuchs 1993, Abbildung nicht maßstabsgerecht)

In diesem Zusammenhang soll auch die Frage beantwortet werden, welche Auswirkungen eine Lenkkrafterhöhung oder deren Verminderung beim Fahrer für eine Reaktion hervorruft. Von wissenschaftlicher Seite wurde schon häufig versucht, diese Frage in Beziehung des Lenkverhaltens im Fahrzeuggrenzbereich zu beantworten.

Mann und Popken (2004) kommen bei ihren Versuchen zu einem Querführungsassistenten zu der Erkenntnis, dass bei allen Versuchspersonen eine Lenkkraft vom Gefahrenort weg eine Lenkreaktion in die richtige Richtung hervorruft. Ebenso stellt *Kopf* (1994) in seinen Versuchen fest, dass 93% Prozent seiner Versuchspersonen auf eine Lenkkrafterhöhung in die richtige Richtung lenkten, wobei der größte Teil von falschem Lenken auf eine einzige Versuchsperson zurückzuführen sei.

Schmidt et al. (2007) stellen fest, dass es sowohl in Bezug auf die Reaktion als auch der Wahrnehmung von Zusatzmomenten an der Lenkung keine wesentlichen Unterschiede in Abhängigkeit des Alters gibt. Weiteres Ergebnis der Untersuchung von *Schmidt et al.* (2007) ist, dass Zusatzmomente vom Fahrer dann als störend angesehen werden, wenn sie einen Lenkradwinkel von mehr als 3° hervorrufen. Damit bestätigen *Schmidt et al.* (2007) das Untersuchungsergebnis von *Gradenegger et al.* (2005). Ebenso konnte festgestellt werden,

dass die Fahrerreaktion auf ein Zusatzlenkmoment in Kurven stärker sind als auf der Geraden. Schmidt et al. (2007) sehen hier die Begründung, dass das Fahrzeug in Kurven generell auf Lenkmomentänderung selbst ebenso stärker reagiert.

Sind dem Fahrer das Annähern an die maximal mögliche Querbeschleunigung über den haptischen Kanal anzuzeigen ist der, dass dieser Weg die schnellste Möglichkeit darstellt, Informationen an den Menschen zu übertragen. Durch die schnellere Übertragung kann der Mensch folglich schneller reagieren. Neben der immer noch aktuellen Diskussion, ob die haptische Anzeige durch einen degressiven oder progressiven Lenkmomentenverlauf erfolgen soll, ist vor allem die Frage zu klären, in welchem Abstand von der maximal möglichen Querbeschleunigung der nichtlineare Verlauf beginnen soll, um dem Fahrer dies frühzeitig anzuzeigen.

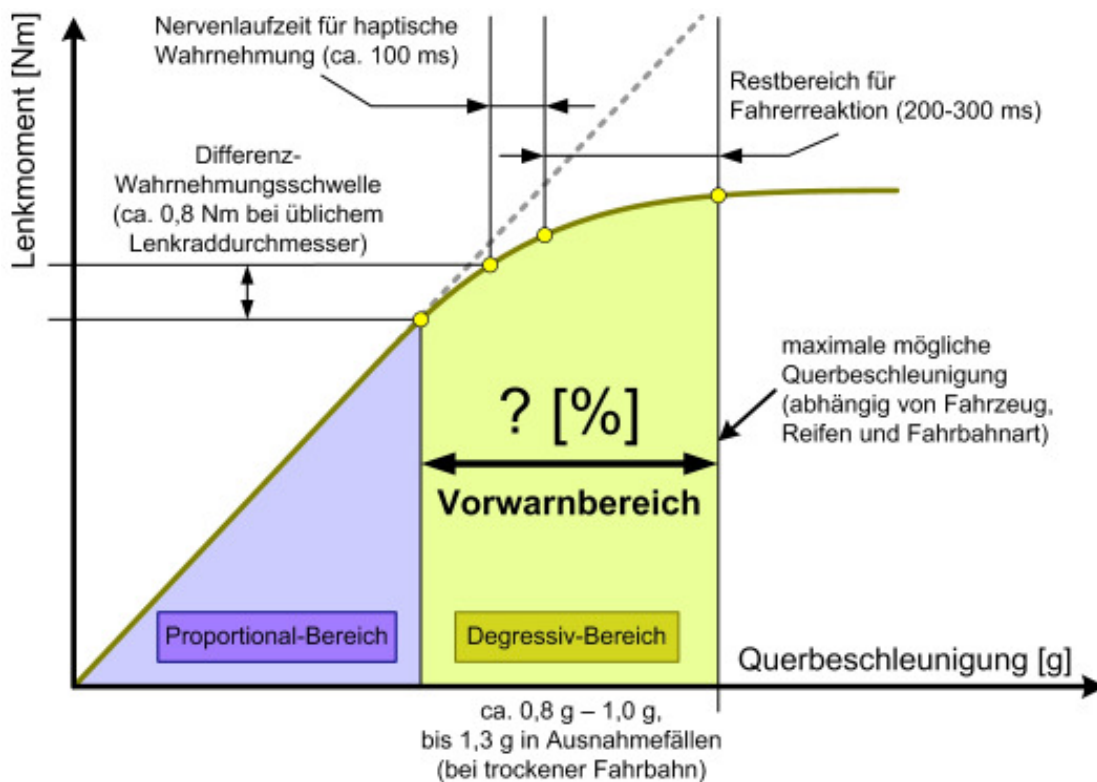


Abbildung 65: Grundsätzlicher und qualitativer Verlauf des Lenkmoments über der Querbeschleunigung mit degressivem Vorwarnbereich

Abbildung 65 veranschaulicht die Überlegungen einer entsprechenden Auslegung des Lenkmoments über der Querbeschleunigung, die einen degressiven Verlauf als Vorwarnbereich für die Annäherung an die maximal mögliche Querbeschleunigung aufweist. Die angestellten Überlegungen sind für einen progressiven Lenkmomentenverlauf ebenso gültig. Die maximale mögliche Querbeschleunigung auf trockener Fahrbahn liegt bei modernen Straßenfahrzeugen bestenfalls bei ca. 1 bis 1,2 g, in Einzelfällen bis 1,3 g. Der maximal erreichbare Wert der Querbeschleunigung hängt von verschiedenen Faktoren, wie unter anderem den Reifen, der Fahrzeugauslegung oder der Fahrbahnart ab.

Damit nahezu jeder Fahrer den Beginn des degressiven Bereichs sicher wahrnehmen kann, ist eine Lenkmomentenänderung von ca. 0,8 Nm notwendig (Buschardt 2003). Ab dem Punkt der sicheren Wahrnehmung benötigt der menschliche Organismus noch eine Zeit von ca. 100 ms (dieser Wert ist ein Anhaltswert und kann individuell davon abweichen) um die Änderung des Lenkmoments von den Rezeptoren der Hände über die Nervenbahnen zu übertragen (reine Nervenlaufzeit). Es lässt sich jedoch nicht sagen, ob diese Laufzeit nicht implizit in der notwendigen Lenkmomentänderung enthalten ist. Um hier auf der sicheren Seite zu sein,

werden in der vorliegenden Überlegung diese beiden Sachverhalte als differenziert angesehen. Der Restbereich bis zur maximalen Querschleunigung muss dem Fahrer so viel Zeit einräumen, dass er noch eine ausreichende Gegenreaktion einleiten kann. Dieser Restbereich muss einen Zeitraum von mindestens 200-300 ms gewährleisten. Für die Zeit bis zum Einleiten einer Reaktion in Form von Gegenlenken benötigt der Fahrer nach einer Untersuchung von *Barthel* (2004) im Schnitt zwischen 200 und 250 ms, in Einzelfällen zwischen 160 und 380 ms. Problematisch ist nun, dass der zur Verfügung stehende Zeitraum bis zum Erreichen der maximalen Querschleunigung unterschiedlich ausfallen kann, weil das von der „Geschwindigkeit“ abhängig ist, mit der sich das Fahrzeug dem Grenzbereich nähert.

Nach einer Untersuchung von *Newberry et al.* (2006) empfindet der Fahrer jedoch nicht immer einen linearen Verlauf der Lenkkraft über den Lenkwinkel, wenn dieser auch tatsächlich linear verläuft. Der Fahrer empfindet sowohl leicht progressive als auch degressive Verläufe als linear. Die Wahrnehmung des linearen Verlaufs folgt einer Verteilung. Die meisten Probanden gaben an, einen leicht degressiven Verlauf zu spüren. Je mehr der tatsächliche Verlauf davon abweicht, desto weniger der Probanden empfinden den Verlauf als linear.

Lenkgefühl – Wahrnehmung von Lenkwinkel und Lenkwinkelgeschwindigkeit

Wie in Abbildung 66 zu sehen ist, wird der Lenkwinkel haptisch und optisch wahrgenommen. Haptisch wird der Lenkwinkel über die Tiefensensibilität, d.h. über die gefühlte Stellung des Hand-Arm-Systems wahrgenommen. Ebenso kann der Lenkwinkel bei ausreichend ausgeprägten Gradienten Lenkkraft/Lenkwinkel über die gefühlte Lenkkraft bestimmt werden.

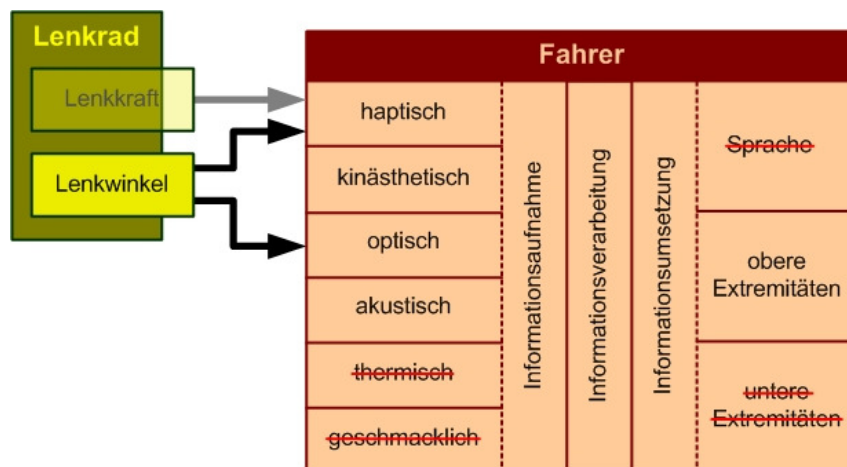


Abbildung 66: Schematische Darstellung der Lenkwinkelwahrnehmung

Für die Wahrnehmung einzelner Körperteilstellungen über den haptischen Kanal existieren ebenso wie bei den anderen Sinneskanälen Wahrnehmungsschwellen, wobei es sich um so genannte Differenzwahrnehmungsschwellen (Just Noticeable Differences, JND) handelt. Basierend auf *Tan et al.* (1994 in *Burdea* 1996), *Biggs und Srinivasan* (2002) und *Doerr* (2003) lassen sich folgenden Differenzwahrnehmungsschwellen angeben:

- Fingergelenk 2,5°
- Handgelenk 2,0°
- Ellenbogengelenk 2,0°
- Schultergelenk 0,8°

Für die Wahrnehmung der Bewegung des Hand-Arm-Systems existieren Schwellwerte. Nach *Schmidt und Thews* (1995) betragen diese Werte für das

- Schultergelenk 0,2-0,4° (bei 0,3 Grad/s) und für das
- Fingergelenk 1,0-1,3° (bei 12,5 Grad/s).

Festzuhalten bleibt, dass bei den angegebenen Werten die sensorische Genauigkeit mit der Größe des Gelenks zunimmt (*Zeilinger 2005*).

Newberry et al. (2007) untersuchten ebenso wie bei der Lenkkraft (siehe vorangegangenes Kapitel) die Differenzwahrnehmungsschwellen (Median-Mittelwerte) für den Lenkwinkel. Sie kommen dabei zu folgenden Ergebnissen:

- Für einen Lenkwinkel von 4° ermittelten sie eine Unterschiedsschwelle von 17% (0,68° bzw. 2,3 mm am Lenkradkranz bei einem Lenkraddurchmesser von 380 mm),
- für einen Winkel von 8° einen Schwellwert von 14% (1,12° bzw. 3,7 mm Wegdifferenz am Lenkradkranz) und
- für 16° einen Differenzschwelle von 11,5% (1,84° bzw. eine Wegdifferenz von 6,1 mm am Lenkradkranz).

Damit wird der Fahrer bei höheren Lenkwinkeln etwas empfindlicher bzgl. der Differenzwahrnehmungsschwelle. Würde das Webersche Gesetz voll und ganz erfüllt, dann müssten die prozentualen Werte im Betrag gleich bleiben.

In einem zweiten Versuchsschritt wurde seitens *Newberry et al. (2007)* ermittelt, inwieweit die Probanden in der Lage waren, eine Veränderung des Lenkwinkels quantitativ zu benennen, was bedeutet, ob die Probanden in der Lage waren, beispielsweise eine Verdoppelung des Lenkwinkels auch als Verdoppelung wahrzunehmen. Dabei kommen *Newberry et al. (2007)* zu dem Ergebnis, dass eine Verdoppelung des Lenkwinkels nicht ganz als eine Verdoppelung empfunden wird. Die zugehörige Gerade hat in einer doppelt logarithmischen Darstellung von tatsächlichem Stimulus und der Empfindung eine Steigung von 0,93, was bei einer Verdoppelung eine Empfindung um ein Niveau von 91% bedeutet.

Lenkgefühl – Center-Point-Feeling

Unter dem Begriff Center-Point-Feeling ist die fühlbare Lenkungsmittellage zu verstehen. Das Lenken um die Mittellage wird als On-Center-Handling bezeichnet, wobei auch geringe Lenkwinkeländerungen um die Mittellage zum On-Center-Handling zu zählen sind. Beides ist vor allem bei der Geradeausfahrt eines Pkws und bei Regelstrecken höherer Ordnung notwendig und vorteilhaft. Das subjektive Empfinden einer Lenkung wird maßgeblich durch On-Center-Handling beeinflusst, da sich der Normalfahrer die meiste Zeit im On-Center-Bereich befindet (*Harrer 2006*).

Für ein gutes Lenkgefühl ist eine gut fühlbare Lenkungsmittellage ein wichtiger Faktor, weil der Fahrer umso besser seine Regelaufgabe erfüllen kann, je besser das Center-Point-Feeling ist (*Buschardt 2003*, S. 43). Die Information der über die Lenkungsmittellage ist nach Auffassung *Buschardts (2003)* gerade für die Geradeausfahrt von Bedeutung. Gemäß der Aussage von *Engels (1994)* ergibt sich aus einem guten Center-Point-Feeling für den Fahrer ein Gefühl eines zuverlässigen Lenksystems. Ferner erhält der Fahrer eine Nullpunktsinformation, die nach der Auffassung von *Bubb (1977a)* bei Regelstrecken höherer Ordnung am Bedienelement unerlässlich ist.

Von wichtiger Bedeutung im Rahmen des Center-Point-Feelings ist die Erkenntnis, dass dem Fahrer bei einer idealen Geradeausfahrt, d.h. eine Geradeausfahrt ohne Störungen aus der Umwelt, wie unebene Fahrbahn oder Seitenwind, die haptische Rückmeldung über die Lenkung fehlt. Dadurch sieht sich der Fahrer unter Umständen gezwungen, eine solche Rückmeldung gleichermaßen zu „suchen“. Im Falle der Querregelung ist es ihm nur möglich, durch Änderung des Lenkwinkels eine für ihn deutlich fühlbare Lenkkraft zu suchen, die im als Regelgröße und Rückmeldung dient. Dieses „Suchen“ der Regelgröße „Lenkkraft“ (siehe Abbildung 67) lässt sich auch in den Versuchsergebnissen des SANTOS-Projekts (*König et al.*

2002) wieder finden: „Dies entsprach am ehesten den Vorstellungen der Probanden in Vorversuchen: Es wurde eine Spurhalteunterstützungsauslegung bevorzugt, die ein leichtes Gegenmoment schon bei normaler Fahrt in der subjektiven Fahrspurmitte erzeugte.“ (König *et al.* 2002, S. 99). Der reale Verlauf macht deutlich, dass zunächst das Reibmoment überschritten werden muss um eine Lenkbewegung auszulösen. Bei höheren Reibmomenten kann also der Fahrer durchaus eine Kraft verspüren, ohne dass eine Lenkwinkeländerung (Wegänderung) stattfindet.

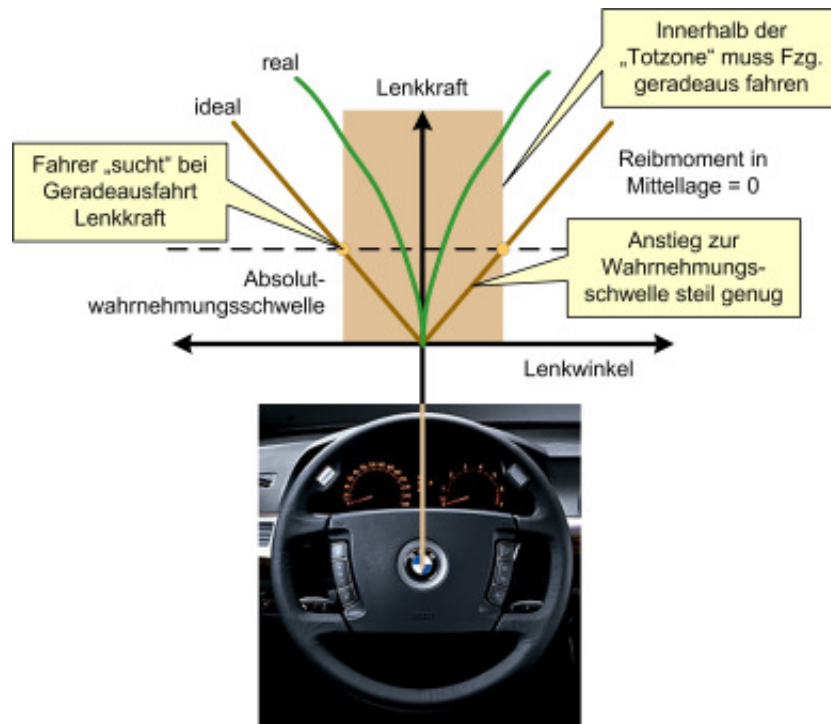


Abbildung 67: Lenkkrachtsuche des Fahrers aufgrund fehlender Regelgrößen bei Geradeausfahrt

Diese Erkenntnis kann in einer Auslegung des Lenkkraft- bzw. Lenkmomentenverlaufs über dem Lenkwinkel im Mittenbereich folgendermaßen Berücksichtigung finden (Abbildung 67). Der Fahrer würde bei Geradeausfahrt gemäß der zuvor beschriebenen Erkenntnis nach einer Seite eine Lenkkraft suchen. Dazu muss zunächst die Absolutwahrnehmungsschwelle überschritten werden. Die „Suche“ der Lenkkraft erfolgt über eine Änderung des Lenkwinkels. Das Fahrzeug sollte infolge der Erwartung an den Geradeauslauf durch den Fahrer trotz einer Lenkwinkeländerung noch geradeaus fahren. Dem steht allerdings das Ziel entgegen, eine möglichst spielfreie und steife Lenkung zu entwickeln. Folglich muss der Anstieg bis zu einer fühlbaren Lenkkraft steil genug sein, damit nicht zu viel Lenkwinkel seitens des Fahrers aufgebracht wird (siehe auch Kushihiro *et al.* 2008).

Ebenso wäre es möglich, einen sog. Offset einzustellen. Das würde bedeuten, dass dem Fahrer das Lenkrad durch eine geringe Lenkkraft weggedrückt wird, aber nur in dem Maße, dass er es natürlich ohne größere Mühe selbst wieder zurückstellen kann und so eine haptische Rückmeldung bekommt, die die Geradeausfahrt weiter stabilisieren kann. Dies ist jedoch nur eine Hypothese und müsste in jedem Fall bezüglich Fahrerakzeptanz und sicherheitstechnischen Überlegungen näher untersucht werden. Schmidt *et al.* (2007) kommen in diesem Zusammenhang zu dem Ergebnis, dass weder die Fahrsicherheit noch das Sicherheitsempfinden des Fahrers durch ein aufgeschaltetes Lenkmoment bei Geradeausfahrt negativ beeinträchtigt werden.

Im Zusammenhang mit dem On-Center-Handling steht auch das Ansprechen des Fahrzeugs aus der Nulllage heraus. Hier ist es entscheidend, dass das Einschlagen aus der Nullstellung einen zügigen Seitenkraft- und Rückstellmomentenaufbau am Reifenlatsch bewirkt.

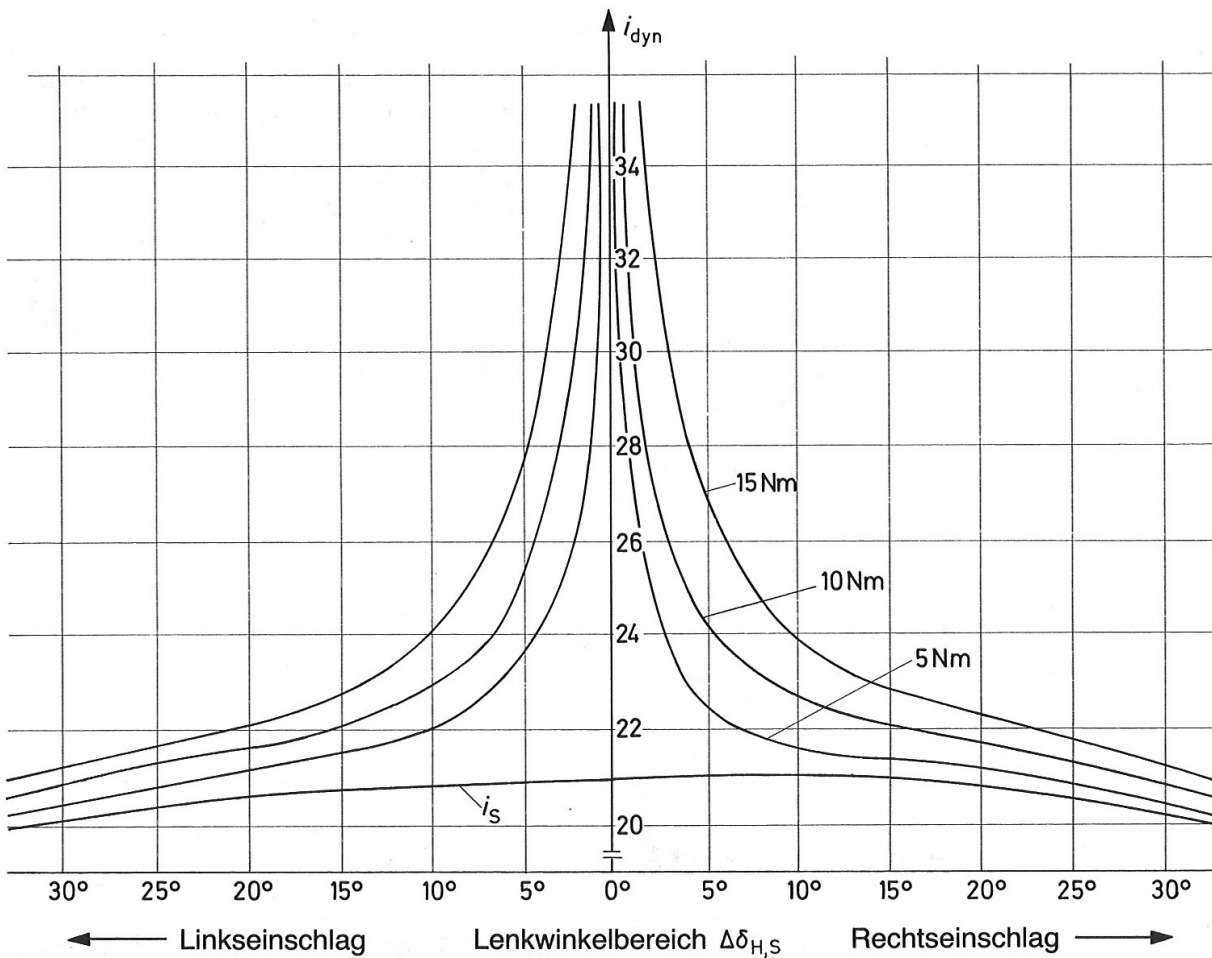


Abbildung 68: Verlauf der statisch-kinematischen (i_s) und dynamisch-elastokinematischen (i_{dyn}) Lenkübersetzung über dem Lenkwinkel aufgetragen als Funktion des Lenkwinkels und des Lenkmoments (Servounterstützung) (Stoll 1992, S. 47)

Die Abbildung 68 (Stoll 1992, S. 47) zeigt den Verlauf der statischen und dynamischen Lenkübersetzung als Funktion des Lenkmoments über dem Lenkwinkel. Die dynamische Lenkübersetzung, die auch wirksame integrale Lenkübersetzung genannt wird, setzt sich aus der kinematischen Lenkübersetzung i_s und einem Anteil i_e aus den Elastizitäten (Stoll 1992, S. 46) zusammen. Die verschiedenen Lenkmomente bzw. der unterschiedliche Grad der Servounterstützung bedingt eine andere dynamische Lenkübersetzung. Eine größere Servounterstützung wirkt sich im On-Center-Bereich nur geringfügig aus. Auffällig ist, dass die dynamische Lenkübersetzung bei 0° Lenkwinkel unendlich groß wird.

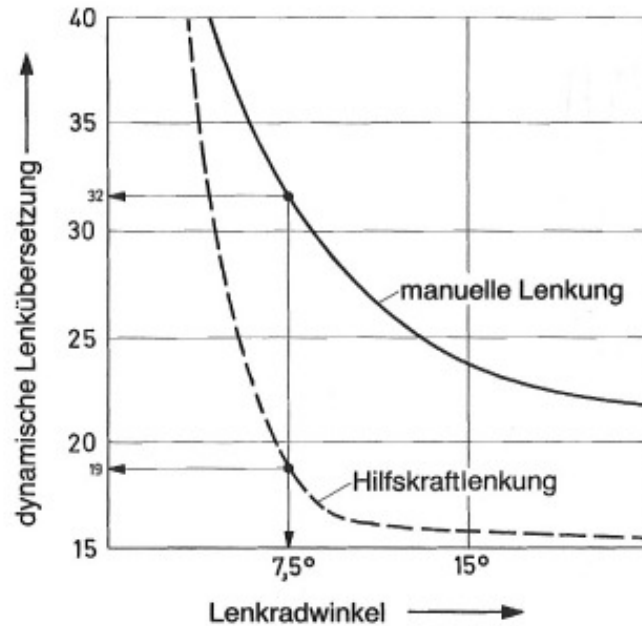


Abbildung 69: Auswirkung einer Servounterstützung auf die dynamische Lenkübersetzung in Abhängigkeit des Lenkradwinkels (Stoll 1992, S. 48)

Wie in Abbildung 69 dargestellt, gilt für Fahrzeuge mit Hilfskraftlenkung (Servolenkung), dass sich die dynamische Lenkübersetzung ab bestimmten Lenkwinkeln gegenüber einer manuellen Lenkung deutlich verringert, da sich die Elastizitäten im Lenksystem weniger bemerkbar machen (Stoll 1992, S. 47-48). Allerdings nur bei Lenkwinkeln, außerhalb bzw. an den Rändern des On-Center-Bereichs (ca. 5° bis 7°). Eine Verkürzung des Ansprechens durch eine höhere Lenkkraftunterstützung dürfte damit nur in einem geringfügigen Maße möglich sein. Grundsätzlich könnten der Einfluss der Elastizitäten dadurch eliminiert werden, indem, wie bei schweren Lkw teilweise umgesetzt, der Arbeitszylinder direkt am Radträger (Achsschenkel) angebracht wird, was aber aus Platz- und Kostengründen beim Pkw nicht möglich ist (Stoll 1992, S. 47).

Lenkgefühl – Fahrbahnkontakt und Rückmeldung

In der Beurteilung einer Fahrzeuglenkung werden häufig die Begriffe „Rückmeldung“ und „Fahrbahnkontakt“ verwendet. Sie sind beide Teil des Lenkgefühls, es ist aber nicht näher definiert, was unter diesen Begriffen genau zu verstehen ist. Grundsätzlich lässt sich sagen, dass unter beiden Begriffen Informationen zu verstehen sind, die der Fahrer größtenteils mittels der Lenkung über spürbare Änderungen von Lenkwinkel bzw. Lenkkraft haptisch aufnimmt (siehe Abbildung 70).

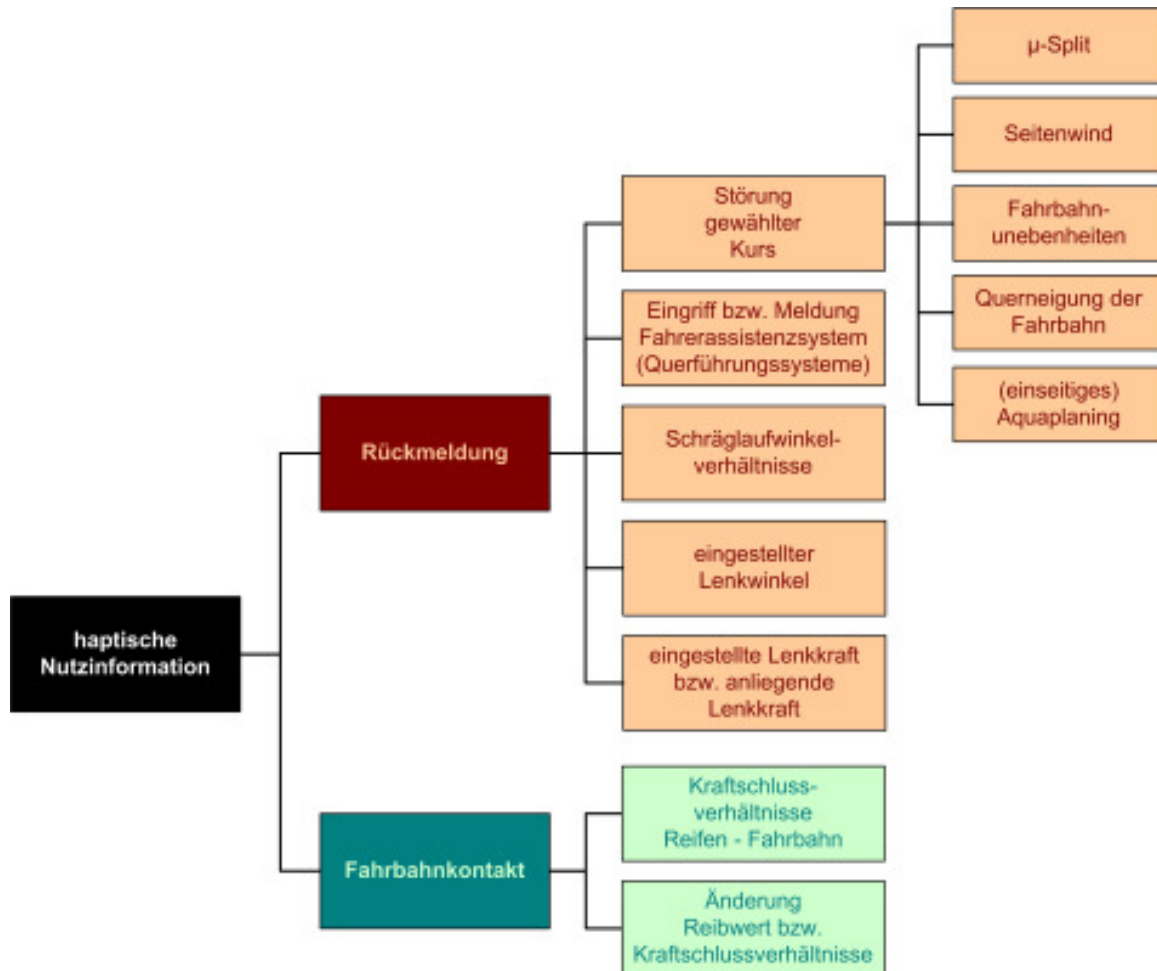


Abbildung 70: Begriffe Rückmeldung und Fahrbahnkontakt als Elemente der haptischen Nutzinformation

Unter Rückmeldung sind Informationen zu verstehen, die der Fahrer bezüglich der Abweichung vom über den Lenkwinkel vordefinierten Kurs aufgrund Fahrbahnunebenheiten erhält, was durch μ -Split, Seitenwind, Fahrbahnunebenheiten, Fahrbahnquerneigung und (einseitiges) Aquaplaning entstehen kann. Unter die Rückmeldung fallen per Definition Eingriffe und Meldungen von Fahrerassistenzsystemen, die Informationen über die Lenkung weitergeben (z.B. Querführungssysteme), der aktuell eingestellte Lenkwinkel, die eingestellte bzw. anliegende Lenkkraft und die vorliegenden Schräglaufwinkelverhältnisse.

Fahrbahnkontakt ist im Gegenzug die Information über die tatsächlichen Kraftschlussverhältnisse zwischen Reifen und Fahrbahn. Darunter fallen die Höhe und die Änderung des Haftreibwertes und die noch verbleibende Reserve bis zur maximal übertragbaren Querbeschleunigung.

Neben der hier dargestellten Einteilungsmöglichkeit existieren noch zahlreiche andere sinnvolle Möglichkeit der Einteilung von Rückmeldung und Fahrbahnkontakt.

Bei genauer Betrachtung, die nachfolgend noch erläutert wird, wird deutlich, dass es in der Realität kaum möglich ist, die Information über die Kraftschlussverhältnisse zwischen Reifen und Fahrbahn, sowie über den Radeinschlag über die Lenkung an den Fahrer unverfälscht bzw. eindeutig interpretierbar zu übermitteln. Das bei Kurvenfahrt am Lenkrad anliegende Rückstellmoment ist also nicht allein vom Reibbeiwert abhängig, sondern zusätzlich von der Fahrgeschwindigkeit und vom Lenkwinkel. Hinzu kommt noch, dass der Fahrer für die richtige Einschätzung über die tatsächlichen Kraftschlussverhältnisse sehr viel Fahrerfahrung mit unterschiedlichen Straßenverhältnissen und im Grenzbereich benötigt, was nachfolgend begründet wird.

Die Abbildung 71 zeigt den Verlauf der maximalen Tangentialspannung über dem Reifenlatsch in Abhängigkeit des maximal möglichen Kraftschlusses für den stationären Fall. Auffällig dabei ist, dass bei weniger maximal möglichem Kraftschluss auch die maximal mögliche Tangentialspannung abnimmt. Bei der Fahrt von einem Fahrbahnbereich mit hoher Haftung in einen Bereich mit niedriger Haftung verschiebt sich die zur Reifenaufstandsfläche normale Kraft S näher zur Mitte der Radaufstandsfläche. Durch den damit geringeren Hebelarm wird weniger Rückstellmoment in das Lenksystem eingeleitet und die Lenkung wird „weicher“.

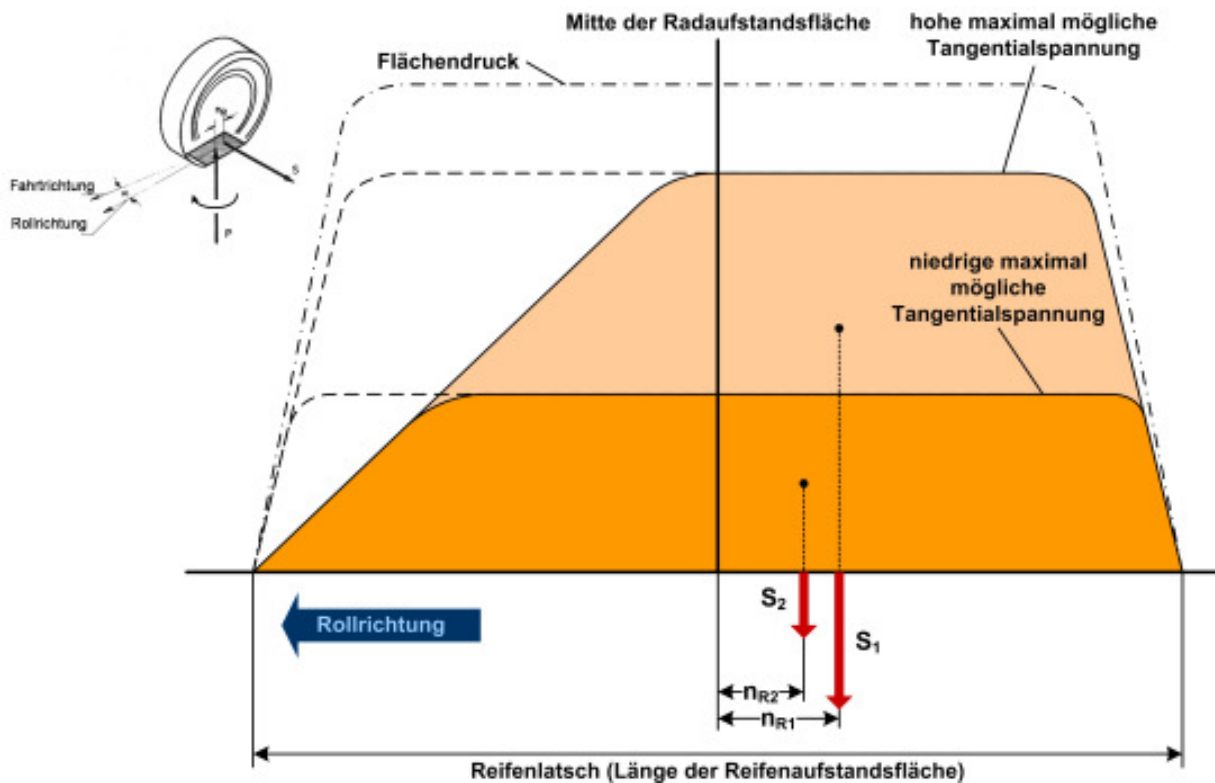


Abbildung 71: Auswirkung der Verringerung der maximal möglichen Reibung auf den Reifennachlauf (nach Gough 1962 und Gengenbach 1969)

Basierend auf der Abbildung 71 verdeutlicht die Abbildung 72, welche Auswirkung die Fahrgeschwindigkeit bei nasser Fahrbahn auf das Rückstellmoment hat. Durch das Aufschwimmen des Reifens im vorderen Bereich des Latsches verschiebt sich die Fläche des tangentialen Spannungsverlaufes mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit immer mehr nach hinten. Zwar nimmt die Kraft S ab, der Hebelarm n erhöht sich in seinem Anteil Lenkmoment überproportional. Daraus wird ersichtlich, dass eine adäquate Rückmeldung über die tatsächlichen Kraftschlussverhältnisse zwischen Reifen und Fahrbahn, dass durch die Kraft S widerspiegelt werden, kaum mehr möglich ist.

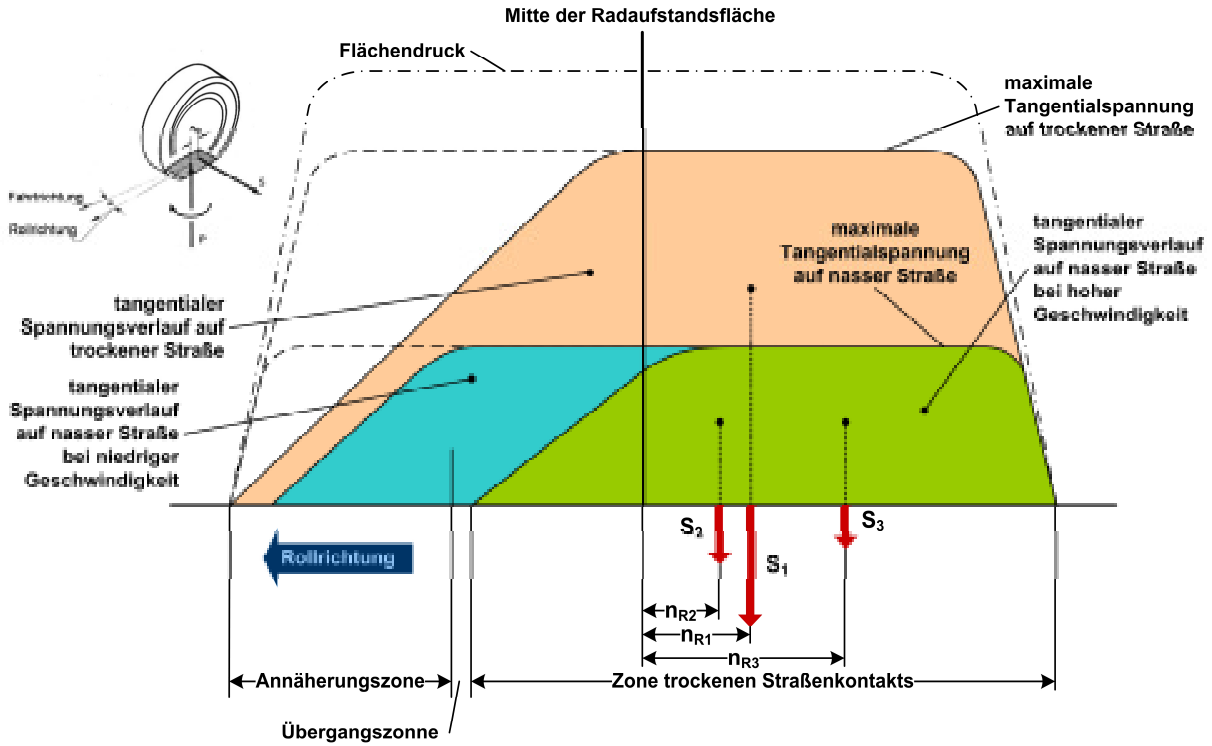


Abbildung 72: Transversaler Spannungsverlauf auf nasser und trockener Straße (nach Bubb 1975)

Erwähnt werden sollte, dass ein komfortabler als auch dynamischer Normalfahrer die Kraftschlusspotenziale auf trockener Straße nicht nutzt. Abbildung 73 zeigt den Bereich eines komfortorientierten und eines dynamischen Normalfahrers für die Fahrbahnzustände Schnee, Eis und trocken, sowie für ein erhöhtes Kraftschlusspotenzial zwischen Reifen und Fahrbahn. Daraus kann gefolgert werden, dass der Fahrer die Grenzen des Fahrbahnkontakts nicht fühlbar zuordnen kann, da er normalerweise nicht mit größeren Quer- und Längsbeschleunigungen fährt. Die denkbar komplexeste Fahrsituation wäre in diesem Zusammenhang das Bremsen in einer unebenen Kurve mit wechselnde Reibwerte (z.B. nasses Laub).

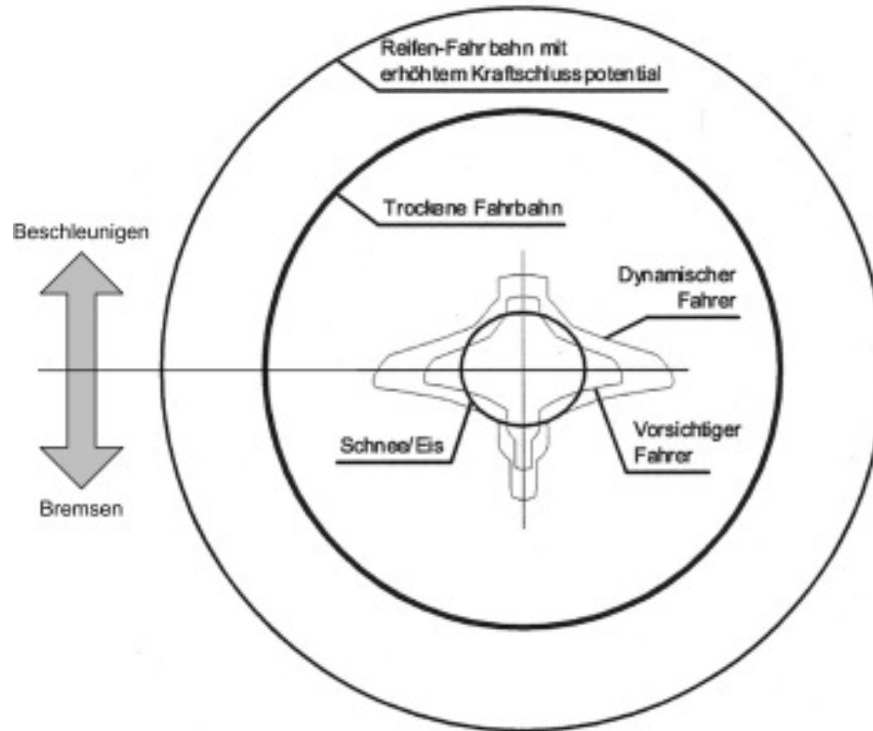


Abbildung 73: Nutzung des Kraftschlusspotenzials von Normalfahrern auf unterschiedlich haftenden Untergründen anhand des Kammschen Kreises (nicht maßstabgerecht) (Braess und Donges 2006, S.8)

Lenkgefühl – Lenkungsstößigkeit, Lenkradschwingungen und Lenkradvibration

Diskomfort im Rahmen des Lenkgefühls betreffen Lenkradschwingungen aller Art, v.a. deswegen, weil sie für den Fahrer in der Regel keine Nutzinformation darstellen. Abbildung 74 zeigt basierend auf einer Darstellung von *Elser* (2007), welche Formen von Lenkradschwingungen unterschieden werden können. In der Darstellung wird nach den drei Bewegungsformen stochastisch angeregte Bewegung, periodisch angeregte Schwingung und periodisch angeregte Hubbewegung unterschieden. Weiter wird nach Schwingungen, die von der Fahrbahn angeregt sind und nach Schwingungen die durch Ungleichförmigkeiten am Rad (Reifen und Felge) entstehen differenziert. Frequenzen bis 1,5 Hz beeinflussen das Lenkverhalten des Fahrers am Lenkrad, Frequenzen bis in etwa 20 Hz das Komfortempfinden in Bezug auf mechanische Schwingungen (wobei hier allerdings auch die Amplitude einen hohen Einfluss hat) und Frequenzen ab 30 Hz werden zunehmend akustisch relevant. Die menschliche Hörschwelle bezogen auf die Frequenz liegt im niedrigsten Fall bei 16 Hz. Die Lenkungsstößigkeit ist eine fahrbahnangeregte Schwingung zwischen ca. 8 und 25 Hz. Sie überdeckt sich teilweise mit dem Lenkradzittern und dem sog. Shimmy. Aus diesem Grund ist zu erwarten, dass v.a. der Normalfahrer zwischen diesen drei Formen der Lenkradschwingungen nicht mehr adäquat unterscheiden kann.

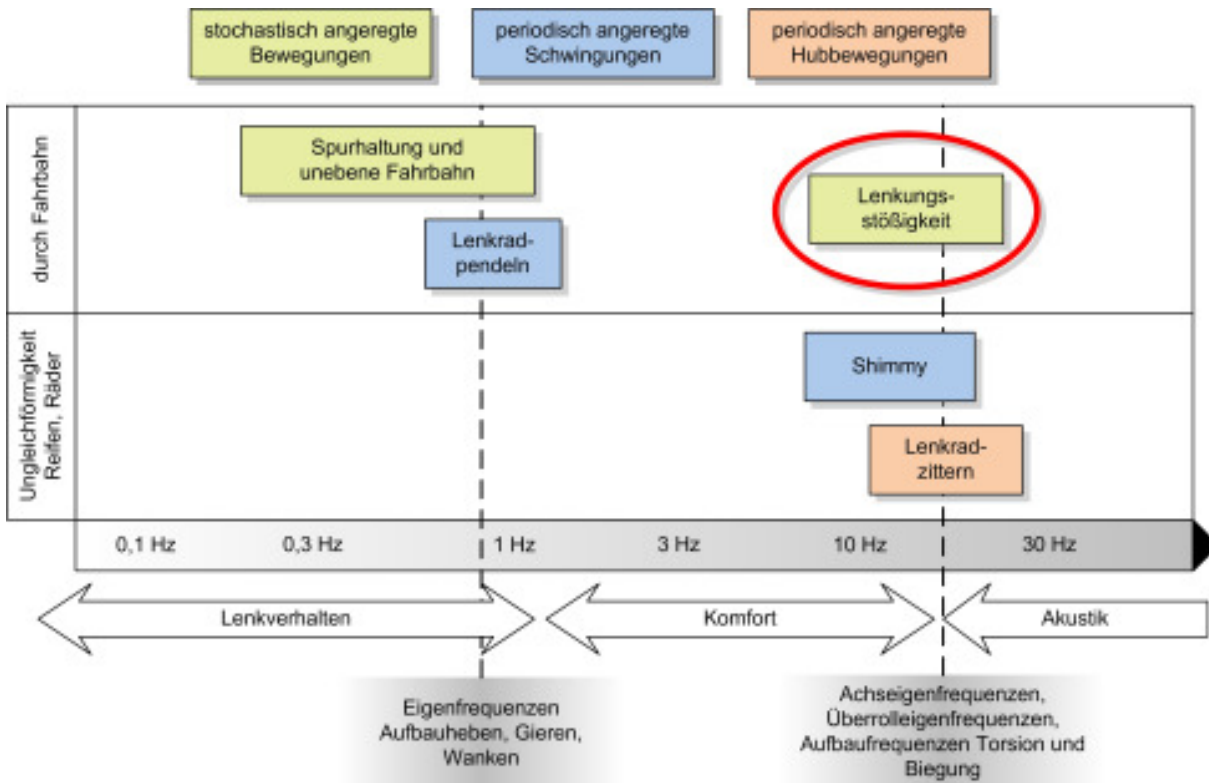


Abbildung 74: Einordnung verschiedener Formen von Lenkradschwingungen (basierend auf Elser 2007)

Es muss noch erwähnt werden, dass die Darstellung von Abbildung 74 die Amplitude (Drehgeschwindigkeit und Drehbeschleunigung) nicht berücksichtigt, diese aber für das Stößigkeitsempfinden durch den Fahrer maßgeblich ist. In der Arbeitswissenschaft sind zwar bei Schwingungsbelastungen Gesundheitsgrenzen bekannt und für Sitzvibrationen existieren ebenfalls Komfortgrenzen, jedoch lassen sich die dort erwähnten Grenzen nicht so ohne weiteres für die Beurteilung der Lenkungsstößigkeit einsetzen. Bisher gibt es nur sehr wenige Untersuchungen, die sich mit Lenkungsstößigkeit auseinandersetzen (siehe von Groll 2006). Beispielsweise haben Untersuchungen im Rahmen der Lenkmomentwahrnehmung mit Seitenwindstörungen (Wallentowitz 1979, 1980 und 1981) ergeben, dass der Mensch auf höherfrequente Lenkmomentänderungen nicht mehr messbar reagiert.

Es bleibt also abzuwarten, ob eine eindeutige Grenze definiert werden kann, die zwischen Stößigkeit (Störinformation) und Fahrbahnkontakt (Nutzinformation) trennt. Falls dem so ist, dann kann sie so aussehen wie in Abbildung 75 dargestellt. Hier ist Lenkradbeschleunigung am Außendurchmesser über der Frequenz dargestellt. Die Lenkradbeschleunigung am Außendurchmesser sollte deswegen verwendet werden, weil sie die physikalische Größe ist, die an der Schnittstelle Lenkrad auf den menschlichen Körper wirkt. Ferner ist zu erwarten, dass der Übergang vom nicht stößigen zum stößigen (Diskomfort) nicht abrupt und für alle Fahrer gleich erfolgt, sondern in Form einer Verteilung. Das bedeutet, dass es Fahrer gibt, die einen Diskomfort empfinden, während andere das nicht tun. Deswegen ist die Summenhäufigkeit mit einem Farbtonverlauf von grün (unten links) nach rot (oben rechts) dargestellt. Er soll den zunehmenden Anteil von Personen widerspiegeln, die einen Diskomfort empfinden.

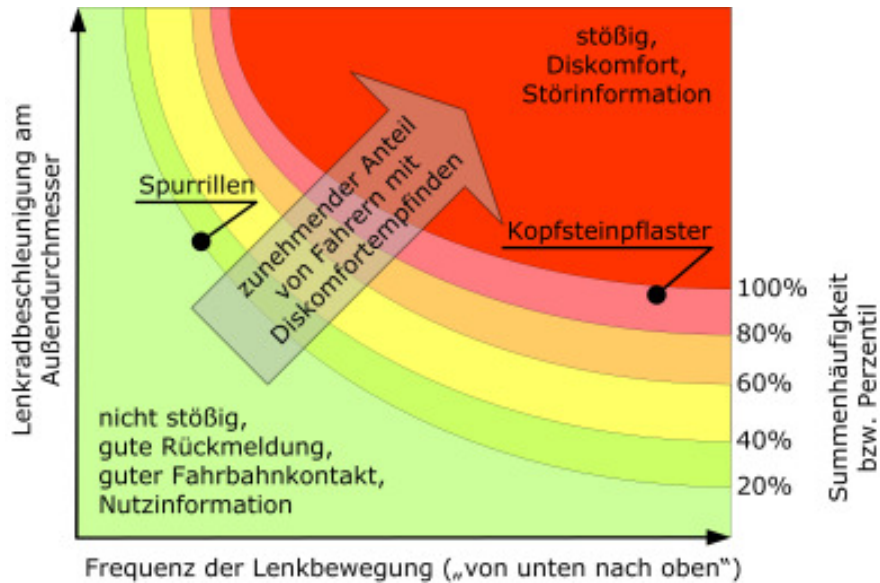


Abbildung 75: Hypothetische Darstellung der empfundenen Lenkungsstöfigkeit über Frequenz und Beschleunigung einer Lenkradschwingung

Die Frage, wann eine Lenkung als stöbig empfunden wird, gewinnt durch den zunehmenden Serieneinsatz von elektromechanischen Servolenkungen an Bedeutung. Der Grund liegt in der Kombination von Zahnstangenlenkung und elektrischer Servounterstützung. Während hydraulische Servolenkungen systembedingt eine mehr oder weniger unveränderbare Eigendämpfung besitzen, können bei elektromechanischen Servolenkungen die Dämpfungseigenschaften stärker variiert werden. Hinzu kommt noch, dass Zahnstangenlenkungen über die Spurstangen höhere Lenkkräfte in das Lenksystem übertragen als das beispielsweise Kugelumlauflenkungen tun (Reimpell und Betzler 2000, S. 290), wobei letztere in heutigen Personenkraftwagen kaum mehr zu finden sind.

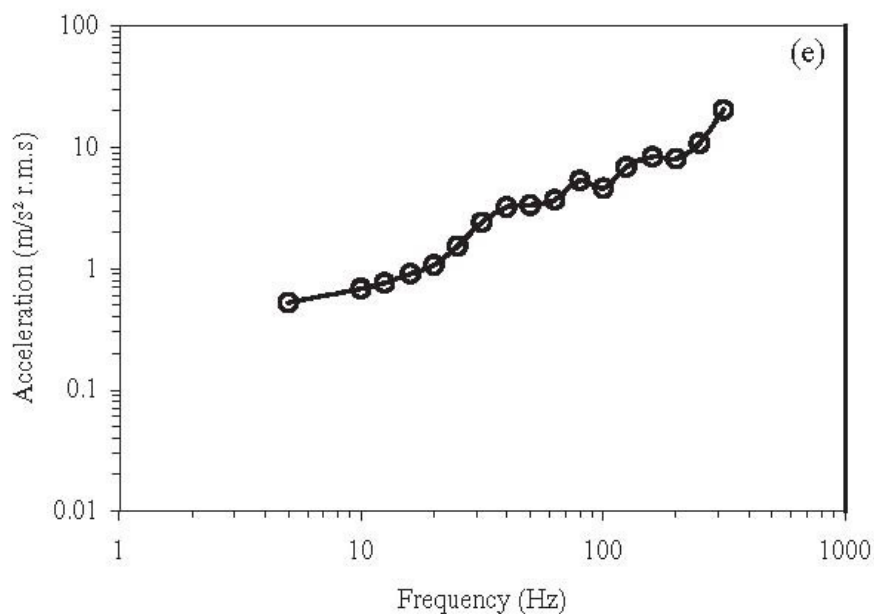


Abbildung 76: Verlauf der als störend empfundene Vibrationen des Lenkrades über der Frequenz (Giacomin et al. 2004)

Eine Untersuchung über das Vibrationsempfinden des Fahrers an der Lenkung führten Giacomin et al. (2004) durch. Dabei wurde auch untersucht, ab wann Vibrationen als störend

empfundener werden. Diese Erkenntnisse können für die Beurteilung der Lenkungsstößigkeit übernommen werden. Wie in Abbildung 76 zu erkennen ist, empfindet der Mensch mit zunehmender Frequenz erst mit zunehmender Beschleunigung des Hand-Arm-Systems die Lenkvibrationen als stößig. Ursache hierfür ist, dass analog zur störenden Empfindung die Wahrnehmungsschwellen mit zunehmender Frequenz ebenfalls zunehmen, d.h. dass die Empfindlichkeit gegenüber störende Vibrationen abnimmt.

Eine weitere Frage ist, ab wann für den Fahrer Lenkraddrehschwingungen von Lenkradvibrationen unterschiedlicher Form nicht mehr unterscheidbar ist, was durch eine zukünftige wissenschaftliche Untersuchung an einem Lenkungsprüfstand geklärt werden könnte. Von ergonomischer Seite lässt sich sagen, dass Drehschwingungen von Vibrationen aller Art an der Lenkung dann leichter zu unterscheiden sind, je größer der Durchmesser des Lenkrades ist, weil damit linear Bewegungen entsprechend des Hebelarms in ihrer Auslenkung größer sind.

2.5.2.5 Zeitliche Aspekte der Wahrnehmung und Zeiterleben in Bezug auf das Lenkgefühl

Die zeitlichen Aspekte scheinen bei der Sinneswahrnehmung im Zusammenhang mit dem Lenkgefühl eine entscheidende Rolle zu spielen. Hinweise darauf liefern Versuche, die das zeitliche Verhalten der Gier- bzw. Querschleunigungsantwort auf die Lenkradeingabe untersuchen. Dabei wird immer wieder festgestellt, dass zu große zeitliche Verzögerungen und große Schwimmwinkel zu einer negativen Fahrzeugbeurteilung führen. Hier sind die Arbeiten von *Fujinami et al.* (1995), *Braess* (1976), *Riedel und Arbinger* (1997 und 2000) und *Aurell et al.* (2000) zu nennen. Die Untersuchungen von *Bergman* (1973) und *Bergman* (1976) kommen zu dem Resultat, dass das Fahrzeug umso schlechter beurteilt wird, je größer der Zeitverzug zwischen visuellem Eindruck und der haptischen Information der Fahrzeugbewegung ist.

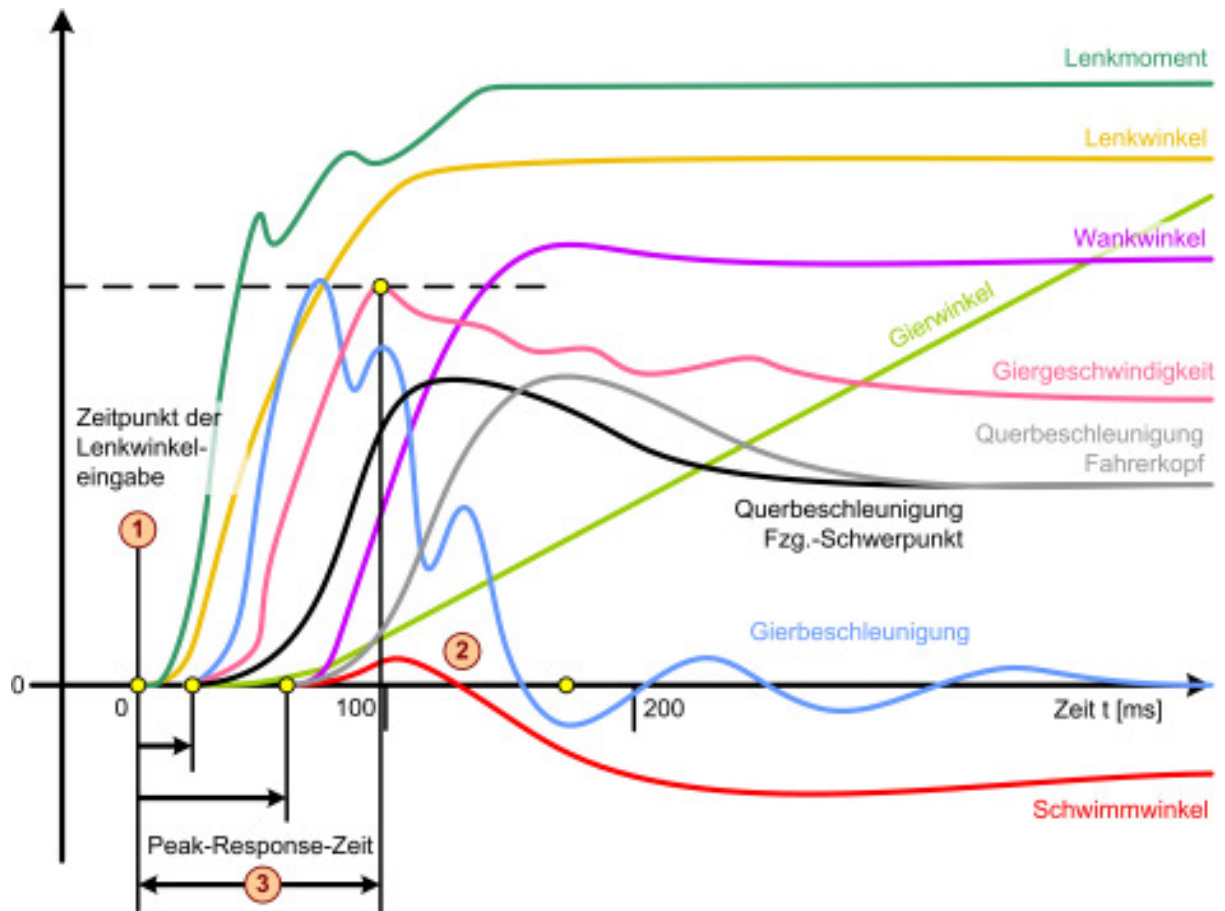


Abbildung 77: Laufzeitunterschied einzelner Fahrdynamik- und Lenkungsgrößen beim Lenkwinkelsprung basierend auf einer Simulation (Werte qualitativ und gültig für 100 km/h und stationäre Querbeschleunigung von 6 m/s^2)

Abbildung 77 zeigt den qualitativen zeitlichen Verlauf

- der Gierwinkelgeschwindigkeit,
- Gierwinkelbeschleunigung,
- des Gierwinkels,
- der Querbeschleunigung im Fahrzeugschwerpunkt,
- der Querbeschleunigung in der Nähe des Fahrerkopfes (Messhelm),
- des Schwimmwinkels,
- des Lenkmoments,
- des Lenkwinkels und
- des Wankwinkels.

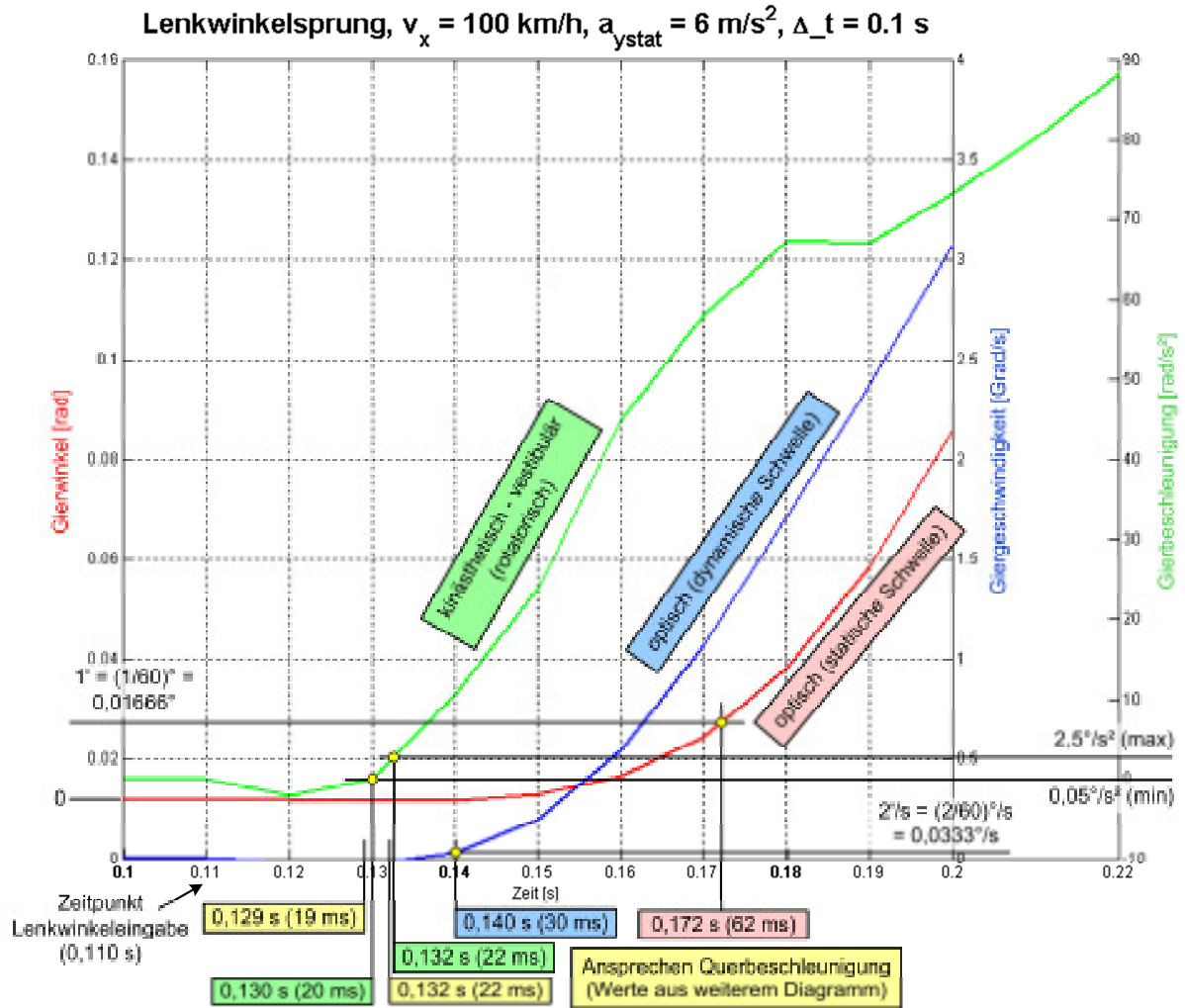
Lenkwinkel und Lenkmoment steigen zeitgleich zu Beginn der Lenkwinkeleingabe (Abbildung 77 Nr. 1) an. Geschwindigkeiten und Beschleunigungen von Lenkmoment und Lenkwinkel sind aus Gründen der Komplexität der Darstellung nicht angegeben. Nach ca. 100 ms folgt die Gierreaktion mit dem zeitgleichen Anstieg der Querbeschleunigung. Der Zeitraum zur Lenkwinkeleingabe ist sehr gering, lässt sich aber dadurch erklären, dass an der Lenkung erst die Elastizitäten überwunden werden müssen, bevor es zu einer Auslenkung der Vorderräder kommt. Es sei erwähnt, dass der Schwimmwinkel hier immer noch null ist, d.h. an den Rädern kein Schräglaufwinkel anliegt (Schwimmwinkelgeschwindigkeit ungleich null).

Als dritte Phase folgt die Reaktion des Fahrzeugaufbaus, ausgedrückt durch den Wankwinkel. Der Schwimmwinkel folgt ebenfalls in der dritten Reaktionsphase und ist zunächst positiv, d.h. er zeigt zum Kurveninneren. Das lässt sich dadurch erklären, dass sich der Reifenschräglaufwinkel an allen Rädern erst allmählich aufbaut, daran zu erkennen ist, dass der Schwimmwinkel ins Negative abfällt (Abbildung 77 Nr. 2).

Nach wie vor ungeklärt ist die Theorie, wie sie *Meier-Dörnberg und Strackerjahn* (1977) aufgestellt haben, dass beim Lenkungsrücklauf das Lenkmoment dem Lenkwinkel voreilt. Eine Untersuchung auf speziellen Reifenprüfständen erwies sich als schwierig, da die Trägheiten und das Gesamtverhalten einer solchen Anlage anders sind als im Fahrzeug (*Braess* 2006). Dadurch kann die Existenz eines voreilende Moment nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden.

Unklar bei der Theorie des voreilenden Moment ist zum einen, ob dies tatsächlich so ist und zum anderen, ob dies bedeutet, dass das Lenkmoment beim Anlenken nacheilt. Sicherlich ist auch beim Anlenken die Wahrnehmungsschwelle für die Lenkkraftwahrnehmung entscheidend, allerdings handelt es sich dabei um eine vom Menschen ausgelöste Handlung, die durch Krafteinleitung erfolgt. Damit kann von Wahrnehmung der Lenkkraft aufgrund der eigenen Handlung nicht mehr gesprochen werden.

In der Abbildung 77 ist nur der rein physikalisch vorhandene Phasenverzug der einzelnen Parameter zu sehen. Nun ist aber für den Eindruck des Lenkgefühls nicht von Bedeutung, welchen zeitlichen Versatz die Maximalwerte tatsächlich aufweisen, sondern mit welchem zeitlichen Verzug die Sinneswahrnehmung von Querschleunigung, Gieren und Lenkmoment an den Wahrnehmungsschwellen erfolgt. Das kann gegebenenfalls zu einer größeren oder kleineren Verzugszeit führen als bei den üblicherweise in der Fahrwerkstechnik verwendeten Peak-Response-Zeiten (Abbildung 77 Nr. 3). Nachfolgend werden zum besseren Verständnis die Wahrnehmungsschwellen anhand einer simulierten Anlenksituation dargelegt.



In Abbildung 78 ist anhand einer Simulation der Zeitverzug der einzelnen Gierbewegungsgrößen (Gierbeschleunigung, Giergeschwindigkeit, Gierwinkel) auf eine Lenkwinkleingabe aufgetragen. Die Gierbeschleunigung wird rein vestibulär und damit kinästhetisch aufgenommen. Der Gierwinkel wird ausschließlich durch die optische Informationsaufnahme bestimmt. Die Gierwinkelgeschwindigkeit wird nach derzeitigem Erkenntnisstand optisch bestimmt. Hier ist die dynamische Wahrnehmungsschwelle von $2^\circ/\text{s}$ für einen Visus von 1 relevant. Die statische Wahrnehmungsschwelle liegt dabei bei $1'$. Durch das Einzeichnen der entsprechenden Schwellen, kann der zeitliche Verzug der einzelnen Größen gegenüber dem Lenkbefehl und unter den Größen selbst bestimmt werden. Der Lenkbefehl erfolgt im Beispiel bei $0,1 \text{ s}$. Die Wahrnehmungsschwelle der Gierbeschleunigung wird demnach zuerst überschritten. Sie ist im vorliegenden Fall mit $0,05^\circ/\text{s}^2$ angenommen, kann aber gemäß der Tabelle 8 und Tabelle 9 je nach Versuch bis zu $5^\circ/\text{s}^2$ betragen. $0,05^\circ/\text{s}^2$ sind aber selbst in dem Zoomausschnitt so gering, dass sie zu null angenommen wird ($0,05^\circ/\text{s}^2$ entspricht Nulllinie). Als nächstes erfolgt die Überschreitung der Schwelle für die Giergeschwindigkeit von $2^\circ/\text{s}$, danach erst die Überschreitung der Schwelle des Gierwinkels von $1'$.

Abbildung 79 zeigt den Verlauf des Gierwinkels, Gierwinkelgeschwindigkeit und Gierbeschleunigung mit der gleichen Simulation aus Abbildung 78, allerdings mit dem Unterschied einer geringeren stationären Querbeschleunigung von $2,5 \text{ m/s}^2$ und einer etwas weniger steilen Lenkwinkelrampe (der Anlenkvorgang dauert $0,5 \text{ s}$). Mit der geringeren

Querbeschleunigung und der weniger steilen Lenkwinkelrampe soll eine bessere Aussage für Normalfahrer im Normalfahrbereich möglich sein. In einen Querbeschleunigungsbereich von 6 m/s^2 (vgl. Abbildung 78) kommt der Normalfahrer in der Regel nur in Notsituationen.

Im Vergleich fällt beim Verlauf der niedrigeren Querbeschleunigung folgendes auf:

- Die Zeitspanne für den unteren und oberen bekannten Schwellwert von Querbeschleunigung und vor allem der Gierbeschleunigung weiten sich mehr auf, was an dem geringeren Gradienten der zugehörige Größe liegt.
- Der Zeitraum (Zeitverzug) des Überschreitens der einzelnen Wahrnehmungsschwellwerte gegenüber dem Lenkbefehl nimmt deutlich zu.
- Bei „steileren“ Anlenkvorgängen (höhere Querbeschleunigung und steileren Anlenkrampen) scheint die Überschreitung der optischen Wahrnehmungsschwellen der der kinästhetischen hinterherzuhinken. Dieser Effekt verwässert sich bei weniger „steileren“ Anlenkvorgängen, die wiederum für Normalfahrer häufiger sind.

Mit der Abbildung 78 und der Abbildung 79 wird klar, dass der Gierbeschleunigung eine hohe Bedeutung zukommt (siehe hierzu auch *Kushiro et al. 2008*)

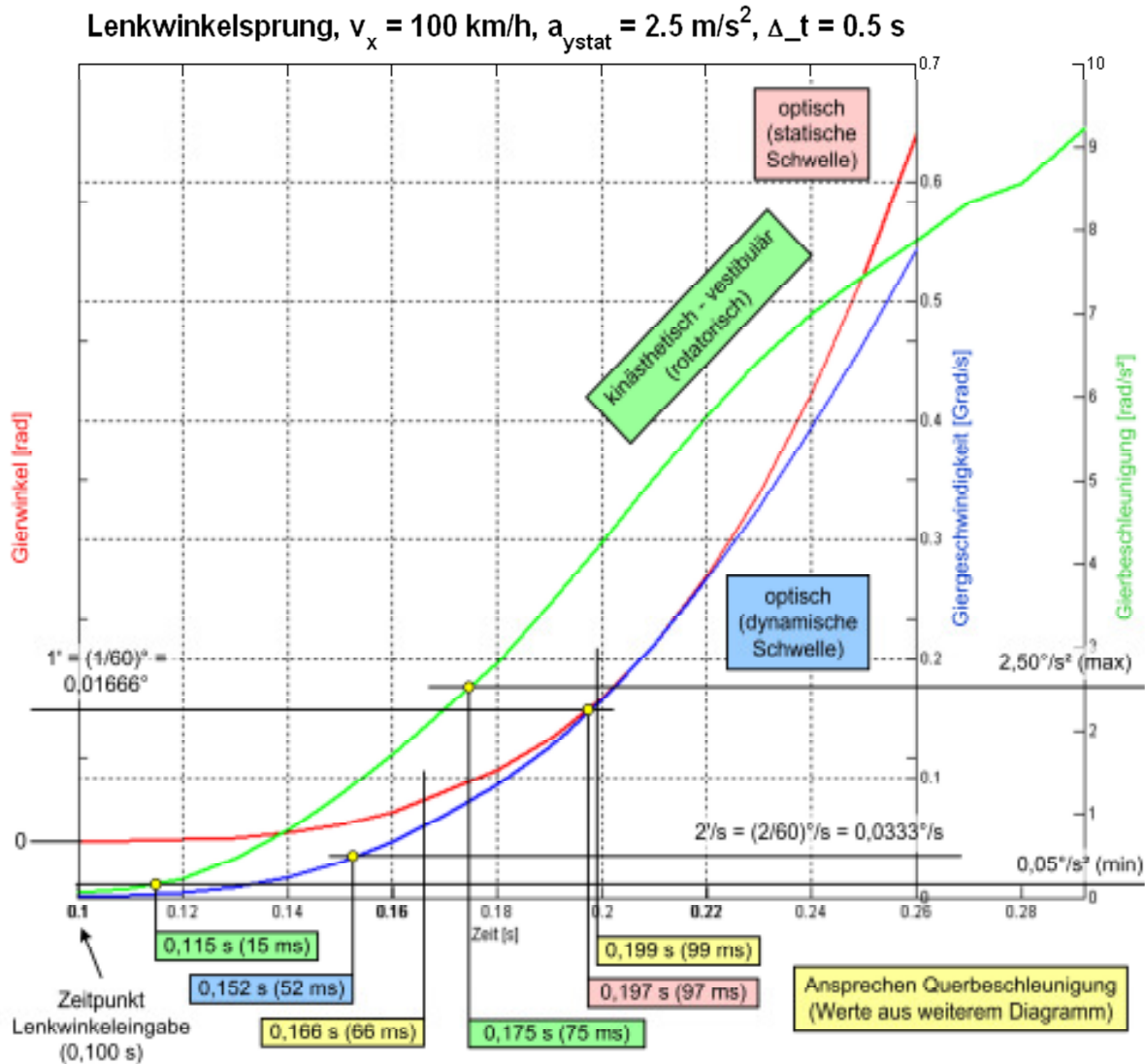


Abbildung 79: Laufzeitunterschiede der Wahrnehmung von Gierwinkel, Gierwinkelgeschwindigkeit und Gierbeschleunigung beim Anlenken (Simulation)

Unerlässlich ist demnach, dass die Querschleunigung zusammen mit der Gierwinkelbeschleunigung – nicht nur Gierwinkelgeschwindigkeit – betrachtet wird, sobald zeitliche Zusammenhänge bezüglich der menschlichen kinästhetischen Wahrnehmung untersucht werden. An dieser Stelle sei daran erinnert, dass sich in manchen wissenschaftlichen Artikeln große Unstimmigkeiten ergeben, sobald die Frage beantwortet werden soll, ob die vestibuläre Wahrnehmung neben den Beschleunigungen auch Geschwindigkeiten wahrnimmt (siehe Kapitel 2.5.2.1 „Kinästhetische Wahrnehmung“).

Trotz allem muss der Gierwinkelbeschleunigung eine höhere Bedeutung eingeräumt werden als der Gierwinkelgeschwindigkeit, sofern ein tiefer gehendes Verständnis der subjektiven Beurteilung gefunden werden soll. Beim Einlenken in eine Kurve wird die Gierwinkelgeschwindigkeit nicht sofort erreicht, sondern das Fahrzeug beschleunigt zunächst auf den entsprechenden Gierwert. Damit tritt also die Gierwinkelbeschleunigung in den Vordergrund. Ferner ist *Helm* (1978) ebenso wie *Bolte* (1991b) der Ansicht, dass die Schwellwerte der Gierwinkelgeschwindigkeit während der Fahrt nur selten überschritten werden, allerdings ist dies bei Anwendung des Schwellwertes von 2°/s klar widerlegt.

Der jetzige Wissensstand lässt die Vermutung aufkommen, dass der Mensch die Laufzeitunterschiede der Überschreitung der Wahrnehmungsschwellen sämtlicher beteiligter Sinne (kinästhetischer, optischer, haptischer Sinn) in irgendeiner Form vergleichend bewertet. Vermutlich müssen die Laufzeitunterschiede aller Wahrnehmungen innerhalb eines Zeitfensters liegen, um ein subjektiv positiven Fahreindruck zu erhalten. Das ist aber nur eine Vermutung, die im jeden Fall genauer untersucht werden muss. Wie schon weiter oben erwähnt, weisen einige Untersuchungen bzgl. des Zeitverhaltens von Gierbewegung und Querschleunigung darauf hin.

Es ist sicherlich trivial zu verstehen, dass große zeitliche Verzögerungen (Sekunden bis Minuten) der Reaktion eines technischen Systems auf eine menschliche Bedieneingabe (hier Lenkeingabe) als negativ bewertet werden. Genauer gesagt, wird das dynamische Verhalten des technischen Systems als negativ bewertet. Man muss allerdings davon ausgehen, dass der Mensch Zeitverzögerungen bereits im Bereich von zehntel Sekunden oder sogar noch darunter „fühlen“ bzw. bewerten kann. Das Auflösungsvermögen von optischen Sinneszellen liegt bei etwa 10 ms, was bedeutet, dass Reize, die innerhalb dieser Zeit aufeinander folgen von der Sinneszelle nicht als unterschiedlich wahrgenommen werden können.

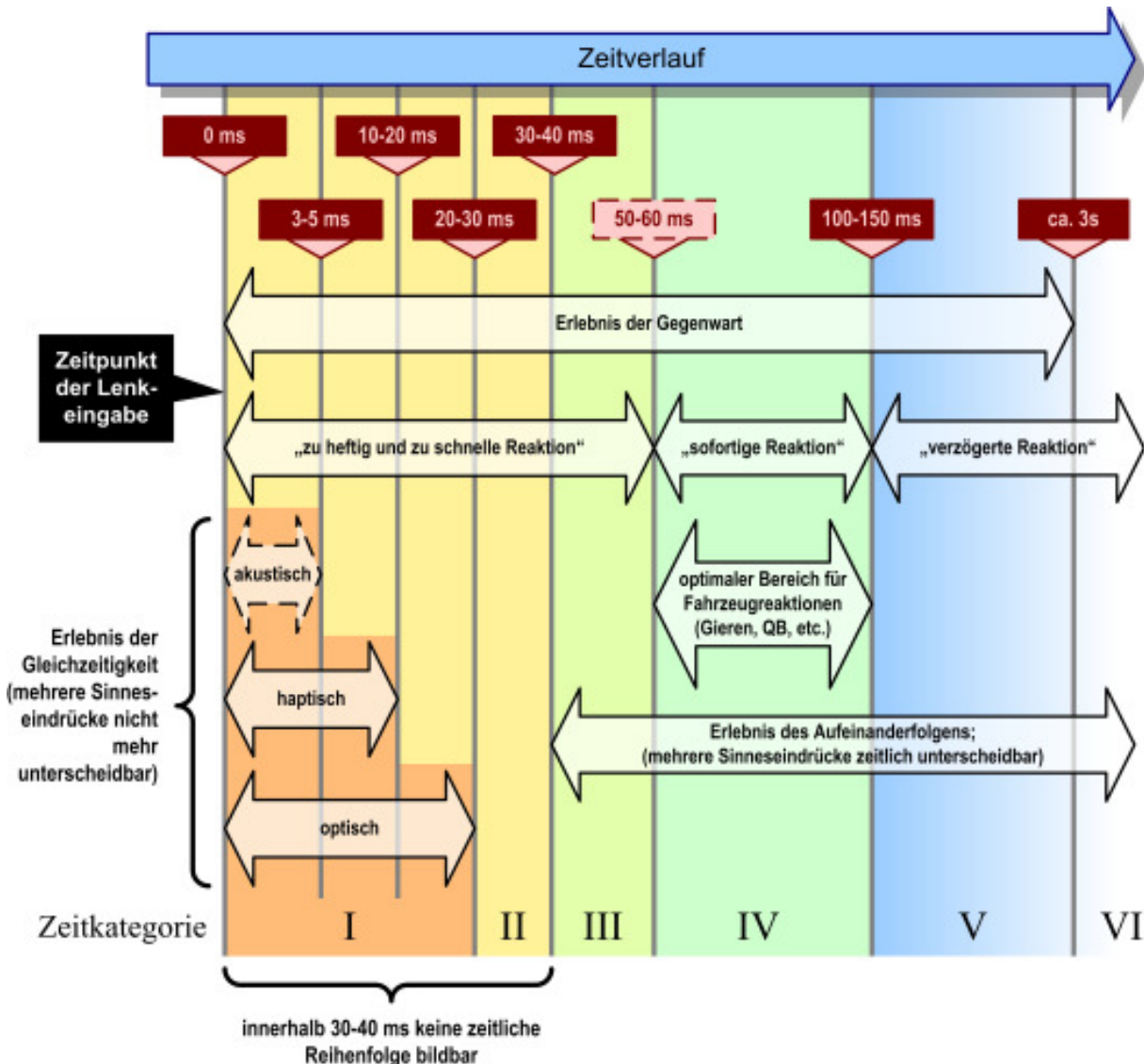


Abbildung 80: Zeitliches Erleben von Sinnesindrücken beim Anlenken eines Fahrzeugs (bildliche Darstellung basierend Vaas 2005 und Pöppel 2000)

Gemäß den Untersuchungen von Pöppel (2000) (Abbildung 80) empfindet der Mensch auch noch oberhalb des Auflösungsvermögens der Sinneszellen unterschiedliche Sinnesreize, die rein physiologisch nacheinander das Gehirn erreichen, als gleichzeitig („Erlebnis der Gleichzeitigkeit“). Er ist nicht in der Lage die einzelnen Sinnesreize voneinander zu unterscheiden. Oberhalb der Schranke von mindestens 30-40 ms ist der Mensch in der Lage, die einzelnen Sinneseindrücke voneinander als unterschiedlich wahrzunehmen („Erleben des Aufeinanderfolgens“). Die Sinneseindrücke werden vom Menschen dann zwar als differenziert wahrgenommen, aber bis ca. 100-150 ms noch als sofortige bzw. zeitgleiche Reaktion interpretiert.

Teilweise basierend auf den Ergebnissen von Pöppel (2000) beschreibt Vaas (2005) den aktuellen Stand bei der Erforschung der Zeitwahrnehmung durch den Menschen. Die Abbildung 80 ist um Zeitkategorien erweitert, was im folgenden noch Erläuterung findet.

Zunächst erscheint dem Menschen nicht das gegenwärtig, was auch tatsächlich physisch simultan ist, sondern ein Zeitraum, der in etwa 3 Sekunden dauert. Hiervon ist das Erleben von zwei getrennten Signalen zu unterscheiden. Für den Tastsinn sind zwei Signale die nicht weiter als 10-20 ms auseinanderliegen nicht mehr als getrennt voneinander wahrnehmbar. Für

optische Reize beträgt dieser Zeitraum 20-30 ms und für akustische 3-5 ms. Diese Werte stimmen mit denen von *Pöppel* (2000) angegebenen überein (siehe Abbildung 80). Akustische Signale sind für das Lenken und das Handling eines Fahrzeuges nur von untergeordneter Bedeutung. Optische Reize spielen eine größere Rolle. Bedeutend für das Lenken wäre auch der Zeitraum, bei dem zwei kinästhetische (vestibularische) Signale nicht mehr voneinander unterschieden werden können. Hierzu machen weder *Vaas* (2005) noch *Pöppel* (2000) Angaben. Die unterschiedlichen Zeiten für die verschiedenen Signalarten gehören alle zur Zeitkategorie I (siehe Abbildung 80).

Generell ist auch aus der Forschung zur Zeitwahrnehmung bekannt, dass Signale, die in einem Zeitfenster von 30-40 ms erfolgen, nicht mehr in einer zeitlichen Reihenfolge gestellt werden können. Das bedeutet, dass zwei akustische Signale, die beispielsweise 10 ms auseinanderliegen, als zwei voneinander getrennte Signale wahrgenommen werden, der Mensch jedoch im Nachhinein nicht mehr bestimmen kann, welche der beiden Signale zuerst erfolgte (Zeitkategorie II). Das kann er erst dann, wenn die Signale mehr als 30-40 ms auseinanderliegen (Zeitkategorie III und höher). Dazu sollte noch erwähnt werden, dass das Durchsuchen des Kurzzeitgedächtnisses ebenfalls 30-40 ms dauert.

Bei manchen Untersuchungen zum Fahrzeughandling ist bekannt, dass vermutlich eine untere zeitliche Grenze von 50-60 ms für die Fahrzeugreaktion existiert, die nicht unterschritten werden sollte, da dies sonst vom Fahrer als negativ beurteilt wird (z.B. *Fujinami et al.* 1995). Diese Grenze bildet mit den erwähnten 30-40 ms Signale der Zeitkategorie III. Nun kann aber nicht gesagt werden, ob diese Kategorie tatsächlich existiert, d.h. ob nicht doch die 50-60 ms mit denen 30-40 ms von *Pöppel* (2000) (siehe Abbildung 80) identisch sind.

Aus der Ergonomie ist bekannt, dass Verzögerungen auf Eingaben von mehr als ca. 100-150 ms als tatsächlich verzögert wahrgenommen werden. Daraus ergibt sich die Zeitkategorie IV, die derzeit unter der Annahme, dass der Fahrer Zeitsignale als unterschiedlich und im zeitlichen Kontext wahrnehmen möchte, als ideal für eine Fahrzeugreaktion auf eine Lenkradeingabe gilt.

Die „Gegenwart“ beinhaltet einen Zeitraum von ca. 3s. Zeitdauern darüber werden als Vergangenheit angesehen (Zeitkategorie VI). Letzteres scheint im übrigen auch der Grund dafür zu sein, warum der Fahrer keine größere Vorausschau als 3s bildet. Der Vollständigkeit halber, bleibt noch die Zeitkategorie V, die Zeitsignale beschreibt, die verzögert, aber noch als gegenwärtig erlebt werden. Es sollte jedoch noch erwähnt werden, dass es Versuche gibt, die nachweisen, dass die Perzeption von Gleichzeitigkeit zwischen den Individuen relativ stark variieren kann.

Zusätzlich geht man derzeit davon aus, dass der Mensch getaktet Informationen verarbeitet. Der zugehörige EEG-Zeittakt wird mit 30-40 Hz angegeben. Daraus resultieren maximal etwa 30 Entscheidungen pro Sekunde. Ist dieser Zeittakt ausgeschaltet, wie z.B. während einer Operation, dann kann der Mensch keine Ereignisse mehr aufbauen und eine subjektive Gegenwart konstruieren.

Interessant ist auch die Erkenntnis, dass Einzelhandlungen, die kürzer als 3s beanspruchen, zeitlich vom Menschen überbewertet werden, d.h. in ihrer Dauer länger eingeschätzt werden, als sie tatsächlich waren. Bei Tätigkeiten die länger als 3s dauern, verhält sich das entsprechend umgekehrt. Nur Handlungen die ziemlich genau 3s dauern, kann der Mensch zuverlässig in ihrer Länge einschätzen.

| | | Lenk- winkel | Lenk- moment | Quereschleunigung (QB) | | Wank- reaktion | Gierreaktion | | | Schwimmwinkel, Schwimmwinkel- gradient (Geschwindigkeit, Beschleunigung) |
|---|--------------------------------|-----------------|-----------------|--------------------------|-----------|-------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------------|--|
| | | | | Fahrzeug- schwerpunkt | Kopfnähe | | Gier- winkel | Gierwinkel- geschwindigkeit | Gierwinkel- beschleunigung | |
| Lenkwinkel | | | 1 | 2 | 3 | | | 4 | | 5 |
| Lenkmoment | | 1 | | 6 | 7 | | | | | |
| Quereschleu- nigung (QB) | QB Fahrzeug- schwerpunkt | 2 | 6 | | 8 | 9 | | | | |
| | QB Kopfnähe | 3 | 7 | 8 | | 10 | 11 | | | |
| Wankreaktion | | | | 9 | 10 | | | | | |
| Gierreaktion | Gierwinkel | | | | 11 | | | | | |
| | Gierwinkel- geschwindigkeit | 4 | | | | | | | | |
| | Gierwinkel- beschleunigung | | | | | | | | | |
| Schwimmwinkel, Schwimmwinkelgradient | | 5 | | | | | | | | |

Tabelle 11: Zahlencode der gegenübergestellten Fahrzeuggrößen für das Betrachten ihres zeitlichen Verhaltens für die nachfolgende Tabelle

| | gegenüber- gestellte Fahrzeuggrößen | Zeitliches Verhalten der betrachteten Größen zueinander (u.a. Bode-Diagramm) | Änderung mit der Fahr- geschwindigkeit |
|-----------|---|--|--|
| 1 | Lenkwinkel - Lenkmoment | Lenkmoment eilt beim Durchlenken und bei Lenkungsrückstellung Lenkwinkel voraus. Beim Anlenken eilt Lenkmoment zunächst hinterher. Bei niedriger Geschwindigkeit (10 m/s ²) eilt Lenkmoment vor. | stark unterschiedlich |
| 2 | Lenkwinkel – QB Fahrzeugschwerpunkt | Querbeschleunigung als Rückmeldeinformation auf Lenkbefehle. Querbeschleunigung im Fahrzeugschwerpunkt vom Fahrer nur haptisch durch Sitzdruck wahrgenommen. | stark unterschiedlich |
| 3 | Lenkwinkel – QB Kopfnähe | Querbeschleunigung als Rückmeldeinformation auf Lenkbefehle. Querbeschleunigung in Kopfnähe tendenzielle etwas größerer Phasenverzug gegenüber Lenkeingabe als im Fahrzeugschwerpunkt. | (keine Daten vorliegend) |
| 4 | Lenkwinkel – Gierwinkelgeschwindigkeit | Gierwinkel zunächst Phasengleich mit zunehmender Frequenz und höherer Geschwindigkeit voreilend, dann mit weiter zunehmender Frequenz wieder abfallend bis zum Nacheilen. | leicht unterschiedlich |
| 5 | Lenkwinkel – Schwimmwinkel, Schwimmwinkelgradient | Schwimmwinkel eilt bei niedrigen Geschwindigkeiten bis ca. 1 Hz Frequenz vor. Bei mittleren bis hohen Geschwindigkeiten eilt Schwimmwinkel sehr stark nach (> 180°) | nahezu unabhängig (größere Abweichung nur bei sehr niedrigen Geschwindigkeiten) |
| 6 | Lenkmoment – QB Fahrzeugschwerpunkt | Querbeschleunigung als Rückmeldeinformation auf Lenkbefehle. Beim Durchlenken geringerer Phasenverzug als Lenkwinkel ggü. QB Fahrzeugschwerpunkt | (keine Daten vorliegend) |
| 7 | Lenkmoment – QB Kopfnähe | Querbeschleunigung als Rückmeldeinformation auf Lenkbefehl. Querbeschleunigung in Kopfnähe mit möglichem größerem Zeitverzug ggü. Lenkbefehl. | (keine Daten vorliegend) |
| 8 | QB Fahrzeugschwerpunkt – QB Kopfnähe | Querbeschleunigungsaufbau in Nähe des Fahrerkopfes eilt dem Querbeschleunigungsaufbau in Fahrzeugschwerpunkt nach | (keine Daten vorliegend) |
| 9 | QB Fahrzeugschwerpunkt – Wankreaktion | Wankwinkel eilt dem Querbeschleunigungsaufbau zeitlich hinterher. | (keine Daten vorliegend) |
| 10 | QB Kopfnähe – Wankreaktion | Querbeschleunigungsaufbau eilt Wankreaktion zeitlich hinterher | (keine Daten vorliegend) |
| 11 | QB Kopfnähe – Gierwinkel | Querbeschleunigung in Kopfnähe | (keine Daten vorliegend) |

Tabelle 12: Zeitliche Betrachtung zweier gegenübergestellter Fahrzeuggrößen als Informationsträger an den Fahrer und ihre Änderung mit der Fahrgeschwindigkeit

Ein Versuch, der die Bedeutung der Zeit in Bezug auf das Lenkgefühl widerspiegelt, ist der von *Chai et al.* (2004). Sie untersuchten die Wirkung verschiedener Gierverstärkungen und Momentenrampen in der Lenkung auf die Beurteilung der Probanden bzgl. eines guten Gefühls für die Lenkung. Als objektive Größen wurde die Amplitude des Lenkmoments und der Zeitverzug der Fahrzeugreaktion herangezogen (siehe Abbildung 81). Im Ergebnis sind die Bereiche für „good feeling“ (grauer Bereich) und „extended margin of good feeling“ festgehalten.

Chai et al. (2004) kommen zu dem Ergebnis, dass die Lenkmomentenmagnitude und die zugehörigen Grenzwerte zum „good feeling“ (grau) und „extended margin of good feeling“ sich aus den physikalischen Möglichkeiten des Fahrers ergeben, die stark variieren

kann. Beim Zeitverzug für den Bereich des „good feelings“ liegt bei beiden Probanden zwischen 0 und 200 ms.

Allerdings sollte zum Versuch erwähnt sein, dass die Probandenzahl für die Untersuchungen zu gering gewählt ist, zumindest werden in der Veröffentlichung nur zwei Versuchspersonen erwähnt. Der Versuch zeigt jedoch, welche große Bedeutung das zeitliche Verhalten der Fahrzeugreaktion für das Lenkgefühl hat und das sich das Ergebnis mit anderen Untersuchungen deckt.

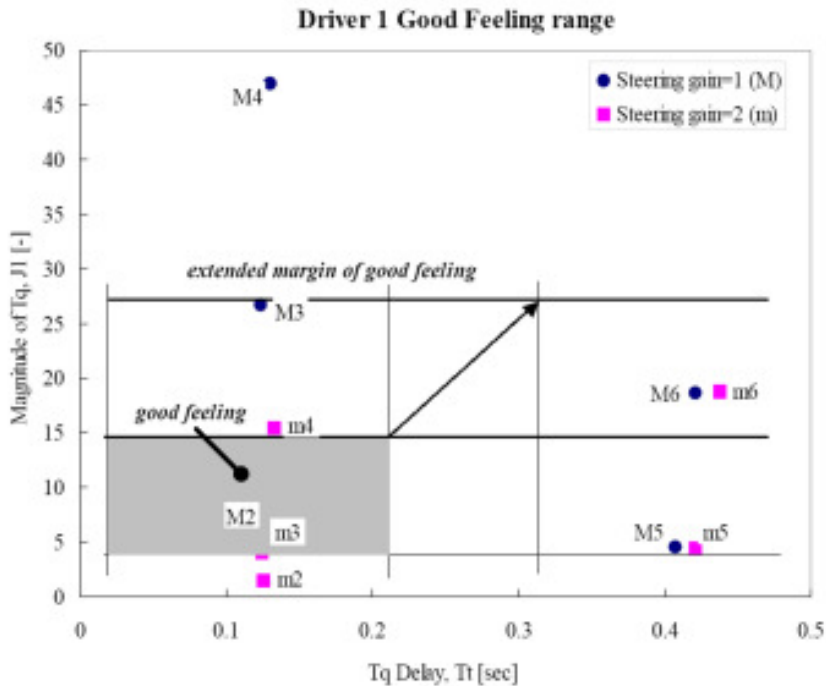


Abbildung 81: Ermittelte Bereiche eines „guten Gefühls“ von Zeitverzug und Lenkmomentamplitude für die erste von zwei Versuchspersonen (aus Chai et al. 2004b)

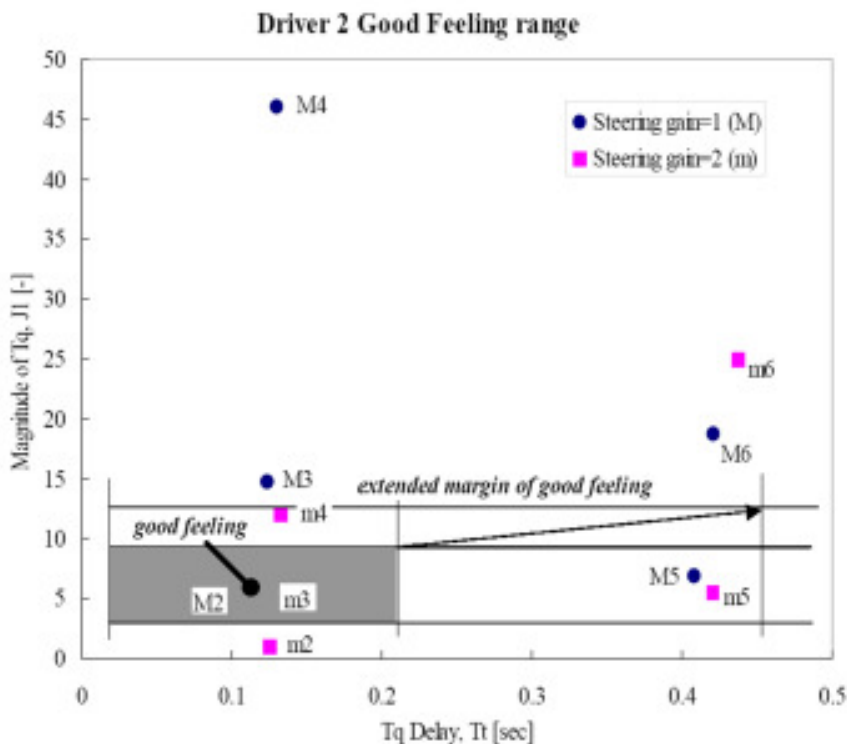


Abbildung 82: Ermittelte Bereiche eines „guten Gefühls“ von Zeitverzug und Lenkmomentamplitude für die zweite von zwei Versuchspersonen (aus Chai et al. 2004b)

2.5.3 Informationsverarbeitung

In der Ergonomie beziehen sich informationstechnische Aspekte auf den Verarbeitungsprozess von Informationen seitens des Menschen. Während bei der Informationsaufnahme vorwiegend die psychophysische Eigenschaften des Menschen in den Vordergrund treten, sind dies bei der Informationsverarbeitung hauptsächlich informationstechnische Verhaltensmuster. Im Rahmen der Lenkaufgabe stellen sich in Bezug auf die Informationsverarbeitung folgende Fragen:

- *Wie läuft der Informationsverarbeitungsprozess im Menschen ab?*
- *Wie entsteht das Lenkgefühl?*
- *Welche Regelstrategien kann der Mensch für die Erfüllung der Lenkaufgabe anwenden?*
- *Wie muss die Informationsrückmeldung gestaltet werden, damit der Fahrer ein optimales Lenkgefühl für Erfüllung seiner Querregelungsaufgabe erhält?*

In den nachfolgenden Kapiteln werden diese Fragen mit Hilfe ergonomischer Methoden und Erkenntnisse durchleuchtet und beantwortet.

2.5.3.1 Modelle der Informationsverarbeitung

Nach der Informationsaufnahme durch die einzelnen Sinneskanäle, bei der die Erkenntnisse der Psychophysik eine Rolle spielen, erfolgt die Informationsverarbeitung. Zwei Modellvorstellungen aus der Ergonomie können im Rahmen der Lenkaufgabe herangezogen werden, um die Informationsverarbeitung und die Lenkgefühlentstehung anschaulich zu erklären.

Das Informationsverarbeitungsmodell (Abbildung 83) von *Bubb* (2002b) lässt sich für die Erklärung der Lenkgefühlentstehung heranziehen. Basisvorstellung ist, dass der Mensch in der Regel für das Treffen einer Entscheidung über mehrere „innere Modelle“ verfügt, wovon er das ihm im Moment der Wahrnehmung am günstigsten erscheinende unbewusst auswählt, was nicht immer das passendste sein muss. Das „innere Modell“ besteht immer aus zwei Teilen. Einem Wahrnehmungs-Handlungs-Schema und dem umgekehrten Handlungs-Wahrnehmungs-Schema.

Der Fall der Anwendung eines Wahrnehmungs-Handlungs-Modells aufgrund visueller Informationsaufnahme bedeutet, dass das entsprechende Bewegungsprogramm für die Muskelbewegungen aufgerufen wird. Die Auswahl des geeignet erscheinenden „inneren Modells“ verläuft unbewusst. Im nachfolgenden Kapitel ist der Grundgedanke des „inneren Modells“ auf die Entstehung des Lenkgefühls übertragen dargestellt. Nur wenn im Differenzpunkt große Unterschiede auftreten (z.B. völlig andere Wahrnehmung als erwartet), dann kommt es zur bewussten Wahrnehmung und zur bewussten Entscheidung für ein mögliches anderes „inneres Modell“, das in der gegenwärtigen Situation den größten Nutzen verspricht.

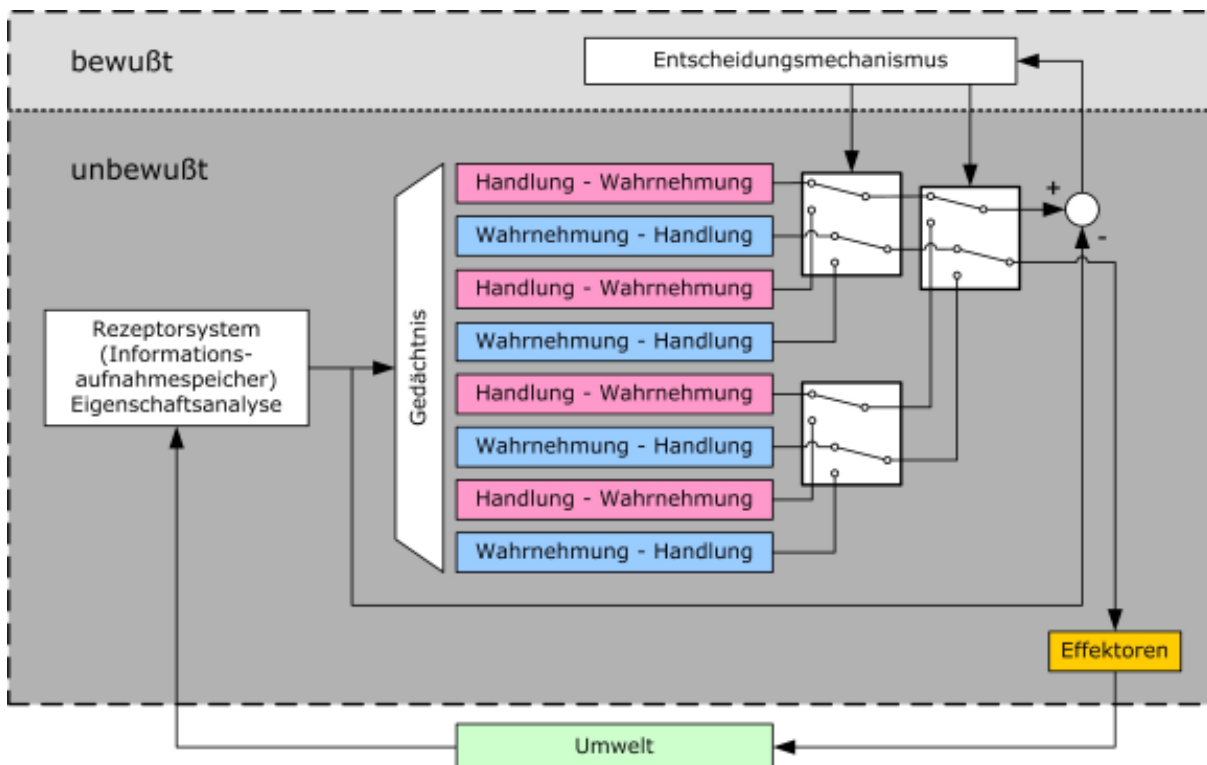


Abbildung 83: Informationsverarbeitungsprinzip von Bubb (2002b)

Ein anderes Modell der menschlichen Informationsverarbeitung wurde von *Rasmussen* (1987) entwickelt (Abbildung 84). Mit Hilfe seiner Vorstellungen können die Auswirkungen unterschiedlicher Laufzeiten während der Informationsverarbeitung erklärt werden. Ursache sind drei verschiedene Arten der Verarbeitung, die mit unterschiedlich langen Laufzeiten verbunden sind und deswegen auch als Verarbeitungsniveaus bezeichnet werden. Die Übergänge zwischen den Niveaus sind kontinuierlich und nicht scharf voneinander trennbar.

Die längste Zeitdauer ergibt sich dann, wenn Informationen auf dem Wissen basierend verarbeitet werden. „Letzteres ist die Grundlage des Problemlösungsverhaltens, das auch als ‚einsichtiges Verhalten‘ bezeichnet wird.“ (*Bubb* 1993, S. 348). Ein Beispiel für ein wissensbasiertes Handeln (Abbildung 84 Nr. 1) wäre ein Fahrschüler in einer seiner ersten Fahrstunden, der jeden Schritt seines Tuns genau überlegen muss, weil (noch) keine ausreichenden „inneren Modelle“ vorhanden sind.

Die zweite Möglichkeit der Informationsverarbeitung stellt das Handeln nach erlernten Regeln dar (Abbildung 84 Nr. 2). Die Verarbeitungsdauer des regelbasierten Handelns ist kürzer als die des wissensbasierten Handelns. Basis für eine mögliche Handlung Aufgrund von Ereignissen sind gespeicherte Regeln für eine Aufgabe.

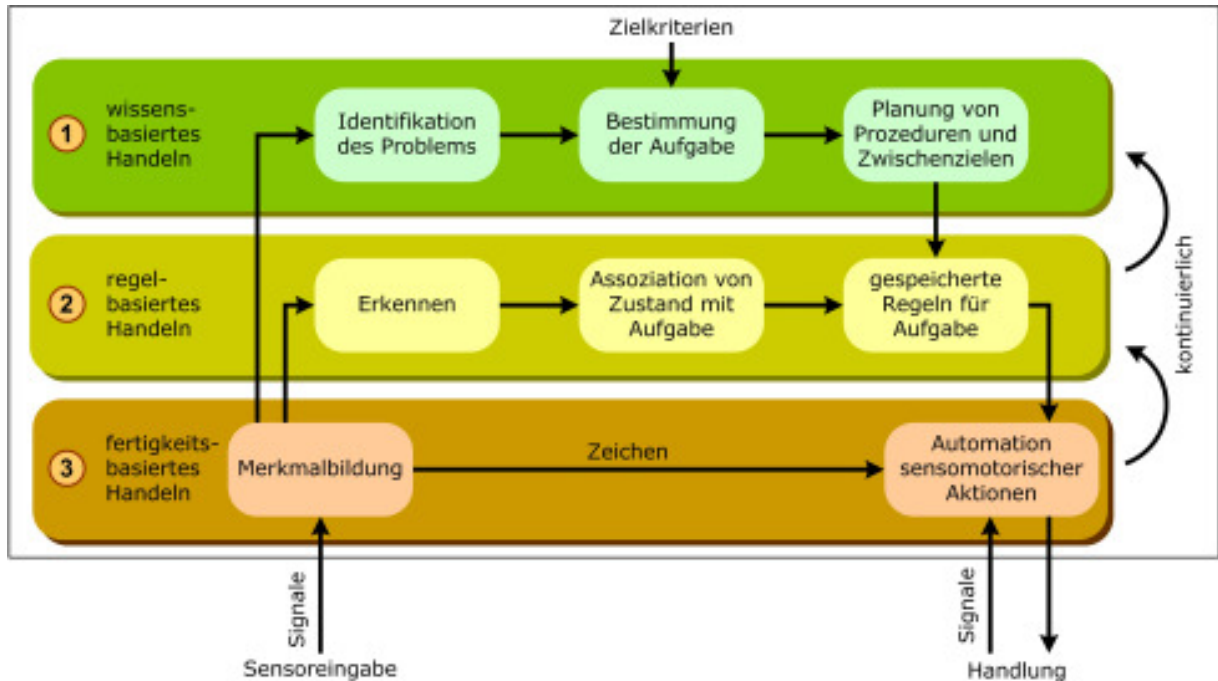


Abbildung 84: Informationsverarbeitungsmodell nach Rasmussen (1987)

Die schnellste und dritte Möglichkeit der Informationsverarbeitung ist das fertigkeitstbasierte bzw. verhaltensbasierte Handeln (Abbildung 84 Nr. 3). Diese Form ist nur für hochgeübte Tätigkeiten möglich. Darunter fallen Tätigkeiten, die mehrmals in der Woche vom Menschen durchgeführt werden. Demnach gehören das Autofahren und das Lenken bei den meisten Menschen zu den hochgeübten Tätigkeiten. Hier greift die Automation sensomotorischer Aktionen.

Die Verarbeitungsdauer ist entsprechend der drei Arten unterschiedlich lang. Sie hängt auch davon ab, ob ein Vorhalt durch eine Voraussicht gebildet werden kann, der eine Verkürzung der Verarbeitungs- und Reaktionsdauer bewirkt.

2.5.3.2 Lenkgefühl auf Basis innerer Modelle

Der Mensch als Regler besitzt gewisse Eigenschaften, die ihn von den meisten technischen Reglern unterscheiden. Das zeigt sich in zahlreichen Versuchen, den Regler „Mensch“ technisch nachzubilden, ihn also durch einen technischen Regler zu ersetzen. In den vorherigen Kapiteln wurden die psychophysischen Aspekte angesprochen. In Abbildung 85 ist die Entstehung des Lenkgefühls basierend auf der in der Ergonomie vorherrschenden Vorstellung modellhaft dargestellt. Wie bereits zu Beginn erwähnt, ist unter dem Begriff „Lenkgefühl“ streng genommen die Wahrnehmung der Eigenschaften des technischen Systems „Fahrzeug“ bzgl. der Querdynamik zu verstehen. Es handelt sich also nicht um ein Gefühl oder eine Emotion im psychologischen Sinne.

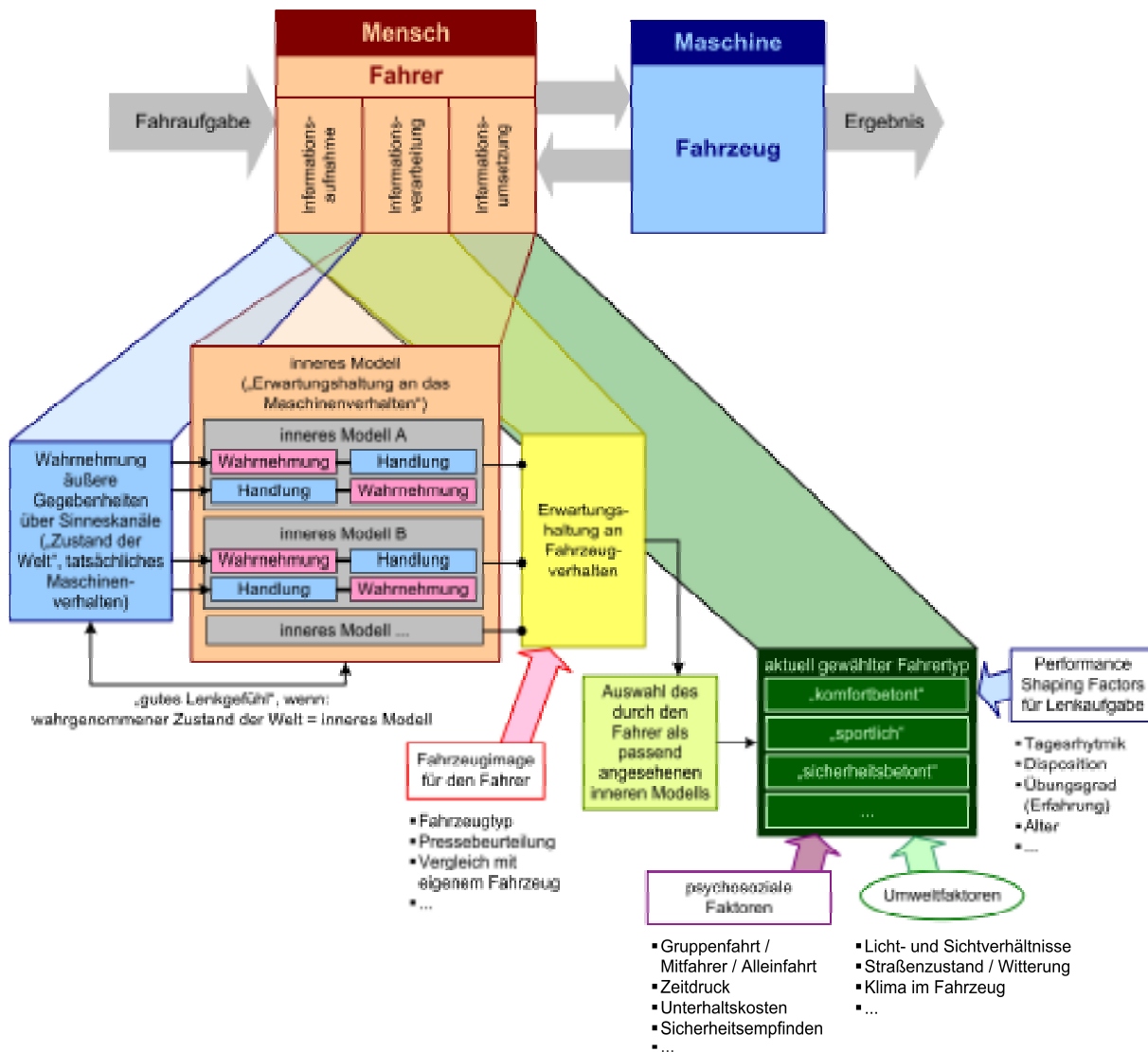


Abbildung 85: Modellvorstellung über die Entstehung des Lenkgefühls

Der grundlegende Gedanke des „inneren Modells“ ist ein wesentlicher Schlüssel für das Verständnis der Entstehung des Lenkgefühls. Basis für das „innere Modell“ sind die sog. Handlungs-Wahrnehmungs- und Wahrnehmungs-Handlungs-Schemata (siehe auch Abbildung 83). Nimmt der Mensch eine Situation aus seiner Umwelt über die Informationsaufnahmekanäle wahr, dann folgt in einem nächsten Schritt (Informationsverarbeitung) die bewusste Entscheidung über ein als geeignet erscheinendes Wahrnehmungs-Handlungs-Modells. Das hat dann in der Informationsumsetzung eine bestimmte Handlung zur Folge. Darunter fällt ebenso das Unterlassen von Handlungen.

Das Prinzip gilt auch für das Handlungs-Wahrnehmungs-Schema, welches maßgeblich für die Lenkgefühlentstehung ist. Der Mensch erwartet nach seiner Handlungseingabe ein bestimmtes Verhalten des technischen Systems bzw. der Maschine (Wahrnehmung). Diese Erwartungshaltung bzw. dieses „innere Modell“ vom Systemverhalten wird mit denen von den Sinnesorganen vermittelten äußeren Gegebenheiten verglichen. Ergeben sich Abweichungen vom erwarteten Verhalten dann kann der Mensch nötigenfalls reagieren. Die Erwartungshaltung an sich, hängt wie in Abbildung 85 verdeutlicht, auch von den Vorstellungen ab, die der Fahrer von einem Fahrzeug hat.

Es ist also nicht von unwesentlicher Bedeutung, inwieweit die Lenkaufgabe aus regelungstechnischer Sicht qualitativ erfüllt wurde. Gemäß Abbildung 86 wäre im Idealfall

eine vollständige Aufgabenerfüllung dann gegeben, wenn durch richtige Steuerung kein Nachregeln seitens des Menschen mehr erforderlich wäre (Qualität = 1). Aufgabenstellung und Aufgabenerfüllung wären dann zu 100% überdeckt. Am Summenpunkt ergibt sich eine Differenz von null. Eine solch hohe Überdeckung wird in der Realität nur selten vorkommen, insbesondere bei schwierigen Fahraufgaben.

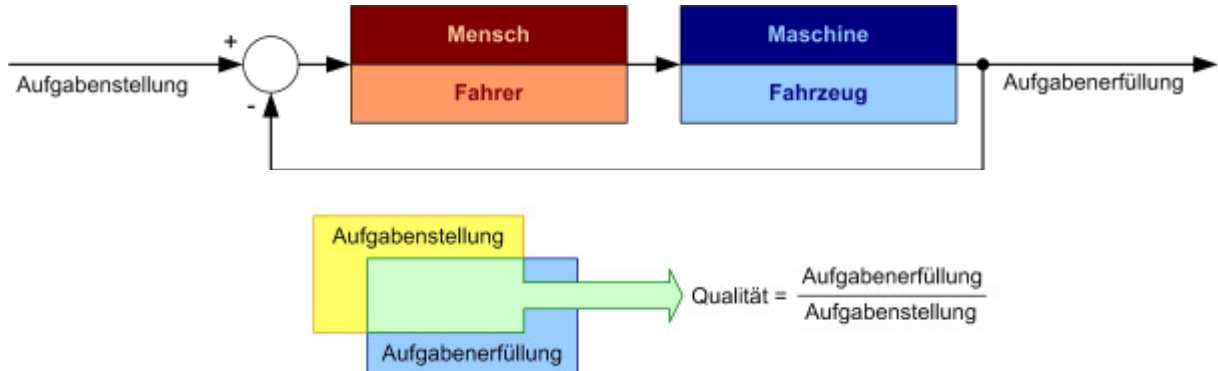


Abbildung 86: Regelkreis der menschlichen Aufgabenerfüllung und Definition der Qualität

Wie in Abbildung 86 zu sehen ist, besteht die positive Beeinflussung des Lenkgefühls nicht in der alleinigen Überdeckung von Aufgabenstellung und Aufgabenerfüllung. Vielmehr ergibt sich eine positive Auswirkung auf das Lenkgefühl durch den Überdeckungsgrad des wahrgenommenen Zustands der Welt mit dem „inneren Modell“ (Abbildung 87). Je größer dieser ist, umso besser ist die positive Auswirkung auf das Lenkgefühl, weil dies eine Bestätigung der menschlichen Handlung darstellt.

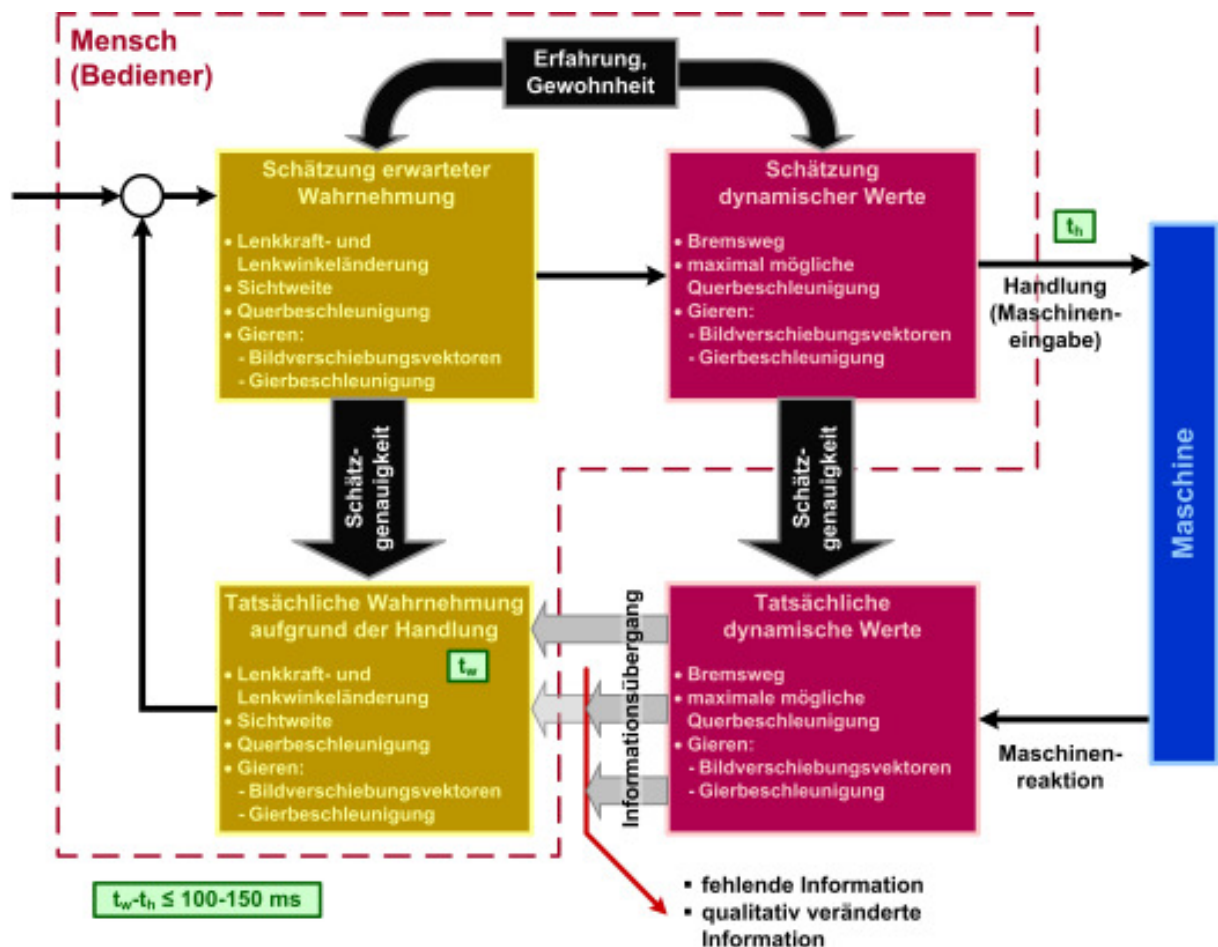


Abbildung 87: Schätzungen und tatsächliche Wahrnehmung bzw. tatsächliche dynamische Werte an der Mensch-Maschine-Schnittstelle für den Fall des Lenkens

Das „innere Modell“ ist stark individuell geprägt. Man muss davon ausgehen, dass es fahrertypabhängig ist. Mit dem Fahrertyp sind unterschiedliche Motive verbunden. Der Fahrertyp ist nicht personengebunden. Ein Wechsel des Typs kann jederzeit erfolgen, also auch während einer einzelnen Fahrt selbst. Die Wahl des Fahrertyps hängt von den äußeren Faktoren Umwelt (Definition siehe Glossar ab S. 282), psychosoziale Einflüsse und den Performance Shaping Factors für die Lenkaufgabe ab (Abbildung 85). Die **Umweltfaktoren** können die Wahl des Fahrertyps durch folgende Aspekte beeinflussen:

- Licht- und Sichtverhältnisse,
- Witterungseinflüsse (Nebel, Regen, etc.),
- Fahrbahnverhältnisse,
- Klima im Fahrzeug,
- ...

Unter die psychosozialen Faktoren fallen:

- Alleinfahrt oder Mitfahrer (gruppendynamische Einflüsse),
- Kraftstoffpreise und Gesamtkosten,
- Eigentum am Fahrzeug,
- Zeitdruck,
- Freizeitfahrt,
- ...

Die **Performance Shaping Factors** (leistungsbeeinflussende Faktoren) werden in der Ergonomie unter dem generellen Gesichtspunkt der menschlichen Arbeit gesehen. Sie lassen sich direkt auf die Lenkaufgabe übertragen. Hierzu gehören unter anderem

- die Tagesrhythmik,
- der Gesundheitszustand,
- der Übungsgrad,
- die Motivation,
- ...

2.5.3.3 Der Mensch als Regler (Regelkreisparadigma)

Im System Mensch-Maschine (Abbildung 88) kann der Mensch wie ein technischer Regler betrachtet werden. Die Führungsgröße $w(t)$ ist für ihn die Aufgabe, die zusammen mit der Rückmeldung der Nachführgröße bzw. des Ergebnisses über den Summenpunkt die Regelabweichung $x_w(t)$ ergibt. Der Regler „Mensch“ versucht über die Stellgröße $y(t)$ an der Regelstrecke, die durch den Parameter S charakterisiert ist, die Nachführgröße bzw. das Ergebnis $x(t)$ so zu beeinflussen, dass es der Führungsgröße bzw. der Aufgabe entspricht und die Regelabweichung dadurch möglichst null wird. Die Nachführgröße bzw. das Ergebnis kann unmittelbar nach der Regelstrecke noch durch Störgrößen aus der Umwelt negativ beeinflusst werden.

Im Allgemeinen wird in der vorliegenden Regelkreisconstellation von einer Regelung (closed loop control) gesprochen, weil die Nachführgröße zurückgeführt wird. Ist das nicht der Fall spricht man von einer Steuerung (open loop control). Gemäß *Bubb* (2004) erlaubt eine Steuerung eine schnellere Reaktion, jedoch zu Lasten der Genauigkeit, die bei einer Regelung höher ist. Hinzuzufügen ist, dass dieser Zusammenhang bei linearer Fahrdynamik gilt.

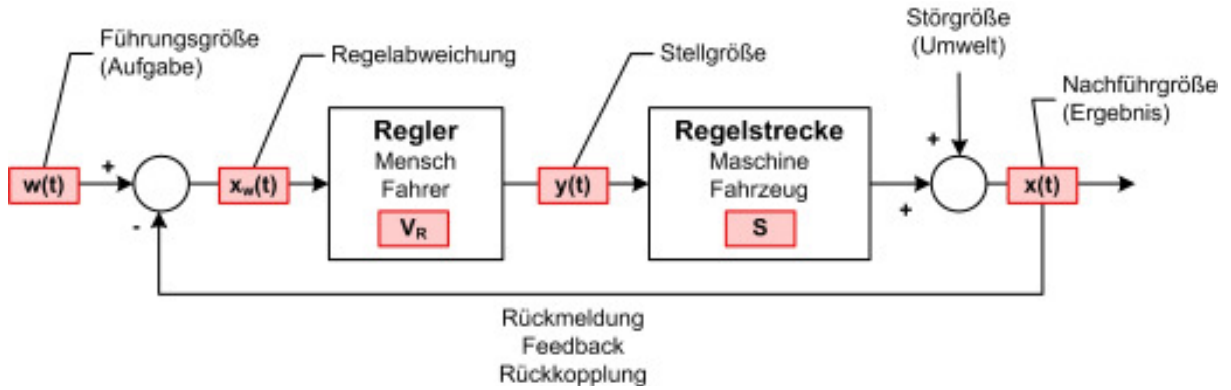


Abbildung 88: Regelgrößen des Reglers „Mensch“ an der Regelstrecke „Maschine“

Grundsätzlich verhält sich der Mensch als ein sog. PID-Regler. Er weist also sowohl Proportional-Verhalten (P-Verhalten), ein differenzierendes Verhalten (D-Verhalten) und ein dämpfendes, also integrierendes Verhalten (I-Verhalten) auf. In Abbildung 89 ist nach *Bubb* (2004) diese Eigenschaft über der Zeit als menschliche Reaktion auf einen Sprung (nicht auf ein haptisches Signal) dargestellt. Zu erkennen ist, dass der Mensch unterhalb seiner physiologischen Reaktionszeit von 180 ms nicht reagiert (auf haptische Signale ist die potenzielle menschliche Reaktionszeit kürzer).

Unmittelbar danach zeigt sich das dämpfende Verhalten (I-Verhalten) des Menschen. Nach einer Zeit von etwa 300 ms zeigt sich ein deutlich erkennbares Überschwingen. Ursächlich hierfür ist, dass der Mensch nur auf die Änderung und nicht auf die Größe selbst reagiert. Dies ist ihm nach etwa 500 ms möglich.

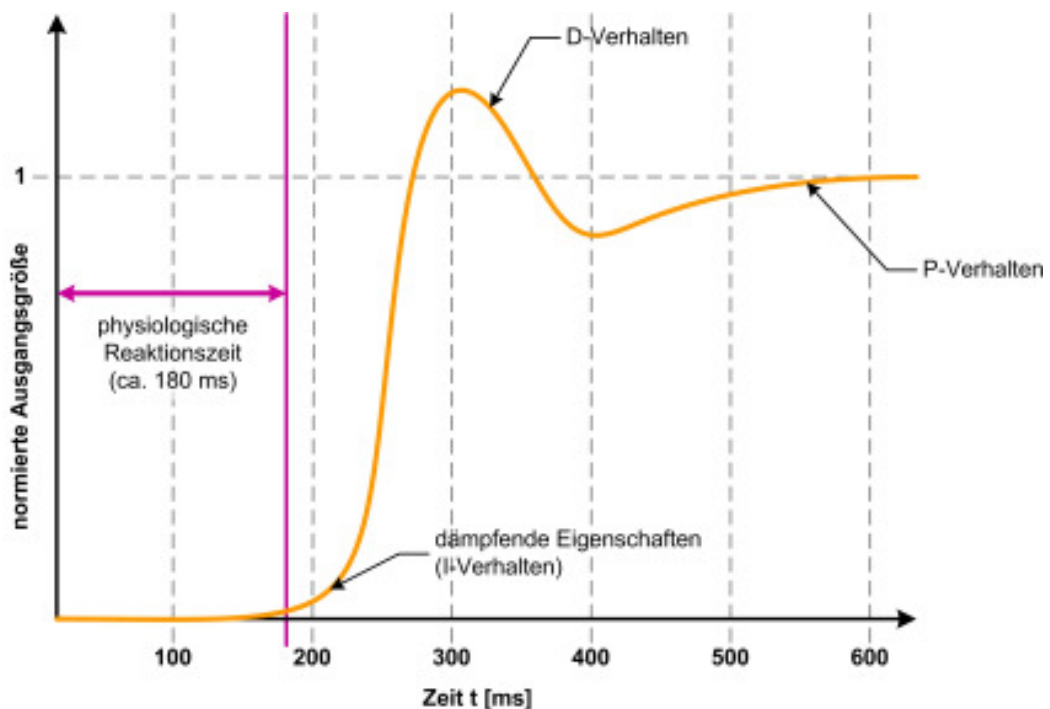


Abbildung 89: D-Verhalten des Reglers „Mensch“ in Abhängigkeit der Zeit (ohne Reaktion auf haptisches Signal) (*Bubb* 2004)

Im Zusammenhang mit der Beschreibung der Dynamik eines Kraftfahrzeugs (sowohl bei Längs- und Querführung), in der der Mensch als Regler auftritt, wird häufig das Cross-Over bzw. Schnittfrequenz-Modell von *McRuer* (1967) verwendet. Das Modell kann angewendet werden um abzuschätzen, inwieweit Resonanzspitzen der Mensch-Maschine-Interaktion, die

eine Gefahr bedeuten, innerhalb des menschlichen Übertragungsverhalten liegen, das in etwa bis 2 Hz reicht.

In einem Bode-Diagramm (Abbildung 90) wird diejenige Frequenz als Schnitffrequenz bezeichnet, bei der das Produkt der Frequenzgänge von Regler (hier „Mensch“) und Maschine den Wert „1“ erreicht. Dieser Punkt der Frequenz ist die Schnitffrequenz ω_c . Fällt die Schnitffrequenz mit dem Frequenzwert des Erreichen von -180° im Phasenwinkeldiagramm (Abbildung 90 unten) zusammen, dann ist der zugehörige Regelkreis (hier Fahrer-Fahrzeug) instabil. Für die Fahrzeugführung ergibt sich einer kritischer Fahrzustand, der sich durch ein Aufschaukeln des Fahrzeugs äußert („Schleudern“).

Damit verdeutlicht sich in einem solchen Bode-Diagramm auch die Sicherheitsreserve. Je weiter die Schnitffrequenz von der Frequenz bei -180° entfernt liegt, desto größer ist in der Regel die Sicherheitsreserve. Sie wird im Diagramm des Amplitudenverhältnisses (Abbildung 90 oben) als Verstärkungsreserve (V_{Rand}) bezeichnet und im Phasenwinkeldiagramm als Phasenreserve (φ_{Rand}). Der V_{Rand} ist im Diagramm des Amplitudenverhältnisses bei der Frequenz ω ($\varphi = -180^\circ$) die Differenz zum Amplitudenverhältnis = 1. Die Phasenreserve φ_{Rand} ist der Restwinkel bei der Schnitffrequenz ω_c zum Winkel von -180° .

Ziel sollte es also sein, bei allen möglichen Fahrzuständen die Phasen- und Verstärkungsreserve so groß wie möglich zu halten. Dies kann dadurch gelingen, die Resonanzspitze möglichst zu hohe Frequenzen zu verschieben.

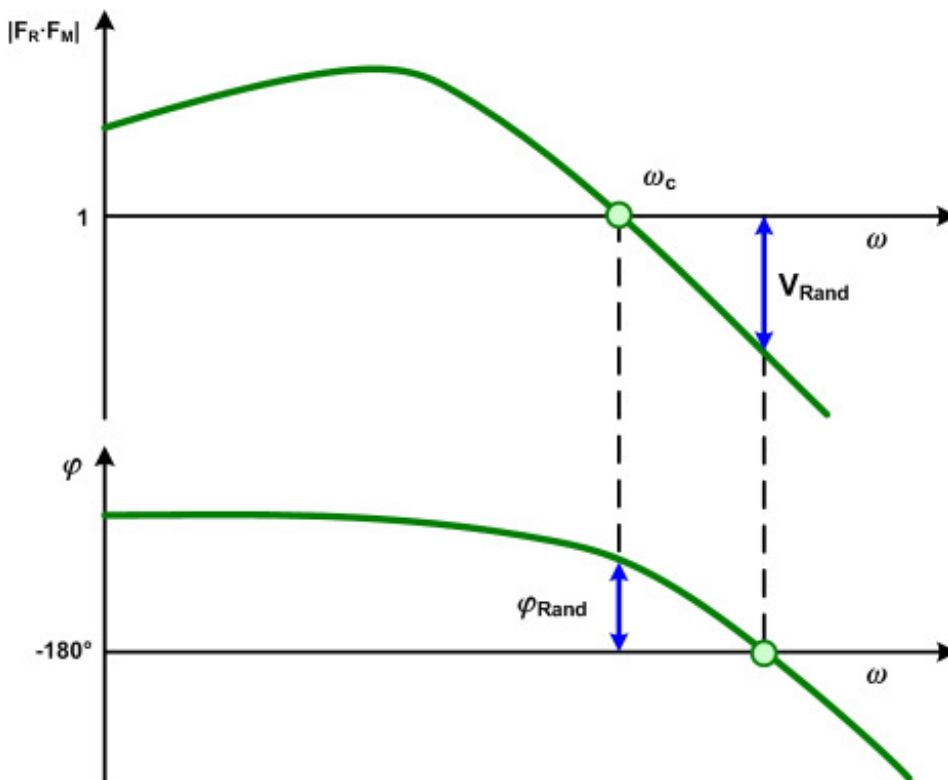


Abbildung 90: Bodediagramm eines grundsätzlichen Frequenzgangs und Definition der Schnitffrequenz und des Phasenrandes

In Abbildung 91 sind nach Mitschke und Wallentowitz (2004, S. 659) für bestimmte Fahrsituationen Schnitffrequenzen und zugehörige Phasenreserven angegeben. Je höher die dort angegebene Schnitffrequenz und je geringer die Phasenreserve, desto kritischer ist das Fahrmanöver anzusehen.

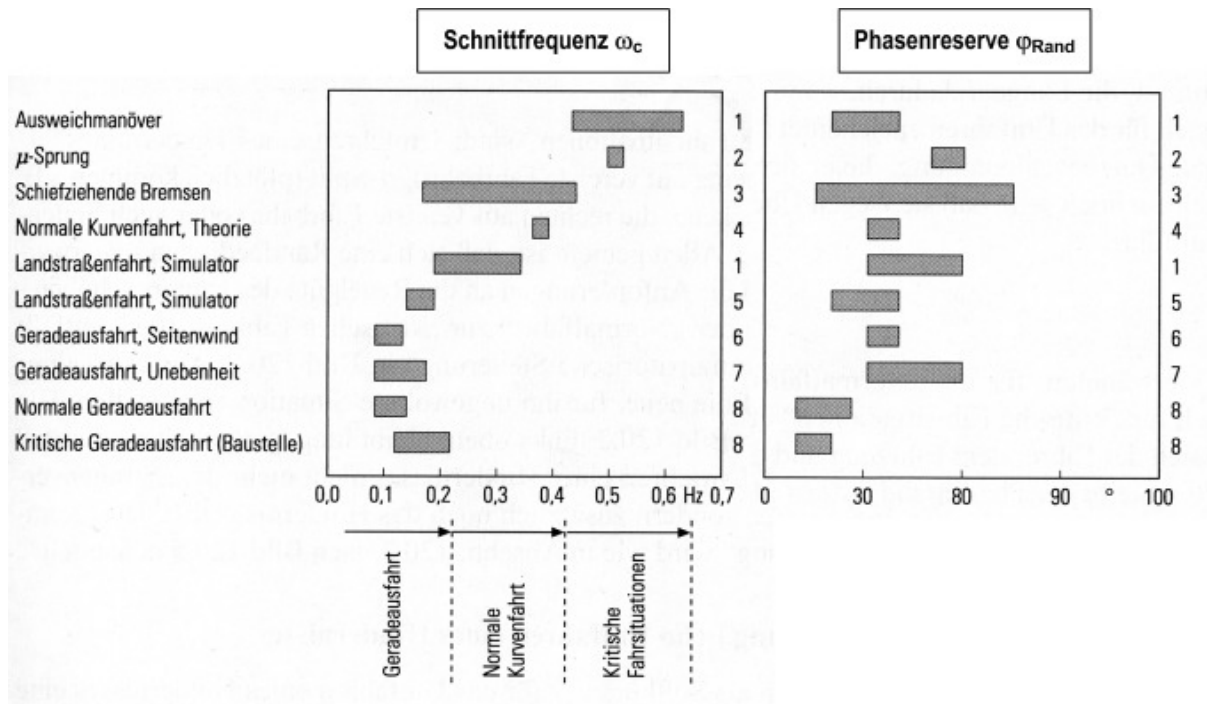


Abbildung 91: Schnitffrequenzen und Phasenreserven des offenen Querregelkreises in verschiedenen Fahrsituationen (Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 659)

Henze (2004) kommt in seiner Arbeit zum Frequenzverhalten zu dem Ergebnis, dass der Fahrer bei kritischen Fahrmanövern ein völlig anderes Frequenzverhalten zeigt als bei nichtkritischen.

2.5.3.4 Regelstrategien und Regelverhalten des Fahrers für die Fahrzeugquerführung

Bernotat (1970) gliedert die Aufgabe des Fahrens in drei Ebenen (Tabelle 13). Die oberste Ebene enthält die Navigationsaufgabe. Hier wird die nach verschiedenen Kriterien am günstigsten erachtete Strecke ausgewählt (z.B. Zeitaspekte). Die nächste Ebene beinhaltet die Bahnführungsaufgabe (Antizipation). Der Fahrer legt in seiner Sichtweite aufgrund des Straßenverlaufs und anderer verkehrstechnischer Vorgaben (z.B. Verkehrsschilder, Ampeln und Fahrbahnmarkierungen) den für ihn optimalen Sollkurs fest. Die unterste und dritte Ebene ist die Stabilisierung, wobei alles zuvor vom Fahrer festgelegte versucht wird einzuhalten. Dabei spielt die Lenkaufgabe die tragende Rolle, den als optimal erachteten Sollkurs einzuhalten. Die subjektive Beurteilung des Lenkverhaltens ist somit vornehmlich von den Vorgängen auf der Stabilisierungsebene abhängig.

| Ebene | Aufgabe | Einflussgrößen | Einflussfaktoren | technische Unterstützungsmittel |
|-------|----------------------------|--------------------------------|--|---|
| 1 | Navigation | Kurs, mittlere Geschwindigkeit | Straßennetz, eigene Motive (z.B. Zeit, Landschaft), etc. | Navigationssystem, etc. |
| 2 | Bahnführung (Antizipation) | Weg, genaue Geschwindigkeit | Verkehrsregeln, Schilder, Ampel, andere Verkehrsteilnehmer, etc. | Scheinwerfer, Spurwechselassistent, Adaptive Light Control, Lane Departure Warning, ACC, etc. |
| 3 | Stabilisierung | Stellgrößen | Fahrbahnverhältnisse, Fahrverhalten, Sichtverhältnisse, etc. | ABS, ESP, Bremsassistent, aktive Lenkungen etc. |

Tabelle 13: Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe in Anlehnung an Bernotat (1970) und Heißing et al. (2000, S. 17-19)

Nach der Interpretation von *Bubb* (1993, S. 406) des Hierarchiemodells von *Bernotat* (1970) muss es zu einem Wechsel auf die nächst höhere Ebene (Bahnführung, Ebene 2) kommen, wenn der Fahrer die Aufgabe auf der Stabilisierungsebene nicht mehr erfüllen kann. *Bubb* (1993, S. 406) nennt als Beispiel eine Geschwindigkeitssenkung als Folge aus einer als subjektiv zu hoch empfundenen Querschleunigung. Durch technische Hilfsmittel (Fahrerassistenzsysteme) kann die Erfüllung der Aufgabe auf einer bestimmten Ebene (z.B. Stabilisierungsebene) unterstützt und der Aufgabenschwierigkeit zumindest teilweise entgegengewirkt werden (z.B. ESP). Die Lenkung könnte durch die Anpassung der Lenkungscharakteristik an die Fahrsituation unterstützend wirken. Die technische Voraussetzung für die Umsetzung ist eine aktive Lenkung (Möglichkeit der Lenkwinkelregelung) oder die elektrische Servolenkung (Möglichkeit der Lenkmomentenregelung) in Verbindung mit einer Fahrsituationserkennung. Um eine adaptive Lenkungsregelung zu verwirklichen, müssen beide Systeme in Kombination eingesetzt werden (Steer-By-Wire), was spezifische technische Schwierigkeiten mit sich bringt (z.B. Zuverlässigkeit der Systeme Auslegungsfragen, Ausfallstrategie, etc.).

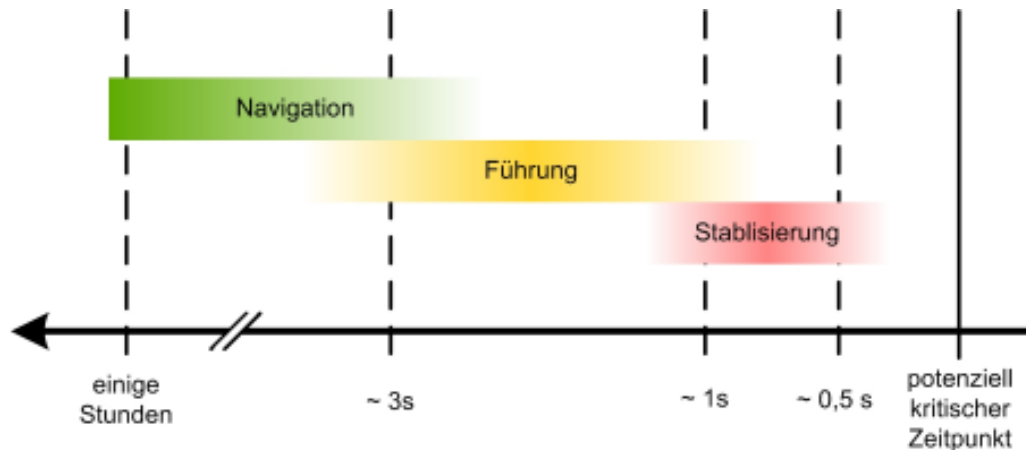


Abbildung 92: Antizipationszeit vor einem potenziellen kritischen Zeitpunkt (in Anlehnung Braess und Donges 2006)

Bezogen auf kritische Fahrsituationen zeigen *Braess und Donges* (2006) (siehe Abbildung 92), in welcher noch verbleibenden Zeit zu einem kritischen Ereignis, der Fahrer mit Hilfe welcher der drei zuvor genannten Ebenen, eine kritische Situation gerade noch abwenden kann. Je „näher“ sich der Fahrer an solch einem Ereignis befindet, desto wahrscheinlicher ist es, dass er das Fahrzeug nur noch durch Stabilisierung die Gefahr abwenden kann (z.B. nur noch Abbremsen). Unterhalb 0,5s ist davon auszugehen, dass der Fahrer nicht mehr adäquat reagieren kann.

Steht dem Fahrer etwas mehr Zeit zur Verfügung, dann ist unter Umständen möglich, das Fahrzeug auf der Führungsebene (Bahnführung, Antizipation) so zu steuern, dass noch ein sicherer Weg an der Gefahrenstelle vorbei antizipieren werden kann (z.B. Bremsen und Vorbeilenken).

Ein Beispiel für die Vermeidung auf der Navigationsebene wäre, dass der Fahrer Minuten oder Stunden zuvor vom kritischen Ereignis weiß und die mögliche Gefahrenquelle großräumig umfährt. Im Flugverkehr wäre so etwas durch genau Flugroutenplanung eher möglich.

Kritische Ereignisse im Straßenverkehr entstehen aber zumeist unvorhersehbar und sind von kurzer Dauer, sodass sich die genannte Möglichkeit der Vermeidung für den Fahrer nur selten ergeben wird. An dieser Stelle wird ein weiteres mal deutlich, wie wichtig es ist, dass der Fahrer eine ausreichende Vorausschau (vorausschauendes Fahren) hat, weil es ihm damit möglich ist, länger auf der Bahnführungsebene zu bleiben, die es ihm leichter macht kritische Situation zu meistern. Ebenso zeigt, wie wichtig es ist, dem Fahrer mit Hilfe von Fahrerassistenzsystemen, in kritischen Situationen mehr Zeit zu verschaffen.

Die drei Ebenen zur Erfüllung der Fahraufgabe lassen sich mit den drei Ebenen des Verarbeitungsniveaus nach *Rasmussen* (1987) über das benötigte und zur Verfügung stehende Zeitbudget kombinieren. Tabelle 14 enthält Beispiele, die den Zusammenhang der Fahraufgabe mit dem Verarbeitungsniveau verdeutlichen.

| Aufgabe | | Verarbeitungsniveau | | |
|-----------------------------------|--|-----------------------------|------------------------------------|--|
| | | benötigte Zeit t_b | | |
| | | fertigkeitsbasiert | regelbasiert | wissensbasiert |
| zur Verfügung stehende Zeit t_a | Planen z.B. Navigieren (Minuten bis Stunden) | täglicher Arbeitsweg | Wahl zwischen vertrauten Wegen | Zurechtfinden in einer fremden Stadt |
| | Programmieren und Handeln z.B. Führung (Sekunden bis Minuten) | Abbiegen an einer Kreuzung | Überholen anderer Fahrzeuge | Steuern auf einer nassen oder vereisten Fahrbahn |
| | Beobachten und Regeln z.B. Stabilisierung (Sekunden) | um eine Kurve fahren | ein unbekanntes Auto fahren | Fahrschüler in der ersten Fahrstunde |

Tabelle 14: Zuordnung von Aufgabenebenen und dem Verarbeitungsniveau (nach Schweigert 2003 und in Anlehnung an Hale et al. 1990)

Der tägliche Arbeitsweg wird durch den hohen Übungsgrad fertigkeitsbasiert und damit sehr schnell verarbeitet. Die Planung des Weges gehört zur Navigationsebene, wobei zur Erfüllung relativ viel Zeit zur Verfügung steht (Minuten bis Stunden). Daraus lässt sich auch der Grund erkennen, warum Fahrschüler in der ersten Fahrstunden häufig Fehler begehen und mit dem Fahrzeug stehen bleiben oder in gefährliche Situationen kommen, bei denen der Fahrlehrer einschreiten muss. Die meisten Fahraufgaben müssen auf der fertigkeitsbasierten oder regelbasierten Ebene durchgeführt werden, da nicht ausreichend Zeit für eine wissensbasierte Verarbeitung zur Verfügung steht. Aufgrund der fehlenden Übung sind die Fahrschüler in ihren ersten Fahrstunden aber nur in der Lage, eine wissensbasierte Verarbeitung vorzunehmen.

Bubb (1993) beschreibt das Fahren als eine zweidimensionale Aufgabe. Das Lenken eines Fahrzeuges wird als Regelung der Querdynamik des Fahrzeuges definiert. Es gibt, wie bei der

Fahrzeuginnenregelung, drei mögliche Regelstrecken, nach der der Fahrer steuern kann. Es handelt sich um

- die **Lagesteuerung**,
- die **Geschwindigkeitssteuerung** und
- die **Beschleunigungssteuerung**.

Nach *Fiala* (1966) (siehe Tabelle 15) kann die Fahrzeugquerführung auf vier verschiedenen Niveaus geschehen. Die Steuerung des seitlichen Abstands, der sich nach einer bestimmten Fahrstrecke und Fahrzeit beim Durchfahren einer Kurve einstellen wird, ist eine Beschleunigungssteuerung. *Fiala* (1966) nennt dies die „Nebelorientierung“. Sie wird meist von ungeübten Fahrern und Fahranfängern verwendet. Die Steuerung nach dem seitlichen Abstand ist auch bei Geradeausfahrt möglich.

Neben der „Nebelorientierung“ gibt es noch die Möglichkeit, die Längsorientierung des Fahrzeugs (Orientierungswinkel) durch die Lenkradstellung zu beeinflussen („Richtungsorientierung“), was einer Geschwindigkeitssteuerung entspricht. Eine Regelung durch das kinästhetische Empfinden ist nach *Bubb* (1993) eine Lagesteuerung. *Fiala* (1966) nennt hier die Begriffe „Querkraft“ und „Popometer“.

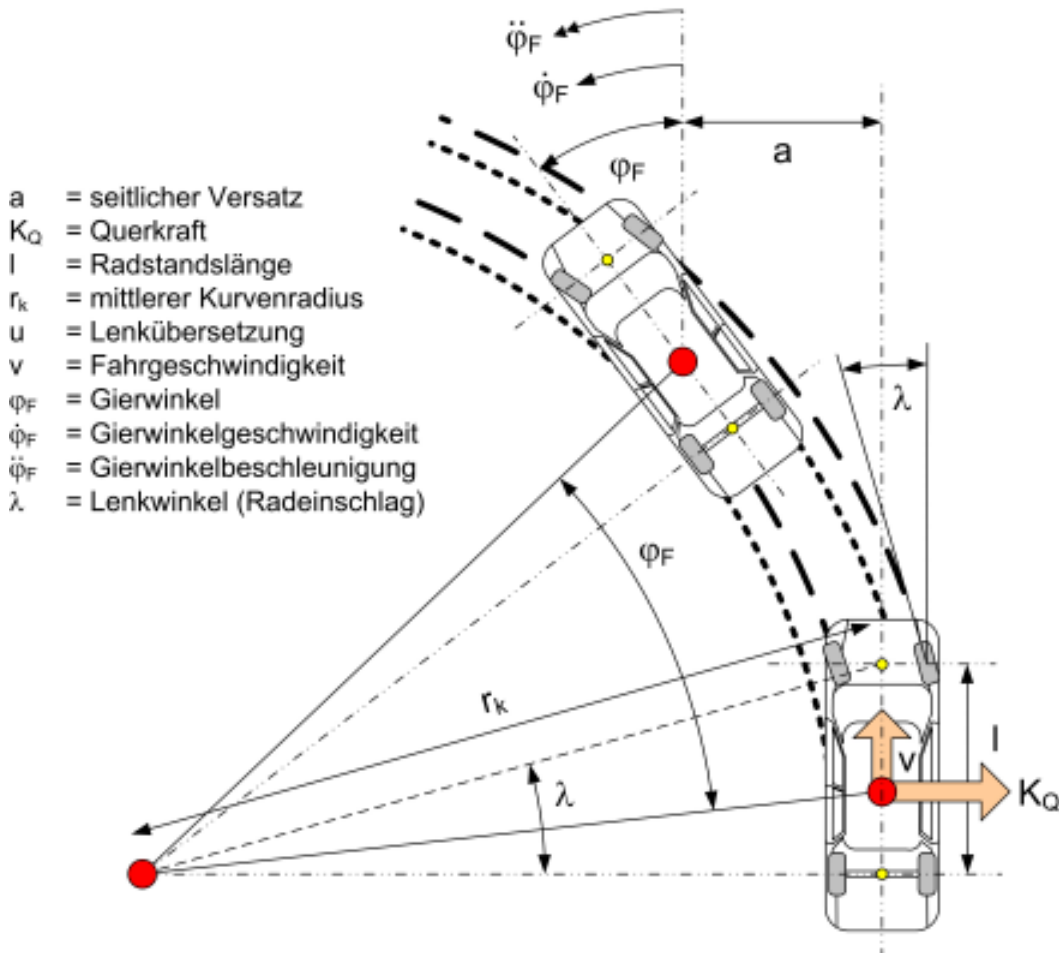


Abbildung 93: Geometrie der idealisierten Kurvendurchfahrt eines Pkw ohne Reifenschräglauflauf

| Basisregelstrategien des Fahrers für die Fahrzeugquerführung bei linearem Fahrzeugverhalten | | | | | |
|--|--------------------|----------------------------|-------------------------------------|---|------------------------------|
| | Bezeichnung | weitere Bezeichnung | Steuerungsart (Regelstrecke) | zugehörige Formel | zugehörige Abbildung |
| 1 | Querkraft | "Popometer" | Lagesteuerung | $K_Q = \frac{m * v^2 * u}{l} * \lambda$ <i>m = Masse des Fahrers</i> | Abbildung 93 |
| 2 | Querabweichung | "Nebelorientierung" | Beschleunigungssteuerung | $\frac{d^2 a}{dt^2} = \frac{v^2 * u}{l} * \lambda$ | Abbildung 93 |
| 3 | Fahrzeugrichtung | "Richtungsorientierung" | Geschwindigkeitssteuerung | $\frac{d\varphi_F}{dt} = \frac{v * u}{l} * \lambda$ | Abbildung 93 |
| 4 | Voraussicht | "Scheinwerferorientierung" | Lagesteuerung | $a' = k_0 * u * \lambda$ | Abbildung 93 Abbildung 94 |

Tabelle 15: Basisregelstrategien für lineares Fahrzeugverhalten nach Ackermann basierend auf Fiala (1966) und Bubb (1993)

In Tabelle 15 sind die oben angesprochenen vier grundlegenden Regelstrategien, mit der der Mensch die Lenkaufgabe erfüllen kann, zusammengefasst. Aus ergonomischer Sicht sind die dort angegebenen Regelstrecken unterschiedlich gut für den Regler „Mensch“ zur Aufgabenerfüllung geeignet, was bedeutet, dass der Schwierigkeitsgrad bei den einzelnen Typen der Regelstrecke unterschiedlich ausfällt. Die Beschleunigungssteuerung ist für den Menschen (nicht nur beim Autofahren) am schwersten zu regeln. Die Lage- und Geschwindigkeitssteuerung sind hingegen einfacher für den Menschen zu handhaben.

Die vorliegende Tabelle sollte jedoch nicht dahingehend interpretiert werden, dass der Fahrer je nach Situation nur einen Parameter verändert und somit nur über eine einzige Regelstrecke regeln kann. Vielmehr muss davon ausgegangen werden, dass entsprechend der Fahraufgabe die Gesamtaufgabe aus den einzelnen in der Tabelle erwähnten beeinflussbaren Parametern zusammengestellt wird. Das können alle Parameter, nur ein Teil davon oder auch nur ein einziger sein. Z.B. bleibt dem Fahrer bei zu schnellem Fahren in dichtem Nebel letzten Endes nur noch die Möglichkeit die Fahraufgabe, die darin besteht, das Fahrzeug auf der Spur zu halten, durch die Beeinflussung des seitlichen Abstandes („Beschleunigungssteuerung“) zu erfüllen, da ihm für die verbleibenden Möglichkeiten der Aufgabenerfüllungen die Informationen fehlen (Sichteinschränkung).

Ist es hingegen der fahrenden Person möglich, eine uneingeschränkte Voraussicht zu bilden, so kann die Vorausschauentfernung ca. 2-3 Sekunden betragen (Bubb 1993, S. 403). Das bedeutet, dass der Mensch so weit nach vorne blickt, dass Objekte, die in dieser Vorausschauentfernung sind, sich nach etwa 2-3 Sekunden auf gleicher Höhe mit dem Fahrzeug befinden. Die angewendete Regelstrategie ist in diesem Fall eine Lagesteuerung („Scheinwerferorientierung“) (Ebene 4 in Tabelle 15), die bei einer Folgeaufgabe aus ergonomischer Sicht am leichtesten für den Menschen zu regeln ist.

Im Übrigen stellt das eine Begründung für eine geschwindigkeitsabhängige Lenkübersetzung mit $1/v$ -Beziehung dar, wie es *Schulze* (1981) vorgeschlagen und in einem realen Fahrversuch erprobt hat. In der Gleichung (1) wird die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Systemparameters s_1 , der durch Gleichung (2) beschrieben ist, durch eine entsprechend ausgelegt geschwindigkeitsabhängige Lenkübersetzung eliminiert:

$$s_1 \dot{x} = y \quad (1) \text{ mit}$$

$$s_1 = \frac{1}{v_u} \quad (2)$$

In Abbildung 94 ist die Voraussicht als der seitliche Abstand (a') und die Entfernung eines imaginären Zielpunktes (k_0) zur Lenkradmitte zu sehen. Bei einer höheren Geschwindigkeit liegt der Vorausschaupunkt weiter vom Fahrzeug entfernt als bei niedriger ($k_{0,2} > k_{0,1}$). Das kann zur Folge haben, dass der Fahrer bei höherer Geschwindigkeit am Lenkrad einen größeren Winkel bei gleicher Kurve einstellt als bei niedrigerer, da der Vorausschaupunkt nicht nur weiter entfernt liegt, sondern auch weiter rechts ($a'_2 > a'_1$).

Das Fahrzeug reagiert durch die Verkoppelung von Querdynamik und Fahrzeuggeschwindigkeit bis zur charakteristischen Geschwindigkeit empfindlicher, sofern die Querschleunigungen nicht allzu hoch werden. Der Fahrer verstärkt dann noch die Gierbewegung des Fahrzeugs, weil er – wie zuvor dargelegt – mit der zunehmenden Geschwindigkeit größere Lenkwinkel einstellt. Um dieser Verstärkung seitens des Fahrers entgegenzuwirken, sollte bei höherer Geschwindigkeit eine indirektere Lenkübersetzung (bis zur charakteristischen Geschwindigkeit v_{ch}) im Fahrzeug eingestellt werden, was beispielsweise mit einer aktiven Lenkübersetzungsverstellung möglich ist.

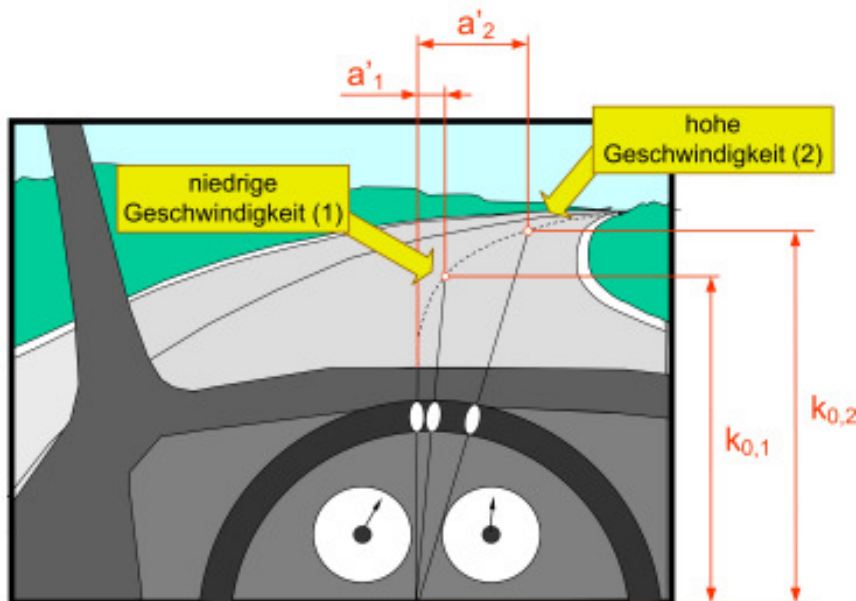


Abbildung 94: Auswirkung zweier unterschiedlicher Darstellungen der Voraussicht mit konventionellem Bedienelement Lenkrad bei Kurvenfahrt

In Tabelle 16 sind nach *Eckstein* (2001) alle Möglichkeiten die Lenkaufgabe zu erfüllen nach Ordnungsgrad und Typ der Regelstrecke, sowie zugehöriger Formel aufgeführt. Der Regelstreckentyp ist dann eine Lagesteuerung mit Positionssystem, wenn der Fahrer die Bahnkrümmung der Kurve, die Gierwinkelgeschwindigkeit oder die Querschleunigung über die Lenkung beeinflusst. Die Beeinflussung des Gierwinkels ist eine Geschwindigkeitssteuerung mit Geschwindigkeitssystem. Die höchste Anforderung an den Fahrer stellt die Beeinflussung des seitlichen Abstandes, die eine Beschleunigungssteuerung mit Beschleunigungssystem ist. Die Darstellung von *Eckstein* (2001) deckt sich mit der von

Fiala (1966) und Bubb (1993), jedoch enthält sie noch eine zusätzliche Regelungsmöglichkeit nach der Giergeschwindigkeit.

| Aufgabe | Ergonomische Interpretation | |
|---|---|--|
| Bahnkrümmung κ beeinflussen | $\delta_{LR} = a_0 * \kappa$ Lenkradwinkel δ_{LR} ist proportional zur Bahnkrümmung | Lagesteuerung mit Positionssystem |
| Giergeschwindigkeit beeinflussen | $\delta_{LR} = \frac{a_0}{v} * \dot{\psi}$ | Lagesteuerung mit Positionssystem |
| Querschleunigung beeinflussen | $\delta_{LR} = \frac{a_0}{v^2} * a_y$ | Lagesteuerung mit Positionssystem |
| Gierwinkel beeinflussen (in Vorausschau-entfernung) | $\delta_{LR} = \frac{a_0}{v} * \psi$ | Geschwindigkeitssteuerung mit Geschwindigkeitssystem |
| seitlichen Abstand y beeinflussen | $\delta_{LR} = \frac{a_0}{v^2} * \ddot{y}$ | Beschleunigungssteuerung mit Beschleunigungssystem |

Tabelle 16: Verschiedene Aufgabestellungen bei der Querführung eines Fahrzeugs und zugehöriger Typ und zugehörige Ordnung der Regelstrecke (nach Eckstein 2001)

In Tabelle 17 ist zum besseren Verständnis der Regelstrecke für die Fahrzeugquerführung dargelegt, wie sich die einzelnen Regelstrecken auf das Lenkgefühl auswirken, wie sie an der Lenkaktivität des Fahrers erkennbar sind und welche Anforderungen an die Lenkung in Bezug auf diese Regelstrecken gestellt werden.

Es muss allerdings erwähnt werden, dass der Fahrer nicht immer eindeutig nach einer alleinigen Regelstrecke versucht, die Aufgabe der Querführung zu erfüllen, sondern bei einer guten Voraussicht nach allen fünf möglichen Teilaufgaben sich eine Gesamtaufgabe bildet und damit nach allen Regelstrecken regelt, weil die Teilaufgaben verschiedene Sinnesmodalitäten (z.B. Querschleunigung den kinästhetischen Sinn und seitlicher Abstand den optischen Sinn) ansprechen.

| Regelstrecke gemäß ergonomischer Interpretation | Lagesteuerung (0. Ordnung) | Geschwindigkeitssteuerung (1. Ordnung) | Beschleunigungssteuerung (2. Ordnung) |
|---|---|--|---|
| Aufgabenstellung bezogen auf die Fahrzeugquerführung | <ul style="list-style-type: none"> Bahnkrümmung beeinflussen Giergeschwindigkeit beeinflussen Querbeschleunigung beeinflussen | <ul style="list-style-type: none"> Gierwinkel beeinflussen | <ul style="list-style-type: none"> seitlichen Abstand beeinflussen |
| Erklärung bzw. Gefühl der Regelstrecke (allgemein) | <ul style="list-style-type: none"> kein Zeitverzug auf Stellgrößenänderung keine Trägheiten auf Lenkbefehle Hebelübersetzung leicht zu regeln leichte Vorhaltbildung | <ul style="list-style-type: none"> geringer Zeitverzug auf Stellgrößenänderung (90° Phasenwinkel) leichte Trägheiten auf Lenkbefehle Stellbefehle beeinflussen die Geschwindigkeitsänderung der Bezugsgröße | <ul style="list-style-type: none"> großer Zeitverzug auf Stellgrößenänderung (180° Phasenwinkel) große Trägheiten auf Lenkbefehle Stellbefehle beeinflussen die Beschleunigungsänderung der Bezugsgröße kaum Vorhaltbildung möglich |
| Gefühl der Regelstrecke in Bezug auf die Kraftfahrzeugquerführung | <ul style="list-style-type: none"> gespürte Querbeschleunigung verändert sich analog mit dem Lenkwinkel bzw. ein bestimmter Lenkwinkel bedeutet eine bestimmte Querbeschleunigung | <ul style="list-style-type: none"> konstant gehaltene Lenkwinkeländerung bestimmt die Geschwindigkeit mit der sich ein gewünschter Gierwinkel einstellt | <ul style="list-style-type: none"> konstant gehaltene Lenkwinkeländerung bewirkt eine Beschleunigung auf den Fahrbahnrand (seitl. Abstand verringert sich immer schneller) |
| Beispiele in der Kraftfahrzeugquerführung | <ul style="list-style-type: none"> Landstraßenfahrt bei Einfahrt in die Kurve und guter Voraussicht und guten Sichtverhältnissen | <ul style="list-style-type: none"> Landstraßenfahrt bei Einfahrt in eine Kurve | <ul style="list-style-type: none"> Baustellenfahrt Autobahn mit Sichteinschränkung nach vorne |
| mögliche Beeinflussungen des Lenkrades durch den Fahrer (Lenkwinkelaktivität) | <ul style="list-style-type: none"> relativ wenig Lenkaktivität | <ul style="list-style-type: none"> nicht eindeutig Lenkaktivität zwischen 0. und 2. Ordnung | <ul style="list-style-type: none"> mehr Lenkaktivität (mehr Lenkwinkeländerungen und höhere Lenkgeschwindigkeiten) Suchen der Lenkradmitte häufigeres Nachkorrigieren |
| Anforderungen an die Lenkung in Bezug auf Regelstrecke | <ul style="list-style-type: none"> spürbare Mittellage nicht notwendig | <ul style="list-style-type: none"> deutlich fühlbare Mittellage linearer Kennlinienanstieg aus der Mitte | <ul style="list-style-type: none"> deutlich fühlbare Mittellage linearer Kennlinienanstieg aus der Mitte kurze Bedienbefehlswege ermöglichen |

Tabelle 17: Vergleich der relevanten Regelstrecken der Fahrzeugquerführung unter verschiedenen Kriterien

Es sollte noch erwähnt werden, dass Untersuchungen (McRuer et al. 1977, Neculau 1992, Reichelt und Strackerjahn 1992, Bubb 1993) ergeben haben, dass vor allem Fahranfänger mehr nach dem seitlichen Abstand fahren, und damit über die allgemein schwerer zu regelnde Beschleunigungssteuerung regeln, was auch zur Folge hat, dass die Voraussicht kürzer ist. Weiterhin ist aus Untersuchungen bekannt, dass der Fahrer diejenigen Parameter versucht zu beeinflussen, die am ehesten zur Fahraufgabe passen (z.B. seitlicher Abstand beeinflussen bei Fahrstreifenwechsel mit hoher Geschwindigkeit und zusätzlicher Beeinflussung der Querbeschleunigung).

Es dürfte also deutlich geworden sein, dass es letzten Endes keine Aussage darüber getroffen werden kann, über welche Parameterbeeinflussung der Fahrer in welcher Fahrsituation und bei welchem Fahrmanöver versucht, eine bestimmte Fahraufgabe zu erfüllen. Dennoch könnte

der Fahrer in einer bestimmten Fahrsituation durch eine entsprechend angepasste Lenkcharakteristik unterstützt werden. Beispielsweise könnte eine Nachtfahrt auf einer Autobahn eine andere Lenkungscharakteristik erfordern als am Tage, weil der Typ der Regelstrecke durch die geringere Sicht nach vorne bei Abblendlicht vom Menschen geändert sein kann.

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz einer Assistenzfunktion ist das Fahren in einer Autobahnbaustelle. Die Unfallhäufigkeit ist in Autobahnbaustellen, bei denen der Verkehr auf eine Richtungsfahrbahn verlegt wurde, meist recht hoch, obwohl die Fahrgeschwindigkeit an dieser Stelle reduziert wird. Der häufig zu beobachtende zu gering eingehaltene Abstand und die damit verbundene mangelnde Sicht nach vorne ermöglichen den Fahrern nur noch die Regelung des seitlichen Abstandes („Nebelorientierung“, Beschleunigungssteuerung). Hinzu kommt noch die geringe seitliche Toleranz aufgrund der engen Fahrspur (geringerer Sicherheitskorridor). Die Beschleunigungssteuerung und die geringe Toleranz stellen zusammen eine hohe Anforderung an den Fahrer. Vermutlich wird dadurch ein höheres Unfallrisiko hervorgerufen, das durch entsprechende technische Unterstützungsmittel vermindert werden kann (z.B. Heading-Control-Systeme).

Allerdings sollte hierzu erwähnt sein, dass eine sehr große Adaptivität der Lenkungscharakteristik an die Fahrsituation oder an den Fahrertyp auch Risiken mit sich bringt. Wie bereits erwähnt (siehe Kapitel 2.5.3.1 „Modelle der Informationsverarbeitung“) bildet der Mensch immer ein „inneres Modell“. Dies bedeutet für ihn die Entwicklung von Wahrnehmungs-Handlungs- und Handlungs-Wahrnehmungs-Schemata, die ihm helfen, das Verhalten der Lenkung vorhersehbar zu machen. Im Falle der Lenkungscharakteristik heißt das, dass der Mensch auf seine Handlung eine bestimmte Fahrzeugreaktion erwartet (Wahrnehmung). Verhält sich das Fahrzeug nun anders als erwartet und vorhergesehen, muss der Mensch dafür eigens seine „inneren Modelle“ überarbeiten oder erneuern. Das kann dazu führen, dass die Reaktionen des Fahrers an der Lenkung unzureichend bzw. der Situation entsprechen falsch und nicht wirkungsvoll sind.

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich aus der Tatsache, dass der Mensch bei der Erfüllung seiner Lenkaufgabe sowohl regelt (closed-loop-Anteile) als auch steuert (open-loop-Anteile). Das Zwei-Ebenen-Modell von *Donges* (1977) wird dieser Tatsache gerecht. Es setzt sich aus den Anteilen der antizipatorischen Steuerung und der kompensatorischen Regelung zusammen. Die antizipatorische Steuerung ergibt sich aus der Voraussicht und der Vorausberechnung des Menschen über den zu erwartenden Straßenverlauf. Dies stellt einen Steuervorgang dar, der durch kompensatorische Regelung in der Stabilisierungsebene im Ergebnis bzw. in der Aufgabenerfüllung nachgeregelt werden muss.

Huang (2004) stellt einige für das Lenkgefühl bedeutsame Erkenntnisse über das Steuer- und Regelverhalten des Fahrers dar, die im Folgenden stichpunktartig aufgeführt sind.

- § In Kurven mit **geringer Krümmung** und **Geradeausabschnitten** sind aufgrund der Antizipation fast nur **Steueranteile** zu erwarten (*Dettki* 1997), wobei der Regelanteil je nach Erfahrungshorizont unterschiedlich ausfällt.
- § **Unerfahrene Fahrer** benötigen **mehr Regelanteile**, da sie mehr nach dem seitlichen Abstand regeln. **Erfahrene** benötigen **mehr Steueranteile**, da sie mehr nach der von ihnen durch Antizipation geschätzten Kurvenradius steuern (*McRuer et al.* 1977, *Neculau* 1992, *Reichelt und Strackerjahn* 1992, *Bubb* 1993)
- § Je weiter der **Vorausschaupunkt** des Fahrers entfernt liegt, desto **weniger Regelanteile** benötigt der Fahrer. Umgekehrt gilt, dass der Fahrer bei geringer Vorausschau mehr regeln muss, weil zunehmend nach dem seitlichen Abstand geregelt wird (*Farrer* 1993).

- § Beim Fahrmanöver **Spurfolgen** benutzt der Fahrer vorwiegend den **Gierwinkel**, beim **Fahrstreifenwechsel** eher die **Spurabweichung** zur Regelung der Fahrzeug-Querdynamik (Yuhara et al. 1999).

Zu ähnlichen und weiterführenden Ergebnissen wie Huang (2004) kommt ebenso Henze (2004) in seiner Arbeit zum Frequenzverhalten des Fahrers. Er führte zur Erstellung eines regelungstechnischen Fahrermodells Probandenversuche am Simulator durch und stellt durch Frequenzanalysen folgende Auffälligkeiten fest:

- § Bei normaler Kurvenfahrt scheinen Querabweichung und Krümmung die wichtigsten Fahrerinformationen zu sein.
- § Beim Spurwechsel scheint der Einfluss der Krümmung fast vollständig zu verschwinden.
- § Auf der Landstraßenfahrt verringert sich die Vorausschauzeit erheblich auf einen Wert von ca. 0,6s.
- § Bei klotiodischen Übergängen zwischen Kurven und Geraden scheinen die Probanden überwiegend zu steuern und weniger zu regeln (siehe auch Horn 1986), während sie beim Übergang von der Normalfahrt zur kritischen Fahrsituation fast nur noch regeln (siehe auch Mitschke und Apel 1996 und Apel 1997).

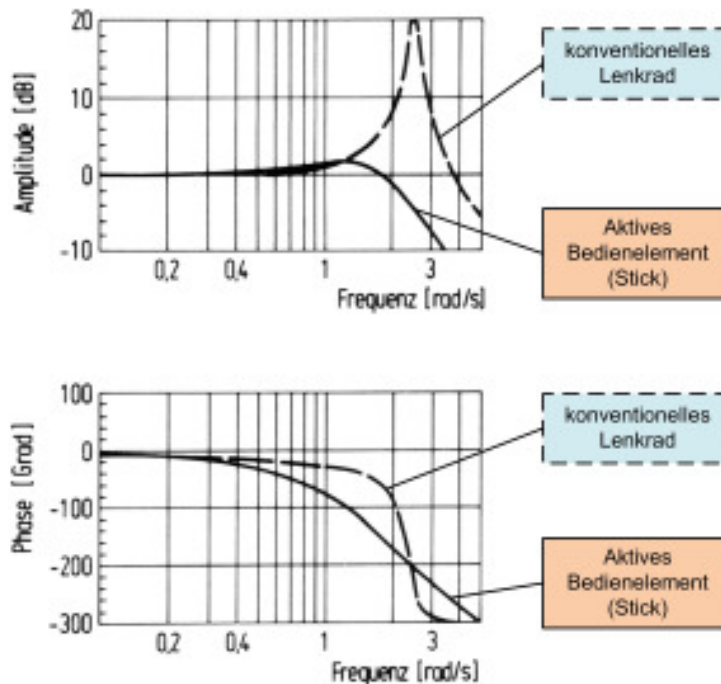


Abbildung 95: Frequenzgang eines geschlossenen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises eines Aktiven Bedienelements im Vergleich zu einem konventionellen Lenkrad (Bubb und Bolte 1990)

Eine weitere Eigenheit des Reglers „Mensch“ wird bei näherer Betrachtung der Diagramme in Abbildung 95 deutlich. Sie zeigen den Frequenzgang (Bode-Diagramm) eines geschlossenen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises mit einem aktiven Bedienelement (durchgezogene Linie) und einem konventionellen Lenkrad (unterbrochene Linie). Ein aktives Bedienelement (siehe Glossar ab S. 282) ist ein Stick (Joystick), das die Gierwinkelgeschwindigkeit krafrückmeldet, d.h. je schneller eine bestimmte Kurve durchfahren wird, desto größer ist die zugehörige Rückstellkraft am Stick. Ein solches Fahrzeug besitzt dann kein Lenkrad mehr.

Beim Verlauf mit konventionellem Lenkrad ist die Resonanzspitze bei ca. 2,5 rad/s bzw. 0,4 Hz bei der konventionellen Lenkung auffällig. Ursache hierfür ist das Zusammentreffen der physiologischen Verzögerungszeiten mit der Trägheit des Fahrzeugs. Dieser Fall tritt dann ein, wenn die Giereigenfrequenz des Fahrzeugs mit der Anregungsfrequenz durch die

Lenkbewegung übereinstimmt. Das Fahrzeug würde dann sehr heftige Reaktionen zeigen. Es sollte nun das Ziel sein, den Amplitudengang bei „eins“ zu halten und den Phasengang bei „null“, um die Resonanzspitze zu vermeiden. Bei einer konventionellen Lenkung kann diese Zielsetzung zumindest teilweise durch eine steife Lenkung (geringe Nachgiebigkeit des Lenkungsstranges) erreicht werden.

Gemäß *Braess* (2001) wurde in der Vergangenheit bei der Fahrzeugentwicklung dieser Forderung bereits Rechnung getragen. Einen weiteren Beitrag zur obigen Forderung könnte die Verkürzung der menschlichen Reaktionszeit beim Lenken beitragen. Inwieweit das durch anthropometrische und geometrische Aspekte (Lenkradgeometrie, Positionierung im Fahrzeug, usw.) erreicht werden könnte, wird in Kapitel 2.5.5 „Anthropometrische Aspekte“ genauer behandelt.

Eine weitere Möglichkeit die Verläufe der Amplitude und der Phase abzuflachen bestünde darin, wie beim aktiven Bedienelement das Lenkmoment mit der Gierwinkelgeschwindigkeit des Fahrzeugs zu erhöhen. Dadurch regelt der Fahrer nicht mehr den Lenkwinkel der Vorderräder, sondern die Gierwinkelgeschwindigkeit des Fahrzeugs. Ob dieses Ziel mit der angesprochenen Maßnahme zu erreichen ist, kann nur durch einen realen Fahrversuch sicher beantwortet werden.

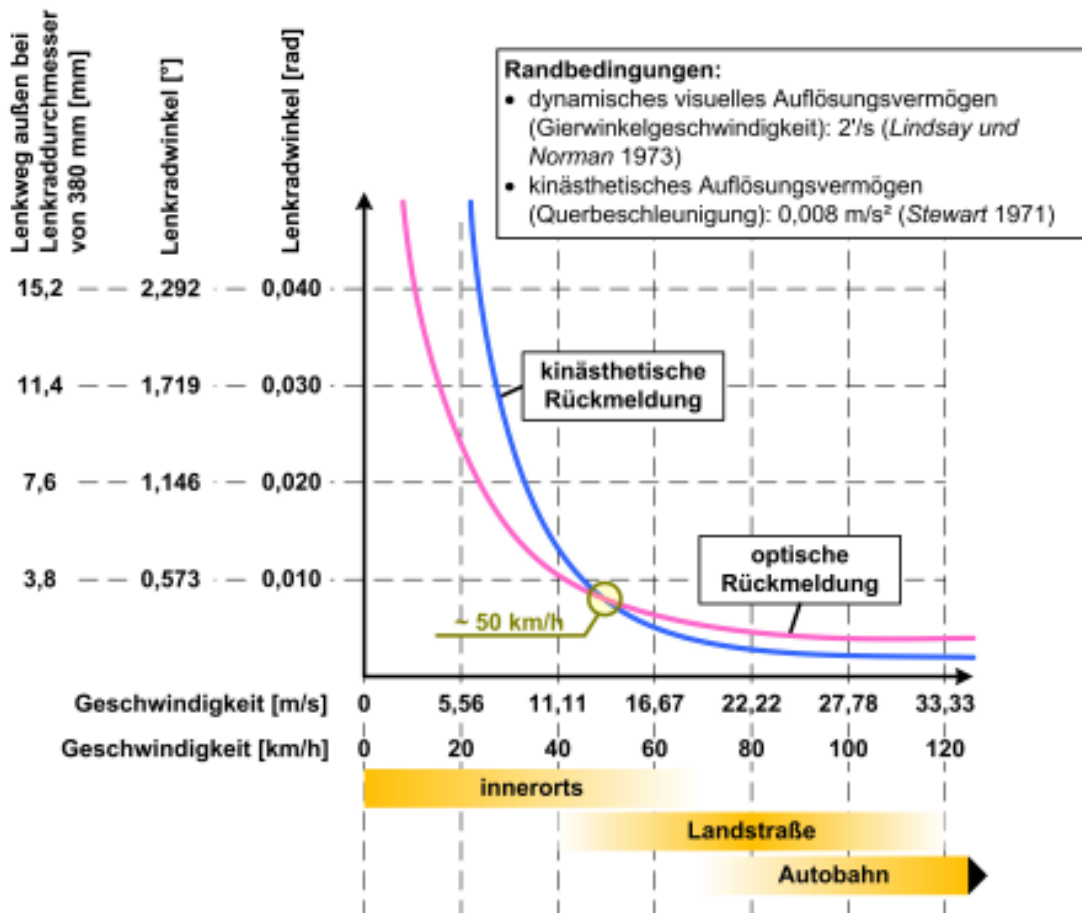


Abbildung 96: Lenkradwinkel über der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit, die gerade zu einem wahrnehmbaren Ereignis führen, bezogen auf die Querschleunigung bzw. die Gierwinkelgeschwindigkeit (in Anlehnung an Bubb 2004)

In Abbildung 96 sind die Wahrnehmungsschwellen des optischen (Winkelgeschwindigkeit) und kinästhetischen Sinns (Querschleunigung) in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit und dem vom Fahrer eingestellten und konstant gehaltenen Lenkwinkel aufgetragen (Bubb 2004). Aus der Abbildung lässt sich bestimmen, welche Lenkausschläge durch optische und kinästhetische Wahrnehmung gerade zu einem spürbaren Ereignis führen. Bei

Geschwindigkeiten bis in etwa 50 km/h erfolgt die optische Rückmeldung eher als die kinästhetische. Über 50 km/h erfolgt die kinästhetische geringfügig eher als die optische. Diese Erkenntnis korreliert in etwa mit den Ergebnissen von *Huang* (2004), die besagen, dass bei niedrigen Geschwindigkeiten (bis ca. 25 km/h) vorwiegend nach der Krümmung regelt, von ca. 25 km/h bis 45 km/h sowohl nach Krümmung als auch nach dem Gierwinkel und der Spurbabweichung und ab ca. 45 km/h nur noch überwiegend nach dem Gierwinkel und der Spurbabweichung regelt. Bei der Regelung nach der Krümmung ist also eine optische Rückmeldung von Bedeutung, bei der Regelung des Gierwinkels und der Spurbabweichung ist noch zusätzlich die kinästhetische Rückmeldung bedeutsam.

Bubb (2004) sieht darin im Übrigen eine Erklärung für die von *Jürgensohn* (2000) gefundene Eigenheit des Fahrers bei völlig gerader Fahrbahn einen Zick-Zack-Kurs zu fahren. *Bubb* (2004) erklärt dies folgendermaßen: „Der Fahrer sieht die gerade Strecke, weiß, dass hier keine Querb beschleunigung zu erwarten ist und regelt auf Querb beschleunigung ‚null‘. Da die Längsrichtung des Fahrzeugs von der Längsrichtung der Straße abweichen kann, nimmt er optisch erst nach einer gewissen Zeit die Abweichung vom Kurs wahr, korrigiert, regelt dann aber wieder auf Querb beschleunigung ‚null‘, usw.“

Die Konsequenz für das Lenkgefühl besteht darin, dass für niedrige Geschwindigkeiten unterhalb ca. 50 km/h die kinästhetische Rückmeldung nahezu keine Rolle mehr spielt, dafür aber mit zunehmenden Geschwindigkeiten ab 50 km/h immer bedeutender wird.

Zusammenfassung Regelstrategien

- § Mensch als **PID**-Regler
- § **Fahraufgabe** durchläuft drei Ebenen (Navigation, Bahnführung, Stabilisierung).
- § Verknüpfung der drei Ebenen der Fahraufgabe (zur Verfügung stehende Zeit) mit **Verarbeitungsniveau** (benötigte Zeit).
- § **Beschleunigungssteuerung** am schwersten zu regeln, **Lagesteuerung** am leichtesten zu regeln.
- § Fünf verschiedene Regelungsmöglichkeit zur Erfüllung der Aufgabe „Querführung“ anwendbar, davon **drei Lagesteuerungen**.
- § Lenkgefühl betreffend:
 - Bei **Normalfahrt** scheint **Querabweichung und Krümmung** die wichtigste Information zu sein, jedoch beim **Spurwechsel** scheint der Einfluss beider Größe vollständig **zu verschwinden**.
 - Bei **Kurven mit geringer Krümmung** und Geradeausabschnitten fast nur **Steueranteile**.
 - Bei **Kurveneinfahrt** zunächst antizipatorische Steuerung und dann kompensatorische **Regelung** (Modell von *Donges* 1977).
 - **Unerfahrene Fahrer** (auch Fahranfänger) benötigen mehr **Regelanteile**, regeln mehr nach dem seitlichem Abstand (Beschleunigungssteuerung im Beschleunigungssystem).
 - **Erfahrene Fahrer** setzen mehr **Steueranteile** ein, regeln mehr nach dem durch Antizipation geschätzten Straßenverlauf (Lagesteuerung im Positionssystem).
 - Je **weiter Vorausschaupunkt**, desto **weniger Regelanteile**; je kürzer, desto mehr Regelanteile (Regelung nach seitlichem Abstand).
 - Anteil von Steuerung und Regelung je nach **Erfahrungshorizont** unterschiedlich.
 - Beim Fahrmanöver **Spurfolgen** mehr Regelung nach dem **Gierwinkel** und beim **Fahrstreifenwechsel** mehr nach der **Spurbabweichung**.

- Bei **niedrigen Geschwindigkeiten**, Regelung mit **optischer Rückmeldung**; mit **zunehmender Geschwindigkeit** Regelung mit **kinästhetischer und optischer Rückmeldung**.
- Bei Geschwindigkeiten **unterhalb ca. 25 km/h** vorwiegend Regelung nach der **Krümmung**, zwischen **25 km/h und 45 km/h** Regelung nach **Krümmung und Gierwinkel**, **über 45 km/h** Regelung nach dem **Gierwinkel**.

2.5.3.5 Informationsrückmeldung

Um Anforderungen für eine angestrebte Fahrzeuglenkung definieren zu können, muss aus der informationstechnischen Sicht zunächst einmal geklärt werden, welche Informationen aus dem Mensch-Maschine-System an die fahrende Person übermittelt werden sollen, und welche nicht. Unter den „Informationen“ sind im systemergonomischen Sinne alle menschlichen Wahrnehmungen aus seiner Umwelt zu verstehen. Dieser Begriff umfasst auch die an den Körper angreifenden Kräfte. Das Lenkrad ist einer der Hauptübermittler von Informationen an den Fahrer.

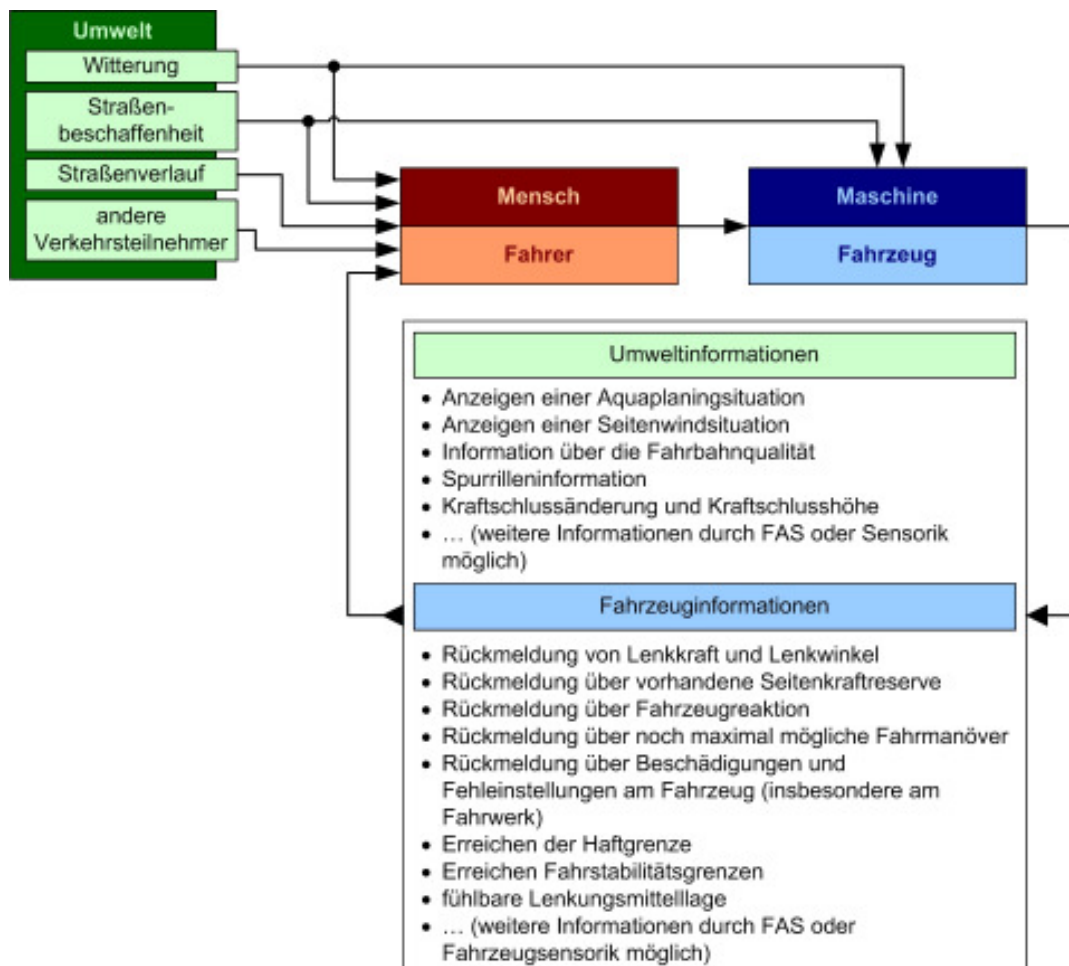


Abbildung 97: Notwendige Informationen für den Fahrer bei der Fahraufgabe „Lenken“

Pauschal lässt sich sagen, dass nur Informationen an die fahrende Person übermittelt werden sollen, die für die Regeltätigkeit beim Lenken tatsächlich benötigt werden (Nutzinformation). Im Wesentlichen sind das die Informationen, die in Abbildung 97 zusammengefasst sind. Das Bild zeigt einen einfachen Mensch-Maschine-Regelkreis. Die notwendigen Informationen sind in zwei Kategorien eingeteilt. Zum einen sind dies an den Fahrer rückgemeldete

Informationen und zum anderen Informationen aus der Umwelt. Unter die Umweltinformationen, die für den Fahrer nötig sind, fallen

- die Beschaffenheit der Straße (z.B. nass oder verschneit),
- die Witterungsverhältnisse (z.B. Tag oder Nacht),
- der Straßenverlauf und
- das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer.

Die notwendigen Informationen seitens der Maschine (Fahrzeug) ist das Anzeigen

- einer Aquaplaningsituation,
- einer Seitenwindsituation
- und von Spurrillen in der Fahrbahn.

Sie sind eigentlich Situationen, die aus den Umweltbedingungen des Mensch-Maschine-Kreises entstehen. Darüber hinaus gibt es noch Informationen, die den Zustand des Fahrzeugs anzeigen. Dazu gehört die Information über

- den eingestellten Lenkwinkel,
- das Lenkmoment,
- die damit verbundene Fahrzeugreaktion,
- die Mittellage der Lenkung,
- die vorhandene Seitenkraftreserve,
- das Erreichen der Reifenhaftgrenze
- und eventuelle Beschädigungen am Fahrzeug, wie beispielsweise Reifenschäden.

Die Begründung für die Notwendigkeit der Übertragung dieser Informationen ist in Tabelle 18 zu finden.

| notwendige Information für die Erfüllung der Fahraufgabe | | optisch | haptisch | akustisch | kinästhetisch | Begründung der Informationsübertragung an der Fahrer |
|--|---|---------|----------|-----------|---------------|---|
| | | | | | | |
| Umweltinformationen | Witterung | X | | | | <ul style="list-style-type: none"> • notwendig zur Anpassung des Fahrverhaltens |
| | Straßenbeschaffenheit | X | X | X | | <ul style="list-style-type: none"> • notwendig zur Anpassung des Fahrverhaltens an die Straßenbeschaffenheit |
| | Straßenverlauf | X | | | | <ul style="list-style-type: none"> • notwendig zur Aufgabenerfüllung • Bildung einer Voraussicht |
| | andere Verkehrsteilnehmer | X | | X | | <ul style="list-style-type: none"> • ermöglicht Reaktion auf eventuelles Fehlverhalten anderer Verkehrsteilnehmer |
| Umweltinformationen (Rückmeldung über Fahrzeug) | Anzeigen einer Aquaplaningsituation | | X | | | <ul style="list-style-type: none"> • schnellstmögliche Übermittlung der Situation an den Fahrer • eventuell Verkoppelung mit aktiven Gaspedal (drückt Gasfuß zurück und nimmt Gas weg) |
| | Anzeigen einer Seitenwindsituation | X | X | | X | <ul style="list-style-type: none"> • Anzeigen eines Regeleingriff bei automatischem Seitenwindausgleich • schnellstmögliche Übermittlung der Situation über haptischen Kanal, um Gegenreaktion zu ermöglichen |
| | Information über die Fahrbahnqualität | X | | | | <ul style="list-style-type: none"> • Vorab- und Zusatzinformation über Kraftschlussverhältnisse |
| | Spurrilleninformation | X | X | | X | <ul style="list-style-type: none"> • schnellstmögliche Übermittlung der Situation an den Fahrer über haptische Rückmeldung, um Gegenreaktion zur ermöglichen |
| | Kraftschlussänderung und Kraftschlusshöhe | X | X | | | <ul style="list-style-type: none"> • Rückmeldung der Änderung, um angepasste Fahrweise rechtzeitig zu ermöglichen |
| Fahrzeuginformationen | Rückmeldung von Lenkkraft und Lenkwinkel | X | X | | | <ul style="list-style-type: none"> • Rückmeldung über den Erfolg der Bedienelementeingabe (Soll-Ist-Vergleich durch den Fahrer) • Stabilisation des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug |
| | Rückmeldung über vorhandene Seitenkraftreserve | | X | | | <ul style="list-style-type: none"> • Anzeigen des Sicherheitskorridors • Voranzeige über das Erreichen der Haftgrenze • ermöglicht Anpassung der Fahrweise |
| | Rückmeldung der Fahrzeugreaktion | X | X | | X | <ul style="list-style-type: none"> • zur Aufgabenerfüllung notwendig • verbessert die menschliche Regelleistung • ermöglicht korrigierende Maßnahmen |
| | Rückmeldung über noch maximal mögliche Fahrmanöver | X | X | | X | <ul style="list-style-type: none"> • zur Abwendung eines Unfalls durch adäquate Reaktion unter voller Ausschöpfung der noch möglichen Fahrmanöver |
| | Rückmeldung über Beschädigungen und Fehleinstellungen am Fahrzeug | X | X | X | X | <ul style="list-style-type: none"> • schnellstmögliche Übermittlung der Situation an den Fahrer über einen oder mehrere Sinneskanal/-kanäle, um Reaktion zu ermöglichen |
| | Erreichen der Haftgrenze | | X | X | | <ul style="list-style-type: none"> • schnellstmögliche Übermittlung der Situation an den Fahrer über haptische Rückmeldung, um schnelle Gegenreaktion zur ermöglichen |
| | Erreichen der Fahrstabilitätsgrenzen | X | X | | | <ul style="list-style-type: none"> • schnellstmögliche und frühzeitige Übermittlung an den Fahrer |
| | fühlbare Lenkungsmittellage (Center-Point-Feeling) | | X | | | <ul style="list-style-type: none"> • für Regelstrecken höherer Ordnung notwendig („Nebelorientierung“) • verbessert Qualität der Aufgabenerfüllung |

Tabelle 18: Notwendige Informationen für die Erfüllung der Fahr- und Lenkaufgabe

Darüber hinaus müssen nicht nur Informationen übertragen werden, die der Fahrer für seine Aufgabenerfüllung benötigt, sondern auch solche Informationen, die ihm bevorstehende kritische Situationen anzeigen. Dadurch ist es möglich auf die mögliche Gefahr rechtzeitig zu reagieren. *Buschardt* (2003, S. 15) nennt zum Beispiel das Anstoßen mit dem Fahrzeug an eine Bordsteinkante oder das Auftreten einer Seitenwindsituation als Beispiele, die er als Störungen kategorisiert.

Buschardt (2003, S. 15/16) erläutert ebenso, dass die Übertragung der Informationen auf den Menschen möglichst immer unter Beteiligung des haptischen Informationskanals erfolgen sollte. Einige Untersuchungen, die sich mit diesem Thema beschäftigen, kommen zu der wichtigen Erkenntnis, dass die menschliche Reaktion bei Nichtverwendung des haptischen Informationskanals vier bis sechsmal so lange dauern kann. Das entspricht auch den Erfahrungen des Lehrstuhls für Ergonomie mit dem aktiven Bedienelement, nach denen haptische Informationen viermal schnellere Reaktion ermöglichen, als wenn sie akustisch und optisch übertragen werden (vgl. *Penka* 2001).

Neben den Nutzinformatoren, die für die Regeltätigkeit notwendig sind, existieren auch Informationen, die destruktiv sind und die folglich nicht an die fahrende Person übermittelt werden sollten. Sie lassen sich entsprechend ihrer Auswirkungen auf den Menschen in vier Kategorien einteilen (siehe Abbildung 98).

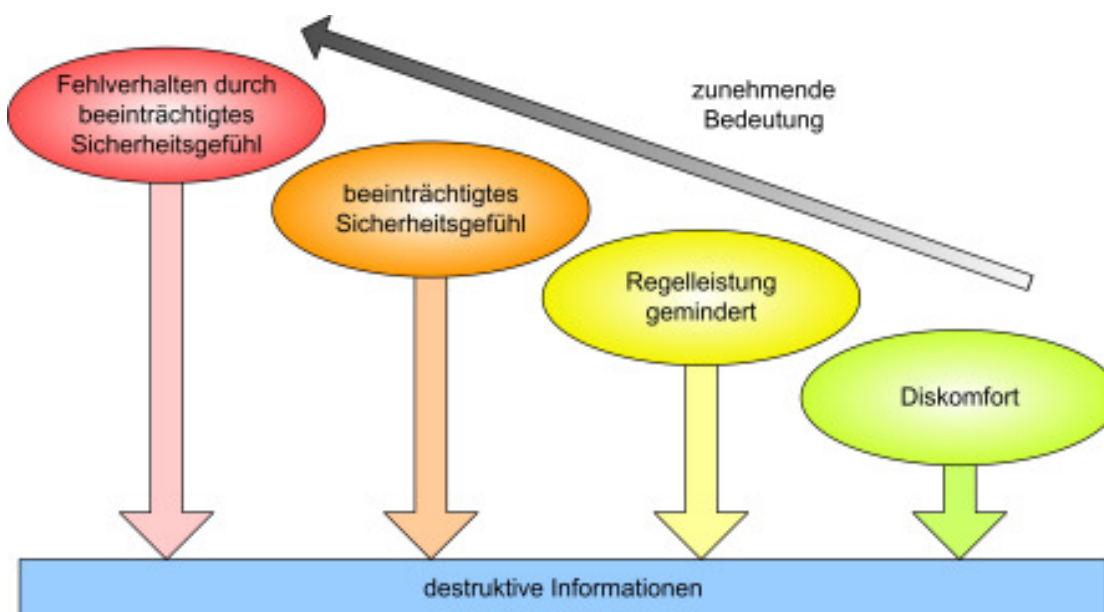


Abbildung 98: Klassifizierung destruktiver Informationen für den Fahrer bei der Fahraufgabe „Lenken“

Zur wichtigsten Kategorie gehören die Informationen, die die fahrende Person verunsichern und sich möglicherweise negativ auf das Lenkgefühl auswirken. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass in die Kategorie „beeinträchtigtetes Sicherheitsgefühl“ nur solche Informationen fallen, die die fahrende Person verunsichern, tatsächlich aber kein Sicherheitsproblem darstellen. Handelt es sich doch um eine Gefahr, dann muss die Information wie weiter oben beschrieben zur fahrenden Person weitergeleitet werden, wenn die Gefahr nicht durch Assistenzsysteme hundertprozentig eliminiert werden kann, was de facto nicht zu realisieren ist. Nachfolgend ist aufgelistet, welche Informationen eine fahrende Person verunsichern können, auch wenn noch kein Sicherheitsproblem vorliegt:

- Lenkradflattern beim Bremsen,
- Lenkradstöße beim Überfahren von Schwellen,
- Schiefziehen beim Bremsen (μ -Split),

- zu schnelle und zu heftige Fahrzeugreaktionen (im Extremfall sicherheitsrelevant),
- ...

Neben den oben genannten Informationen sind noch solche existent, die die fahrende Person nicht unbedingt verunsichern müssen, aber die Regelleistung mindern können. Das können vor allen Dingen folgende Informationen sein:

- größere Zahl an notwendigen Lenkkorrekturen seitens des Fahrers,
- Lenkradschwingungen aller Art,
- unstetiges Verhalten aller Art (Nichtlinearitäten),
- nichtlineares Verhalten der Querdynamik, weil abhängig von der Fahrgeschwindigkeit,
- geändertes Verhalten der Lenkung bei Bremsung,
- Lenkmomentschwankung nach Kurvenfahrt (*Heißing und Brandl* 2002),
- großer Zeit- bzw. Phasenverzug auf Lenkradeingabe,
- Lenkungsspiel,
- große Lenkmomenttotzone,
- ...

Der letzten Kategorie sind Informationen zuzuordnen, die einen Diskomfort bewirken, die Regelleistung aber (noch) nicht mindern. Hierunter fallen auch auf den Menschen einwirkende Kräfte und Schwingungen, die eine ermüdende Wirkung haben. Der Übergang zwischen einer diskomfortbalen Wirkung und einer Minderung der Regelleistung ist schleichend und wahrscheinlich individuell unterschiedlich. Dennoch dürften einige der nachfolgenden Punkte einen Diskomfort bewirken und somit das Lenkgefühl verschlechtern:

- hoher Lenkaufwand als Kombination aus Lenkkraft und Lenkwinkel (Ermüdung),
- durch Fahrbahn ausgelöste Lenkradbewegungen (z.B. während Autobahnfahrt),
- Vibrationen und Schwingungen der Lenksäule,
- kleinere Lenkradstöße,
- mangelnder Geradeauslauf (häufiges Nachkorrigieren),
- ...

Ein Problem ergibt sich also bei Beantwortung der Frage, welche Informationen nur leistungsmindernd sind, aber bei Nichtübermittlung an den Fahrer keine potenzielle Gefahr nach sich ziehen, und welche Informationen eine Gefahr anzeigen und an den Fahrer übermittelt werden müssen, damit ihm eine Reaktion möglich ist, unabhängig davon, ob der Fahrer sich verunsichert fühlt oder nicht. Wie die Arbeit bis hierher gezeigt hat, müsste jedes technische System eine solche Unterscheidung sicher vornehmen können, was aber wohl in absehbarer Zukunft in vollständiger Weise nicht zu erwarten ist.

2.5.4 Informationsumsetzung (Hand-Arm-System)

Die Informationsumsetzung durch den Menschen entsprechen Aktionen, die der Mensch durchführt, um durch Manipulationen an der Maschine Aufgaben zu erfüllen. Im Fall der Kraftfahrzeugquerführung (Lenken) erfolgt die Informationsumsetzung über das Hand-Arm-System (obere Extremitäten) an der Lenkung.

Die Informationsumsetzung durch den Menschen über das Hand-Arm-System an der Lenkung erfolgt über zwei parallel in der Muskulatur wirksame Regelkreise. Das ist zum einen der Längenservomechanismus und zum anderen der Kraftservomechanismus (*Bubb* 1993, S. 340-341 und *Bubb* 1977). Beide Mechanismen werden am Beispiel des Lenkens in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben. Zu erwähnen sei noch, dass sich immer mehr die

Auffassung von *Houk und Rymer* (1981) durchzusetzen scheint, „wonach der Mensch im Wesentlichen die Muskelsteifigkeit, d.h. das Verhältnis von Kraftänderung zur Bewegungsänderung regelt“ (*Penka* 2001, S. 4). Damit ergibt sich als Konsequenz für die Lenkung, dass keine Lenkmomententotzone vorhanden sein sollte und der Anstieg aus der Lenknulllage möglichst proportional und linear sein sollte.

2.5.4.1 Längen- und Kraftservomechanismus der Muskulatur beim Lenken und die Bedeutung von Lenkmoment und Lenkwinkel

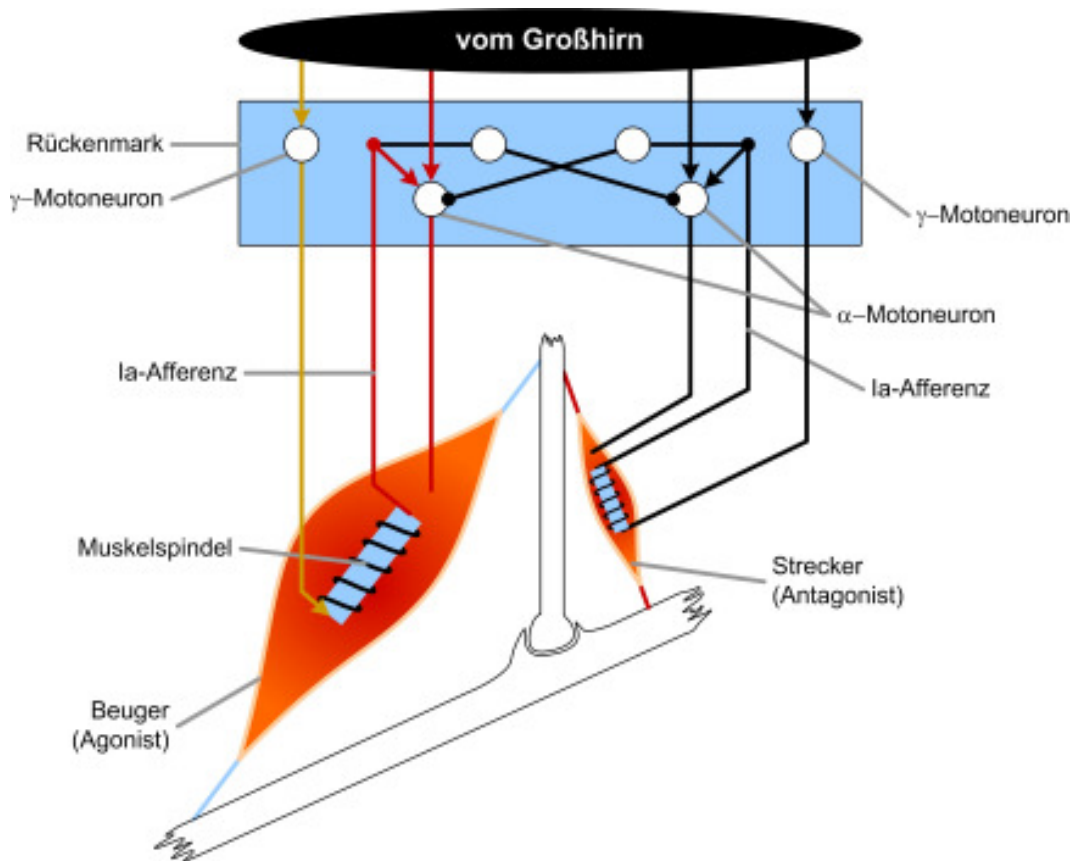


Abbildung 99: Prinzip des Längenservomechanismus der menschlichen Muskulatur (in Anlehnung an Bubb 1977a und Frederich und Schmidt 1971)

Um einen Pkw in eine Kurve zu steuern, muss der Fahrer einen der Fahrsituation entsprechenden Lenkwinkel einstellen. Dadurch möchte er bewirken, dass das Fahrzeug einen von ihm als adäquat angesehen Kurvenradius durchfährt, den er zuvor durch Voraussicht von ca. 2-3 Sekunden „errechnet“ hat. Um das zu erreichen, muss der Fahrer das Lenkrad in eine Drehbewegung versetzen und einen entsprechenden bogenförmigen Weg am Lenkradaußendurchmesser zurücklegen. Dazu muss eine bestimmte Kraft aufgewendet werden.

Der Längenservomechanismus der Muskulatur (siehe Abbildung 99) übernimmt also die Regelung des Weges mit dem Ziel, den vom Menschen gewünschten und eingestellten Weg gegen Störungen abzusichern (beim Lenken eines Kraftfahrzeugs beispielsweise durch größere Fahrbahnunebenheiten erzeugte Änderung des Radeinschlagwinkels). Die Messung der Längenänderung des Muskels, also eine Dehnung oder Stauchung „bewirkt also auch eine Dehnung bzw. Stauchung der Muskelspindel“ (*Bubb* 1977, S. 85). Die Muskelspindel sind afferent über die Ia-Fasern verbunden (Ia-Afferenz). Die Ia-Afferenz ist wiederum im Rückenmark mit dem α -Motoneuron des entsprechenden Muskels verbunden. Durch eine entsprechende Verschaltung wird immer das Agonisten-Antagonisten-Paar (Beuger und

Strecker) erregt, das dadurch die ungewollte Längenänderung – und somit auch Wegänderung – auf den ursprünglichen Weg kompensiert.

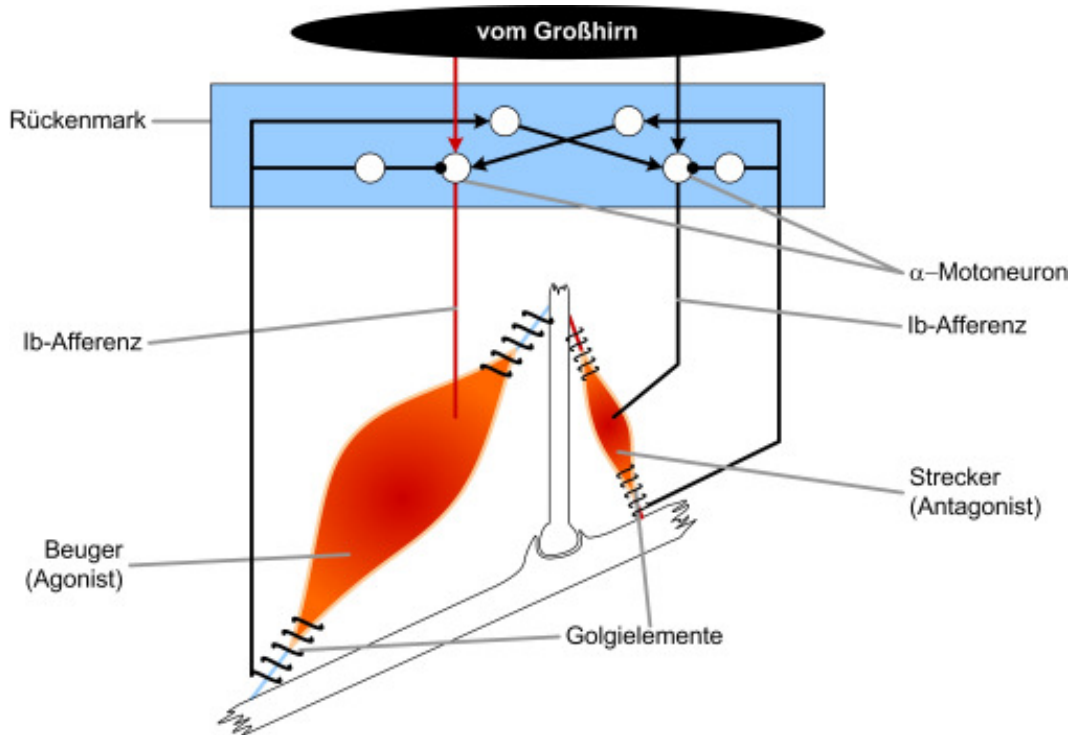


Abbildung 100: Prinzip des Kraftservomechanismus der menschlichen Muskulatur (in Anlehnung an Bubb 1977a und Frederich und Schmidt 1971)

Steigt der Bewegungswiderstand beim Einstellen eines gewollten Weges bzw. Winkels gegen unendlich, kommt der Kraftservomechanismus (siehe Abbildung 100) zum Tragen. Das Funktionsprinzip ähnelt dem des Längenservomechanismus, wobei die Kraftmessung über die Dehnung der Sehnen und nicht über die Muskelspindeln erfolgt. Die Verschaltung mit demselben Muskel erfolgt ähnlich dem Längenservomechanismus im Rückenmark mit Hilfe der Ib-Fasern (Ib-Afferenz).

Analog zum Längenservomechanismus hat der Kraftservomechanismus die Funktion, die vom menschlichen Organismus vorbestimmte Kraft im Muskel aufrechtzuerhalten und gegen Störungen abzusichern. Nach Bolte (1991, S. 15) kommt dem Längenservomechanismus eine 5-10 mal stärkere Bedeutung zu als dem Kraftservomechanismus, was zur Folge hat, dass „der Mensch [...] den Weg wesentlich feiner regeln kann als die Kraft“.

Es ist zu unterscheiden, ob die Muskulatur als Halte- oder Folgeregelung eingesetzt wird. Eine Haltere gelung hat das Ziel, die momentane Stellung aufrechtzuerhalten und gegen Störungen abzusichern, während die Folgeregelung zum Ziel hat, einen bestimmten Weg zurückzulegen. Der vielzitierte Eigenreflex ist ein längenstabilisierender Eigenreflexbogen mit der Regelgröße Muskellänge.

Die Angabe von Parametern des Längen- oder Kraftservomechanismus, die beispielsweise für eine größere Population von Autofahrern gültig sind, ist nicht sinnvoll möglich, weil die individuellen Unterschiede, wie Trainiertheitsgrad der Muskeln, Dehnungszustand der Sehnen, Alter, Geschlecht, usw. sich voneinander stark unterscheiden.

Die Reaktionsfähigkeit kann, wie durch Bubb und Bolte (1987) beschrieben und wie durch Wallner (1972) in Simulatorversuchen und Niemann et al. (1980) mit Realfahrversuchen ausprobiert, mit einer Vorhaltlenkung (Lenkwinkelvorhalt) verbessert werden. Bei einer solchen Vorhaltlenkung ist demnach ein Differentialglied vorhanden, sodass die Lenkung ein PD-Verhalten zeigt. Der positive Effekt ist zum einen eine Verkürzung der Fahrerreaktion an

der Lenkung und zum anderen weniger Lenkwinkelaktivität. Auch *Hirao et al.* (1974) haben einen Realfahrversuch zur Vorhaltlenkung vorgenommen, bei dem die Vorhaltzeit 300 ms betrug. Zwar konnten auch hier die erwähnten positiven Ergebnisse gewonnen werden, normale Fahrer auf öffentlichen Straßen reagierten jedoch mit Angst und Unsicherheit. Deswegen wird vermutet, dass die Vorhaltezeit zu groß ist und auf 200 ms reduziert werden sollte (*Bubb und Bolte* 1987, S. 32). Vermutlich erscheint dem Fahrer bei einer zu großen Vorhaltzeit die Lenkung mit einem Eigenleben bzw. die Reaktion des Fahrzeugs nicht mehr unbedingt als von ihm ausgelöst.

Abbildung 101 zeigt das Blockschaltbild basierend auf *Bubb* (1977a) mit den Frequenzgängen der einzelnen Komponenten des Hand-Arm-Systems. Zunächst werden Informationen benötigt, die durch den Frequenzgang F_A in der Abbildung repräsentiert sind. Die Weiterleitung an das Zentralnervensystem (ZNS) ist dort beinhaltet. Sie ist eine PD-Charakteristik. Als nächsten folgt die Weiterleitung aus dem ZNS (Gehirn) ins Rückenmark. Diese Einleitung der Informationsumsetzung ist durch den Frequenzgang F_U in Form einer Totzeit berücksichtigt. Als nächster Teil der Informationsumsetzung folgt der Frequenzgang F_L der Laufzeit vom Rückenmark zu den motorischen Platten der Muskeln.

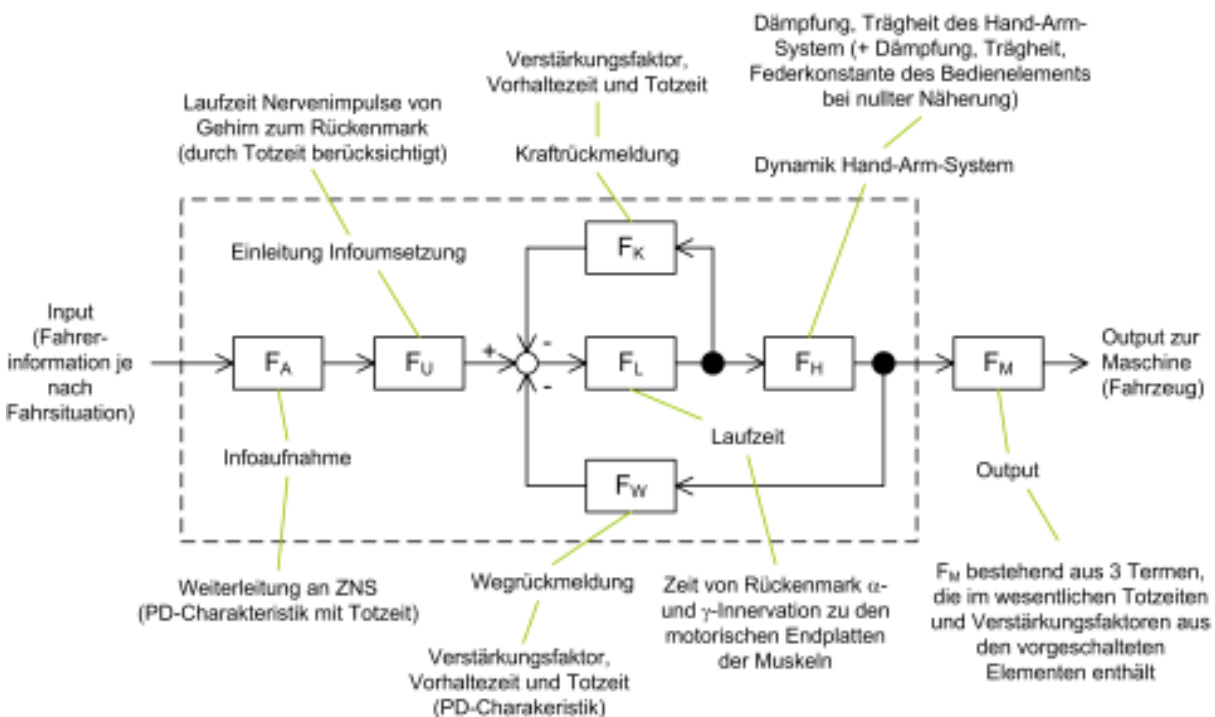


Abbildung 101: Blockschaltbild der Frequenzgänge der einzelnen Komponenten des Hand-Arm-Systems des Mensch als Regler (basierend auf *Bubb* 1977a)

Bei der Aktivierung der Muskeln muss die Dynamik des Hand-Arm-Systems berücksichtigt werden, was durch den Frequenzgang F_H erfolgt. Hier werden die Trägheit und die Dämpfung mitberücksichtigt. In nullter Näherung können an dieser Stelle des Blockschaltbildes die Trägheit, die Dämpfung (viskose Dämpfung) und Reibung des betätigten Bedienelementes miteingerechnet werden.

Wichtiger Bestandteil sind die beiden Unterregelkreise „Krafrückmeldung“ und „Wegrückmeldung“, die vor dem Frequenzgang F_L agieren und sozusagen von den Muskeln in das Rückenmark zurückführen. Im Unterregelkreis „Krafrückmeldung“ melden die Sehnenrezeptoren der Muskeln den Spannungszustand des Muskels und damit der eingestellten Kraft über das Rückenmark zurück. Die Rückmeldung der neu eingestellten Stellung (Wegrückmeldung) des Hand-Arm-Systems der Gelenk- und Stellungsrezeptoren

läuft zwar über das Gehirn, jedoch wird die Stellung hauptsächlich über die Muskelspindeln zurückgeführt.

Der Frequenzgang des Ausgangs F_M besteht aus drei Termen. Der erste Term ist durch die Eigenschaften des Bedienelements wie Trägheit und Dämpfung bestimmt. Der zweite Term berücksichtigt im wesentlichen den Verstärkungsfaktor, der für den Fahrer zwischen 1 und 100 liegen kann. Der dritte Term ist ein Approximationsterm, der im wesentlichen nur bei niedrigen Frequenzen einen Einfluss hat. Zum Verstärkungsfaktor stellt *Zimmermann* (1986, S. 347) fest, dass die Regelgröße umso genauer gehalten werden kann, je größer der Verstärkungsfaktor ist.

Aus den unterschiedlichen Laufzeiten, die in den Frequenzgängen als Totzeiten berücksichtigt sind, kann die minimal mögliche Reaktionszeit des Menschen abgeschätzt werden (siehe *Bubb* 1977a, S. 216). Abbildung 102 zeigt diese Abschätzung anhand einer optischen Informationsaufnahme. Aus der sensorischen Empfindungslatenzzeit und der effektorischen Latenzzeit ergibt sich nach der Kalkulation ein Zeitraum für die menschliche Reaktion von 200 ms. Es ist zu erwähnen, dass dieser Zeitraum nur gilt, wenn der Mensch keine willentliche Verzögerung in der eigenen Reaktion aufbaut.

Reaktionszeit des Menschen (am Beispiel optischer Informationsaufnahme)

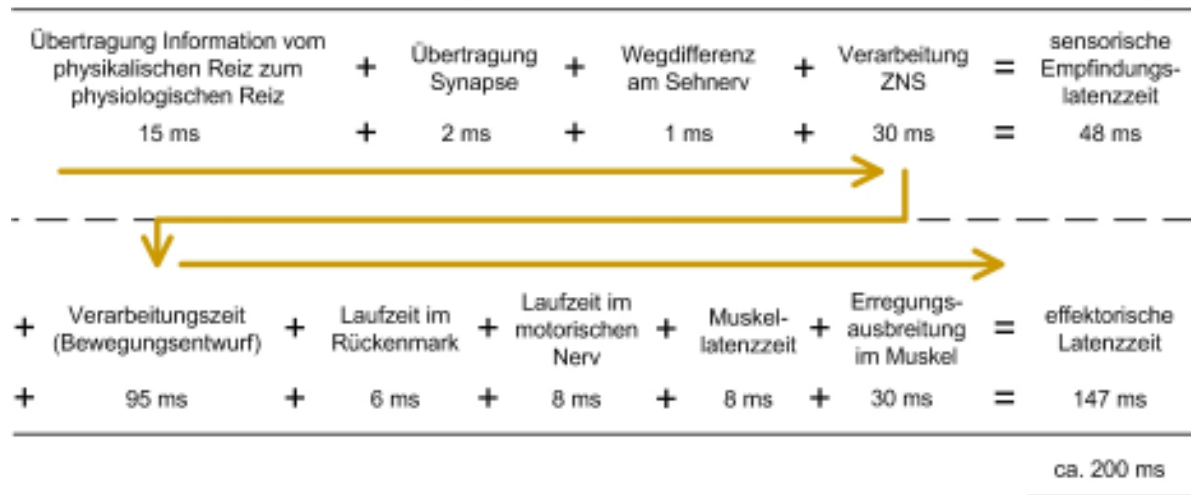


Abbildung 102: Berechnung der minimal möglichen menschlichen Reaktionszeit (basierend auf *Bubb* 1977a)

Eine wesentliche Frage ist, wann der Fahrer die Kraft (Lenkkraft) regelt und wann den Weg (Lenkwinkel). Zunächst ist in der zugehörigen Fachliteratur (u.a. *Henatsch* 1976 und *Zimmermann* 1986) kein Hinweis zu finden, der die Frage eindeutig beantwortet. Ebenso lässt sich aufgrund vorhandener Regelkreisbilder und deren zugehörigen Formeln keine eindeutige Antwort finden. *Rühmann* (1978, S. 33) kommt jedoch zu dem Ergebnis, dass die initiale Bewegung durch die Kraft hervorgerufen wird und dass diese durch die Propriozeptoren (Tiefensensibilitäts-Sensoren) kontrolliert wird. Das bedeutet, dass der Fahrer dann immer den Weg regelt, sobald er über seine Extremitäten eine Strecke zurücklegen muss. Ist eine Längenänderung nicht mehr möglich (z.B. Schieben eines Tisches bis zu einer Wand), dann erfolgt die Regelung der Kraft. Im Grunde soll die Regelung der Kraft sicherstellen, dass die Sehnen an der Muskulatur nicht reißen.

Für das Lenken bedeutet das, dass ein Halten eines Lenkwinkels eine Kraftregelung darstellt (Abbildung 103 Nr. 3). Hier sichert der Fahrer seinen gewünschten Lenkwinkel gegen Störungen von unten nach oben durch die Lenkung ab. Das Einstellen des Lenkwinkels ist eine Wegregelung (Abbildung 103 Nr. 2). Das kann außerhalb oder innerhalb des Offcenterbereichs sein oder aus der Nulllage heraus bzw. in die Nulllage zurück.

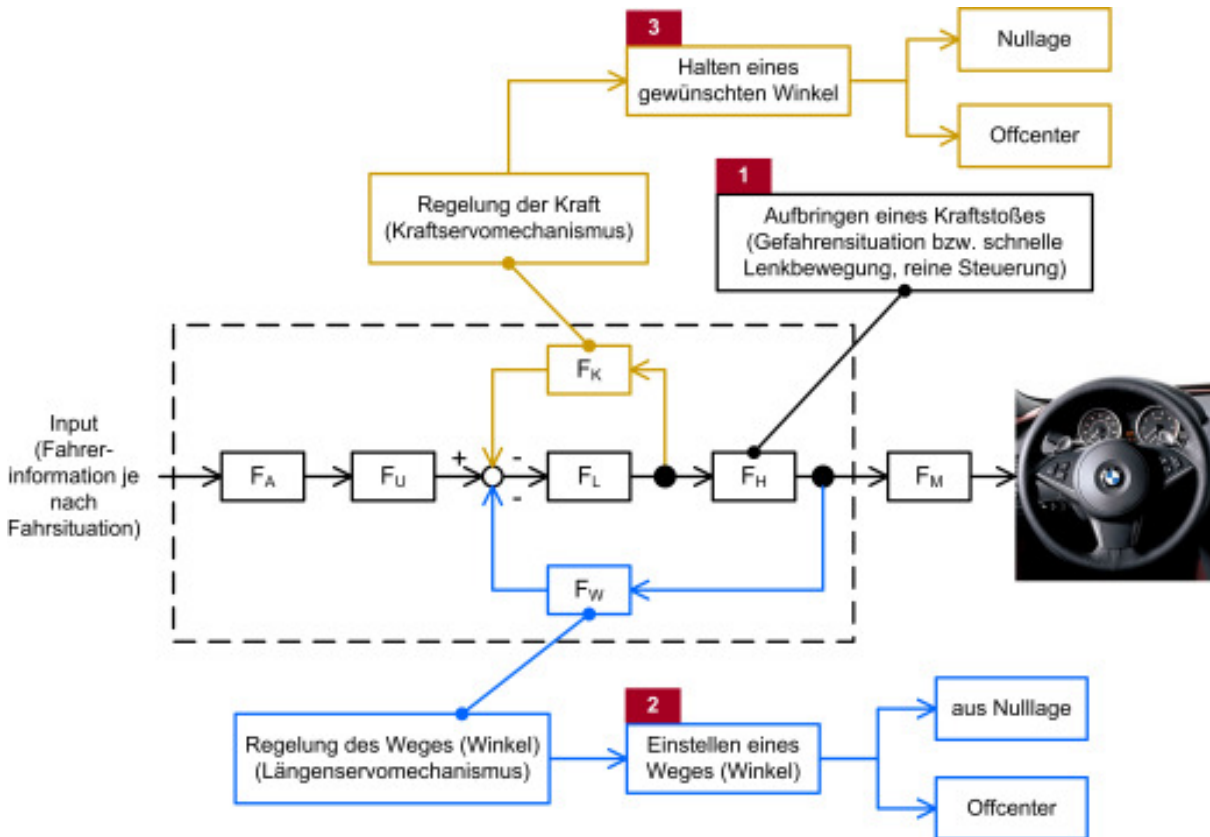


Abbildung 103: Blockschaltbild des Längen- und Kraftservomechanismus der menschlichen Informationsumsetzung über das Hand-Arm-System an einer Fahrzeuglenkung

In einer Notsituation, bei dem der Fahrer versucht, eine möglichst hohe Lenkwinkelgeschwindigkeit zu erreichen, liegt eigentlich keine Regelung mehr vor, sondern dieser Fall entspricht einer Steuerung (Abbildung 103 Nr. 1). Bleibt dem Fahrer in einer kritischen Situation mehr Zeit als erwartet bzw. ist die kritische Situation abgewendet, dann greifen wieder beide Regelkreise. Das kann sich beispielsweise dadurch äußern, dass der Fahrer einen Lenkwinkel, der ursprünglich zu hoch eingestellt war, nachkorrigiert und verringert.

Es stellt sich nun die abschließende Frage, welche der beiden Größen „Lenkwinkel“ und „Lenkkraft“ mit ihren beiden Unterregelkreisen eine größere Bedeutung zukommt. Eine jüngere Untersuchung von *Kushiro und Yamamoto (2006)*, in der mit Hilfe einer Lenkmaschine sowohl ein konstant sinusförmiges Lenkmoment als auch einen konstant sinusförmigen Lenkwinkel aufgebracht wurde, zeigt, dass das Fahrzeugverhalten auf diese unterschiedlichen Eingabeformen sich unterscheidet. Die Untersuchung wurde durch reale Fahrer ergänzt, die das unterschiedliche Fahrzeugverhalten beurteilen sollten.

Als Ergebnis der Untersuchung bleibt festzuhalten, dass die Fahrzeugreaktion in Form des Verlaufs der Giergeschwindigkeit und der Querbeschleunigung bei einer sinusförmigen Lenkmomenteneingabe über einen Lenkroboter ungleichförmiger ist als bei der Eingabe eines sinusförmigen Lenkwinkels. Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass die Unterschiedlichkeiten zwischen zwei Fahrzeugen in den Hystereseverläufen von Lenkmoment gegenüber der Gierrate, der Querbeschleunigung und des Lenkwinkels bei sinusförmigen Lenkmomenteneingaben deutlicher ausgeprägter sind als bei sinusförmigen Lenkwinkleingaben.

Ein weiterer Bestandteil der Untersuchung von *Kushiro und Yamamoto (2006)* war es, Probanden zwei verschiedene Charakteristika von Fahrzeuglenkungen zu beurteilen. Dabei

sollte die Probanden einmal mehr nach dem Lenkmoment und einmal eher nach dem Lenkwinkel regeln. Als Ergebnis konnte festgehalten werden, dass die beiden in ihren Parametern unterschiedlichen Lenkungen nur bei der Regelung mehr nach dem Lenkmoment von den Probanden gespürt werden. Bei einer Regelung mehr nach dem Lenkwinkel konnte die Probanden dies offenbar nicht bemerken. Allerdings muss hier erwähnt werden, dass den Probanden vor dem Versuch gesagt wurde, ob sie den Weg oder die Kraft regeln sollten.

Das Ergebnis zeigt, dass dem Lenkmoment bzw. der Lenkkraft eine große Bedeutung zukommt, sobald die Unterschiedlichkeiten der Lenkung bezüglich ihres Charakters übermittelt werden sollte. Das Lenkmoment scheint sozusagen ein Informationsträger der Lenkungseigenschaften zu sein.

Wie bei der Wahrnehmung verfügen ebenso die menschliche Ausgaben über bestimmte Genauigkeiten und Grenzen. Für den Fall des Lenkens ist dabei vor allem die Genauigkeit der Kraftübertragung von Interesse. Gemäß der Untersuchung von *Tan et al.* (1994) ist die mögliche Kraftauflösung nominal von der bereits aufgebrauchten Kraft abhängig. Relativ bzw. prozentual liegt sie jedoch für das Handgelenk und das Ellenbogengelenk zwischen 1-2 % der aufgebrauchten Kraft. Für die Auslegung einer konventionellen Fahrzeuglenkung bedeutet die erwähnte Ausgabegenauigkeit, dass der Lenkkraftanstieg mit dem Lenkwinkel einerseits nicht so groß werden darf, dass zu wenig Lenkwinkel erforderlich ist, weil dadurch ein notwendiger Lenkwinkel eventuell vom Fahrer nicht eingestellt wird, andererseits nicht zu flach verlaufen darf, weil dann die Lenkwinkel zu groß und das Fahrzeug überlenkt werden könnte, wengleich auch nicht in Form eines gefährlichen Überlenkens.

In Bezug auf die Bewegungsgeschwindigkeit existieren zwei maßgeblich Grenzen (siehe *Schmidtke* 1961 und auch *Bubb und Schmidtke* 1999). Die maximale Geschwindigkeit, mit der das Hand-Arm-System kontrolliert bewegt werden kann liegt bei etwa 100 cm/s. Unterhalb von 10 cm/s ist die Bewegung derart unstetig, dass nicht mehr von einer gesamthaften, fließenden Bewegung gesprochen werden kann. Die mittlere Abweichung einer Zielübung nimmt mit zunehmender Bewegungsgeschwindigkeit leicht überproportional zu. Weiterhin stellt *Schmidtke* (1961) fest, dass mit zunehmender Bewegungsgenauigkeit die Bewegung aufgrund der Trägheit des Hand-Arm-Systems glatter wird, aber wie schon erwähnt auch ungenauer.

2.5.4.2 Vom Menschen aufbringbare Lenkwinkel und Lenkwinkelgeschwindigkeiten

Wie schon deutlich wurde, hängen die Regelleistung des Menschen beim Lenken und das damit verbundene Lenkgefühl von dem zeitlichen Verlauf der auf das Lenksystem übertragbaren Lenkwinkel und Lenkmomente ab. Damit spielt auch die menschliche Reaktionszeit eine Rolle. Konkrete und allgemeingültige Zahlenwerte lassen sich nur mit Bandbreiten angeben, weil die übertragbaren Lenkwinkel und Lenkmomente, sowie die damit verbundene Reaktionszeiten von den zuvor erwähnten Parametern, wie etwa dem Lenkraddurchmesser abhängen. Denn streng genommen kann der Mensch im Zusammenhang mit der Lenkbewegung nur Kräfte übertragen und spüren und nicht Drehmomente.

Nach *Poulton* (1974) eignet sich das Hand-Arm-System nicht für die Aufbringung gleichmäßiger rotatorischer Bewegungen. Begründung dafür ist, dass entweder eine zu hohe oder zu niedrige Stellkraftbewegung abgegeben wird, die zu einer ungleichförmigen Bewegung führt (*Rühmann* 1993a, S. 439). *Förster* (1991) gibt an, dass in der Reaktion eines Fahrers auf eine Lenkmomentenänderung (z.B. durch Störung) die Korrekturbewegungen nur selten exakt passend sind, da es sich häufig nur um eine Reflexbewegung handelt. Die Aufgabenstellung wird mit unzureichender Qualität erfüllt. Eine sehr direkte Lenkübersetzung und kleine Lenkraddurchmesser verstärken diesen negativen Effekt.

Heißing und Brandl (2002, S. 81) geben für die maximal aufbringbare Lenkwinkelgeschwindigkeit einen Wert zwischen $800^{\circ}/s$ und $1000^{\circ}/s$ an. In der Arbeit von Breuer (1998) lassen sich Verteilungen für Lenkwinkelgeschwindigkeiten bei einem doppelten ISO-Spurwechsel-Test („Moose-Test“ oder „Elch-Test“) ohne Bremsen finden. Darin sind vereinzelt Lenkwinkelgeschwindigkeiten bis $1300^{\circ}/s$ zu finden. 13% der Probanden erreichen Lenkwinkelgeschwindigkeiten über $1000^{\circ}/s$. Lenkwinkelgeschwindigkeiten unter $200^{\circ}/s$ traten nicht auf. Tendenziell lassen sich bei Expertenfahrern („Testfahrern“) geringere Lenkwinkel und Lenkwinkelgeschwindigkeiten messen. Begründet werden kann das dadurch, dass Expertenfahrer die erforderlichen Lenkwinkel und Lenkwinkelgeschwindigkeiten leichter vorhersagen können (höherer Steueranteil, weniger Regelanteil).

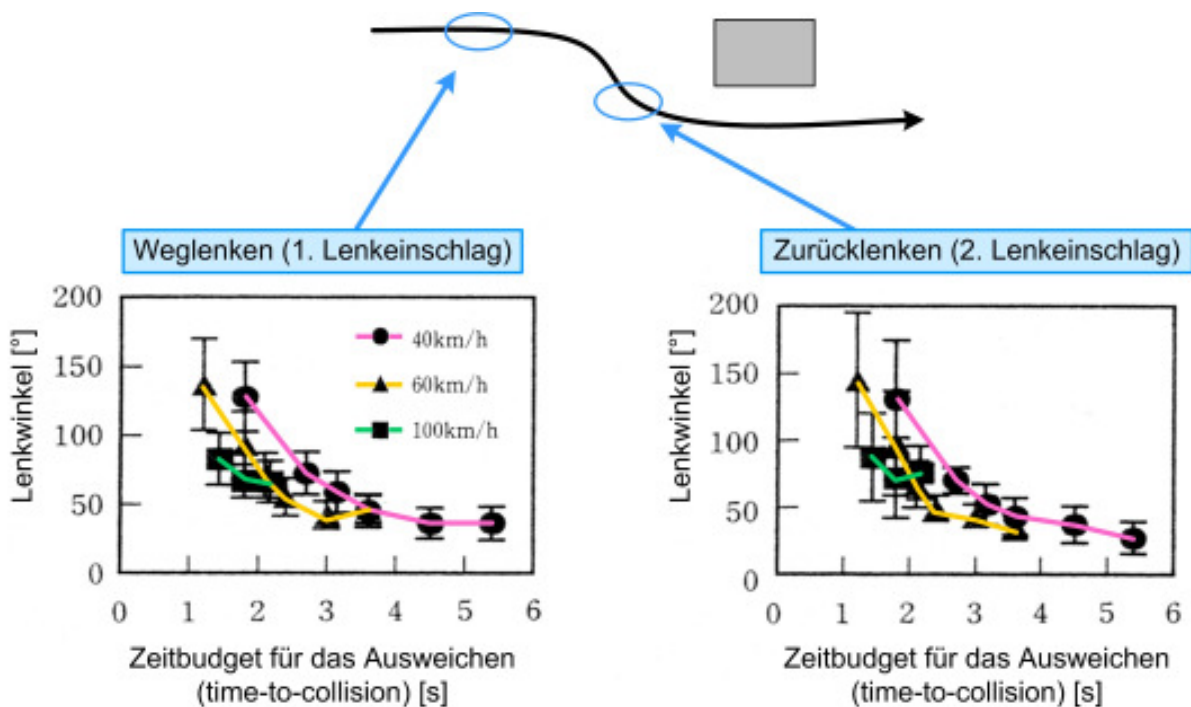


Abbildung 104: Lenkwinkel beim Ausweichen vor einem Hindernis mit unterschiedlichem Zeitbudget (nach Uno und Hiramatsu 1999)

Weitere Aufschlüsse bezüglich der vom Menschen aufbringbaren Lenkwinkel und Lenkwinkelgeschwindigkeiten liefert die Arbeit von Uno und Hiramatsu (1999) (siehe Abbildung 104). Sie untersuchten bei 25 Probanden mit Hilfe eines Simulators den Verlauf des Lenkwinkel und der Lenkwinkelgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Zeitbudget, welches dem Fahrer noch zur Verfügung steht, um einem Hindernis auf der Straße auszuweichen. Als Variation wurde das Auftreten des Hindernisses so eingestellt, dass sich die Fahrer in einem Fall zuvor darauf einstellen konnten, also in der Lage waren, einen Vorhalt zu bilden. Im anderen Fall trat das Hindernis plötzlich auf, jedoch nicht in Form einer Schrecksituation. Ergänzend wurden bei den Versuchen die Fahrgeschwindigkeiten variiert. Bei allen Versuchsvarianten ist auffällig, dass die Lenkwinkelgeschwindigkeit der Probanden einen Wert von $500^{\circ}/s$ nicht überschreitet. Ebenso bleiben alle maximal eingestellten Lenkwinkel unterhalb von etwa 150° . Die von den Versuchspersonen eingestellten maximalen Lenkwinkelgeschwindigkeiten und Lenkwinkel nehmen mit abnehmendem Zeitbudget zum Hindernis exponentiell zu.

Beim Vergleich der Versuchsvarianten mit erwarteten und unerwarteten Auftauchen des Hindernisses ergeben sich bei einem unerwarteten Erscheinen durchschnittliche höhere Reaktionszeiten, weil beim erwarteten eine Vorhaltbildung möglich ist. Auffällig ist, dass die

Lenkwinkelgeschwindigkeiten für das Weglenken (Zurücklenken bzw. zweiter Lenkeinschlag) vom Hindernis in beiden Situationen in etwa gleich sind und sich damit nicht signifikant unterscheiden. Beim Zurücklenken jedoch sind bei einem unerwarteten Erscheinen des Hindernisses die Lenkwinkelgeschwindigkeiten nahezu doppelt so groß wie beim erwarteten. Eine Erklärung dafür wurde von *Uno und Hiramatsu* (1999) nicht gegeben.

Aus allen Untersuchungen geht also hervor, dass unterschieden werden muss, ob es sich bei der angegebenen maximal aufbringbaren Lenkwinkelgeschwindigkeit um einen einzigen zeitlich von anderen Lenkaktionen abgrenzbaren und vom Fahrer eingeleiteten Lenkimpuls handelt oder um ein Sinuslenken (Rechts-Links-Lenken mit vorgegebener Frequenz). Ebenso muss differenziert werden, ob es sich um ein geplantes und ungezwungenes Lenken handelt, wie z.B. das Durchfahren einer Kurvenkombination, um ein geplantes Lenken mit wenig Zeitbudget (z.B. vorhersehbare Ausweichsituation) oder um eine Schreckreaktion (z.B. völlig unerwartete Gefahrensituation). *Mitschke und Wallentowitz* (2004) kommen zu dem Ergebnis, dass der Fahrer für Sinuslenken nicht mehr als ca. 1,5 Hz aufbringen kann.

Bezüglich der Lenkwinkel kommen *Färber und Färber* (1987) zu dem Schluss, dass Fahrer vorwiegend Winkel bis 60° einstellen und dass Lenkradwinkel von mehr als 120° generell vermieden werden sollten. Diese Empfehlung deckt sich in etwa mit den Untersuchungsergebnissen von *Uno und Hiramatsu* (1999), die beobachteten, dass beim Ausweichen vor einem Hindernis Lenkwinkel über 150° bei mittleren Geschwindigkeiten kaum mehr vorkommen. Die nachfolgende Abbildung 105 zeigt basierend auf der Untersuchung von *Zomotor* (1976), welche Lenkwinkel-Amplituden der Fahrer mit welcher Lenkwinkelgeschwindigkeit in kritischen Situationen einstellt. Aus den beiden Parametern lässt sich der mittlere Zeitbedarf für das Einstellen der Lenkwinkel-Amplitude in die Abbildung 105 einzeichnen.

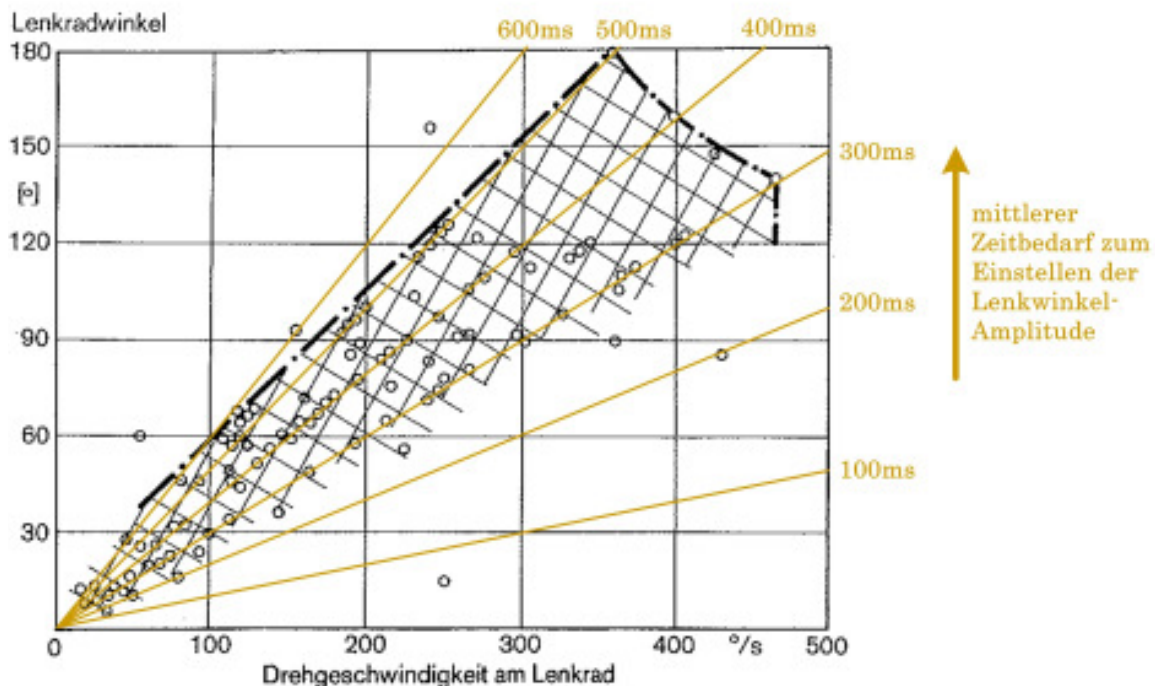


Abbildung 105: Vom Fahrer eingestellte Lenkwinkelgeschwindigkeiten, Lenkwinkel-Amplituden und zugehörige Einstellzeiten in Notsituationen basierend auf *Zomotor* (1976)

Aus der Untersuchung von *Zomotor* (1976) lassen sich vier Aussagen ableiten.

- Erstens fällt auf, dass Fahrer auch in kritischen Situationen kaum mehr als 120° Lenkwinkel einstellen, wobei jedoch nicht gesagt werden kann, welche Geschwindigkeit dabei gefahren wurde.

- Zweitens übersteigt die Lenkwinkelgeschwindigkeit in keinem Fall einen Wert von $450^\circ/\text{s}$, was im Vergleich zu anderen Untersuchungen, die bis zu $1300^\circ/\text{s}$ angeben, relativ niedrig ist.
- Drittens ist auffällig, dass die benötigte Zeit für das Einstellen einer bestimmten Lenkwinkel-Amplitude bis auf wenige Ausnahmen einen Wert von 300 ms oberhalb $200^\circ/\text{s}$ und 200 ms unterhalb $200^\circ/\text{s}$ nicht unterschreitet. Diese Werte decken sich mit den allgemeinen Erkenntnissen der Ergonomie, dass die Reaktionszeit inkl. der Verwirklichung einer Aktion 200 ms bis 300 ms bedürfen. Ebenso sei erwähnt, dass es so zu sein scheint, dass sich mit geringerer Lenkwinkelgeschwindigkeit die Einstellzeit reduziert.
- Viertens bleibt festzuhalten, dass bis auf Einzelfälle alle Versuchspersonen in der Lage waren, die Lenkwinkel-Amplitude innerhalb von 600 ms einzustellen.

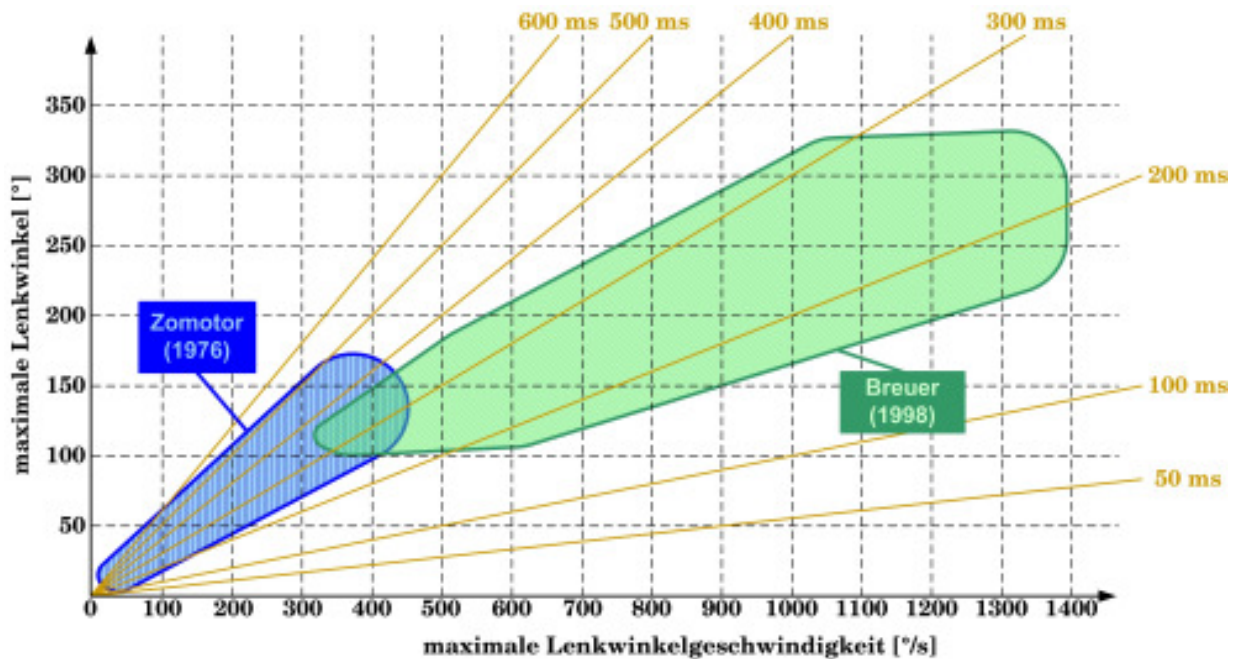


Abbildung 106: Maximale Lenkwinkelgeschwindigkeiten und zugehörige maximale Lenkwinkel in Notsituationen (basierend auf Zomotor 1976) und beim Elchtest (basierend auf Breuer 1998)

In Abbildung 106 sind neben Abbildung 105 nach Zomotor (1976) die Bereiche der maximalen Lenkwinkelgeschwindigkeiten und Lenkwinkel aus der Untersuchung mit dem Elchtest von Breuer (1998) abgebildet. Es lässt sich erkennen, dass die Ergebnisse der beiden Untersuchungen insofern zusammenpassen, als dass der mittlere Zeitbedarf zum Einstellen eines bestimmten maximalen Lenkwinkels nicht unter 150 ms liegt und bei den meisten Probanden zwischen 200 und 300 ms zu finden ist. Einstellzeiten oberhalb 300 ms kommen so gut wie gar nicht mehr vor, weil bei diesem Zeitbedarf ein erfolgreiches Durchfahren des doppelten ISO-Spurwechsel-Parcours anscheinend nicht mehr möglich ist.

Die nachfolgende Abbildung 107 zeigt die markanten Lenkwinkel-Punkte basierend auf den zuvor erwähnten Erkenntnissen aus unterschiedlichen Untersuchungen für ein Lenken nach rechts. Zusätzlich zu den vom Fahrer bei Normalfahrt und in Notsituationen aufgebrachten Lenkwinkeln und Lenkwinkelgeschwindigkeiten ist die Betrachtung von Interesse, wie die Lenkwinkelaktivität mit den Quer- und Längsbeschleunigungen des Fahrzeugs in Verbindung steht. In Abbildung 42 sind die vom Fahrer bei Normalfahrt genutzten Längs- und Querbeschleunigungen dargestellt. Dabei ist auffällig, dass vor allem beim Bremsen die Lenkung in Bezug auf das Ausnutzen des Querbeschleunigungspotenzials nicht bzw. nur wenig genutzt wird. In Notsituationen führt das soweit, dass der Fahrer entweder bremsst oder

lenkt, d.h. nicht mehr in der Lage ist gleichzeitig zu bremsen und zu lenken. Es wird vermutet, dass der Fahrer aufgrund der Beschränkung von 7 ± 2 psychologischen Einheiten, nicht mehr in der Lage ist, gleichzeitig zu lenken und zu bremsen.



Abbildung 107: Markante Lenkwinkel-Punkte eines rechtsseitigen Lenkradeinschlages

Bisher wurde die Frage beantwortet, welche Lenkwinkel bzw. Lenkwinkelgeschwindigkeiten der Mensch aufbringen kann. Jetzt steht noch die Frage aus, welche Lenkkraft in welcher Zeit auf das Lenksystem von Menschen aus übertragbar ist. Das lässt sich durch folgende Fragestellung beantworten:

1. Welchen Durchmesser hat das Lenkrad?
2. In welcher Winkellage befindet sich das Lenkrad zum Zeitpunkt der Lenkwinkeländerung?
3. Wie groß ist das bereits anliegende Gegenmoment am Lenkrad zum Zeitpunkt einer Lenkwinkeländerung?
4. Befindet sich das Lenkrad in Ruhelage oder soll eine bestehende Lenkwinkelgeschwindigkeit erhöht oder vermindert werden?

Für die Beantwortung dieser Fragen sind die Untersuchungsergebnisse von Wilkie (1970) und Suggs (1963) hilfreich (Braess 2003a). Wilkie (1970) untersuchte den Zusammenhang zwischen Kraft und der Verkürzungsgeschwindigkeit der Muskeln und kommt zu dem Ergebnis, dass der Muskel umso weniger Kraft aufbringen kann, je schneller er sich zusammenzieht (siehe Abbildung 108). Die Untersuchung von Suggs (1963) klärt den Zusammenhang zwischen der äußeren Belastung eines Muskel und der noch von ihm aufbringbaren Kraft. Das Resultat der Untersuchung ist, dass zunächst zu Beginn die noch aufzubringende Muskelkraft mit der äußeren Belastung steil ansteigt, ein Maximum erreicht und dann degressiv abfällt. Bemerkenswert ist, dass die Werte im degressiven Bereich relativ stark die zuvor berechneten Werte unterschreiten.

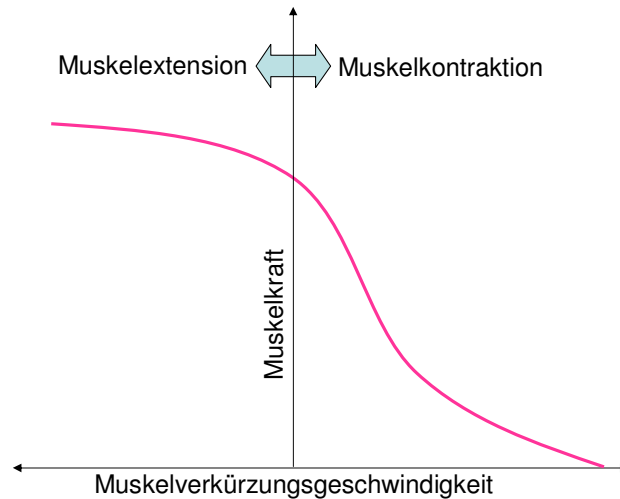


Abbildung 108: Qualitativer Verlauf der Muskelkraft über der Muskelverkürzungsgeschwindigkeit bei Muskelextension und Muskelkontraktion

Die vier zuvor genannten Fragen sind unter der Voraussetzung zu sehen, dass die fahrende Person beide Hände auf gleicher Höhe auf dem Lenkrad hat und dass es nicht zu einem Übergreifen an der Lenkung kommt, wie sich das bei Stadtfahrten zwangsläufig ergibt.

Die **erste** Frage bezieht sich auf die Auswirkung einer Änderung des Lenkraddurchmessers auf die vom Menschen aufbringbare Lenkwinkelgeschwindigkeit, das von ihm übertragbare Lenkmoment und die Einstellgenauigkeit bestimmter Lenkwinkel. Vor allem letzteres hat einen großen Einfluss auf das Lenkgefühl, denn eine mangelnde Einstellgenauigkeit vorgewählter Lenkwinkel macht ein Nachkorrigieren notwendig. Dadurch kann eine Lenkung als unpräzise beurteilt werden. In physikalischer Hinsicht beeinflusst der Lenkraddurchmesser die Lenkwinkelgeschwindigkeit und das Lenkmoment. Durch Vergrößerung des Lenkraddurchmessers erhöht sich durch den größeren Hebelarm bei gleich bleibender Lenkkraft das Lenkmoment. Ein Vorteil ist, dass ebenso die auf den Menschen ermüdend wirkenden Rückstellkräfte durch den größeren Hebelarm und gleich bleibenden Rückstellmoment vermindert werden können. Die übertragbare Lenkwinkelgeschwindigkeit verringert sich hingegen durch einen größeren Lenkweg. Somit reduziert sich auch die Reaktionsfähigkeit auf schnellem Wege einen bestimmten Lenkwinkel einzustellen zu können, was als Nachteil anzusehen ist. Ein Vorteil ist jedoch, dass die Einstellgenauigkeit eines bestimmten Lenkwinkels mit größeren Lenkradhalbmessern steigt. Es ist folglich schwierig eine Empfehlung für einen idealen Lenkraddurchmesser anzugeben. Die als Sonderausstattung angebotenen Sportlenkräder besitzen gegenüber den Serienlenkrädern meist einen geringeren Durchmesser mit tendenziell höherem Lenkkraftniveau, um ein sportlicheres Lenkgefühl zu erzeugen.

Die **zweite** Frage bezieht sich auf den Aspekt, dass das übertragbare Lenkmoment und der zeitliche Verlauf vom momentanen Lenkwinkel abhängen. Ein bestimmter Lenkwinkel hat eine bestimmte Haltung des Hand-Arm-Systems zur Folge. Diese Haltung hängt letzten Endes von der individuellen Anthropometrie und der eingestellten Sitz- und Lenkradposition ab. Möchte der Fahrer den bestehenden Lenkwinkel erhöhen, z.B. weil sich eine Kurve im weiteren Straßenverlauf verengt, so ist der Unterarm gegenüber dem Oberarm je nach Lenkwinkel bereits unterschiedlich stark gestreckt. Ist der Unterarm vollständig gestreckt, kann der Lenkwinkel nur noch durch Übergreifen am Lenkrad oder durch Herunterziehen des Lenkrades auf der gegenüberliegenden Lenkradseite erhöht werden. Dadurch wird deutlich, dass das vom Menschen übertragbare Lenkmoment abhängig vom Lenkwinkel ist. Es nimmt mit zunehmender Unterarmstreckung ab. Dadurch ist die über den Lenkwinkel

aufzubringende Lenkkraft seitens des Menschen nicht immer gleich groß. Die erzeugte Bewegung ist ungleichförmig.

Die **dritte** Frage soll verdeutlichen, welche Abhängigkeiten sich zwischen den übertragbaren Lenkmomenten und Lenkwinkeln und dem bereits anliegenden Gegenmoment (Rückstellmoment) der Lenkung ergeben. Zur Klärung dieser Frage ist die Arbeit von *Suggs* (1963) hilfreich. Demnach ist die noch aufbringbare Kraft eines Muskels abhängig von seiner Belastung. Überträgt man diese Erkenntnis auf das Lenken, bedeutet dies, dass sich die Höhe des anliegenden Gegenmoments direkt auf die übertragbaren Lenkmomente auswirkt. Je höher das Rückstellmoment, desto geringer die aufbringbare Kraft des Menschen für eine Lenkwinkeländerung. Dies gilt auch für die Rückstellung und die viskose Dämpfung der Lenkung.

Die **vierte** Frage schließt die Untersuchungen von *Wilkie* (1970) mit in die Überlegungen ein. Demzufolge ist die aufbringbare Muskelkraft abhängig von der Muskelverkürzungsgeschwindigkeit. Je schneller sich ein Muskel verkürzt, umso weniger Kraft kann er abgeben. Dieser Sachverhalt ist jedoch von sehr vielen Parametern abhängig, wie etwa der Lage der Hand-Arm-Kinematik, der beteiligten Muskelart und dem individuellen Muskelquerschnitt. Trotzdem lässt sich eine wesentliche Erkenntnis auf die Lenkaufgabe übertragen. Je größer die aufgebrachte Lenkgeschwindigkeit ist, desto geringer muss das Gegenmoment sein, um die maximal mögliche Lenkgeschwindigkeit nicht zu verringern. Inwieweit dies mit dem subjektiven Empfinden korreliert ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht bekannt. Es ist allerdings davon auszugehen, dass sich das Lenkgefühl mit zunehmender Beanspruchung, also der subjektiv empfundenen Belastung, verschlechtert. Demnach wäre es für eine schnelle Fahrerreaktion von Vorteil, wenn der Erhöhung der Lenkgeschwindigkeit durch eine Verminderung des Lenkmoments Rechnung getragen würde, z.B. in Notsituationen, in denen eine hohe maximale Lenkgeschwindigkeit benötigt wird. Das wäre durch eine Erhöhung der Servounterstützung möglich.

Durch die drei Fragen wurde deutlich, dass das übertragbare Lenkmomente von drei wesentlichen Parametern abhängt. Insofern ist das übertragbare Lenkmoment bzw. die übertragbare Lenkkraft eine Funktion

- des Lenkraddurchmessers,
- des Lenkwinkels,
- der Lenkwinkelgeschwindigkeit
- und des anliegenden Gegenmoments bzw. Rückstellmoments.

Ein Vorteil dieser Parameter ist ihre einfache technische Messbarkeit durch Sensoren an der Lenkung. Durch die Möglichkeiten der elektromechanischen Lenkung und der Überlagerungslenkung kann eine Anpassung des Lenkungsstrangs an die oben erwähnten zu erwarteten Aspekte erfolgen. Beim Einsatz eines „echten“ Steer-By-Wire-Systems, also bei der völligen Aufhebung der mechanischen Verbindung zwischen Vorderrädern und Bedienelement (Lenkrad), ist dies ebenso problemlos möglich und auch nötig.

Jürgensohn (1997, S. 81) leitet aus allgemeinen Überlegungen vier Hypothesen zu den Bewegungsabläufen des menschlichen Hand-Arm-Systems ab.

1. Je weniger Zwänge in der Bewegungsaufgabe stecken, desto höher ist der Steueranteil der Bewegung und desto mehr nähern sich die Geschwindigkeitsprofile von Einzelbewegungen einer zeitoptimalen Bewegung an.
2. Je geübter eine Tätigkeit ist, desto höher ist der Anteil „ballistischer“ Bewegungen.
3. Höhere Genauigkeitsanforderungen einer Aufgabe bilden sich bei Einzelbewegungen in den Asymmetrien der Geschwindigkeitsverläufe ab.

4. Je größer das Massenträgheitsmoment des zu bewegenden Gliedes im Vergleich zur Muskelkraft ist, desto mehr wirkt sich dies in Form „linearer“ Anteile in den Geschwindigkeitstrajektorien aus.

Die Zwänge der Bewegungsaufgabe unterteilt *Jürgensohn* (1997, S. 80) in interne und externe Zwänge, die beim Menschen einen der Situation entsprechenden Bewegungsablauf erfordern. Ein externer Zwang, der beim Lenken eines Kraftfahrzeugs auftreten kann, ergibt sich aus den Umgebungsgegebenheiten, wie z.B. eine Verengung der Fahrbahn. Interne Zwänge beziehen sich auf den Fahrer und sind somit in ihrem Auftreten individuell unterschiedlich. Als Beispiel nennt *Jürgensohn* (1997, S. 80) eine starke Orientierung am rechten Fahrbahnrand aus Angst.

Eine „lineare“ Bewegung definiert *Jürgensohn* (1997, S. 76) als eine Bewegung, die in ihrem Verlauf kontinuierlich, „weich“ und exponentiell abnimmt. Sie sind mathematisch durch lineare Systeme unterschiedlichen Ordnungsgrad definierbar. Im Gegensatz dazu ist ein wesentliches Merkmal von „ballistischen“ Bewegungen, dass sie sich in deutlich voneinander unterscheidbare Intervalle aufteilen lassen.

2.5.4.3 Vergleich eines Stick-Bedienelements mit einem konventionellen Lenkrad

Andonian et al. (2003) untersuchten und verglichen das Lenkverhalten von Fahrern bei der Fahrzeugführung mit einem Joystick und mit einem konventionellen Lenkrad. Die Versuchspersonen mussten jeweils eine virtuelle Landstraße und ein gerades Stück Autobahn befahren. Bei den Joysticks wurden drei Konfigurationen untersucht. Einmal ohne und mit Krafrückmeldung, wobei im letzteren Fall eine lineare und eine nicht-lineare von der Fahrgeschwindigkeit abhängige Krafrückmeldung verwendet wurde. Die Versuche brachten hervor, dass die Joysticks ohne Krafrückmeldung immer größere Regelfehler beim Fahrer verursachten als mit Rückmeldung. Bei Autobahnfahrt waren die Regelfehler aller Versuchspersonen unter Verwendung des Lenkrades gegenüber dem Einsatz der Joysticks geringer oder in etwa gleich groß, aber in keinem Fall besser. Bei der Landstraßenfahrt war das Ergebnis hingegen nicht eindeutig. *Andonian et al.* (2003) kommen schließlich zu der Erkenntnis, dass eine Joystick-Bedienung der Lenkung in jedem Fall durch eine haptische Rückmeldung unterstützt werden sollte, um geringere Regelfehler zu gewährleisten. Dahinter steht die wissenschaftliche Feststellung, dass die Beteiligung mehrerer Sinne an einer Regelungsaufgabe zu besseren Ergebnissen führt und eine (zusätzliche) haptische Rückmeldung dem Menschen eine schnellere Reaktion als ohne ermöglicht.

2.5.4.4 Auswirkung von Stelleigenschaften bei der Informationsumsetzung durch das Hand-Arm-System

Einige Erkenntnisse aus Untersuchungen an verschiedenen Stellteilen, wie Kurbeln, Hebeln oder Drehknöpfen können für die Auslegung des Bedienelements „Lenkrad“ wichtige Hinweise liefern, welche Eigenschaften eines Stellteils dem Menschen bei seiner Aufgabenerfüllung entgegenkommend sind. Das Verhalten eines Bedienelements ist vornehmlich durch die Parameter

- Dämpfung,
- tote Zone,
- Spiel,
- Reibung
- und Massenträgheit charakterisiert.

In den nachfolgenden Kapiteln wird dargelegt, wie sich eine bestimmte Auslegung der Parameter auf die Regelleistung des Menschen auswirkt.

Dämpfung

In Zusammenhang mit einem Bedienelement ist unter Dämpfung eine viskose Dämpfung zu verstehen. Sie begrenzt die maximal mögliche Lenkwinkelgeschwindigkeit und Lenkwinkelbeschleunigung. Zur viskosen Dämpfung liegen nur wenige Untersuchungsergebnisse vor. *Poulton* (1974) ist der Ansicht, dass bei Schwingungseinwirkung während der Betätigung eines Bedienelements die viskose Dämpfung besser gegen unbeabsichtigte Stellbewegungen seitens des Menschen geeignet ist als die statische Reibung oder eine Massenerhöhung des Bedienelements. Eine Begründung sieht er in der kürzeren Ansprechzeit bei der viskosen Dämpfung.

Beim Lenken ist es deswegen durchaus sinnvoll, ein gewisses Maß an Dämpfung im Lenksystem bereitzustellen, um unbeabsichtigte Lenkbewegungen, die bei Einhandbedienung vor allem aus der Vertikaldynamik resultieren, abzumildern. Aus Untersuchungen geht hervor, dass die Kombination von viskoser Dämpfung und Federrückstellung die besten Resultate in Bezug auf die Regelleistung ergibt (*Rühmann* 1993a, S. 439). Die Rückstellung einer Pkw-Lenkung ist in etwa mit einer Federrückstellung vergleichbar. Ebenfalls verhindert eine hohe Dämpfung das Übersprechen eines vorherbestimmten Lenkwinkels. Jedoch wirkt sich eine zu große Dämpfung zu stark mindernd auf die maximal mögliche Lenkwinkelgeschwindigkeit und Lenkwinkelbeschleunigung aus, die unter Umständen in Gefahrensituationen erforderlich sein kann. Hier zeigt sich ein weiteres Mal, dass eine variable Lenkungsdämpfung, in Abhängigkeit bestimmter Kenngrößen, ergonomisch und fahrdynamisch sinnvoll sein kann.

Tote Zone

Die Tote Zone entspricht dem mechanischen Spiel um die Nulllage (*Rühmann* 1993a, S. 437) und ist eine Nichtlinearität bezüglich der Stellgröße. Beim Lenkrad äußert sich diese durch eine Lenkmomententotzone. Die Nullpunktslage ist dadurch nicht mehr genau fühlbar und die Regelleistung verschlechtert sich (*Rühmann* 1993a, S. 432). Dies gilt vor allen Dingen für Regelstrecken höherer Ordnung, wie etwa bei Beschleunigungssteuerungen. Eine Ausnahme ergibt sich für impulsartige Steuerbefehle seitens des Menschen. Hier kann nach *Poulton* (1974) eine gewisse tote Zone von Vorteil sein. Da impulsartige Bewegungen bei der Lenkung nur sehr selten sind, ist diese Erkenntnis für das Bedienelement „Lenkrad“ gegenstandslos. Insofern sollte eine tote Zone bei Kraftfahrzeuglenkungen generell vermieden werden.

Spiel

Das mechanische Spiel ist dadurch charakterisiert, dass eine Wegänderung am Bedienelement keine Änderung der Stellgröße bewirkt (Lüftweg) und ist damit eine Nichtlinearität bezüglich der Stellgröße. Bei der Kraftfahrzeuglenkung hat somit eine bestimmte Winkeländerung am Lenkrad keine Richtungsänderung des Fahrzeugs zur Folge.

Nach *Rühmann* (1993a, S. 436) verschlechtert das mechanische Spiel die Regelleistung. Heutige Pkw-Lenkungen gelten in der Regel als spielfrei. Sollte dennoch ein Spiel in den Bedienelementen vorhanden sein, dann „ist der negative Effekt um so stärker ausgeprägt, je größer der Verstärkungsfaktor der Regelstrecke ist.“ (*Rühmann* 1993a, S. 436).

Reibung

Hierunter ist die Coulombsche Reibung zu verstehen. Sie ist ebenso wie mechanisches Spiel eine Nichtlinearität bezüglich der Rückstellkraft. Gemäß *Rühmann* (1993a, S. 435-436) reduziert die Reibung die Regelleistung und der negative Einfluss der Reibung fällt umso stärker ins Gewicht, je geringer das Übersetzungsverhältnis und je kleiner die Massenträgheit des Bedienelements ist. Dennoch ist es nach *Rühmann* (1993a, S. 436) nicht unbedingt von Vorteil, völlig auf die Reibung zu verzichten, gleichwohl reibungsbehaftete Bedienelemente

subjektiv als unangenehm empfunden werden. Bei Fahrzeugen führt eine bestimmte Reibung in der Lenkung unter Einfluss von Schwingungen zu besseren Ergebnissen der Regelaufgabe.

Massenträgheit

Eine Erhöhung der Massenträgheit eines Bedienelements ergibt eine größere Zeitkonstante in der Übertragungsfunktion und dadurch wird ein feinfühliges und schnelles Korrigieren behindert (Rühmann 1993a, S. 438). Eine andere Erkenntnis, die zunächst im Widerspruch zur zuvor genannten zu stehen scheint, ergibt sich aus Untersuchungen von Handkurbeln und Drehknöpfen. Hier konnte festgestellt werden, dass eine Erhöhung der Masse eine höhere Steuerleistung ergibt. Jedoch geht das zu Lasten der Einstellgeschwindigkeit (Rühmann 1993a, S. 439). Letztere Erkenntnis trifft nur auf Stellteile zu, bei denen für eine Einstellung mehrere Umdrehungen notwendig sind. Für das Bedienelement „Lenkrad“ ist demnach nur die zuerst genannte Erkenntnis von Bedeutung, dass eine künstliche Erhöhung der Massenträgheit als nachteilig zu sehen ist. Außerdem ist die Trägheit des Lenkrads gegenüber der Trägheit des Hand-Arm-Systems ohnehin geringer. Kraiss (1970) konnte bei seinen Untersuchungen mit einem Steuerknüppel feststellen, dass die Höhe der Massenträgheit des Bedienelements in einem Positionssystem – die Beeinflussung der Bahnkrümmung, Gierwinkelgeschwindigkeit und Querbeschleunigung ist eine Positions- bzw. Lagesteuerungsteuerung in einem Positionssystem (Eckstein 2001) – keine Auswirkungen auf die Zielgenauigkeit beim Nachfahren einer visuell dargebotenen Sprungfunktion hat. Eine Bestätigung diesbezüglich lässt sich in der Arbeit von Stier (1969) finden.

Zusammenfassung Informationsumsetzung (Hand-Arm-System)

- § **Längenservomechanismus** übernimmt die Regelung des Weges und der **Kraftservomechanismus** die isometrische Regelung der Kraft und sichert den Winkel gegen Störungen ab.
- § **Notsituationen** mit maximaler Lenkgeschwindigkeit ist zunächst eine reine Steuerung.
- § Menschliches Hand-Arm-System ist für die Aufbringung **gleichmäßiger Rotationsbewegungen** ungeeignet.
- § Die **Einstellzeit** für das Einstellen der Lenkwinkel-Amplituden zwischen 300ms und 500ms. Bei ISO-Spurwechsel-Versuchen lagen die Werte zwischen 150 und 350ms.
- § Die maximale aufbringbare **Lenkwinkelgeschwindigkeit** liegt zwischen 800°/s und 1400°/s. Unter normalen Fahrbedingungen überschreitet sie kaum 500°/s.
- § Die aufbringbare **Grenzfrequenz** für das **Sinuslenken** liegt in etwa bei 1,5 bis 2 Hz.
- § Die maximal eingestellten **Lenkwinkel** überschreiten einen Wert von 150° nur selten, in Notsituationen erreichen sie teilweise Werte bis ca. 320°. Lenkwinkel über 120° sollten vermieden werden.
- § **Expertenfahrer** benötigen tendenziell weniger Lenkwinkelgeschwindigkeit und Lenkradwinkel.
- § **Normalfahrer** nutzen bei stärkeren Verzögerungen bzw. Beschleunigungen **Querbeschleunigungspotenzial** nicht aus und stellen zu wenig Lenkwinkel ein (siehe g-g-Schmetterling).
- § Je größer die **Muskelverkürzungsgeschwindigkeit**, desto geringer die vom Muskel aufbringbare Kraft.
- § Je höher die **anliegende Gegenkraft**, die die Muskeln aufbringen müssen, desto weniger Kraft können die Muskeln noch zusätzlich aufbringen.

- § Je **weniger Zwänge** in der Bewegungsaufgabe stecken, desto höher ist der Steueranteil der Bewegung und desto mehr nähern sich die Geschwindigkeitsprofile von Einzelbewegungen einer zeitoptimalen Bewegung an.
- § Je **geübter eine Tätigkeit** ist, desto höher ist der Anteil ballistischer Bewegungen.
- § Höhere **Genauigkeitsanforderungen** einer Aufgabe bilden sich bei Einzelbewegungen in den Asymmetrien der Geschwindigkeitsverläufe ab.
- § Je größer das **Massenträgheitsmoment** des zu bewegenden Gliedes im Vergleich zur Muskelkraft ist, desto mehr wirkt sich dies in Form „linearer“ Anteile in den Geschwindigkeitstrajektorien aus.
- § Das **Lenkmoment** bzw. die **Lenkkraft** scheinen eine größere Rolle für das Lenkgefühl zu spielen als bislang angenommen. Dabei scheint das Lenkmoment wichtige Informationen über die **Lenkungscharakteristik** zu liefern.

2.5.5 Anthropometrische Aspekte

Es ist unbestritten, dass die anthropometrische Gestaltung eines Bedienelements im Mensch-Maschine-System einen Einfluss auf die Regelleistung des Menschen besitzt. Der Vergleich des Bedienelements Lenkrad mit einem aktiven Bedienelement in Form eines seitlich angebrachten „Joysticks“ (Sidesticks) verdeutlicht dies, wobei in der Vergangenheit einige Untersuchungen durchgeführt wurden (*Bubb und Bolte 1997, Bolte 1991a und 1991b, Eckstein 1997, 2000 und 2001, Gillet 1999, Mayer 1986, Penka 2001*). Inwieweit anthropometrische Aspekte, ebenso wie die zuvor erläuterten psychophysischen und informationstechnischen Aspekte einen Einfluss auf das Lenkgefühl besitzen, bleibt weitgehend unklar. In der öffentlich zugänglichen Literatur lassen sich nur sehr wenige Erkenntnisse für eine entsprechende anthropometrische Gestaltung des Lenkrads ableiten, da sich die Untersuchungen hierzu fast ausschließlich auf das aktive Bedienelement (Sidestick) beziehen.

Dennoch ist davon auszugehen, dass die in Abbildung 109 aufgelisteten fünf Faktorgruppen (Faktoren deswegen, weil ihr quantitativer Einfluss nicht bekannt ist) zumindest teilweise einen Einfluss auf das Lenkgefühl besitzen und somit auch die menschliche Regelleistung beeinflussen:

- Position der Hände auf dem Lenkrad,
- Sitzposition relativ zum Lenkrad,
- Pedalerieposition relativ zum Lenkrad,
- Lenkradgeometrie,
- Lage der Lenksäule (inkl. Lenkrad) im Fahrzeug.

Diese Faktoren ergeben sich aus der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine bezogen auf die Lenkaufgabe und wirken sich auf die zeitlichen Verläufe des übertragbaren **Lenkmoments**, sowie der übertragbaren **Reaktionszeiten** und **Lenkwinkel** aus. Alle drei Teilfaktoren sind eng miteinander verzahnt. Ein weiterer Teilfaktor ist der **Lenkkomfort** bzw. **Lenkdiskomfort**. Die Bedeutung der Teilfaktoren für das Lenkgefühl lässt sich mit der Aussage von *Jürgensohn (1997, S. 20)* erkennen: „Insbesondere der zeitliche Verlauf von Lenkradmoment und Lenkradbewegung in Relation zu den Fahrzeugbewegungen ist nach Meinung vieler Versuchsfahrer die ausschlaggebende Informationsquelle für die Beurteilung.“

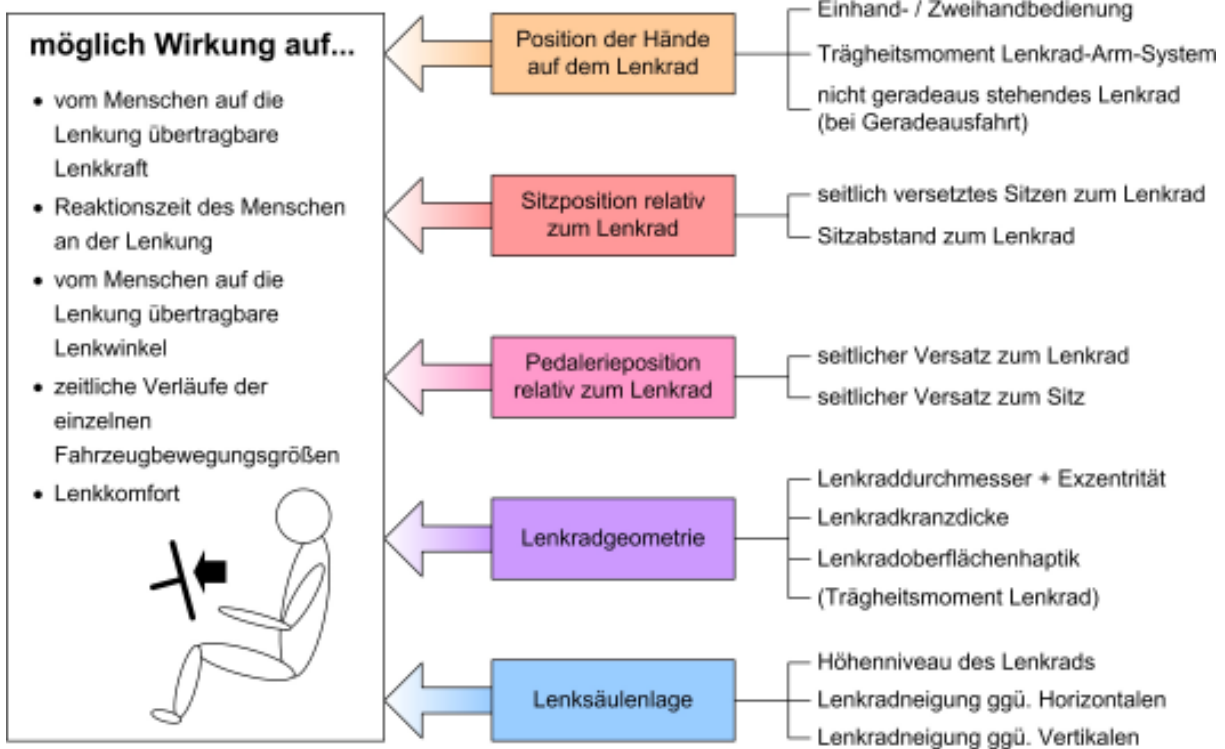


Abbildung 109: Mögliche anthropometrische Einflüsse auf das Lenkgefühl

2.5.5.1 Position der Hände auf dem Lenkrad

Im Zusammenhang mit dem Lenkgefühl ist zum einen von Interesse, wo Fahrer ihre Hände auf dem Lenkrad haben und zum anderen zu welchen Anteilen sie einhändig fahren. Dazu lässt sich die Untersuchung von *Kolling* (1998) heranziehen. Er teilte ein Lenkrad, wie in Abbildung 110 zu sehen, in jeweils sechs Richtungssektoren ein und ermittelte die Häufigkeitsverteilung für die linke und rechte Hand getrennt auf Basis von 18 Versuchspersonen. Zusätzlich wurde jeweils ermittelt, mit welcher Häufigkeit kein Lenkradkontakt vorhanden war.

Ergebnis der Untersuchung ist, dass das Lenkrad mit über der Hälfte (>50%) relativ weit oben, d.h. über einer gedachten horizontalen Linie durch den Mittelpunkt des Lenkrades, gegriffen wird. Dazu muss erwähnt werden, dass die Greifhöhe maßgeblich durch die Ansatzpunkte der Lenkradspeichen am Lenkradkranz beeinflusst wird, nicht zuletzt weil dort häufig Lenkradtasten angeordnet sind. So dürfte ein dreispeichiges Sportlenkrad tendenziell etwas tiefer gegriffen werden als ein vierspeichiges Lenkrad. Greifhaltungen ganz oben oder ganz unten am Lenkrad haben nur einen geringen Häufigkeitsanteil.



Abbildung 110: Verteilung der Hände auf dem Lenkrad getrennt nach linker und rechter Seite aus Versuch mit 18 Vpn (basierend auf Kolling 1998, S. 67)

Eine Einhandbedienung kommt relativ häufig vor, wobei die rechte Hand mit bis zu knapp 15% ohne Lenkradkontakt ist, während dieser Anteil der linken Hand bei etwa 6% liegt. Der Unterschied lässt sich durch die Verwendung der rechten Hand zum Bedienen im Bereich der Mittelkonsole erklären, während bei der linken Seite ein Ablegen der Hand in der Armauflage der Tür der Grund sein dürfte. Bei den heutigen Fahrzeuge müsste durch einen gleichartigen Versuch geklärt, inwieweit die Untersuchung von *Kolling* (1998) noch Gültigkeit besitzt oder ob sich die Verteilung der Hände auf dem Lenkrad durch zusätzlicher Lenkstockhebel, zunehmende Verbreitung von Lenkradtasten und zentralen Bedienelementen für Infotainmentsysteme in der Mittelkonsole deutlich verändert hat.

Ein negativer Einfluss auf das Lenkgefühl kann durch ein trotz Geradeausfahrt nicht geradeaus stehendes Lenkrad entstehen. Damit ist ein Lenkradwinkel von wenigen Grad und ungleich null gemeint, der trotz der Geradeausstellung der Räder vorhanden ist. Er kann beispielsweise durch Anstoßen der Vorderräder an Bordsteinkanten (Verstellung der Spureinstellungen) oder nach einem Wechsel der Räder (Reifenungleichförmigkeit) entstehen. Der Grund für einen negativen Einfluss ist darin zu sehen, dass bei einem Lenkradwinkel gleich null gemäß dem „inneren Modell“ entweder ein Lenkwinkel am Rad von null erwartet wird oder die Geradeausfahrt des Fahrzeugs.

Die Frage, wo sich die Hand bzw. Hände des Menschen auf dem Lenkrad befinden, kann im erheblichen Maße das Lenkgefühl und die Regelleistung beeinflussen. Sicherlich liegt ein Unterschied darin, ob nur eine Hand oder zwei Hände am Lenkrad anliegen oder nicht. Dazu stellten *Jürgensohn et al.* (2002) in einem Versuch dar (siehe Abbildung 111), dass bereits die Lage der Hände auf dem Lenkrad einen entscheidenden Einfluss auf das querdynamische Verhalten des Fahrzeugs besitzt. Die Probanden wurden über Ratschenbänder mit dem Lenkrad derart starr verkoppelt, dass sie nur passiv blieben und selbst nicht lenkten.

Das Anreißen der Lenkung wurde durch eine zweite im Beifahrerfußraum liegende Person durchgeführt. In der nachfolgenden Abbildung 111 (rechte Bildhälfte) ist als Ergebnis zu

sehen, dass alleine schon die Höhe, in der die Hände das Lenkrad berühren (unten, normal bzw. mittig, oben), das Nachschwingen des Fahrzeugs auf einen durch die erwähnte zweite Person erzeugten Lenkradstoß (Anreißen) beeinflusst. In den Diagrammen der rechten Hälfte ist zu erkennen, dass das Nachschwingen des Fahrzeugs bei unten am Lenkrad anliegenden Händen deutlich geringer ausfällt als bei oben anliegenden. Eine Begründung dafür könnte sein, dass die Oberarme bei den unten anliegenden Händen mehr am Oberkörper des Fahrers anliegen und dadurch das gesamte Hand-Arm-System in der Bewegung eingeschränkt ist.

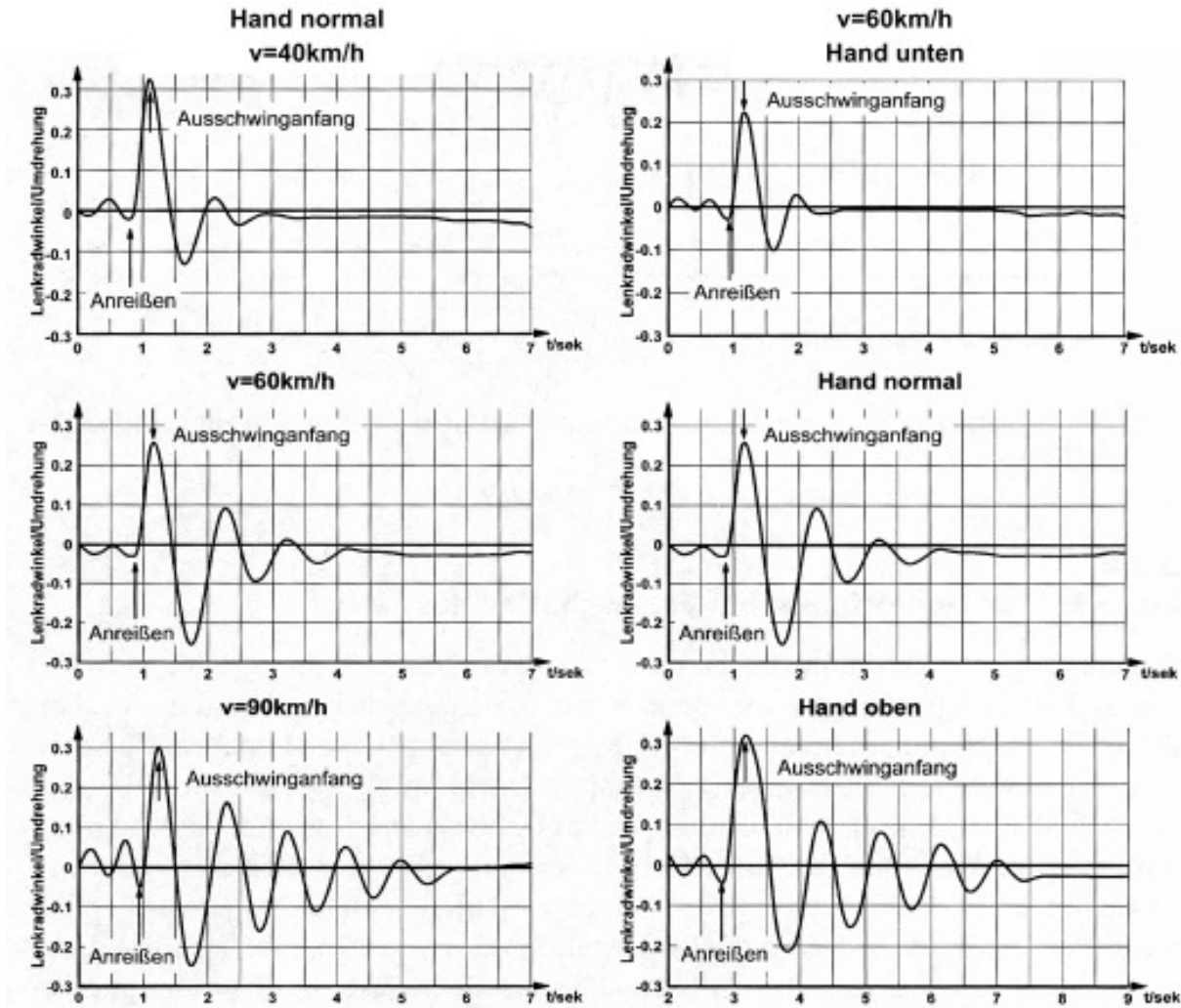


Abbildung 111: Nachschwingverhalten des Systems Fahrzeug-„passiver Fahrer“ nach Anreißen (Jürgensohn et al. 2002, S.155)

Aus den Ergebnissen der Untersuchung lässt sich erkennen, dass das Nachschwingen des Fahrzeugs auf das Anreißen abgemildert (gedämpft) werden kann, sobald der Fahrer aktiv zu regeln beginnt. Inwieweit eine entsprechende anthropometrische Gestaltung des Lenkrads hier entgegenkommen kann, war nicht Gegenstand der Untersuchung von Jürgensohn et al. (2002) und bleibt somit unklar.

Die Untersuchung lässt die Interpretation zu, dass sich die Dämpfungseigenschaften und somit auch das Resonanzverhalten des Hand-Arm-Systems mit der relativen Lage der Hände auf dem Lenkrad deutlich verändern. In Abbildung 111 (rechte Seite) ist zu erkennen, dass bei gleich bleibender Geschwindigkeit Hände, die unten am Lenkrad aufliegen, eine höhere Dämpfung der Anreißschwingungen besitzen als Hände die oben aufliegen. Offensichtlich sind die Winkel des Hand-Arm-Systems im Fall der höheren Dämpfung in einem Bereich, der

näher an den maximal bzw. minimal möglichen Winkeln liegt und dadurch nur noch wenig fremderregte Bewegung (in diesem Falle durch Lenkradschwingung) zulässt.

Nun ist es aber einem Automobilhersteller natürlich nicht möglich, zu beeinflussen, wie der Kunde seine Hände auf dem Lenkrad ablegen wird, zumal dies während der Fahrt immer wieder wechselt. Aus der weiter oben angesprochenen Untersuchung von *Kolling* (1998) lässt sich aber schließen, dass jeder Autofahrer zu einem bestimmten Zeitpunkt nur mit einer Hand am Lenkrad fährt, nicht zuletzt aus Gründen des Haltungskomforts oder weil eine Hand für die Fahrzeugbedienung benötigt wird. Das kann vor allem bei sehr langer Autobahnfahrt der Fall sein, bei der nur wenig Lenkarbeit notwendig ist. Es ist möglich, mit Hilfe eines Kalman-Tiefpass-Filters zu ermitteln, ob der Fahrer die Hände auf dem Lenkrad hat. Mit diesem Filter können ebenfalls äußere Störungen (Lenkmomente von „unten nach oben“) sensiert werden (*Pohl und Ekmark* 2003).



Abbildung 112: Verschiedene Lenkwinkelbereiche für Zwei- oder Einhandbedienung und Anlenkbereich für einen Lenkeinschlag nach rechts

Von Vorteil wäre auch zu erkennen, ob eine Zweihand- oder Einhandbedienung vorliegt. Abbildung 112 zeigt charakteristische Lenkwinkelbereiche für einen Lenkwinkelschlag nach rechts unter der Voraussetzung, dass zunächst beide Hände auf gleicher Höhe zur Lenkradmitte aufgelegt werden. Man kann davon ausgehen, dass die Zweihandbedienung bis zu einem Lenkwinkel von 45° gut möglich ist. Darüber hinaus kann das Anliegen des Armes am Brustkorb oder an den Oberschenkeln als unangenehme Haltung (Körperteilwinkel außerhalb der Komfortwinkel) bewertet werden, so dass die zweite Hand an Lenkarbeit nur noch passiven Anteil hat. Zwischen einem Lenkwinkel von 90° und 120° kann nach jetzigem Wissensstand keine zuverlässige Aussage gemacht werden, ob Ein- oder Zweihandbedienung vorliegt. Das hängt vom relativen Sitzabstand zum Lenkrad ab. Bei Lenkwinkeln größer 120° kann man zunehmend von Einhandbedienung ausgehen. Ab einem Lenkwinkel von ca. 170° , kann mit großer Sicherheit von einer Einhandbedienung ausgegangen werden, weil hier das Übergreifen der Hände am Lenkrad notwendig wird. Diesem Sachverhalt sollte in der Lenkwinkelregelung insofern Rechnung getragen werden, dass größere Lenkwinkel so weit

als möglich vermieden werden (*Uno und Hiramatsu* 1990) und dass bei Einhandbedienung die Lenkkraft über dem Lenkwinkel nicht mehr allzu stark zunimmt.

Es bleibt also die Frage zurück, inwieweit eine anthropometrische Gestaltung die Regelleistung des Menschen ganz allgemein verbessern kann. Verbessert sich die Regelgenauigkeit, so wirkt sich das positiv auf das Lenkgefühl aus. Vor allem bezüglich der übertragbaren Momente und Reaktionszeiten dürften der Lenkraddurchmesser und das Trägheitsmoment des Systems Arm-Lenkrad eine wichtige Rolle spielen. *Bubb* (1978) und *Rühmann* (1993a) stellen hierzu fest, dass das Trägheitsmoment des Lenkrads im Vergleich zu dem des menschlichen Armes gering ist. Eine Schlussfolgerung daraus ist, dass immer das gesamte mechanische System Arm und Lenkrad berücksichtigt werden muss. Es sollte jedoch beachtet werden, dass in den letzten Jahren Lenkräder mit Airbags zum Serienstandard vieler Neufahrzeuge gehören und immer mehr Lenkräder mit so genannten Lenkradbedientasten als Sonderausstattung gewählt werden, was beides das Trägheitsmoment des Lenkrades erhöhen lässt.

Das Trägheitssystem von Arm und Lenkrad ist stark mit der Vertikaldynamik des Fahrzeugs verbunden, was bedeutet, dass vor allem das Überfahren von mittellangen Bodenwellen mit hoher Geschwindigkeit bei Einhandbedienung eine ungewollte Lenkbewegung auslösen kann. Eine negative Auswirkung auf das Lenkgefühl wäre die mögliche Folge davon. Bei konventionellen hydraulischen Zahnstangenlenkungen, vor allen wenn die Servounterstützung drehzahlabhängig ist, ist dies nicht unbedingt ein Sicherheitsproblem, da die Lenkung bei hohen Drehzahlen und um die Mittellage nur wenig direkt reagiert und die Eigendämpfung der Lenkung groß genug ist.

Es müssen demnach zwei wesentliche Fragen beantwortet werden. Ist es möglich mit Hilfe technischer Systeme zu erkennen, ob ein Lenkradstoß durch äußere Einflüsse zustande kommt, oder ob er vom Fahrer ausgelöst wurde und gewollt ist? Die andere Frage ist, inwieweit es mit den technischen Mitteln möglich ist, ungewollte Lenkradbewegungen auszuregulieren oder zumindest stark zu dämpfen. Das könnte beispielsweise mit Hilfe eines verstellbaren bzw. zuschaltbaren Lenkungsämpfer geschehen oder mit Hilfe einer elektromechanischen Servolenkung (Lenkmomentenregelung).

2.5.5.2 Sitz- und Pedalerieposition relativ zum Lenkrad

Unter der relativen Sitzposition zum Lenkrad sind zum einen der Sitzabstand zum Lenkrad und zum anderen der seitliche Versatz des Sitzes zum Lenkradmittelpunkt zu verstehen. Beides ergibt zusammen mit der individuellen Anthropometrie der fahrenden Person eine bestimmte kinematische Lage des Hand-Arm-Systems. Es ist anzunehmen, dass die Regelleistung und das Lenkgefühl, wie schon bei der Position der Hände auf dem Lenkrad, von der kinematischen Lage des Hand-Arm-Systems abhängen. Probleme in diesem Zusammenhang bereitet vor allem die Tatsache, dass die Lage des Hand-Arm-Systems, wie nachfolgend noch genauer erläutert wird, von der individuell eingenommenen Sitzposition abhängt und dass der Fahrer seine Sitzposition während der Fahrt immer wieder leicht verändert.

Eine weitere Vermutung bzgl. des Einflusses auf das Lenkgefühl ergibt sich bei Betrachtung des seitlichen Versatzes der Sitzmittenebene zur Lenkradmittenebene. Es muss davon ausgegangen werden, dass schon ein geringer seitlicher Versatz oder schiefe Lenksäule der beiden Ebenen zu einer schlechten subjektiven Beurteilung der Lenkung führen kann. Eine lange Fahrdauer kann dies begünstigen.

Zu beiden Themen ließen sich bisher keine wissenschaftlichen Berichte finden, die sich direkt mit dem Zusammenhang von Sitzposition zum Lenkrad und dem Lenkgefühl auseinandersetzen. *McFadden et al.* (2000) ermittelten die durchschnittlichen Sitzabstände von 300 Personen, ohne allerdings die Auswirkungen auf das Lenkgefühl zu untersuchen. Die

Datenauswertung erfolgte nach den Kriterien Geschlecht, Alter, Körpergewicht, Perzentil der Körperhöhe und Fahrzeuggröße (drei verschiedene Klassen). Ergebnis war, dass ältere und schwerere Personen dichter am Lenkrad saßen. Größere Personen nehmen einen etwas größeren Sitzabstand ein. Ein Grund, warum Frauen tendenziell näher am Lenkrad sitzen.

Ein erstaunliches Ergebnis ergibt sich, wenn man die unterschiedlichen Fahrzeuggrößen in Betracht zieht. Bei größeren Fahrzeugen nimmt der Sitzabstand zum Lenkrad ab, wenn auch nur geringfügig. Allerdings muss erwähnt werden, dass bei der Untersuchung Fahrzeuge nach ihrem Fahrzeuggewicht in drei Größenklassen eingeteilt wurden. Demnach gehörten Fahrzeuge über 1300 kg schon zur Kategorie „groß“.

Eine Untersuchung zum seitlichen Versatz von Sitzposition und Lenkrad führte *Bäumler* (1992) durch. Er kommt zu dem Ergebnis, dass der Fahrer gegenüber dem Lenkrad gerade und nicht seitlich versetzt sitzen sollte. Gleichmaßen wie die relative Sitzposition zum Lenkrad, kann die relative Lage der Pedalerie zum Lenkrad eine Rolle für die Qualität des Lenkgefühls spielen. Ist die Pedalerie relativ zum Sitz oder zum Lenkrad bei einem Linkslenkerfahrzeug nach links versetzt, besteht die Möglichkeit, dass die fahrende Person leicht nach links verdreht sitzt und sich das bei der Lenkarbeit negativ auf das Lenkgefühl auswirkt. Wie schon zuvor bei der Sitzposition kommt die Arbeit von *Bäumler* (1992) zu dem Ergebnis, dass ein seitlicher Versatz der Pedalerie, sowie eine schräge Anordnung zu vermeiden ist.

2.5.5.3 Lenkraddurchmesser und Lenkübersetzung

Unter der Lenkradgeometrie ist die Gestaltung des Lenkrades bezüglich der Geometrie und der Haptik zu verstehen. Vor allem der Lenkraddurchmesser besitzt einen Einfluss auf die durch den Menschen übertragbaren Lenkkräfte, Lenkwinkel und das zeitliche Verhalten. Der Lenkraddurchmesser ändert auf der einen Seite die geometrischen Verhältnisse der Hand-Arm-Kinematik und auf der anderen die physikalisch übertragbaren Lenkmomente und Lenkwinkel. Der charakteristische zeitliche Verlauf beider Größen dürfte sich ebenfalls mit dem Lenkraddurchmesser ändern. Im Zusammenhang wird oft der Begriff der kinematisch effektiven Lenkübersetzung benutzt. Das bedeutet, dass der Lenkraddurchmesser in der Lenkübersetzung mit berücksichtigt ist und beantwortet die Frage, welcher Lenkwinkel oder Lenkweg für einen bestimmten Vorderradwinkel benötigt wird.

Die nachfolgende Tabelle 19 ist eine Übersicht der in Europa erhältlichen Fahrzeuge mit ihren Lenkraddurchmessern, kinematische Lenkübersetzungen und Radständen. Von den aufgelisteten Fahrzeugen besitzt der Opel Speedster den kleinsten Lenkraddurchmesser (320 mm) und der Rolls-Royce Phantom den größten (410 mm). Beide Fahrzeuge haben auch jeweils den kleinsten und größten durchfahrenen Kurvenradius bei einem eingestellten Lenkweg von 50 mm am Lenkrad (Opel Speedster 117,80 m und Rolls-Royce Phantom 226,87 m). Den größten und kleinsten Lenkweg für einen Grad (1°) Radeinschlag besitzen jedoch andere Fahrzeuge. Der BMW Z4 hat hier den kleinsten Weg mit 44,0 mm und der BMW X3 den größten mit 63,5 mm.

| Fabrikat | Lenkrad-durchmesser [mm] | kinematische Lenk-übersetzung | Radstand [mm] | Lenkweg für einen Grad Radeinschlag [mm/°] | durchfahrerner Kurvenradius bei 50mm Lenkweg [m] |
|----------------------|--------------------------|-------------------------------|---------------|--|--|
| Audi A8 | 375 | 15,7 | 2944 | 51,4 | 173,33 |
| Audi A3 | 380 | 16,2 | 2578 | 53,7 | 158,70 |
| Audi TT | 370 | 15,6 | 2429 | 50,4 | 140,20 |
| Audi S4 Limousine | 370 | 14,5 | 2651 | 46,8 | 142,23 |
| BMW Z4 | 355 | 14,2 | 2495 | 44,0 (kleinster) | 125,77 |
| BMW M3 CSL | 375 | 14,5 | 2729 | 47,5 | 148,47 |
| BMW X3 | 385 | 18,9 | 2795 | 63,5 (größter) | 203,5 |
| Cadillac CTS | 385 | 16,5 | 2880 | 55,4 | 182,95 |
| Chrysler Crossfire | 375 | 16,7 | 2729 | 54,7 | 150,30 |
| Citroen C3 Pluriel | 380 | 17,8 | 2460 | 59,0 | 166,39 |
| Citroen C2 | 375 | 17,8 | 2315 | 58,3 | 154,53 |
| Fiat Idea | 370 | 13,9 | 2508 | 44,9 | 129,0 |
| Jaguar XJ6 | 385 | 15,0 | 3034 | 50,4 | 175,21 |
| Lamborghini Gallardo | 360 | 20,0 | 2560 | 62,8 | 184,32 |
| Lexus 430 LS | 395 | 16,4 | 2925 | 56,5 | 189,5 |
| Maybach 62 | 380 | 14,6 | 3827 | 48,4 | 212,32 |
| Mazda 2 MZI | 370 | 13,9 | 2490 | 44,9 | 128,06 |
| MB CL 65 AMG | 385 | 17,8 | 2885 | 59,8 | 197,71 |
| MB CLK Cabrio | 380 | 15,5 | 2715 | 51,4 | 159,91 |
| MB E-Klasse Kombi | 380 | 16,3 | 2854 | 54,1 | 176,78 |
| Nissan 350 Z | 365 | 15,9 | 2650 | 50,6 | 153,79 |
| Opel Meriva | 380 | 17,0 | 2630 | 56,4 | 169,90 |
| Opel Astra | 380 | 17,0 | 2606 | 56,4 | 168,35 |
| Opel Signum | 385 | 15,2 | 2830 | 51,1 | 165,61 |
| Opel Speedster | 320 (kleinster) | 15,8 | 2330 | 44,1 | 117,80 (kleinster) |
| Opel Zafira | 380 | 17,0 | 2694 | 56,4 | 174,26 |
| Porsche 911 GT3 | 370 | 16,9 | 2355 | 54,6 | 147,26 |
| Porsche Carrera GT | 375 | 15,1 | 2730 | 49,4 | 154,59 |
| Rolls-Royce Phantom | 410 (größter) | 15,5 | 3570 | 55,5 | 226,87 (größter) |
| Saab 9-3 | 380 | 16,0 | 2675 | 53,1 | 162,64 |
| Smart Roadster | 370 | 17,0 | 2360 | 54,9 | 148,44 |
| Volvo XC 90 | 375 | 15,9 | 2857 | 52,0 | 170,35 |
| VW Golf V | 370 | 15,0 | 2578 | 48,4 | 143,08 |
| VW Multivan | 380 | 16,0 | 3000 | 53,1 | 182,40 |
| VW Touran | 370 | 15,0 | 2677 | 48,4 | 148,57 |
| VW Touareg | 390 | 14,7 | 2855 | 50,0 | 163,68 |
| VW Beetle Cabrio | 380 | 15,6 | 2509 | 51,7 | 148,73 |
| VW Phaeton | 391 | 17,5 | 2881 | 59,7 | 197,13 |

Tabelle 19: Lenkungsparameter gängiger Personenkraftwagen (Auswahl) in Europa (basierend auf Auto, Motor und Sport 2002, 2003 und 2004)

2.5.5.4 Weitere Parameter der Lenkradgeometrie

Neben dem Lenkraddurchmesser und der Lenkübersetzung existieren noch weitere Parameter der Lenkradgeometrie. Die Geometrie des Lenkrades wirkt sich im Allgemeinen direkt auf die Höhe dessen Trägheitsmoments aus. *Kraiss* (1970) konnte bei seinen Untersuchungen mit einem Steuerknüppel feststellen, dass die Höhe der Massenträgheit des Bedienelements Regelstrecken mit einem Positionssystem keine Auswirkungen auf die Zielgenauigkeit beim Nachfahren einer visuell dargebotenen Sprungfunktion hat. Eine Bestätigung diesbezüglich lässt sich in der Arbeit von *Stier* (1969) finden.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass der Anteil der Arme am Gesamtträgheitsmoment größer ist als der Anteil des Lenkrades selbst. Zwar haben die Trägheitsmomentanteile des Lenkrades nachgewiesener Maßen keine Auswirkungen auf die Regelleistung, aber das schließt nicht aus, dass sich die Trägheitsmomente des Systems Arm-Lenkrad nicht doch auswirken können, gerade in Hinblick darauf, dass sich Airbagsysteme, Multifunktionstasten und Beledungen auf das Lenkrad gewichtserhöhend auswirken.

Die Lenkradkranzdicke zählt ebenfalls zur Lenkradgeometrie. Dies hat aber nur einen Einfluss auf den Komfort im Sinne von „Gefallen“, weil davon auszugehen ist, dass die menschliche Regelleistung hiervon nicht beeinträchtigt wird, da sich der Verlauf des eingeleiteten Lenkmoments physikalisch nicht mit der Dicke des Lenkradkranzes ändert. Es empfiehlt sich ein Durchmesser von ca. 20 mm. Allerdings wirkt sich eine Gewichtserhöhung durch einen dickeren Lenkradkranz stärker auf das Trägheitsmoment aus als eine Erhöhung im Bereich des Lenkradmittelpunkts.

Die Haptik der Lenkradoberfläche ist ebenfalls ein weiterer Parameter der Lenkradgeometrie. Problem dabei ist, dass ihr Einfluss auf das Lenkgefühl nur sehr schwer nachzuweisen ist, weil der Komfort wie schon bei der Lenkradkranzdicke im Sinne von „Gefallen“ im Vordergrund steht, der individuell variiert. Aus ergonomischer Sicht ist deswegen nur die Frage entscheidend, ob die Oberfläche des Lenkrades zu glatt ist, so dass ein eventuelles Abrutschen zu einer Minderung der menschlichen Regelleistung oder Fehlbedienung führt.

2.5.5.5 Lenksäulenlage

Die Lage der Lenksäule beeinflusst letztlich die Lage des Lenkrades im Fahrzeugaum. Durch die drei nachfolgenden Faktoren kann sich ein Einfluss auf das Lenkgefühl ergeben:

- Die Verdrehung des Lenkrads gegenüber einer vertikalen Fahrzeuglängsebene.
- Die Neigung des Lenkrads gegenüber einer Horizontalebene.
- Das Höhenniveau des Lenkrads gegenüber dem Hand-Arm-System des Fahrers in einer bestimmten eingenommenen Sitzposition.

Die beiden letzten Punkte sind durch die Lenksäulenverstellung (Höhen- und Längsverstellung) von der fahrenden Person bedingt beeinflussbar. Eine seitliche schiefe Lage der Lenksäule kann durch die räumlichen Einschränkungen im Motorraum bedingt sein, wie Radhausgröße, Motorbauraum, Zusatzaggregate, Allradantrieb, usw.. Die seitlich verdrehte Lage der Lenksäule fällt - wenn überhaupt vorhanden - bei modernen Fahrzeugen nur minimal aus. Es lässt sich trotzdem nicht ausschließen, dass der Mensch eine geringe Verdrehung spüren kann, vor allem nach langer Fahrt mit geringer Lenkarbeit (Autobahnfahrt).

Von der Neigung des Lenkrads gegenüber einer Horizontalebene ist anzunehmen, dass eine Abhängigkeit zwischen ihr und der Regelleistung bzw. dem Lenkgefühl besteht. Das gleiche dürfte für das relative Höhenniveau des Lenkrades zur sitzenden Person gelten. Leider gibt es zu diesen Sachverhalten keine wissenschaftlich abgesicherten Erkenntnisse. Zumindest dürfte dennoch ein Einfluss auf das übertragbare Bewegungsverhalten (Lenkmomente, Lenkwinkel, Reaktionszeiten, etc.) vorhanden sein. Ein möglicher wissenschaftlicher Versuch hierzu wäre,

mit Hilfe des Computermenschmodells RAMSIS in Abhängigkeit von der Sitzposition eine optimale Bewegungsbahn für die Hände zu berechnen und dementsprechend die Lenksäulenverstellkinematik derartig anzupassen, dass der Fahrer mit seiner Lenkbewegung immer auf der optimalen Bahn liegt. Grundsätzlich wäre es bei der elektrischen Lenksäulenverstellung denkbar, zusammen mit der elektrischen Sitzverstellung dem Fahrer aufgrund der gewonnenen Versuchsergebnisse eine optimale Lenkradeinstellung anzubieten, die selbstverständlich von ihm bei Bedarf individuell geändert werden kann.

Interne Untersuchungen am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München ergaben (*Dreßel und Kain 1986*), dass eine Lenkradneigung von $4,5^\circ$ gegenüber einer Senkrechten im Zusammenhang mit der idealen Sitzposition am geeignetsten unter allen untersuchten Perzentilen anzusehen ist.

Zusammenfassung anthropometrische Aspekte

- § Unterschiedliche **Dämpfungseigenschaften** des Hand-Arm-Systems bei unterschiedlicher Handposition auf dem Lenkrad (je weiter unten am Lenkrad, desto tendenziell größer Dämpfung).
- § **Einhandbedienung** bei längerer, v.a. monotoner Autobahnfahrt zu erwarten. Bei Lenkwinkeln über 120° sehr wahrscheinliche Einhandbedienung ab 170° sicher zu erwarten.
- § Überwiegend **Zweihandbedienung** bei Lenkwinkeln bis 90° .
- § **Trägheitsmomente** des Lenkrads ggü. dem von Hand-Arm-System viel geringer
- § Seitliche versetzte **Sitzposition** und schräge **Lenksäulenachse** kann zu schlechterem Lenkgefühl führen.
- § Seitliche versetzte und verdrehte **Pedalerie** kann ebenfalls Lenkgefühl verschlechtern.
- § **Lenkraddurchmesser** marktüblicher Fahrzeuge in Europa liegen vorwiegend in den Klassen 366-370 mm und 376-380 mm.
- § **Lenkradkranzdicke** hat nach aktuellem Stand nur Komfortwirkung (Durchmesser von 20 mm empfohlen).

3 Versuche

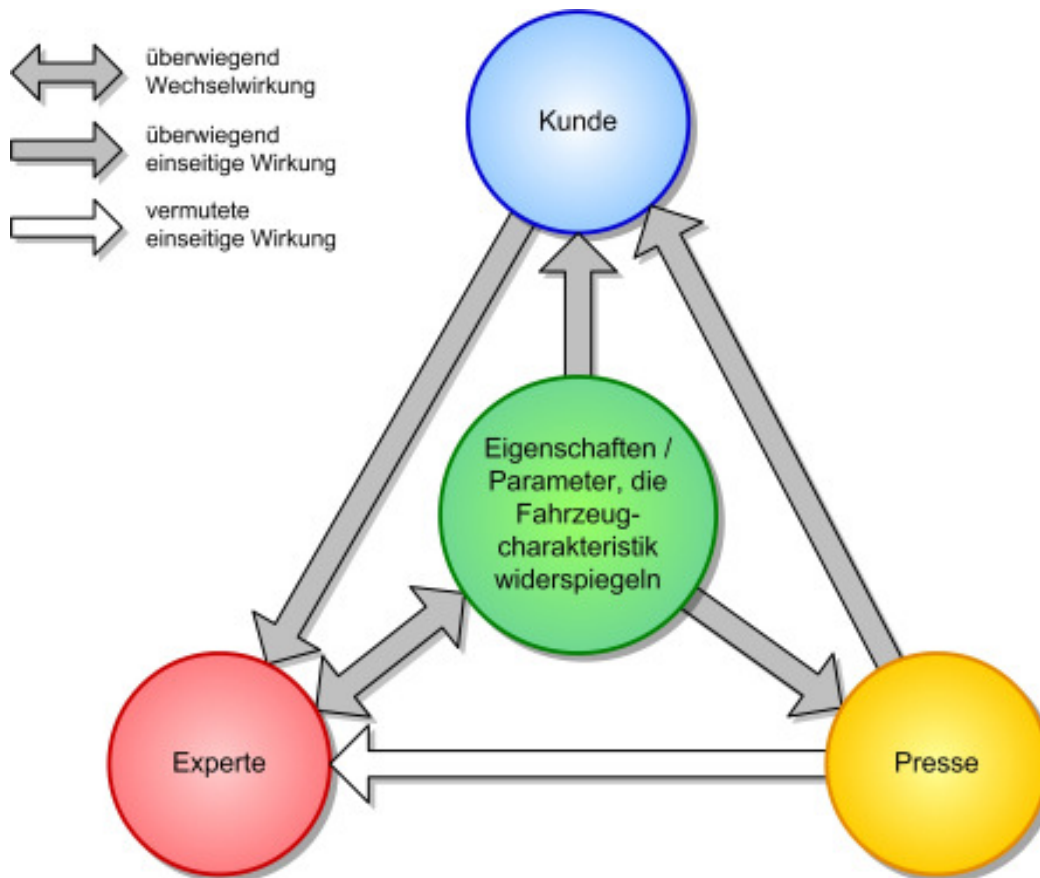


Abbildung 113: Wirkungsgliederung zwischen den Urteilen von Presse, Kunden, Experten und den Eigenschaften und Parametern, die die Fahrzeugcharakteristik widerspiegeln

Um offene bzw. nur teilweise geklärte Fragen um das Lenkgefühl zu beantworten, wurden mehrere Einzelversuche durchgeführt. Die Versuche sollen zu den Einzelergebnissen selbst zusätzlich die Zusammenhänge im Wirkungsgliederung aus Kunden-, Experten-, Presseurteil und den objektiven Fahrzeugparametern (Objektivparameter) klären (siehe Abbildung 113). Bei den Experten, Kunden und der Fachpresse ergibt sich durch die Objektivparameter ein Urteil über die Fahrzeuglenkung, das maßgeblich vom Lenkgefühl beeinflusst wird. Eine ausgewogene Wechselwirkung besteht nur zwischen den Experten und den Objektivparametern des Fahrzeugs durch die Beeinflussbarkeit des Experten auf das Produkt und dessen Auslegungsphilosophie. Kunde und Presse sind trivialerweise nicht in der Lage die Objektivparameter zu beeinflussen. Diese wirken damit nur einseitig. Die Wirkung des Urteils der Kunden hat eine einseitige Wirkung auf den Experten. Ebenso ist eine Wirkung der Pressebeurteilung für einen Teil der Kunden als wahrscheinlich anzusehen. Eine Beeinflussung des Experten durch das Presseurteil kann nur vermutet werden, wird aber in dieser Arbeit als gegeben angesehen.

Unter die Versuche fallen ebenso Auswertungen aufgrund vorhandener, nicht in zusätzlichen Versuchen gewonnene Daten. Einen genauen Überblick über die Versuche geben die nachfolgenden Tabellen.

Versuch 1 (Tabelle 20) beschäftigt sich mit der Frage, ob die Querbeschleunigungsverläufe in Kopfnähe anders sind und vom Fahrer anders wahrgenommen werden als sie durch Messung in der Nähe des Fahrzeugschwerpunktes vermuten lassen. Vor allem die Zeitverzögerungen bis zum Überschreiten der Wahrnehmungsschwellen haben, scheinen einen wesentlichen Einfluss auf das Lenkgefühl zu haben.

Im Versuch 2 (Tabelle 20) sollen mit Hilfe einer speziell entwickelten Software die Eigenschaften der Bildverschiebungsvektoren, die der Fahrer über seinen visuellen Sinn wahrnimmt, in Abhängigkeit verschiedener Fahrzustände ermittelt werden. Damit kann die Bedeutung der Bildverschiebungsvektoren für das Lenkgefühl besser abgeschätzt werden. Bisher ist nicht bekannt, dass eine solche spezielle Softwareanwendung existiert.

Versuch 3 (Tabelle 20) soll klären, welchen Einfluss unterschiedliche Lenkkradkranzdicken auf die Berührfläche der Hände und somit auf die Hautrezeptoren haben. Mit Hilfe des Versuchs soll abgeschätzt werden, ob damit auch ein Einfluss auf das Lenkgefühl besteht.

Der Versuch 4 (Tabelle 21) ist ein Fahrversuch mit mehreren Versuchspersonen, die gleichzeitig mehrere Fragen zum Lenkgefühl beantworten soll. Er beinhaltet verschiedene Auswertungen. Hauptziel der Untersuchung ist es herauszubekommen, ob sich bestimmte Lenkgefühlsausprägungen an objektiven Fahrzeugparametern festmachen lassen.

Versuch 5 (Tabelle 22) ist kein Versuch im eigentlichen Sinne, es handelt sich vielmehr um eine Auswertung von Fahrzeugtests in der Fachpresse. Die Auswertung soll klären, ob sich an den im Fahrzeugtest gemessenen und als objektiv angenommenen Daten erkennen lässt, wann es zu einer signifikanten negativen Beurteilung kommt.

Mit dem Versuch 6 (Tabelle 22) soll ermittelt werden, wie die Verteilung der Differenz- und Absolutwahrnehmungsschwellen der Lenkkraftwahrnehmung ist. Bisher gibt es in der wissenschaftlichen Literatur zu wenige Untersuchungen, die sich speziell mit der Lenkkraftwahrnehmung an einer Fahrzeuglenkung auseinandersetzen. Problematisch ist auch, dass sich manche Untersuchungen auf die Lenkmomentenwahrnehmung stützen, da sich die Untersuchungen nur dann richtig interpretieren und vergleichen lassen, wenn die zugehörigen Lenkkraddurchmesser bekannt sind.

3.1 Versuchsdurchführung

3.2 Übersicht der durchgeführten Versuche

| Versuchsname | Kurzbeschreibung | Ergebnis | Versuchsart | Kapitel |
|---|---|---|--|---------|
| Versuch 1 - Querbeschleunigung in Kopfnähe | <ul style="list-style-type: none"> Es wird die Auswirkung auf das zeitliche Verhalten der Querbeschleunigung in Kopfnähe beim Einlenken in eine Kurve bzw. bei Sinusfahrt untersucht. Es werden Unterschiede zwischen Fahrzeugen mit höherer und niedriger Sitzposition ermittelt. | <ul style="list-style-type: none"> Lenkmoment eilt dem Lenkwinkel zeitlich vor (beim Durchlenken) Beim starken Sinuslenken (Notsituation) neigt der Fahrer dazu, Lenkungsstöße abzugeben. Offenbar versucht er hohe Lenkwinkelgeschwindigkeiten auf Kosten der Genauigkeit abzugeben. Fahrer hält Kopf ruhiger als die Mitfahrer und legt in teilweise mit in die Kurve. Den Mitfahrern scheint dies nicht möglich, da sie den Lenkbefehl kaum antizipieren können und im Gegensatz zum Fahrer keine haltungsunterstützende Lenkbewegung machen. Sitzhöhe wirkt sich nur auf das Amplitudenverhältnis von Querbeschleunigung in Kopfnähe und Querbeschleunigung im Fahrzeugschwerpunkt aus. | realer Fahrversuch (Messgelände) | 3.1.2.1 |
| Versuch 2 - Bildverschiebungsvektorenfeld bei Kurvenfahrt | <ul style="list-style-type: none"> Es wird untersucht, inwieweit Unterschiede im Bildverschiebungsfeld bei unterschiedlichen Fahrzuständen (übersteuernd, neutral, untersteuernd) existieren. | <ul style="list-style-type: none"> Identifizierung mehrerer wichtiger Merkmale (Scheitelpunkt, Zentrum des Auseinanderfließens, Verlauf der Grenze Wahrnehmungsschwelle für dynamische Bildbewegung) Statische und dynamische Wahrnehmungswelt (Grenzlinie mit Fahrgeschwindigkeit nahezu unverändert bei ca. 2s Vorrasschauzeit). Übersteuerndes und untersteuerndes Fahrzeug auch bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten relativ früh aus Bildverschiebung erkennbar. | theoretische Untersuchung (Rechner-simulation) | 3.1.2.2 |

Tabelle 20: Versuche im Rahmen der Erforschung des Lenkgefühls

| Versuchsname | Kurzbeschreibung | Ergebnis | Versuchsart | Kapitel |
|--|---|--|--------------------------------------|------------------------|
| Versuch 3 - Einfluss des Lenkradkranzdicken auf die Kontaktfläche Lenkrad-Hand | <ul style="list-style-type: none"> • Es soll der Einfluss zweier verschiedener Lenkradkranzdicken bei 3 Versuchspersonen untersucht werden. | <ul style="list-style-type: none"> • Kein erkennbarer Einfluss der Lenkradkranzdicke auf die Berührfläche der Hand. | Probandenversuch | 3.1.2.3 |
| Versuch 4 - Erwartungshaltung an Fahrzeuge | <ul style="list-style-type: none"> • Anhand von vorgelegten Bildern und vorbestimmten Sätzen sollen die Probanden eine Rangreihenfolge bilden, die die Erwartungshaltung an die Lenkung bestimmter Fahrzeugtypen widerspiegelt. | <ul style="list-style-type: none"> • Bei der Bildung der Rangreihenfolge scheinen sich die Probanden vornehmlich auf das äußere Erscheinungsbild zu stützen. • So werden bestimmte Eigenschaften bestimmten Fahrzeugen nicht zugetraut, obwohl es hierfür keine fahrwerkstechnischen Gründe gibt. | Befragung vor realem Fahrversuch | Teilkapitel in 3.1.2.4 |
| Versuch 4 - Subjektive Lenkungsbeurteilungen und objektive Lenkungseigenschaften | <ul style="list-style-type: none"> • Anhand 16 objektiver Kriterien (z.B. Rückmeldung, Lenkungsrückstellung) und unterschiedlichen Fahrzeugen (vier) mit verschiedenen Lenkungscharakteristiken soll festgestellt werden, wie das subjektive Urteil (Normalfahrer) abhängt und sich verändert | <ul style="list-style-type: none"> • „Landkarte“ des Lenkgefühls mit definierten Beurteilungskriterien und Einflussfaktoren • Normalfahrer können relativ genau zwischen verschiedenen Lenkungscharakteristiken unterscheiden • Normalfahrer bemerken Unterschiede der Lenkungscharakteristiken, können diese aber nicht im gleichen Maße exakt verbal beschreiben wie Experten. • Mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit werden Beurteilungen einiger Kriterien besser (u.a. Center-Point-Feeling) | realer Fahrversuch (öffentl. Straße) | Teilkapitel in 3.1.2.4 |
| Versuch 4 - Verbale Beschreibung von Fahrzeuglenkung durch den Kunden | <ul style="list-style-type: none"> • Es soll festgestellt werden, wie gut Normalfahrer in der Lage sind, Fahrzeuglenkungen in ihren charakteristischen Eigenschaften verbal und frei zu beschreiben. • Es soll dabei ein Fokus darauf gelegt werden, inwieweit verwendete Schlüsselwörter sich mit denen der Fachpresse ähneln und ob ein Zusammenhang zwischen Lesern und Nichtlesern solcher Zeitschriften besteht. | <ul style="list-style-type: none"> • Normalfahrer können differenziert und im verbalen Sprachgebrauch relativ gut die charakteristischen Eigenschaften einer Fahrzeuglenkung beschreiben. • Der Gebrauch bestimmter Wörter zur Beschreibung der Lenkungscharakteristik unterscheidet sich bei einigen Probanden nicht wesentlich vom verwendeten Sprachgebrauch in der Presse, allerdings konnte keine Abhängigkeit zwischen Lesern und Nichtlesern solcher Fachzeitschriften nachgewiesen werden. | realer Fahrversuch (öffentl. Straße) | Teilkapitel in 3.1.2.4 |

Tabelle 21: Versuche im Rahmen der Erforschung des Lenkgefühls (Fortsetzung)

| Versuchsname | Kurzbeschreibung | Ergebnis | Versuchsart | Kapitel |
|---|--|--|--|------------------------|
| Versuch 4 – Wichtung vorgegebener Kriterien | <ul style="list-style-type: none"> • Beim Fahrzeugwechsel des Fahrzeugwechsels sollen die Probanden mit Hilfe eines Fragebogens vorgegebene Lenkungskriterien wichten. | <ul style="list-style-type: none"> • Kriterien teilweise abhängig von Fahrzeuggröße und Fahrzeugklasse (z.B. Roadster, SUV) | Befragung während realen Fahrversuchen | Teilkapitel in 3.1.2.4 |
| Versuch 4 – Vergleich von Kunden- und Expertenurteilen | <ul style="list-style-type: none"> • Es soll festgestellt werden, ob sich Kunden- und Expertenurteile bei gleichen oder ähnlichen Beurteilungskriterien signifikant unterscheiden oder gleichen | <ul style="list-style-type: none"> • Hohe Übereinstimmungen bei Geradeauslauf, Korrekturaufwand, Ansprechverhalten und Zielgenauigkeit • Akzeptable Abweichungen bei Stößigkeit, Rückstellverhalten, Lenkkraftverlauf über Lenkwinkel, und Lenkkraftniveau • Große Abweichungen bei Mittengefühl und Rückmeldung | realer Fahrversuch (öffentl. Straße) | Teilkapitel in 3.1.2.4 |
| Versuch 5 – Kennzahlenidentifikation anhand von Fahrzeugtests in der Fahrzeugpresse | <ul style="list-style-type: none"> • Anhand von Fahrzeugtests in der Presse sollen Kennzahlen bzw. Bereiche gefunden werden, die zu einer negativen Pressebeurteilung finden. | <ul style="list-style-type: none"> • Erforderlicher Lenkweg nicht unter 58 mm am Lenkradaußendurchmesser für 1° Radeinschlag (oberhalb dieses Wertes keine negative Pressebeurteilung der Lenkung mehr) | Datenauswertung | 3.1.2.5 |
| Versuch 6 – Verteilung Lenkkraftwahrnehmung | <ul style="list-style-type: none"> • Es sollen basierend auf vorangehenden Untersuchungen eine Verteilung der Lenkkraftwahrnehmung in Bezug auf Differenzwahrnehmung und Absolutwahrnehmung ermittelt werden. • Es sollen Schwellwerte für die Differenz- und Absolutwahrnehmung bei unbewegtem Lenkrad und vordefinierten Lenkwinkeln (0°, 5°, 10°, 35°) ermittelt werden. • Es werden drei Handhaltungshöhen (unten, Mitte, oben) und bei Differenzschwellen eine Verminderung und Erhöhung der Lenkkraft gemessen • Bei der Differenzschwelle werden 2 Nm und 4 Nm als Ausgangsmomente angelegt | <ul style="list-style-type: none"> • 0° Absolutschwelle in mittlerer Handhaltung bei 2,7 N • Differenzschwelle bei 35° Lenkwinkel, 2 Nm Ausgangsmoment, mittlerer Handhaltung und Krafterhöhung bei 24,3 % • Differenzschwelle bei 35° Lenkwinkel, 4 Nm Ausgangsmoment, mittlerer Handhaltung und Kraftverminderung bei 34,8 % • Schwellen tendenziell bei mittlerer Handhaltung am größten • Krafterhöhungen bei Differenzschwellen tendenziell etwas eher bemerkt als Kraftverminderungen • Fahrerfahrenere Probanden scheinen empfindlichere Schwellen zu besitzen (ebenso fällt die intraindividuelle Streuung geringer aus) | Probandenversuch Labor | 3.1.2.6 |

Tabelle 22: Versuche im Rahmen der Erforschung des Lenkgefühls (Fortsetzung)

3.3 Detailbeschreibung der ausgewählten Versuche

Die nachfolgenden Kapitel beschreiben die zum Lenkgefühl durchgeführten Versuche im Detail. Mit Hilfe der Versuche und mit Hilfe derer spezifische Fragestellungen beantwortet werden sollen. In den inhaltlich zugehörigen vorangegangenen Kapiteln wurde entsprechend durch Querverweise darauf verwiesen.

3.3.1 Versuch 1 – Querbeschleunigungsmessung in Kopfnähe

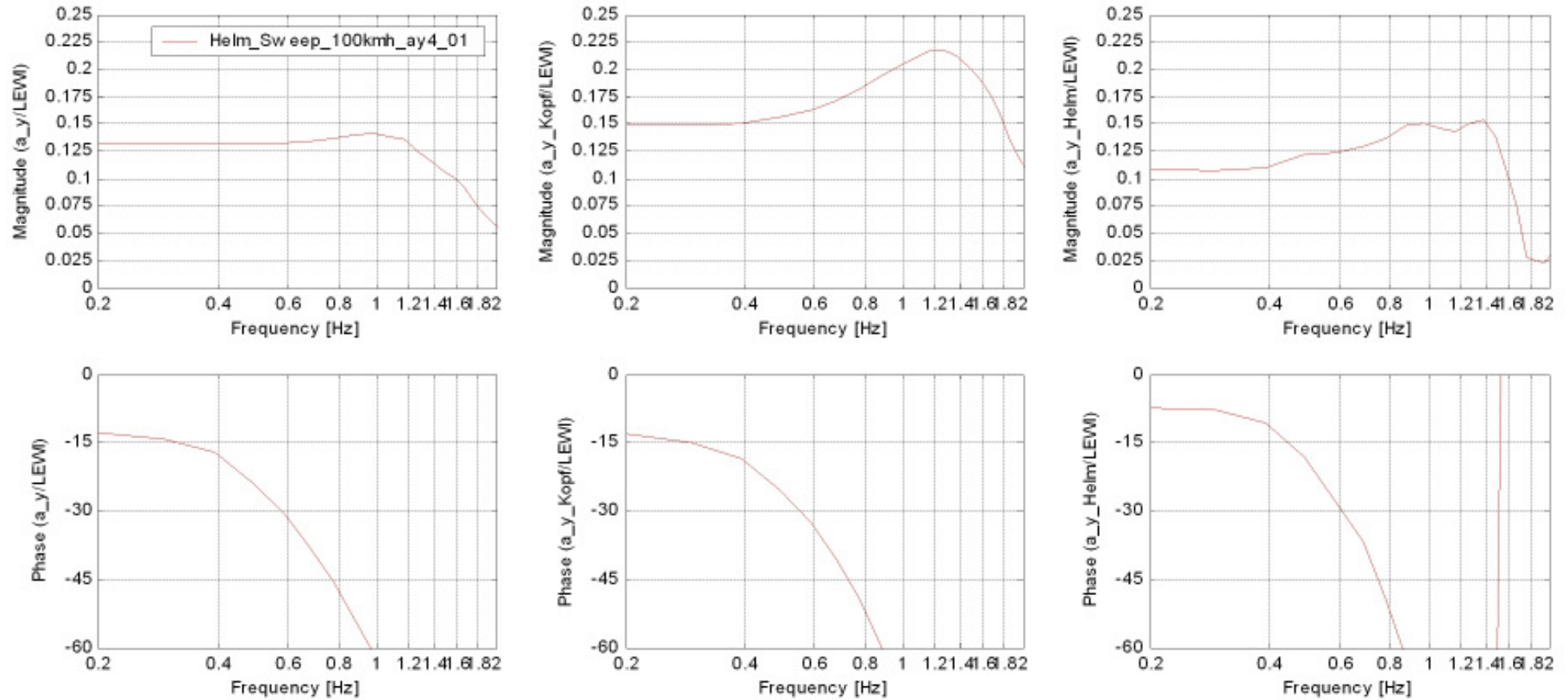
Mit Hilfe eines sog. Messhelms, an dem ein dreiachsiger Beschleunigungsaufnehmer angebracht ist, soll der Querbeschleunigungsverlauf nach einer Lenkwinkeländerung an unterschiedlichen Orten gemessen werden. Der Beschleunigungsaufnehmer ist nicht kreiselstabilisiert. Die Betrachtung erfolgt mit Hilfe der drei Fahrmanöver ISO-Spurwechsel. Anlenken aus Gerade in eine Kurve, stochastisches Lenken (unregelmäßiger Sinus) und Sinus durchgeführt.

Die Messung beim ISO-Spurwechsel soll bei mehreren Fahrern die Vergleichbarkeit gewährleisten. Die Fahrmanöver werden alle auf einem abgesperrten Messgelände und bis auf den ISO-Spurwechsel auf einer Hochgeschwindigkeitsschleife durchgeführt. Die Messung der Querbeschleunigung mit dem Messhelm wird jeweils am Fahrer und am Mitfahrer durchgeführt, wobei bei letzterem nur die Messung auf dem Rücksitz hinter dem Fahrer durchgeführt werden konnte, da der Beifahrersitz mit Messeinrichtungen belegt war. Neben der Querbeschleunigung wurden noch der zeitliche Verlauf des Lenkwinkels, des Lenkmoments und der Fahrgeschwindigkeit gemessen.

Mit dem Versuch sollten folgende Fragestellungen beantwortet werden:

1. Sind sich die Verläufe der Querbeschleunigung an den unterschiedlichen Messorten so ähnlich, dass die Messung an anderen Orten als der Kopfnähe zur Objektivierung subjektiver Fahrereindrücke geeignet ist?
2. Gibt es deutliche Unterschiede im Verlauf der Querbeschleunigung zwischen Fahrer und Mitfahrer, was zugleich auch eine andere Kopfhaltestrategie bedeutet?
3. Bestehen bei Fahrzeugkonzepten (z.B. SUV mit höherer Fahrersitzposition oder wanksteifere Fahrzeuge) unterschiedliche Ausprägungen des Verlaufs der Querbeschleunigung?

Frequenzgang Querbeschleunigung gegenüber Lenkwinkel für 4 m/s² und bei 100 km/h an unterschiedlichen Messstellen



Fahrzeugschwerpunkt
(nicht horizontiert)

Fahrzeug-Kopfhöhe über
Mittelkonsole (nicht horizontiert)

Helm (Fahrer)

Abbildung 114: Frequenzgang (Bode-Diagramm) von Querbeschleunigung gegenüber Lenkwinkel gemessen im Fahrzeugschwerpunkt (Fahrzeug der oberen Mittelklasse) bei 100 km/h und 4 m/s² Querbeschleunigung

Amplitudenverhältnis
Querbeschleunigung
(Schwerpunkt – Helm)

Phase
Querbeschleunigung
(Schwerpunkt – Helm)

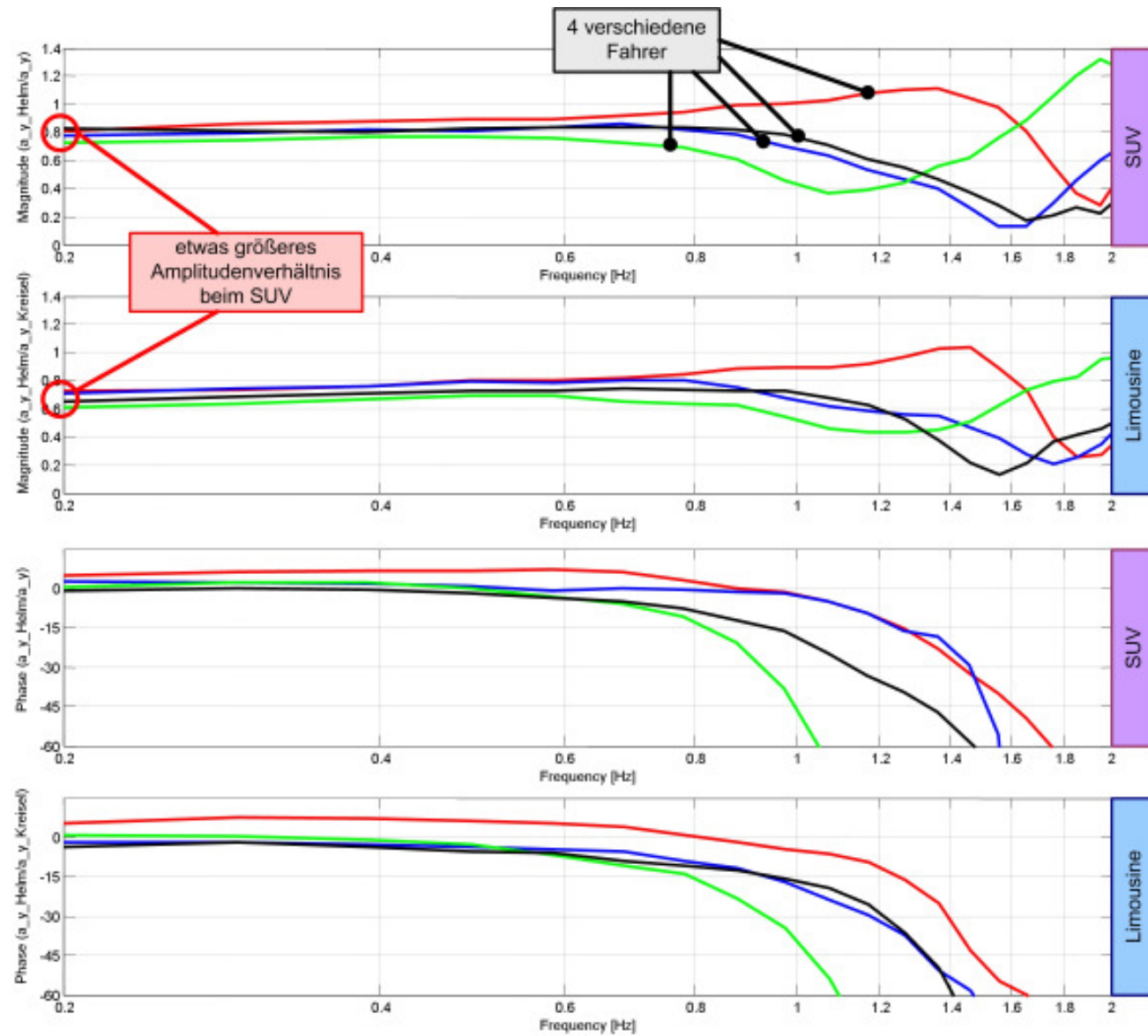


Abbildung 115: Vier Frequenzgänge der Querbeschleunigung im Fahrzeugschwerpunkt gegenüber Helm als Vergleich eines SUV und einer Limousine von vier Fahrern

Aus den Ergebnissen der Versuche lassen sich folgende Aussagen ableiten:

- Es ist aus zusätzlichen Datenmessschrieben (hier nicht dargestellt) zu erkennen, dass das Lenkmoment gegenüber dem Lenkwinkel voreilt, so wie es aus der Hysterese zwischen Lenkmoment und Lenkwinkel erkennbar ist. Dieses Voreilen scheint sich mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit zu verstärken, was bedeutet, dass der Phasenverzug zwischen Lenkmoment und anderen Fahrdynamikgrößen (Querbeschleunigung und Gierbeschleunigung) zunimmt.
- Beim Sinuslenken fällt auf, dass der vom Fahrer eingestellte Lenkwinkel mit zunehmender Lenkwinkelgeschwindigkeit immer mehr einem Stoß gleicht, was an einem leichten Zurückfedern („Zacke“ im Lenkwinkelverlauf) zu erkennen ist. Das lässt darauf schließen, dass der Fahrer versucht, bei sehr kurzen Einstellzeiten auf Kosten der Einstellgenauigkeit eine möglichst hohe Lenkwinkelgeschwindigkeit zu erreichen.
- Im Gegensatz zu den Mitfahrern legt der Fahrer den Kopf beim Lenken in die Kurve, womit er eine gegen die Querbeschleunigungskräfte arbeitende und damit wesentlich ruhigere Kopfhaltung erreicht. Dadurch scheint sich auch die Ansprechzeit der Querbeschleunigung gegenüber einem Lenkbefehl (in Kopfhöhe gegenüber Fahrzeugschwerpunkt) zu verkürzen. Ursache dürfte zum einen eine leichte Kippbewegung des Oberkörpers sein, die aus der Lenkbewegung in Richtung Kurve resultiert, zum anderen bildet der Fahrer durch Antizipation einen Vorhalt und weiß eher als die Mitfahrer, wann er einen Lenkbefehl ausübt. Ebenso lässt sich vermuten, dass der Fahrer durch das Ruhighalten des Kopfes die Verzugszeit zur Wahrnehmung der Querbeschleunigung verkürzt und dadurch eine schnellere Rückmeldung erhält.
- Desweiteren kann bemerkt werden, dass die zugehörigen SAE-Schablonen für die Kopfraumbewegung (Kopffreiheit) mit der zuvor genannten Erkenntnis nur für den Fahrer gültig zu sein scheinen, weil die Kopfbewegungen der Mitfahrer beim Lenken größer sind als die des Fahrers (*Mies* 1987).
- Eine Übertragung oder Umrechnung von Messgrößen, die an fahrzeugfesten Punkte gemessen wurden, ist anscheinend nicht so ohne weiteres möglich. Problematisch ist der unterschiedliche Phasenverzug (zeitlicher Verzug) einzelner aufeinanderfolgender Parameter.
- Bei Fahrzeugen mit höheren Sitzpositionen (wie z.B. SUV) scheint sich bei Betrachtung des Bodediagramms für die Querbeschleunigung im Helm und im Fahrzeugschwerpunkt gemessen gegenüber einer Limousine nur ein Unterschied im Amplitudenverhältnis zu ergeben, nicht aber im Phasenverzug. Auffällig ist auch, dass die Messungen bei vier Fahrern relativ große Streuungen aufwiesen (siehe Abbildung 115).

3.3.2 Versuch 2 – Bildverschiebungsvektorenfeld bei Kurvenfahrt

3.3.2.1 Grundlagen

Für die Untersuchung des Bildverschiebungsvektorenfeldes wird ein animiertes 3D-ComputermodeLL erstellt und verwendet. Es basiert auf dem Konzept (siehe Abbildung 116), dass ein Gitternetz mit senkrecht zueinander stehenden Linien gleichen Abstandes entsprechend der angenommenen Fahrzeuggeschwindigkeit und des vorbestimmten Kurvenradius verschoben wird und sich dadurch ein bestimmtes Abbild dieser Verschiebung auf der Netzhaut des menschlichen Auges ergibt (optischer Fluss). Die Verschiebungsdauer beträgt eine Sekunde, da sich die zugehörige Wahrnehmungsschwelle (wie später noch gezeigt werden wird) auf eine Sekunde bezieht.

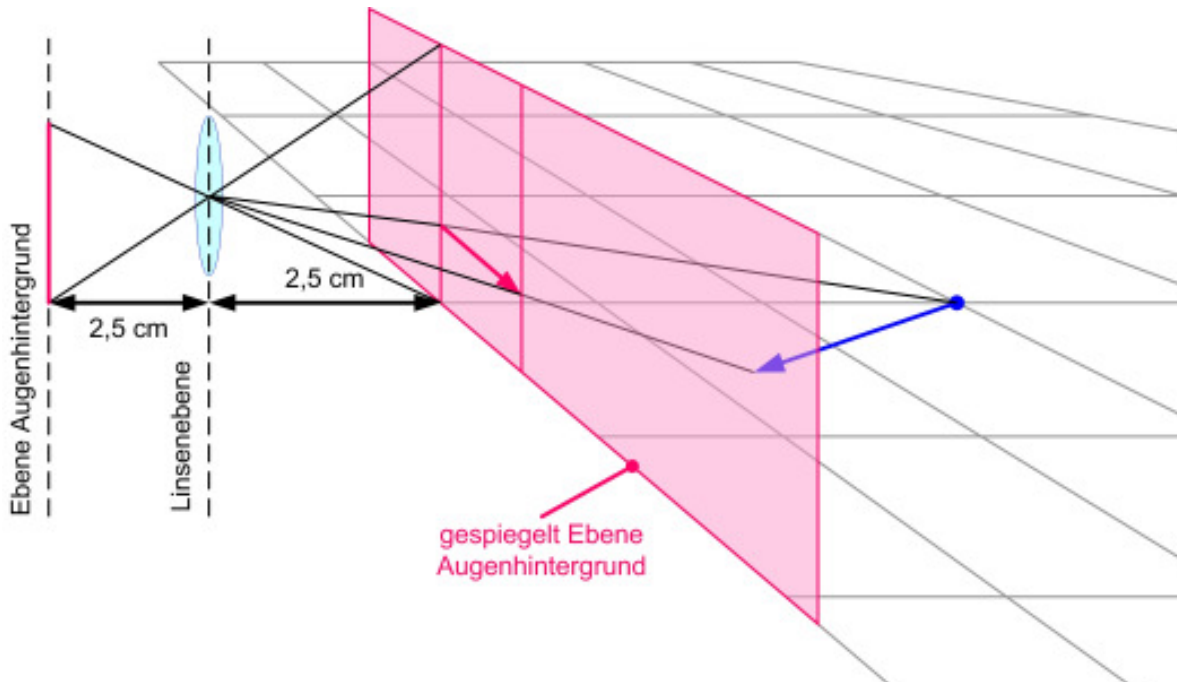


Abbildung 116: Prinzip der Wahrnehmung von Bildverschiebungsvektoren

Aus der Verschiebung der einzelnen Gitternetzpunkte ergibt sich für die Geradeausfahrt in allen Punkten ein und derselbe Vektor (siehe Abbildung 117). Bei der Projektion der Gitternetzvektoren auf eine Ebene, die sich senkrecht zur Blickrichtung des Fahrers und 2,5 cm vor seinem Auge befindet (siehe Abbildung 116), ergeben sich in Abhängigkeit der Entfernung nochmals unterschiedliche Vektoren, sowohl in Richtung und Länge. Auf der senkrechten Ebene ergibt sich dann das gleiche Bildverschiebungsvektorenfeld, dass auch auf dem Augenhintergrund abgebildet wird.

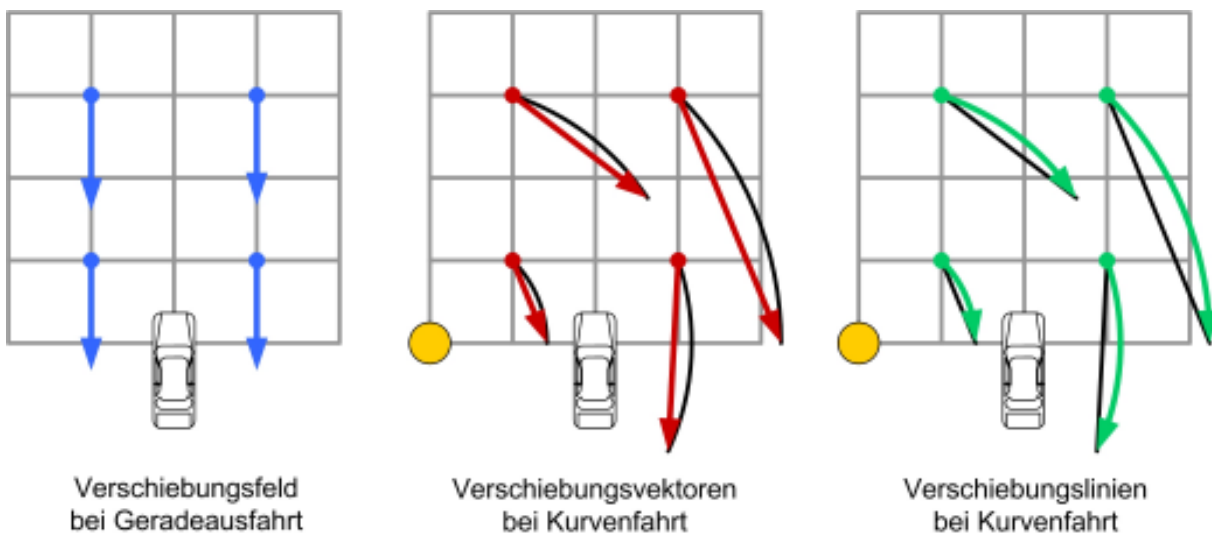


Abbildung 117: Verschiebungsvektoren und Verschiebungslinien eines regelmäßigen Gitters bei Längsverschiebung (links) und Rotation (Mitte und rechts)

Entscheidend bei der optischen Wahrnehmung bewegter Objekte ist die Wahrnehmungsschwelle von zwei Winkelminuten pro Sekunde ($2'/s$) bei einem Sehfähigkeitswert von eins (2.5.2.2 „Optische Wahrnehmung“). Beide Schwellwerte folgen Verteilungen und die angegebenen Werte sind Mittelwerte (Mediane). Die Schwellwerte bedeuten, dass der Mensch nur solche Objekte als bewegt wahrnimmt, wenn diese - auf den

Augenhintergrund bezogen - sich innerhalb einer Sekunde mit mehr als zwei Winkelminuten bewegen. Das gilt auch für eine Größenänderung des Objekts (z.B. Annähern an ein Auto von hinten). Zwar wird das Objekt unterhalb der genannten Schwelle erkannt, aber die Dynamik des Objekts (Zeitverhalten) kann vom Beobachter nicht hinreichend bestimmt werden, da ihm die notwendigen dynamischen Informationen über das Objekt fehlen. Allerdings gilt diese Überlegung zunächst ohne die relative Lage des Sehobjekts zu anderen Objekten.

Zusammenfassend gelten folgenden Grundvoraussetzungen und die im folgenden gemachten Aussagen haben nur für diese Gültigkeit:

- Alle Objekte sind, soweit nicht ausdrücklich im weiteren Text anders definiert, relativ zur Welt unbewegt.
- Alle Betrachtungen beziehen sich auf einem Zeitraum von einer Sekunde (1s).
- Der Kurvenradius der angefahrenen Kurve ist konstant.
- Die Fahrbahn ist absolut eben und ideal.
- Die dynamische optische Wahrnehmungsschwelle wird zu 2'/s angenommen.
- Die statische optische Wahrnehmungsschwelle wird zu 1' angenommen.
- Die Wahrnehmungsschwellwerte beziehen sich auf den Sehfähigkeitswert von eins (Visus 1).
- Der Fahrer blickt in unveränderter Augen- und Kopflage geradeaus.
- Der Fahrer erhält keine weiteren 3D-Informationen, mit der er die absolute Position im Raum besser schätzen kann (z.B. Größen bekannter Objekte, relative Größe von Objekten zueinander, Verdeckung zweier Objekte, relative Bewegung zweier Objekte zueinander).

In der Software erfolgt die Projektion nicht auf eine Ebene, sondern auf eine kugelförmige Fläche, da beim menschlichen Auge die Projektion auch auf einen gekrümmten Augenhintergrund erfolgt. Der sichtbare Bildwinkel ist in der Software skalierbar (siehe Abbildung 118). Somit ist die Betrachtung des Gesichtsfeldes seitlich des Fahrers möglich. Die Software zeigt auch die unverstellte Fahrersicht, was bedeutet, dass Sichteinschränkungen von Karosserie und Karosserieanbauteilen nicht berücksichtigt sind.

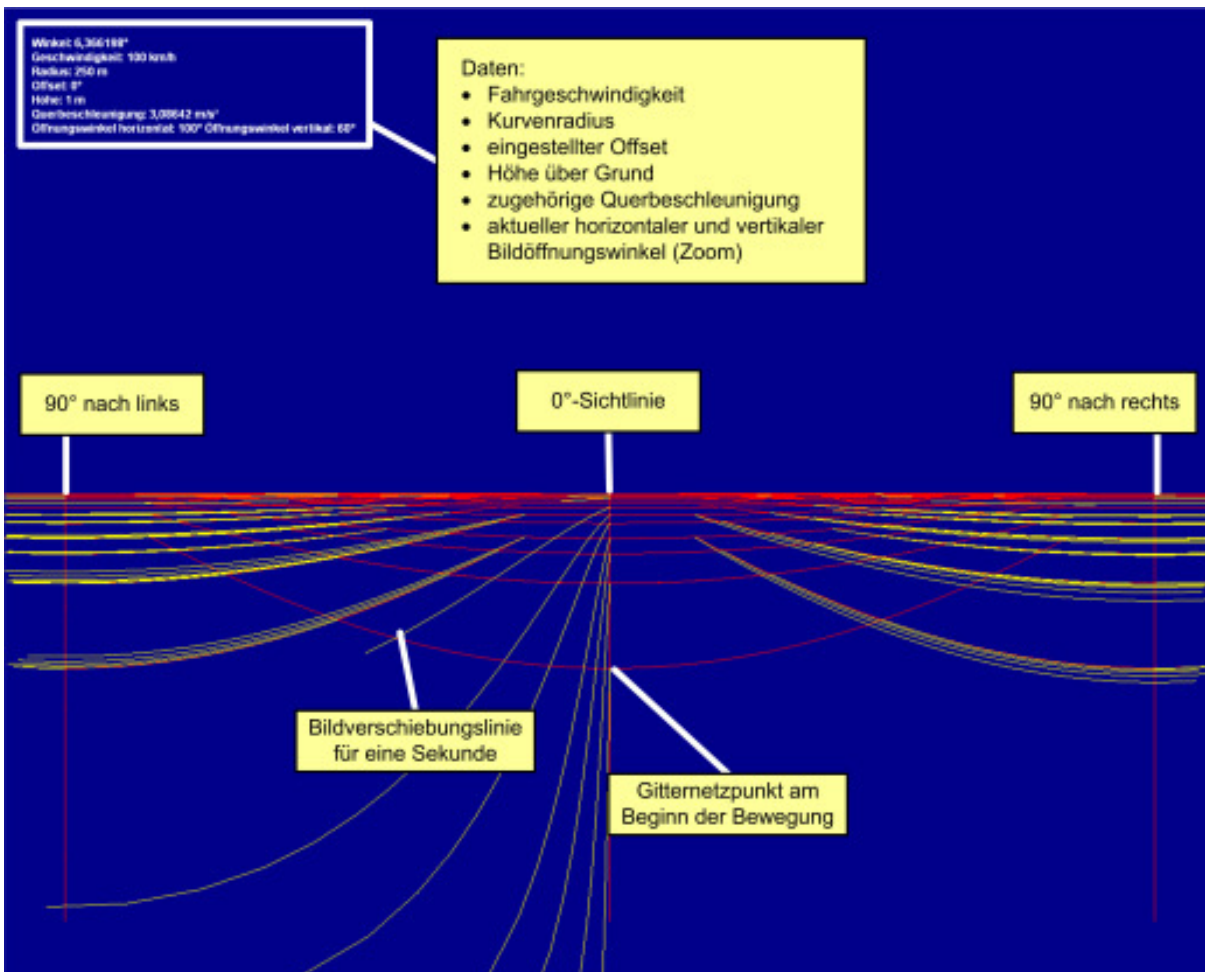


Abbildung 118: Fahrersicht der Bildverschiebungssoftware für einen maximalen Öffnungswinkel $> 200^\circ$

Es wird ausschließlich eine Kurvenfahrt nach rechts simuliert, denn die Kurvenfahrt nach links ist analog dazu. Vertikale Objekte sind in der Software nicht berücksichtigt, der Sachverhalt wird aber im Verlauf noch angesprochen werden. Der Öffnungswinkel der Projektion beträgt horizontal bis zu 200° . Beim Schließen des horizontalen Bildwinkels vermindert sich proportional ebenso der vertikale Bildwinkel, um eine Verzerrung des Gesamtbildes zu vermeiden.

Die Bildverschiebungssoftware (siehe Abbildung 118) zeigt zunächst ein regelmäßiges Gitter, dass mit zunehmender Entfernung weitmaschiger wird, um zu viele Details in größerer Vorausschauentfernung zu vermeiden (aufgrund der derzeitigen gängigen Bildschirmauflösungen bei PC-Systemen von 1280×1024 dpi sind die Details in größerer Entfernung nicht mehr sinnvoll darstellbar). Die Bildverschiebung ist durch bogenförmige Linien gekennzeichnet. Die Linien zeigen die Bildverschiebung nach einer Sekunde, wodurch die Anwendung der dynamischen Wahrnehmungsschwelle von ca. $2'$ pro Sekunde in der Simulation erleichtert werden soll.

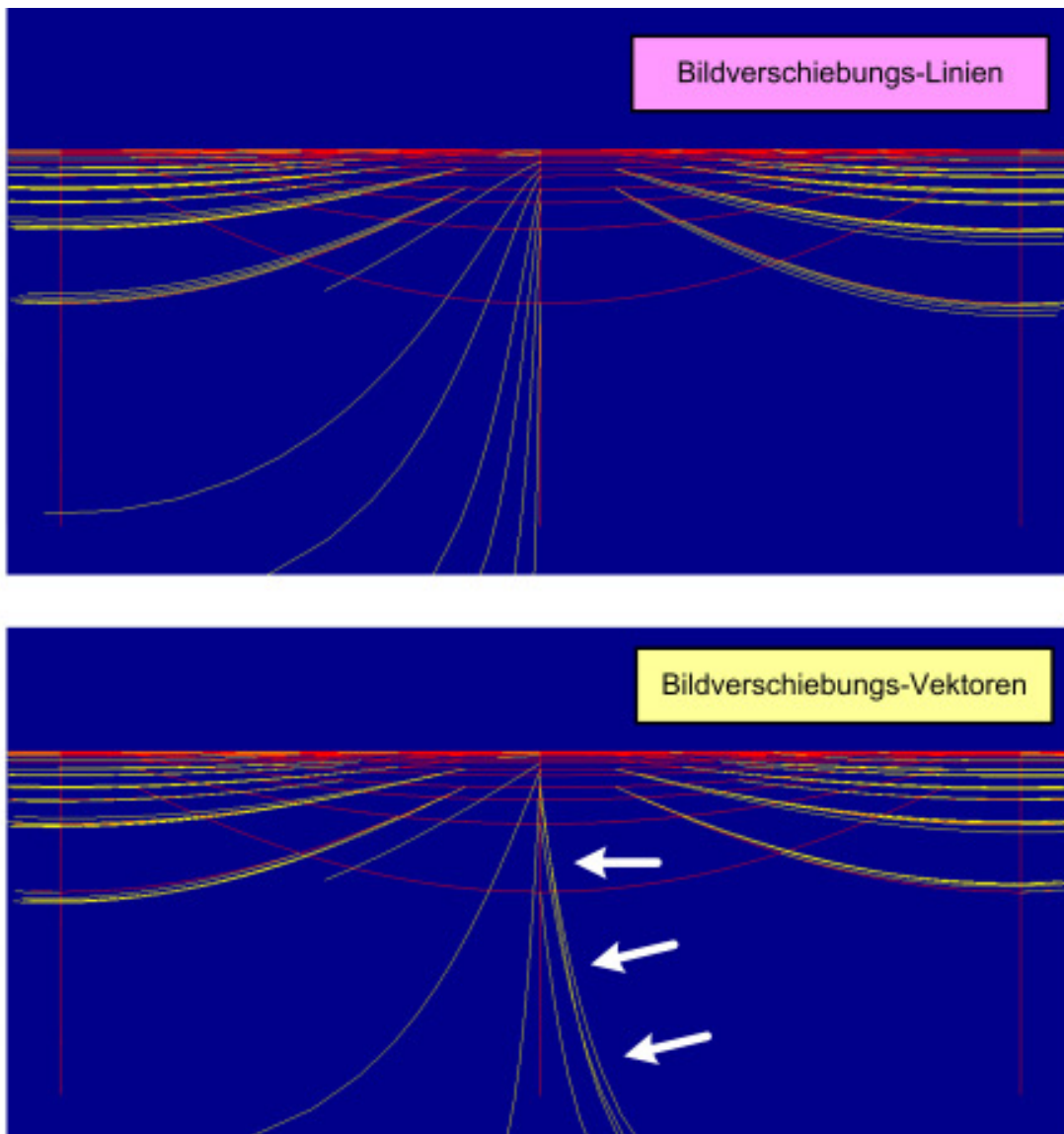


Abbildung 119: Unterschied zwischen der Darstellung mit Bildverschiebungslinien (oben) und Bildverschiebungsvektoren (unten)

Die Bildverschiebungsvektoren zeigen die direkte Verbindungslinie zwischen dem Anfangs- und Endpunkt der Verschiebung nach einer Sekunde. Zwischen Verschiebungslinien und Verschiebungsvektoren kann in der Software umgeschaltet (siehe Abbildung 117 und Abbildung 119) werden, da zunächst nicht klar ist, auf was sich der Fahrer bei der optischen Wahrnehmung einer Kurvendurchfahrt tatsächlich bezieht. Das soll durch die Software erst noch geklärt werden.

Wie die Pfeile im unteren Teilbild der Abbildung 119 kennzeichnen zeigen die Bildverschiebungsvektoren im Gegensatz zu den Bildverschiebungslinien im Nahbereich nach rechts der zugehörigen Gitternetzlinie (z.B. 0°-Sichtlinie). Im oberen Bildteil zeigen die Bildverschiebungslinien nach links. Von diesem Unterschied sind alle Vektoren betroffen, deren Anfangspunkt weniger als eine Sekunde vor dem Fahrzeug liegen, da sie sich aufgrund der Fahrgeschwindigkeit nach einer Sekunde hinter dem Fahrzeug befinden. Deswegen verlaufen auch die zugehörigen Vektoren nach rechts von der Mittellinie (0°-Linie).

Die Software zeigt verständlicherweise den Blick ohne Kopf- und Augenbewegung des Fahrers. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Gesamteindruck der Bildverschiebung dem Fahrer trotz des bei allen Menschen vorhandenen Augenzitterns und eventueller

Kopfbewegungen konstant erscheint, weil durch letzteres beim Fahren keine wesentlichen Zusatzinformationen gewonnen werden können.

3.3.2.2 Einstellungsmöglichkeiten der Bildverschiebungssoftware

Nachfolgend sollen die Möglichkeiten der Verstellung von Parametern in der Bildverschiebungssoftware erörtert werden. Bei der Software kann neben dem Öffnungswinkel des Blickes, dem Kurvenradius, der Sitzhöhe und der Fahrgeschwindigkeit noch der sog. Offset eingestellt werden. Er berücksichtigt das Über- oder Untersteuern des Fahrzeugs bei Kurvenfahrt und für das Schräglaufen („Hundelauf“) bei Geradeausfahrt. Abbildung 120 zeigt anschaulich, welchen Winkel der Offset beschreibt.

Der Offset ist der Winkel, der sich relativ zur senkrechte und tangential zum Kurvenradius ausgerichteten Blickrichtung ergibt. Für die Fahrt in einer Linkskurve bedeutet ein positiver Offset, dass sich das Fahrzeug weiter eingedreht hat als es der tangentialen Richtung entspricht. Mit einem positiven Offset wird also ein übersteuerndes Fahrzeug simuliert. Umgekehrt gilt dies für ein untersteuerndes Fahrzeug. Damit handelt es sich um eine Art Zusatzschwimmwinkel.

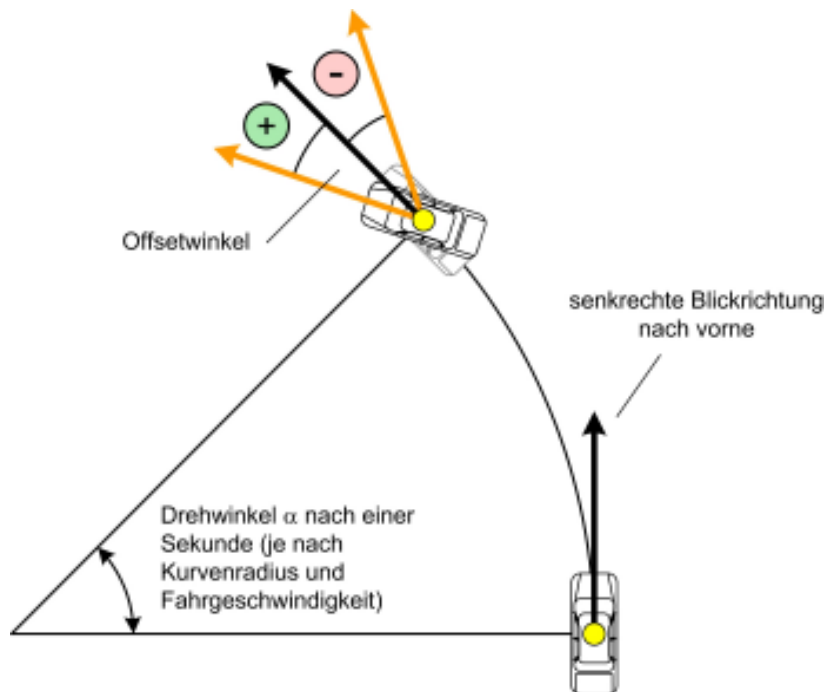


Abbildung 120: Darstellung zur Erklärung des in der Software einstellbaren Offsets

Es sollte in diesem Zusammenhang erwähnt sein, dass die Software eine Fahrdynamik auf Basis des Ein- oder Mehrspurmodells nicht berücksichtigt (Software ist eine Punktverschiebung, keine Fahrzeuglänge und kein Radstand berücksichtigt). Die abgebildeten Bildverschiebungsvektoren und Bildverschiebungslinien ergeben sich aus einer kontinuierlichen Fahrzeugdrehung (konstanten Gierwinkelgeschwindigkeit).

| veränderbarer Parameter | Einstellbereich |
|---|--|
| Kurvenradius |]0-1800] m (bei direkter Eingabe beliebig groß) |
| Fahrgeschwindigkeit |]0-250] km/h |
| Sitzhöhe |]0-2,50] m |
| Offset (Unter- bzw. Übersteuergradient) | -40° (untersteuernd) bis +40° (übersteuernd) |
| Öffnungswinkel Sicht (horizontal) | bis 200° |

Tabelle 23: Einstellbare Parameter der Bildverschiebungssoftware

Mit den Verstellparametern (siehe Tabelle 23) ist es möglich, die Verstellauswirkung auf das Bildverschiebungsvektorenfeld näher zu untersuchen:

- Fahrgeschwindigkeiten,
- Kurvenradien,
- Gierwinkelgeschwindigkeit (Untersteuern, Übersteuern),
- Sitzhöhe und
- schief laufendes Fahrzeug (Schräglauf bei Geradeausfahrt).

3.3.2.3 Draufsicht in der Bildverschiebungssoftware

Zusätzlich zur Fahrersicht ermöglicht die Software eine Draufsicht, in der die zuvor erwähnten Parameter genauso wie bei der Fahrersicht einstellbar sind (siehe Abbildung 121). Die Draufsicht zeigt wie in Abbildung 122 zu erkennen den Kurvenradius (Abbildung 122 Nr. 1) nach rechts ausgehend von der Fahrzeugausgangsposition (Abbildung 122 Nr. 2) in der Mitte am linken Bildrand. Auf der Kurve, die einem konstanten Kurvenradius entspricht, sind die zeitlichen Vorausschauentfernungen nach einer, zwei, drei und vier Sekunden eingezeichnet (Abbildung 122 Nr. 3). Sie beziehen sich auf die Punkte auf der Kurve, die sich nach diesen Zeitintervallen auf Höhe des Fahrers befinden.

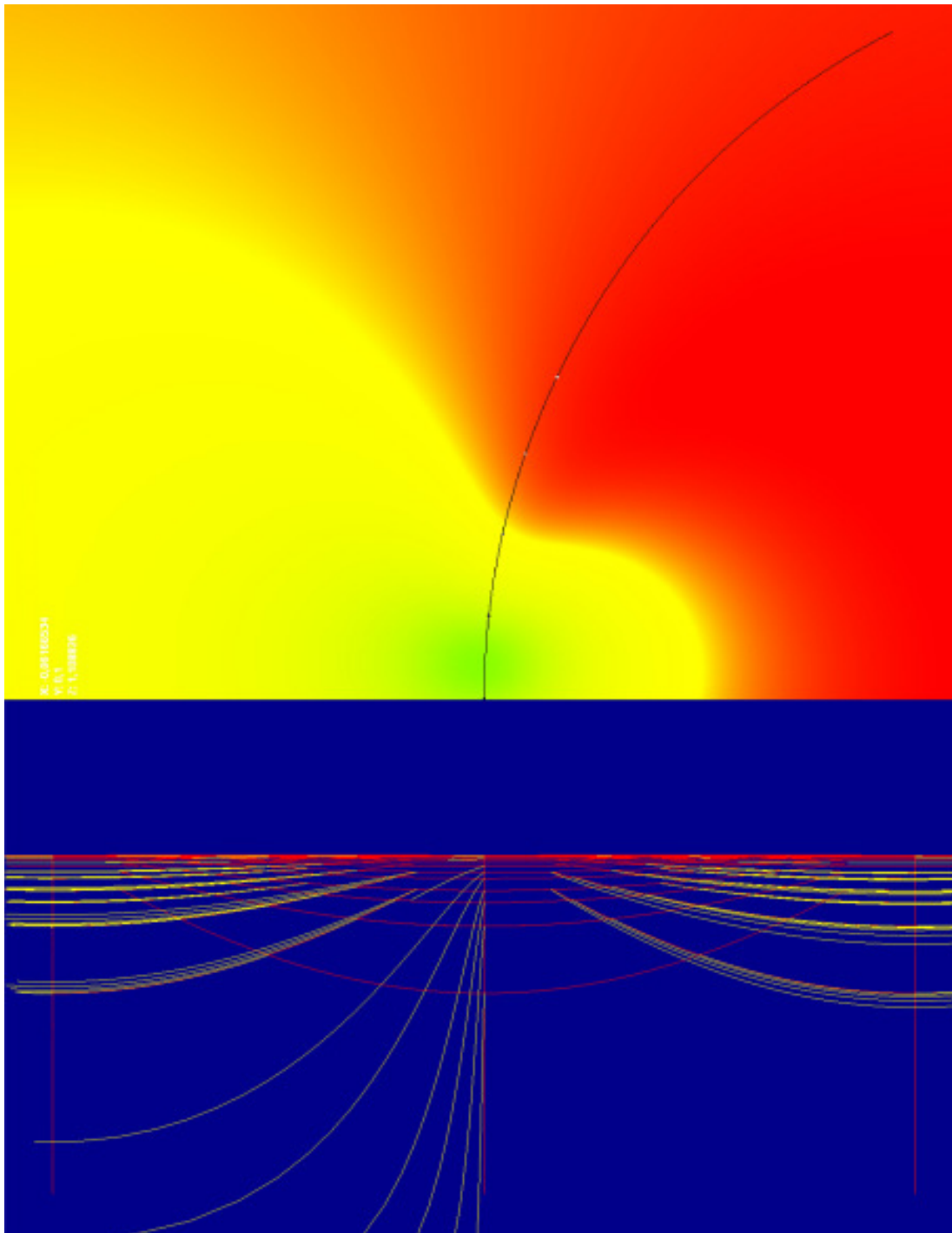


Abbildung 121: Fahrersicht in Ansicht der Bildverschiebungslinien und zugehörige Draufsicht mit Bereichen der dynamischen Wahrnehmungsschwelle

Deutlich ist die Grenzlinie zu erkennen (Abbildung 122 Nr. 4), die die dynamische Wahrnehmungsschwelle (im vorliegenden Fall 2'/s) kennzeichnet. Da die dynamische Wahrnehmungsschwelle nicht für alle Menschen gleich ist und einer Verteilung folgt, ist die Grenzlinie als Farbübergang dargestellt. Die Grenzlinie ist so zu verstehen wie in Abbildung 123 dargestellt und zwar derart, dass der Bereich von der Grenzlinie zum Fahrzeug die dynamische Wahrnehmungswelt und der Bereich von der Grenzlinie in Richtung Horizont die statische Wahrnehmungswelt kennzeichnet.

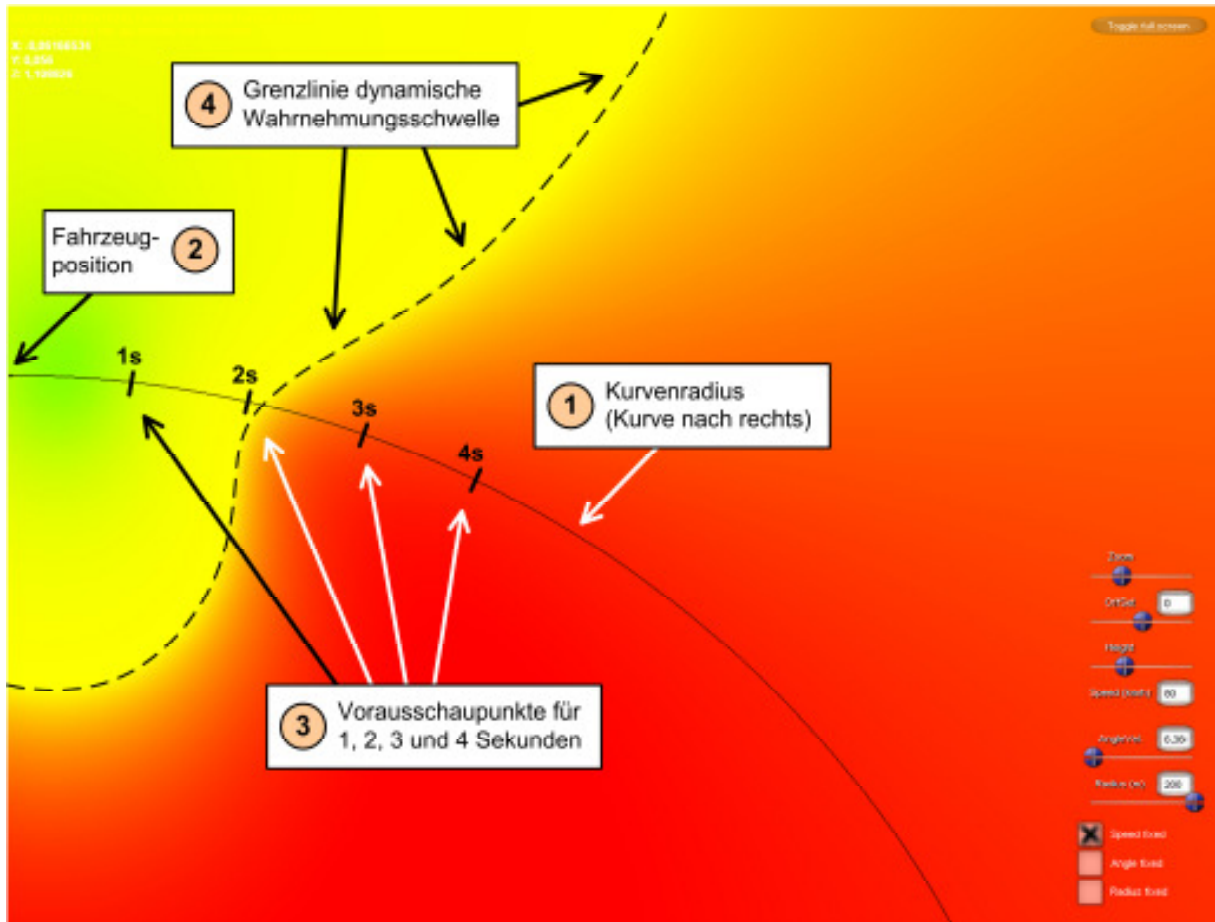


Abbildung 122: Aufbau und Merkmale der Draufsicht

Die Grenzlinie bildet im Bereich der Kurve einen zum Fahrer weisenden Zipfel, der auch bei Geradeausfahrt zu finden ist. Der Zipfel schneidet, wie später noch gezeigt wird, je nach Geschwindigkeitsbereich in einer Vorausschauentfernung von ca. 2s. Die Ursache für die Entstehung und Existenz des Zipfels ist zunächst unklar. Der Zipfel existiert auch bei Geradeausfahrt. Das Auftreten des Zipfels hängt mit der Lage des Zentrums des Auseinanderfließens zusammen, das sich um die Sitzhöhe am Horizont über der Fahrbahn befindet. Der Zipfel ist darauf zurückzuführen, dass rein geometrisch in der Nähe des Fluchtpunktes der Zentralperspektive die Geschwindigkeitsvektoren am kleinsten sind. So sind Teile der Fahrbahn im Mittelstreifenbereich meist näher am Fluchtpunkt als beispielsweise die Fahrbahnränder.

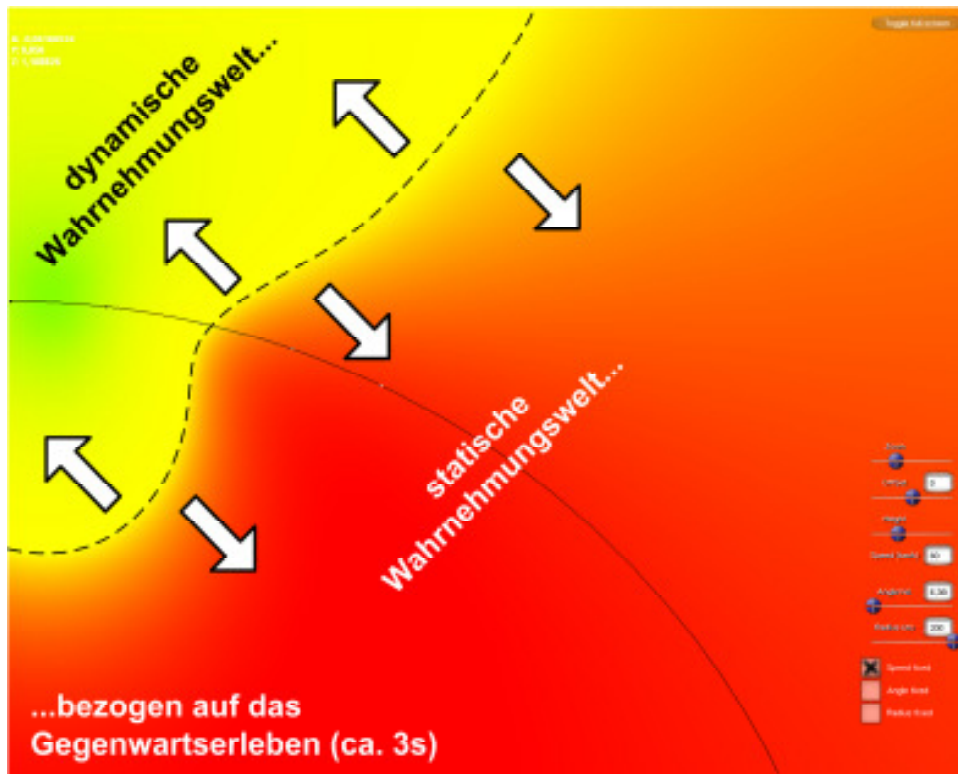


Abbildung 123: Bereich der statischen und dynamischen Wahrnehmungswelt bezogen auf das Gegenwartserleben (ca. 3s)

Die Einteilung in die dynamische und statische Wahrnehmungswelt bezieht sich auf unbewegte Sehobjekte. Allerdings gilt die Grundvorstellung auch für bewegte Sehobjekte. In der dynamischen Welt erscheinen alle Objekte (die selbst keine Relativbewegung aufweisen) zeitlich bewegt und in der statischen Welt zeitlich unbewegt, da mit zunehmender Objektentfernung der dynamische Eindruck über die Bewegung verloren geht. Der Sachverhalt bezieht sich auf das Gegenwartserleben (Zeitraum von ca. 3s) und den Eindruck des optischen Flusses des Menschen, sofern er sich nicht konkret auf die Bewegung von bestimmten Objekten in seinem Blickfeld konzentriert.

Die Folge der Zweiteilung in statische und dynamische Wahrnehmungswelt ist, dass Objekte, die sich im Bereich der statischen Wahrnehmungswelt (v.a. dort im tieferen, weiter entfernten Bereich) befinden, in ihrem dynamischen Verhalten (relative Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung) vom Fahrer schwer zu schätzen sind, sobald statische Informationen nicht ausreichend sind. Eine solche statische Information wäre die relative Lage zu anderen Objekten (z.B. durch Verdeckungen) oder die relative Größe gleicher oder ähnlicher Objekte (z.B. Straßenleitpfosten).

Beispielsweise kann beim Überholen auf Geraden oder langgezogenen Kurven die Schätzung der Annäherungsgeschwindigkeit des Gegenverkehrs stark erschwert sein, wenn der Überholweg durch relativ hohe Geschwindigkeit des Überholenden und Überholten, groß ist.

Ebenso kann bei Annäherung an ein Stauende mit hoher Geschwindigkeit zur Folge haben, dass der Fahrer den Geschwindigkeitsunterschied des sich an ihn annähernden Fahrzeugs nicht mehr hinreichend abschätzen kann, ob das Stauende steht oder mit welcher Geschwindigkeit die Fahrzeuge am Stauende tatsächlich fahren. Geschätztweise kann das Annähern mit 200 km/h an ein Stauende durchaus zu einem Schätzunterschied zwischen 0 und 100 km/h des Stauendes führen.

Vermutlich kann dem Fahrer bei langgezogenen Rechtskurven (im Rechtsverkehr) das Aufeinanderfolgen zweier Fahrzeuge im Gegenverkehr Probleme bereiten, wenn diese sich noch in der statischen Wahrnehmungswelt befinden. Vor allem bei Nacht, kann es zur

Verwechslung zwischen zwei sich überholenden (gefährlich) und zwei unmittelbar hintereinander fahrenden Fahrzeugen (ungefährlich) kommen, weil mehr optische Zusatzinformationen fehlen als am Tag.

Bei Kurvenfahrt wird davon ausgegangen, dass der Fahrer einen inneren Sollkurs, den er für eine bestimmte anzufahrende Kurve für ideal hält, mental in die Kurve legt. Der Sollkurs kann bei engeren Kurven und bei Rechtsverkehr bei Linkskurven (Anfahren des Scheitelpunktes) relativ zum Kurvenmittenradius größer ausfallen als bei langgezogenen Kurven, wie beispielsweise bei Autobahnkurven. Abbildung 124 zeigt den erwähnten Unterschied.

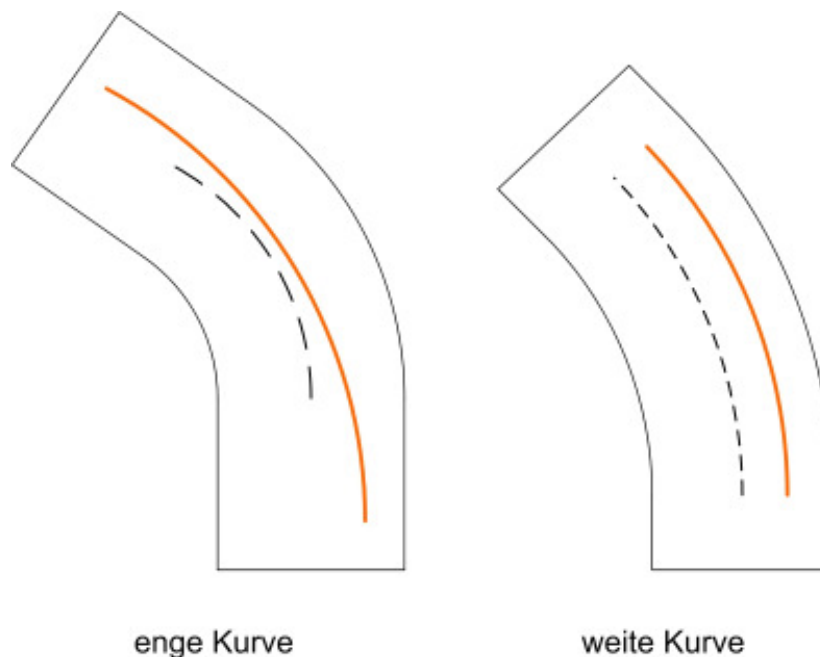


Abbildung 124: Relativer Radius von innerem Sollkurs und Kurvenmitte bei einer engen und einer weiten Kurve

Die Frage, die sich im Zusammenhang mit dem inneren Sollkurs auftut ist die, welche Informationen der Fahrer zur Überprüfung seines inneren Sollkurses nutzt. Es liegt die Vermutung nahe, dass der Fahrer die Bildverschiebungsabweichungen vom inneren Sollkurs in seiner Vorausschauentfernung (in der Regel 2-4 s) beurteilt. Demnach könnte er nur Abweichungen von 2'/s oder mehr wahrnehmen. Bei Abweichungen unterhalb dieses Wertes dürfte der Fahrer die Kurvenfahrt als „ideal“ und ohne Abweichung vom inneren Sollkurs beurteilen.



Abbildung 125: Abweichung der Bildverschiebung eines im Horizont liegenden Bezugspunktes gegenüber dem vom Fahrer festgelegten „inneren“ Sollkurses

Eine weitere Information für den Fahrer scheint das Zentrum des Auseinanderfließens aus dem optischen Fluss zu sein (siehe auch Kapitel 2.5.2.2 „Optische Wahrnehmung“). Gemäß der Theorie von *Lee* (1974), legt der Fahrer virtuell das Zentrum des Auseinanderfließens auf den Kurvenmittelpunkt. Es ist jedoch so, dass die wenigsten Kurven so lange sind, dass sie bis zum Zentrum des Auseinanderfließens reichen.

Es stellt sich deshalb die Frage, welche Informationen der Fahrer nun tatsächlich bei Sichteinschränkung in die Kurve oder bei kurzen aufeinanderfolgenden Kurven nutzt. Die erwähnte Vorstellung kann kaum als Erklärung dienen. Der Fahrer nutzt, wie schon von *Land und Lee* (2005) vermutet, noch zusätzliche Bildinformationen (siehe hierzu Kapitel 2.5.2.2 „Optische Wahrnehmung“).

3.3.2.4 Versuche mit der Software – Geradeausfahrt

Es soll in einem weiteren Versuch geklärt werden, wie sich die zuvor gemachten Aussagen die Sachverhalte bei der Geradeausfahrt verhalten. Bei der Geradeausfahrt des Autos stellt sich die Frage, ab wann der Fahrer einen Schräglauf erkennt bzw. wie stark er eine nicht hundertprozentig geradeausstehende Karosserie auf dem Fahrwerk erkennen kann.

Hier dürfte die Einschätzung von *Warren* (1995) gelten, dass der Fahrer eine Abweichung beim Geradeausfahren von $0,5^\circ$ bis 1° genau schätzen kann. Die Untersuchung bezieht sich auf die Schätzbarkeit einer Abweichung beim Gehen auf ein Ziel, dürfte aber auch auf das Autofahren übertragbar sein.

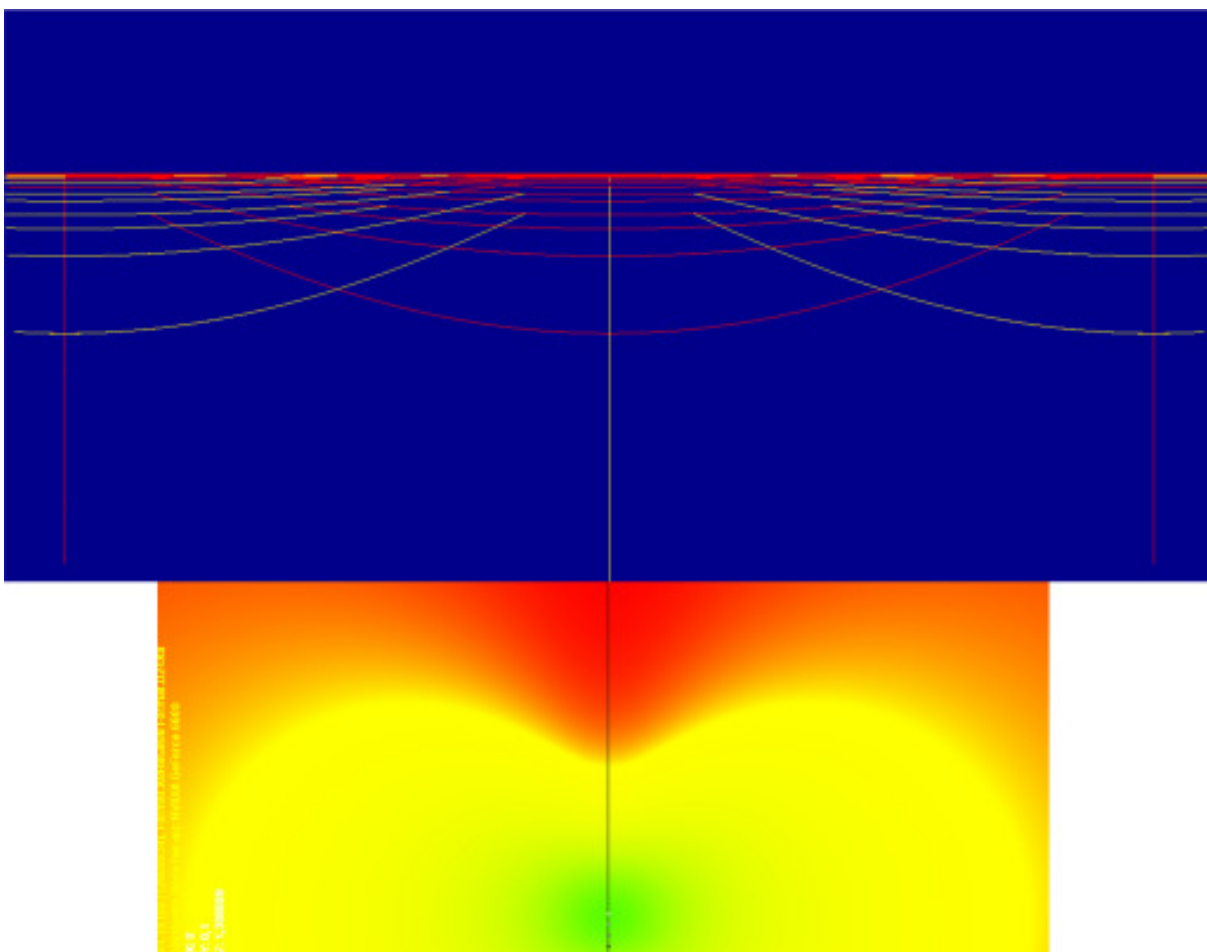


Abbildung 126: Absolute Geradeausfahrt

Abbildung 126 zeigt die Verhältnisse in Drauf- und Fahrersicht für die absolute Geradeausfahrt, also bei einer Fahrt ohne jeden seitlichen Versatz und ohne jede Lenkbewegung (tritt in der Realität über längere Zeit nicht auf). Die Bildverschiebungslinien und –vektoren in auf der Sichtlinie und auch alle anderen Linien und Vektoren weisen dann keine Queranteile auf. Der „Zipfel“ der Grenzlinie zwischen statischer und dynamischer Wahrnehmungswelt liegt genau auf der 0°-Sichtlinie.

Abbildung 127 zeigt die Verhältnisse in Drauf- und Fahrersicht für eine schräge Geradeausfahrt von 5° nach rechts. Die Bildverschiebungslinien und –vektoren zeigen leichte Queranteile nach links, am deutlichsten die Verschiebungslinien und –vektoren auf der 0°-Sichtlinie. Der „Zipfel“ der Grenzlinie zwischen statischer und dynamischer Welt liegt jetzt rechts von der 0°-Sichtlinie, während sich gleichzeitig die linke Seite der dynamischen Wahrnehmungswelt öffnet und auf der rechten Seite mehr schließt. Damit sind die Bildverschiebungslinien und –vektoren in der linken Hälfte tendenziell länger als in der rechten.

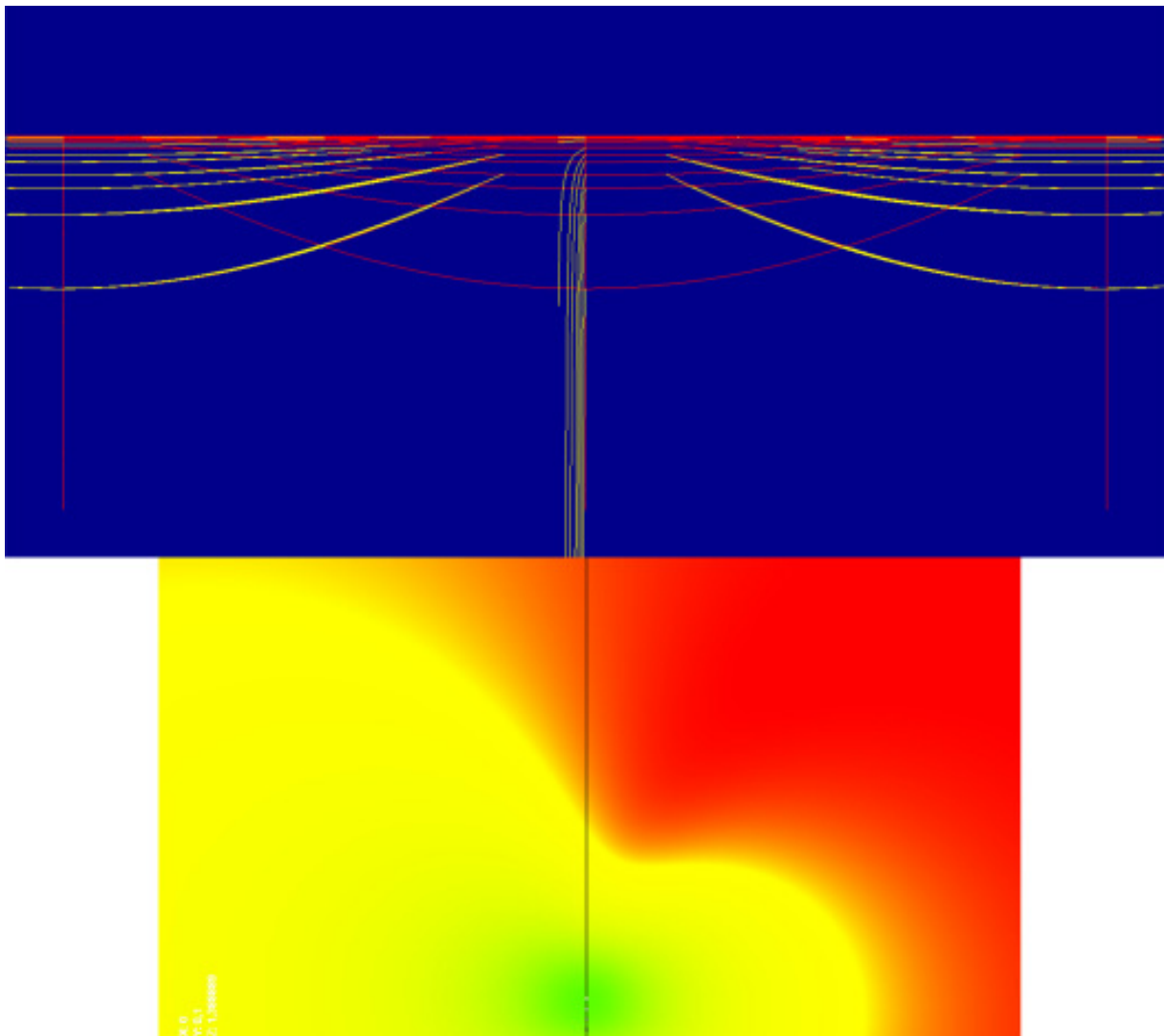


Abbildung 127: Schräge Geradeausfahrt unter einem Winkel von 5° nach rechts

3.3.2.5 Versuche mit der Software – Verstellauswirkung der Fahrgeschwindigkeit

Im Folgenden werden die Experimente zur Klärung von Fragen um die Bildverschiebung erläutert. Zunächst soll die Auswirkung einer Änderung der Fahrgeschwindigkeit untersucht werden.

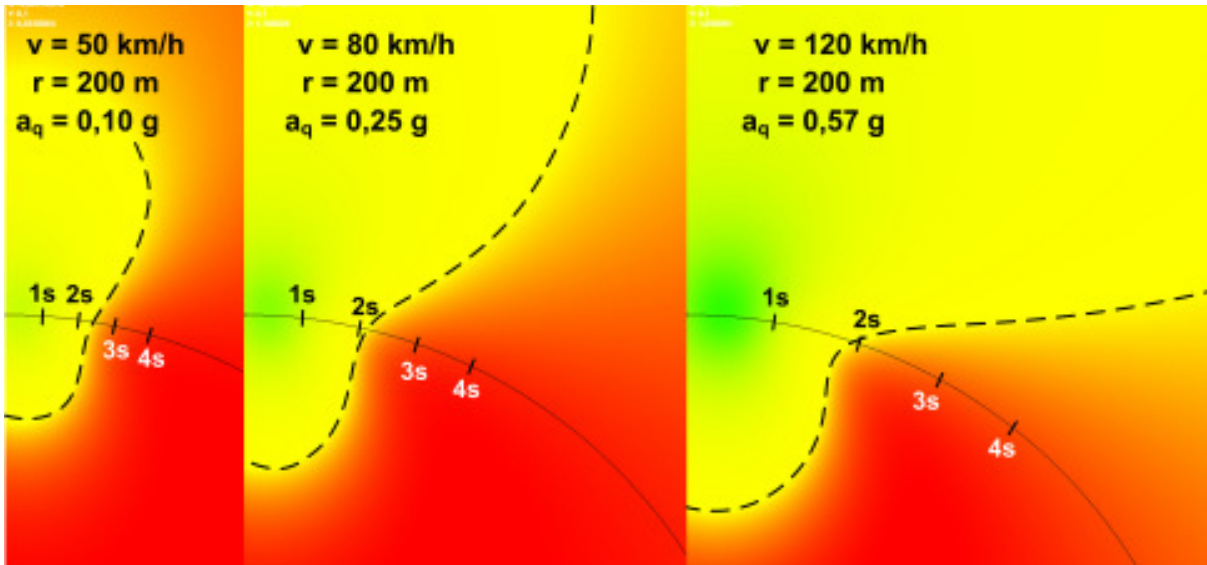


Abbildung 128: Lage der Grenzlinie zwischen statischer und dynamischer Wahrnehmungswelt in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit bei konstantem Kurvenradius

Wie in Abbildung 128 zu erkennen ist, vergrößert sich mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit der Bereich, in dem die dynamische Wahrnehmungsschwelle von 2'/s überschritten wird, nur bleibt die Zone in dem die Kurve verläuft und somit der relevante Informationsbereich für den Fahrer diesbezüglich nahezu unverändert. Der Zipfel der Wahrnehmungsschwelle, der auf der Kurve liegt, verändert sich mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit nur gering. Der Abstand beträgt bei niedrigeren Fahrgeschwindigkeiten ca. 2 bis 2,5 s und nimmt mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit auf etwas unter 2 s ab. Allerdings gerät dabei die zugehörige Quereschleunigung zunehmend in einen Bereich, in dem üblicherweise Normalfahrer nicht fahren bzw. den das Fahrzeug physikalisch ohne zusätzlichen aerodynamischen Abtrieb nicht mehr aufbringen kann (>1,3 g).

Objekte die sich auf dieser Stelle und somit auf der Fahrbahn oder in unmittelbarer Nähe dazu befinden, nähern sich aber durch die höhere Fahrgeschwindigkeit schneller und überschreiten damit eher die Schwelle von 2'/s bezüglich ihrer Größenänderung, auch wenn sie sich im Bereich der statischen Wahrnehmungswelt (roter Bereich) befinden. Für Objekte, die sich vom Fahrzeug entfernen bzw. mit dem Fahrzeug sozusagen mitfahren gilt das umgekehrte. Die Schätzbarkeit der Geschwindigkeit und Geschwindigkeitsänderung verbessert sich bei entgegenkommenden Fahrzeugen, für mitfahrende Fahrzeuge verschlechtert sie sich.

Auch wird durch diese Darstellung deutlich, dass der tatsächliche Scheitelpunkt sog. Hundekurven, die im Verlauf enger werden, im roten Bereich, also in der unerschwelligen Zone liegen kann. Damit ist für den Fahrer erschwerend, seine Annäherung an den Scheitelpunkt genau abzuschätzen und das Lenkverhalten entsprechend anzupassen.

3.3.2.6 Versuche mit der Software – Verstellauswirkung des Offsets

Die Abbildung 129 und die Abbildung 130 sollen Aufschluss darüber geben, inwieweit der Fahrer einen Ansatz von Über- und Untersteuern rein aus der optischen und ohne ausreichende kinästhetische Information gewinnen kann. Bisherige Vorstellung ist, dass der Fahrer ein Unter- oder Übersteuern vorwiegend durch kinästhetische (vestibuläre) Informationsaufnahme gewinnt und erst (zusätzlich) optisch bei einem deutlicher ausgeprägten Unter- oder Übersteuern. Dieser Vorstellung spricht allerdings entgegen, dass Fahrer bei niedrigen Fahrgeschwindigkeiten und relativ großen Kurvenradien bereits kleine Abweichungen der Gierbewegung bestimmen können. Es muss dem Fahrer also möglich sein, ohne den Abgleich mit der kinästhetischen Rückmeldung, gute Schätzungen über das Unter- und Übersteuern vorzunehmen. Um welche optischen Informationen es sich dabei handeln könnte, soll nachfolgend erläutert werden.

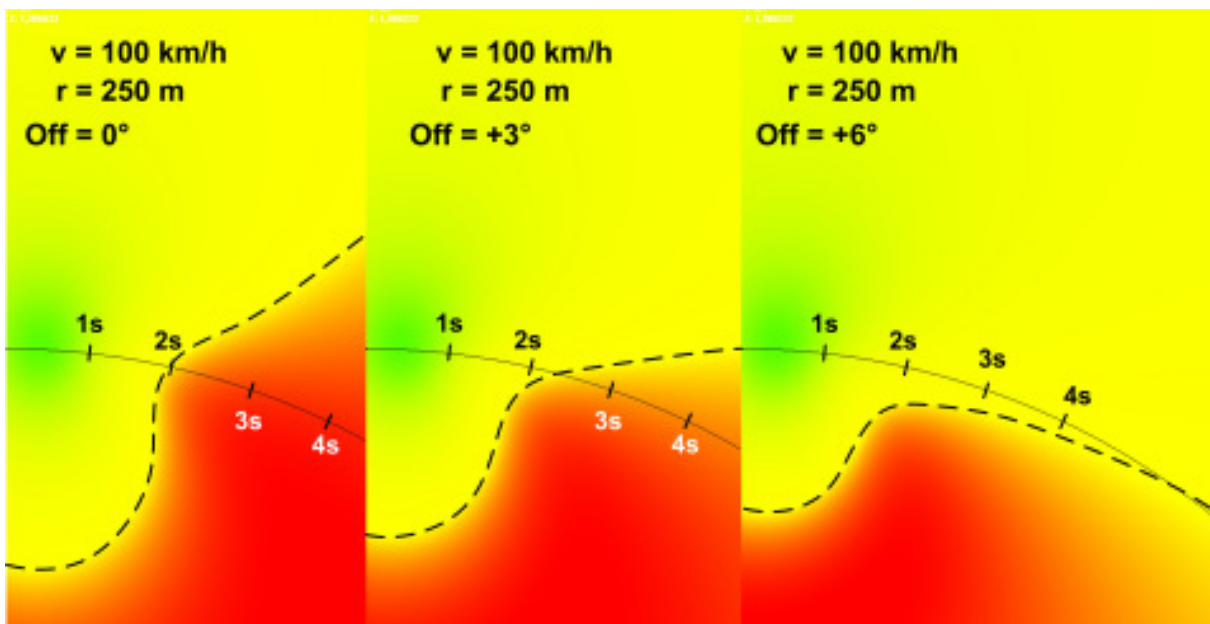


Abbildung 129: Veränderung der Grenzlinie zwischen statischer und dynamischer Wahrnehmungswelt beim Übersteuern (positiver Offset) des Fahrzeugs in der Draufsicht (mit zugehöriger Querbewegung)

Abbildung 129 zeigt in einer Abfolge dreier Bilder wie sich die Grenzlinie der dynamischen Wahrnehmungswelt im Falle des Übersteuerns ändert. Schon bei bereits 6° zu weitem Eindrehen verlagert sich der Zipfel der Grenzlinie mehr Richtung Kurveninneren. Die dynamische Welt liegt nun auf der Kurve, über den Vorausschaupunkt von 4s hinweg. Der Fahrer nimmt das so war, dass auf der Kurve und im gesamten Bild mehr Bewegung und Dynamik auftritt.

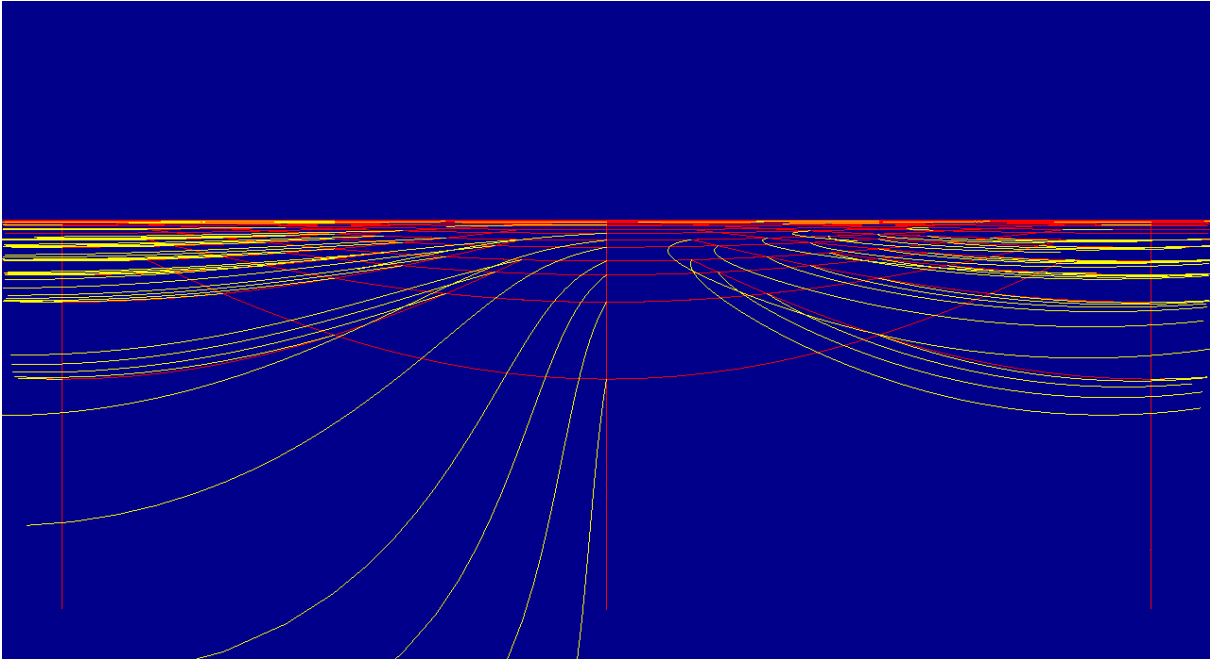


Abbildung 130: Bildverschiebungslinien in der Fahrersicht für einen positiven Offset von $+23^\circ$ (extremes Übersteuern)

Wie schon beim Übersteuern (Abbildung 129) zeigt die Abbildung 131 eine Dreiersequenz für den Fall des Untersteuerns (siehe hierzu auch Abbildung 132). Ebenso wie beim Übersteuern beginnt der Zipfel der Grenzlinie zu wandern, allerdings zum Kurvenäußeren hin. Ein eklatanter Unterschied zum Übersteuern ist, dass der Schnittpunkt zwischen der Grenzlinie und der Kurvenlinie in der Nähe des Vorausschaupunktes von 2s bleibt. Unterschiedlich ist auch, dass der Bereich des Kurvenäußeren der dynamischen Welt kleiner wird, während der Bereich im Kurveninneren größer wird. Das ist zwar beim Übersteuern reziprok und tendenziell genauso, allerdings scheint das Ausmaß der Zu- und Abnahme nicht so ausgeprägt wie beim Übersteuern zu sein.

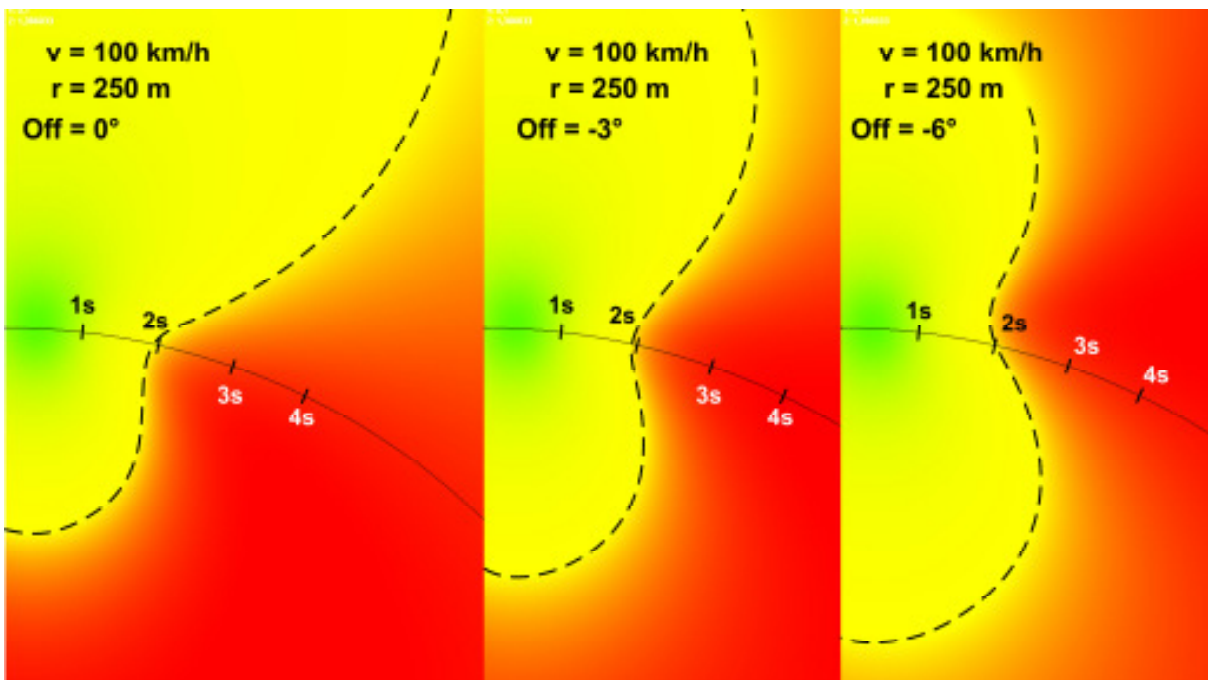


Abbildung 131: Veränderung der Grenzlinie zwischen statischer und dynamischer Wahrnehmungswelt beim Untersteuern (negativer Offset) des Fahrzeugs in der Draufsicht

Der Vergleich von Übersteuern und Untersteuern lässt den Schluss zu, dass der Fahrer mit größerer Wahrscheinlichkeit ein Übersteuern eher aus der visuellen Informationsaufnahme erkennt als ein Untersteuern. Grundsätzlich kommt das jedoch dem Normalfahrer eher entgegen, da ein übersteuerndes Fahrzeug i.d.R. schwerer zu beherrschen ist als ein untersteuerndes.

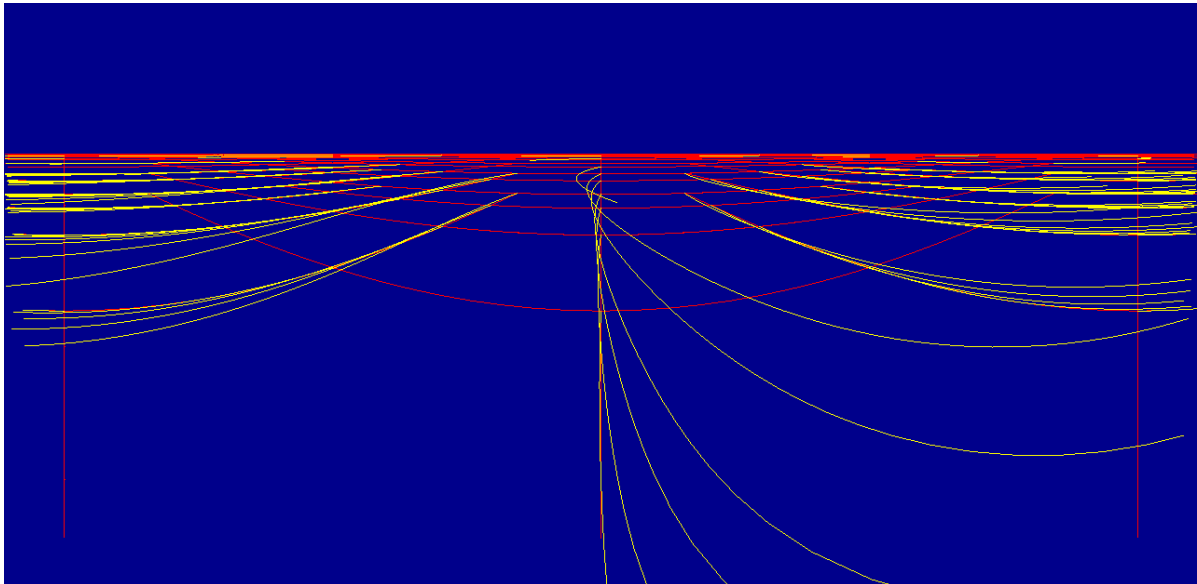


Abbildung 132: Bildverschiebungslinien in der Fahrersicht für einen positiven Offset von -20° (extremes Untersteuern)

3.3.2.7 Versuche mit der Software – Verstellauswirkung der Höhe über Grund

Ebenso wird ausprobiert inwieweit sich eine Höhenverstellung in der Draufsicht auf das sich für den Fahrer ergebende Bild auswirkt (Abbildung 133). Dabei stellt sich heraus, dass die auf den Augenhintergrund abgebildete Länge der Bildverschiebungsvektoren und Bildverschiebungslinien sich mit der Höhe im für Fahrzeuge realistischen Verstellbereich von 0,5m bis 2,5m nicht ändert. Der Grund ist darin zu suchen, dass sich erst dann die Grenzlinie zwischen dynamischer Welt und statischer Welt verändert, wenn sich die Lage des Zentrums des Auseinanderfließens relativ ändert. Das ist dann der Fall, wenn sich der Betrachter nicht mehr parallel zur Ebene bewegt, sondern auf sie zu oder von ihr weg (wie beim Landeanflug oder Start eines Flugzeuges).

Mit erhöhter Sitzposition verbessert sich die Übersichtlichkeit jedoch deutlich, was vor allem für die Beurteilung des Bereichs der dynamischen Welt von Vorteil ist. Es ist im diesem Zusammenhang denkbar, dass eine sehr niedrige Fahrzeugsitzposition über der Fahrbahn und eine lange Motorhaube (wie z.B. bei einem Roadsterfahrzeug) dazu führen können, dass der Bereich der dynamischen Wahrnehmungswelt nahezu vollständig für den Fahrer durch die Silhouette des Fahrzeugs (A-Säulen, Dachkanten, Motorhaube) verdeckt wird. Dadurch wird es dem Fahrer erschwert, Schätzungen der Dynamik anderer Sehobjekten und des eigenen Fahrzeugs vorzunehmen.

Ursächlich hierfür ist, dass der Mensch in aufrechter stehender Haltung Entfernungen am besten abschätzen kann. Sehr hohe Standpositionen (z.B. auf einem Turm) und sehr niedrige (liegende) Positionen machen es dem Menschen nahezu unmöglich, Entfernungen ohne Hilfsmittel bzw. in ihren Ausmaßen bekannte Hilfsobjekte abzuschätzen.

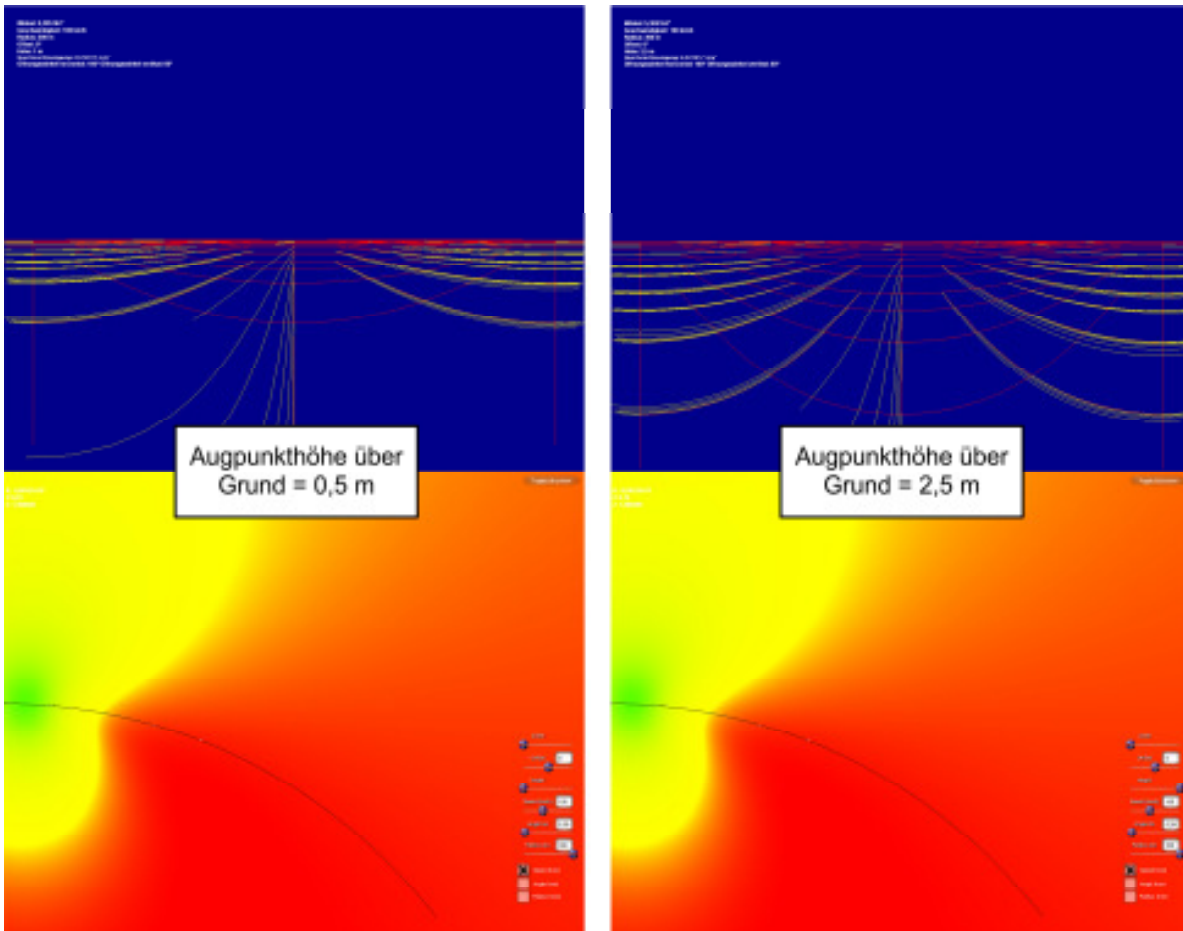


Abbildung 133: Auswirkung der Veränderung der Augpunkthöhe über der Fahrbahn in der Fahrer- und Draufsicht

3.3.2.8 Zusammenfassung der Ergebnisse und Rückschlüsse

Zu klären bleibt noch die Frage, ob bei Objekten, die nicht in der Fahrbahnebene liegen oder auch bei gekrümmter Fahrbahn (z.B. Steigungen oder Kuppen), ebenso die genannten Verhältnisse der Bildverschiebung gelten. Abbildung 134 soll veranschaulichen, wie die Verhältnisse sind. Grundsätzlich können drei Arten von Ebenen unterschieden werden, nämlich Ebenen unterhalb der Augenhöhe, Ebenen oberhalb der Augenhöhe und die Ebene auf Augenhöhe. Grundsätzlich ist die Bildverschiebung für Objekte die auf einer Ebene oberhalb der Augenhöhe ist gleich einer Ebene unterhalb der Augenhöhe, wenn beide Ebene gleichweit von den Augen entfernt sind und die Objekte von der Mittenachse in Querrichtung ebenso die gleichen Abstände aufweisen.

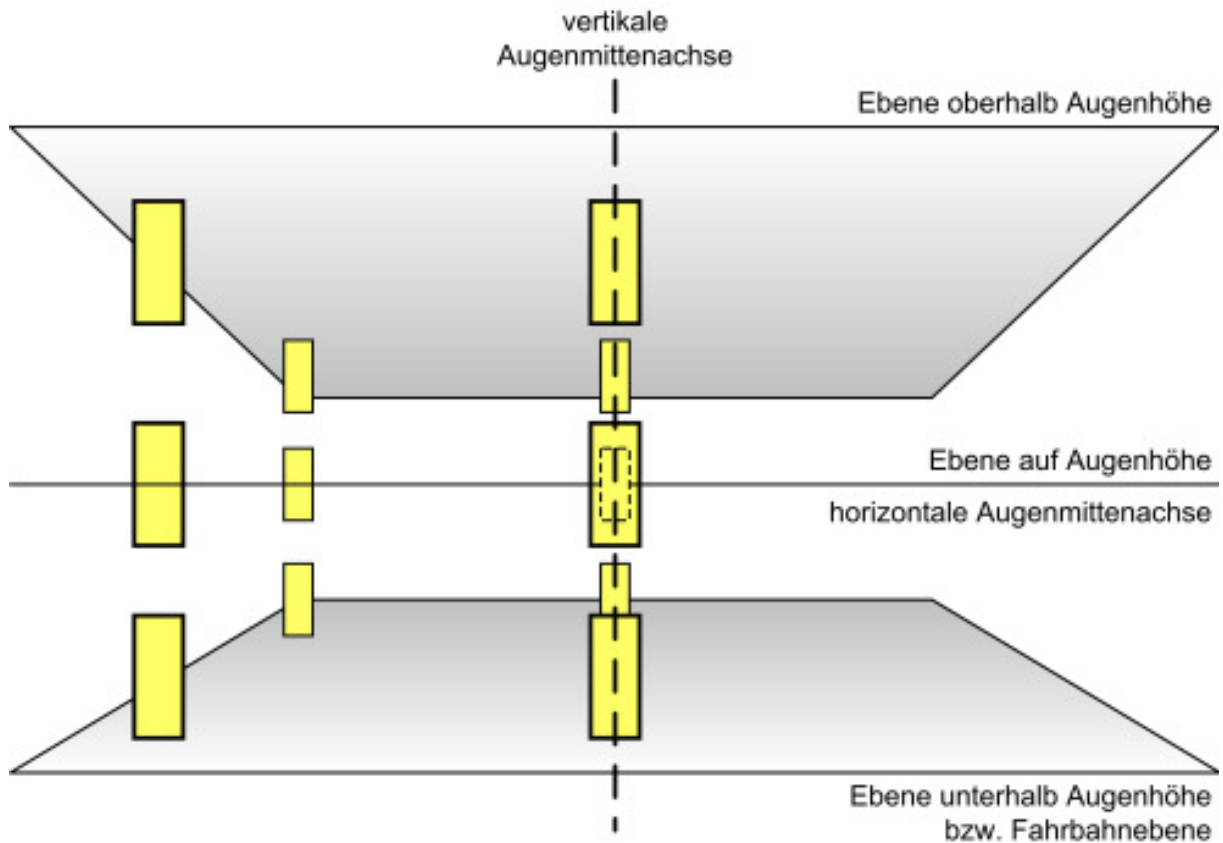


Abbildung 134: Prinzipielle Darstellung von Objekten unterschiedlicher Höhe über der Fahrbahn zur Klärung der Bildverschiebungsauswirkung dieser Objekte

Der Kreuzungspunkt aus vertikaler und horizontaler Augenmittenachse entspricht im vorliegenden Fall dem Zentrum des Auseinanderfließens. Objekte die exakt auf diesem Kreuzungspunkt liegen, unterliegen der kürzesten Bildverschiebung. Eine Abschätzung der Annäherung oder Entfernung zum Beobachter ist hier am schwersten möglich, da die Vektoren an dieser Stelle im Blickfeld am kürzesten und somit eher Gefahr laufen unterhalb der dynamischen Wahrnehmungsschwelle von ca. 2'/s zu fallen. Je weiter die Objekte entfernt liegen, desto eher ist eine Größenänderung unterhalb der erwähnten Wahrnehmungsschwelle. Es sei nochmals erwähnt, dass die angesprochenen Gesetzmäßigkeiten für den Fall gelten, dass die Bewegungsrichtung und Bewegungsgeschwindigkeit unverändert bleibt. Es spielt dabei keine Rolle, ob der Fahrer seine Blickrichtung ändert.

Wie schon erwähnt, nutzt der Fahrer auch andere Bildinformationen, die bisher nicht mit in die Betrachtung gezogen wurde. Dazu gehören unter anderem

- die Disparitäten,
- die Verdeckung zweier oder mehrerer Objekte,
- die relative Größe von Objekten zueinander,
- die Größe bekannter und geläufiger Objekte und
- der Schattenschlag.

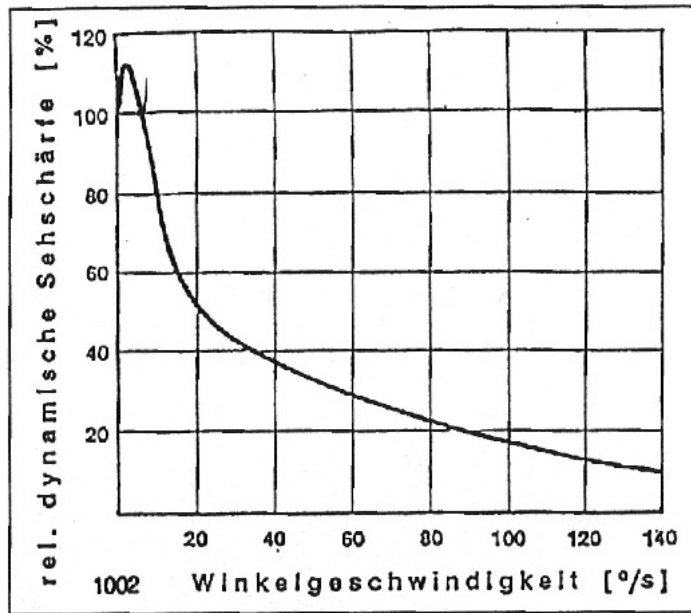


Abbildung 135: Relative dynamische Sehschärfe in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit (Winkelgeschwindigkeit) eines Objekts (Schierz 2001, S. 23)

Eine wichtige menschliche Eigenschaft in Bezug auf die Wahrnehmung ist die lokale Unschärfe. Sie stellt neben der statischen und dynamischen Wahrnehmungsschwelle eine weitere Qualitätsgrenze des menschlichen Sehnsinns dar. Wie in Abbildung 135 (Schierz 2001, S. 23) zu erkennen ist, nimmt die Sehschärfe für ein Objekt (dieses muss nicht unbedingt zusätzlich zur Welt eine Relativgeschwindigkeit aufweisen) mit zunehmender Bewegungsgeschwindigkeit (Winkelgeschwindigkeit) ab. Ursache ist, dass zwei oder mehrere Rezeptoren des Auges hintereinander in einem so knappen Zeitrahmen gereizt werden, dass das Objekt verschwommen erscheint (Schierz 2001, S. 23). Das kann so weit gehen, dass das Objekt als solches nicht mehr wahrgenommen wird, obwohl es im unbewegten Zustand große genug wäre, um erkannt zu werden, wie das beispielsweise bei einem Projektil der Fall ist.

Es wird nun vermutet, dass der Fahrer mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit seinen Blick weiter nach vorne richtet (hier ist die Vorausschauzeit gemeint), weil er im Nahbereich relevante Objekte nicht mehr scharf sehen kann und sich dadurch für ihn kein Informationsgewinn mehr ergibt. Jedoch ist das Problem, dass die Grenze zur statischen Welt mit zunehmender Geschwindigkeit sich nicht weiter vom Fahrzeug weg bewegt. Abbildung 136 verdeutlicht nochmal den beschriebenen Effekt. Durch die Vergrößerung des Bereichs lokaler Unschärfe, versucht der Fahrer den Blick so weit nach vorne zu nehmen, dass er zunehmend in Konflikt mit der Grenzlinie von statischer und dynamischer Wahrnehmungswelt zu kommen scheint. Damit lässt sich sagen, dass der Fahrer ab ein Geschwindigkeit von 120 km/h ein gesteigertes Risiko eingeht.

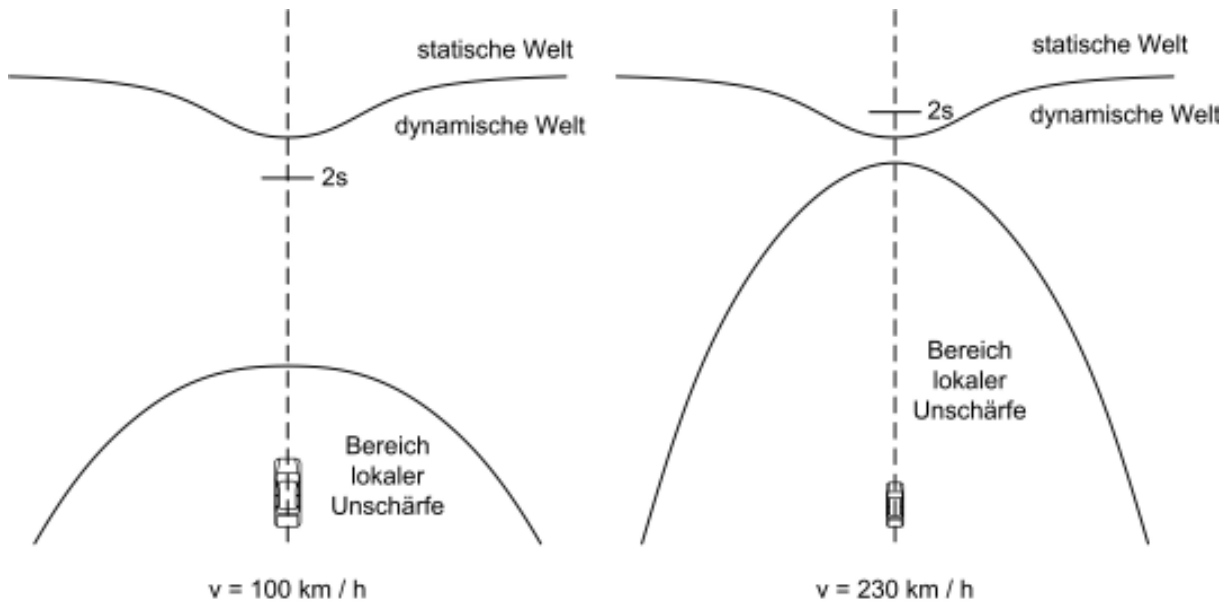


Abbildung 136: Prinzipielle Darstellung des Bereichs lokaler Unschärfe und der Grenzlinie der statischen und dynamischen Welt bei mittlerer und hoher Fahrgeschwindigkeit (Grenzlinienverlauf entstammt Softwaresimulation, Bereich lokaler Unschärfe geschätzt)

Die nachfolgende Tabelle 24 zeigt zusammenfassend die bereits erwähnten Verstellauswirkungen auf die Bildverschiebungslinien und –vektoren, sowie der Grenzlinie zwischen der dynamischen und statischen Wahrnehmungswelt bei Veränderung der Sitzhöhe (in zwei Schritten) und der Fahrgeschwindigkeit (in drei Schritten).

| | veränderter Fahrzeugparameter | | | | |
|---|---|--|---|---|---|
| | Sitzhöhe | | Fahrgeschwindigkeit | | |
| | erhöht (ca. 2.5 m über Grund) | niedrig (ca. 0.5 m über Grund) | ca. 30 km/h | ca. 100 km/h | ca. 200 km/h |
| Änderung Vektorenrichtung ggü. Normalfahrt | ←————→ | | ————→ | | |
| | unverändert | | unverändert | | |
| Längenänderung (Linien und Vektoren) | ←————→ | | ————→ | | |
| | nahezu nicht erkennbar | | werden in Längsrichtung entsprechend der Geschwindigkeitszunahme länger | | |
| Grenzlinie dynamische Wahrnehmungsschwelle (2'/s) | ←————→ | | ————→ | | |
| | nahezu unverändert | | Zipfel der Grenzlinie prägt sich mehr aus. Zone der dynamischen Welt vergrößert sich im Bereich des Kurvenäußeren (s. Abb. 128) | | |
| Zipfel dynamische Wahrnehmungsschwelle | gute Sicht in Bereich „dynamische Wahrnehmungswelt“ | kann optisch durch Fahrzeugsilhouette verdeckt sein (Motorhaube) | liegt leicht innerhalb der Kurve und zwischen 2-3s Vorausschau | liegt leicht innerhalb der Kurve und bei ca. 2s Vorausschau | liegt leicht innerhalb der Kurve und unterhalb von 2s Vorausschau |

Tabelle 24: Änderung im Bildverschiebungsvektorenfeld in Abhängigkeit unterschiedlicher Fahrzeugparameter

Während Tabelle 24 die Verstellauswirkungen zeigt, ist in der Tabelle 25 zusammenfassend dargestellt, welche Änderungen sich im dem Fahrer dargebotenen Bild gegenüber einer Normalfahrt ergeben. Hier lassen sich die mutmaßlich genutzten Zusatzbildinformationen für den Fahrer errahnen. Die Tabelle untersucht die Fälle „Normalfahrt“ als Referenz für eine Kurvenfahrt, „Fahren wie auf Schienen“, sowie eine stark übersteuernden und untersteuernden Fall und die Übergangssituation zum Übersteuern und Untersteuern.

Weiterhin werden eine absolut genaue Geradeausfahrt, ein schief laufendes Fahrzeug und ein seitliches paralleles Versetzen betrachtet. Für alle Fälle werden

- die Änderung der Richtung von Bildverschiebungslinien und – vektoren,
- die Änderung des Längsanteils,
- die Änderung des Queranteils,
- die Änderung der Grenzlinie zwischen dynamischer und statischer Wahrnehmungswelt,
- die Änderung des „Zipfels“ der Grenzlinie zwischen dynamischer und statischer Wahrnehmungswelt,
- die Änderung des Zentrums des Auseinanderfließens und
- weitere Auffälligkeiten von Änderungen im Bild beobachtet.

| Fahrsituation | | Änderung Richtung Vektoren bzw. Bildverschiebungslinien | Änderung Längsanteil | Änderung Queranteil | Grenzlinie dynamische Wahrnehmungsschwelle (2/s) mit Fahrbahn | „Zipfel“ der Grenzlinie der dynamischen Wahrnehmungsschwelle | Zentrum des Auseinanderfließens | allgemeine Auffälligkeiten im Bild | Abb. |
|---|---|---|---------------------------|----------------------------------|--|--|---|--|------------|
| Normalfahrt (Referenz Kurve) | Rechtskurve (ideale ebene Fahrbahn, konstanter Kurvenradius) | (Referenz Kurve) | (Referenz Kurve) | (Referenz Kurve) | siehe Abbildung 122 | siehe Abbildung 122 | (Referenz Kurve) | - | 121 |
| „Fahren wie auf Schienen“ | | - | - | - | - | - | - | Bildverschiebungslinien kreuzen sich nicht | - |
| Übergang zum Übersteuern (positiver Offset) | | Vektoren und Linien zeigen insgesamt mehr nach links | | | dynamische Wahrnehmungswelt öffnet mehr im kurvenäußeren Bereich | wandert zum Kurveninneren | wandert im Blickfeld nach rechts | Bildverschiebungslinien kreuzen sich | 129 130 |
| übersteuernd (positiver Offset) | | Vektoren und Linien zeigen insgesamt mehr nach links | | | dynamische Wahrnehmungswelt hat mehr Fläche im kurvenäußeren Bereich | liegt recht von Kurve (innerhalb von Kurve) | liegt ggü. Referenz rechts | Bildverschiebungslinien kreuzen sich | |
| Übergang zum Untersteuern (negativer Offset) | | Vektoren und Linien zeigen insgesamt mehr nach rechts | | | dynamische Wahrnehmungswelt schließt mehr im kurvenäußeren Bereich | wandert in Kurvenäußeren Bereich | wandert im Blickfeld nach links | Bildverschiebungslinien kreuzen sich | 131 132 |
| untersteuernd (negativer Offset) | | Vektoren und Linien zeigen insgesamt mehr nach rechts | | | dynamische Wahrnehmungswelt hat weniger Fläche im kurvenäußeren Bereich | liegt links von Kurve (außerhalb von Kurve) | liegt ggü. Referenz links | Bildverschiebungslinien kreuzen sich | |
| absolut genaue Geradeausfahrt (Referenz Geradeausfahrt) | | (Referenz Geradeausfahrt) | (Referenz Geradeausfahrt) | (Referenz Geradeausfahrt) | siehe Abbildung 126 | liegt auf Straßenmitte in Blickrichtung 0° | liegt in Sitzhöhe über dem Horizont in Blickrichtung 0° | - | 126 |
| schieflaufendes Fahrzeug | nach rechts | nach links | minimal kürzer | Anteil nach links | wandert in Fahrerblickrichtung (nicht gleich Fahrtrichtung) | driftet ab (nach links) | driftet ab (nach links) | - | 127 |
| seitliches paralleles Versetzen (z.B. durch Seitenwind) | nach rechts | In Richtung des Fahrzeugversatzes | keine Änderung | mehr in Richtung Fahrzeugversatz | unbekannt, da nicht simuliert (womöglich aber ggü. Referenz unverändert) | unbekannt, da nicht simuliert („Zipfel“ müsste mitwandern) | unbekannt, da nicht simuliert (Zentrum müsste mitwandern) | - | - |

Tabelle 25: Änderung im Bildverschiebungsvektorenfeld von bestimmten Fahrsituationen gegenüber einer Normalfahrt

Tabelle 26 zeigt die Hypothesen, die sich aus der Bildverschiebungsuntersuchung ergeben und ihre Effekte bzw. Konsequenzen für das Zusammenspiel Fahrer und Fahrzeug.

| Hypothese | Quelle bzw. basierend auf | Effekt(e) bzw. Konsequenzen für Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis aus Hypothese |
|---|---------------------------|--|
| Beim Anlenken der Kurve versuchen Fahrer Zentrum des Auseinanderfließens auf Kurvenmittelpunkt zu setzen | Land und Lee (1974) | Kompensationsaufgabe, zugehörige Regelstrecke (erste, zweite, dritte Ordnung) unbekannt |
| Korrektur, sobald Zentrum des Auseinanderfließens nicht mehr mit Kurvenmittelpunkt | Land und Lee (1974) | Fahrzeug kann nicht mehr in Kurve gehalten werden, Korrektur notwendig |
| Bei Geradeausfahrt blicken Fahrer etwas links vom Zentrum des Auseinanderfließens (Rechtsverkehr) | Land und Lee (1994) | - |
| Bei Sichtverdeckung auf die Kurve Abschätzung des Fahrers, wo Referenzpunkte im Bild liegen | - | Fahrer muss Zentrum des Auseinanderfließens schätzen |
| Das Zentrum des Auseinanderfließens bleibt bei konstanter Geschwindigkeit und absolut ebener Fahrbahn um die Sitzhöhe über dem Horizont | - | - |
| Das Zentrum des Auseinanderfließens sinkt beim Bremsen (Bremsnicken) relativ nach unten und beim Beschleunigen (Beschleunigungsnicken) steigt es nach oben | - | Keine wesentlichen Auswirkungen, jedoch sehr genaue Bestimmungsgröße für den Fahrer für die Nickbewegung des Fahrzeugs |
| Bei idealer Kurvendurchfahrt und konstantem Kurvenradius sind die Linien aus dem Zentrum des Auseinanderfließens (Bildverschiebungslinien) parallel zu den Linien der Kurve | - | - |
| Übergang zum Über- oder Untersteuern dadurch erkannt, dass Bildverschiebungslinien sich kreuzen | - | Möglicherweise Erkennungsmerkmal des unter- bzw. übersteuernden Fahrzeugs |
| Durch eine höhere Sitzposition bessere Sicht auf die Bildverschiebungsvektoren in größerer Entfernung | - | Gesteigertes Gefühl der Sicherheit und Fahrzeugkontrolle |
| Fahrer kann Zentrum des Auseinanderfließens auf 0,5 bis 1 Grad genau schätzen | Warren (1995) | Fahrer kann schief laufendes Fahrzeug sicher erkennen, wenn Zentrum des Auseinanderfließens 0,5 bis 1 Grad abweicht. |
| Der zeitliche Abstand für die Grenzlinie für die dynamischen Wahrnehmungsschwelle bei einem Sehfähigkeitswert (Visus) von 1 in etwa 2s | - | Fahrer konzentriert sich auf Objekte, die vorwiegend vor diesem zeitlichen Abstand von 2-3 Sekunden liegt. |
| Fahrer schauen bei hoher Geschwindigkeit u.a. nicht mehr in den Nahbereich, weil Bereich der lokalen Unschärfe größer wird | Schierz (2001) | Fahrer blickt über den Bereich der lokalen Unschärfe hinweg (blickt weiter nach vorne) |
| Die Sitzhöhe des Fahrers über der Fahrbahn hat keine einschränkende Auswirkung auf die Lage der Grenzlinie statische / dynamische Welt | - | Erhöhte Sitzposition erhöht jedoch die Übersichtlichkeit allgemein |
| Bei Nachfahrt, dunkler Fahrbahn und Nässe erhält der Fahrer nur noch wenig Informationen über die Bildverschiebung im Bereich der dynamischen Welt | - | Zunehmend schwierig, eigenes und dynamisches Verhalten anderer Fahrzeuge abzuschätzen |
| Beim Überholen kann der Fahrer Probleme bekommen, wenn die notwendige Vorausschauzeit bis in den Bereich der statischen Welt reicht (>2s) | - | Häufiges Verschätzen der Geschwindigkeit des Gegenverkehrs und der Länge des Überholweges |

Tabelle 26: Hypothesen aus der Untersuchung der Bildverschiebung bei Kurvenfahrt mit einem Kraftfahrzeug

Konsequenz für das Lenkgefühl ist, dass der Fahrer aus der visuellen Informationsaufnahme weitaus mehr Informationen nutzt als bislang angenommen. Dabei sind nicht nur solche Informationen von Bedeutung, die für die Antizipation und Vorausschau genutzt werden, sondern auch solche der Rückmeldung der Fahrzeugreaktion, die wiederum für das Nachregeln seitens des Fahrers wichtig sind.

In Tabelle 27 sind die Bildinformationsgrößen aus der Bildverschiebung aufgelistet und es ist dargelegt, welche Informationen diese Größen dem Fahrer in Bezug auf die Fahrzeugbewegung und die Regeltätigkeit liefern.

| Bildinformationsgröße | Liefert Information bezogen auf Fahrzeug | Liefert Information auf Regeltätigkeit |
|---|---|---|
| Bildverschiebungslinie | Zurückgelegter Weg | Kurshaltung Fahrzeug und Kursrichtung |
| Bildverschiebungsvektoren | Aktuelle Bewegungsrichtung eines Punktes bezogen auf 1 Sekunde | unbekannt, vermutlich bezieht sich Fahrer eher auf Bildverschiebungslinie |
| Zentrum des Auseinanderfließens | Nickwinkel, Über- und Untersteuern, seitliche Abweichung, schief laufendes Fahrzeug | Anfahren Kurve, Kurshaltung Kurve, Ausfahren aus Kurve, Geradeausfahrt |
| Kurvenmittelpunkt (bezogen auf eigene Fahrbahn) | Relative Lage des Fahrzeugs in der Kurve | Anfahren Kurve, Kurshaltung Kurve (nur bei Mittellinien gut schätzbar) |
| Scheitelpunkt der Kurve in der aktuellen Sicht | Relative Lage des Fahrzeugs in der Kurve | Kurshaltung Kurve |
| Grenzlinie Wahrnehmungsschwelle | Relative Lage des Fahrzeugs und Geschwindigkeit | Kurshaltung Kurve |
| Lage Grenzlinie dyn. Wahrnehmungsschwelle relativ zur Kurve | Über- und Untersteuern des Fahrzeugs | Kurshaltung Kurve bzgl. Über- und Untersteuern |

Tabelle 27: Bildinformationsgrößen und ihr Informationsgehalt bezogen auf die Bewegung des Fahrzeugs und die Regeltätigkeit des Fahrers

3.3.3 Versuch 3 – Berührungsflächen Hand-Lenkrad bei verschiedenen Lenkradkranzdicken

Versuch 3 soll Aufschluss darüber geben, inwieweit unterschiedliche Lenkradkranzdicken einen Einfluss auf die Geometrie der Berührfläche der Hände mit der Lenkradoberfläche bewirken und dadurch die rezeptiven Felder der Mechanorezeptoren in der Haut unterschiedliche berühren (siehe *Handwerker* 2004 und Kapitel 2.5.2.4).

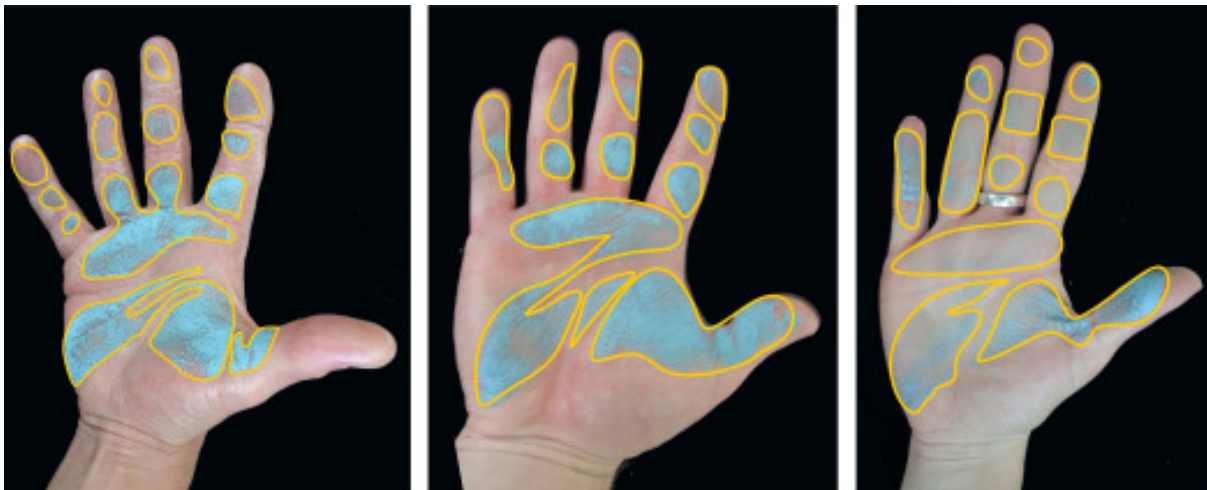
Der Versuch wurde jeweils mit drei Versuchspersonen an zwei verschiedenen Lenkrädern mit 28,6 mm (Umfang ca. 90 mm) und mit 33,1 mm (Umfang ca. 104 mm) Querschnittsdurchmesser am Kranz durchgeführt. Beide Lenkräder haben einen nahezu runden Kranzquerschnitt. Die Querschnittsdurchmesser wurden an mehreren Stellen gemessen, wobei jeweils der größte Wert gewählt wurde, da nicht zu erwarten ist, dass der Fahrer das Lenkrad im Griff mit allzu hoher Kraft hält. Die Versuchspersonen wurden angehalten eine Handhaltung über den oberen Speichen einzunehmen und den Kranz mit eingehängtem Daumen zu umschließen (siehe Abbildung 137).



Abbildung 137: Gemessene Handposition auf einem Lenkrad mit vergleichsweise dünner Lenkradkranzdicke ($\varnothing = 28,6 \text{ mm}$)

Anhand eines blauen Kreideabdrucks lassen sich die Kontaktflächen des Lenkrades auf der Hand nachvollziehen. Mit Hilfe des Abdrucks kann dann eine Aussage darüber getroffen werden, ob die unterschiedliche Lenkradkranzdicke unterschiedliche Abdruckflächen ergeben und dadurch eventuell die rezeptiven Felder der einzelnen Hautsensoren (siehe Abbildung 56) unterschiedlich stimuliert werden.

Die drei herangezogenen Versuchspersonen haben eine Breite der Hand (Messung über die Fingerwurzeln), die jeweils dem 76. Perzentil männlich, dem 50. Perzentil männlich und dem 40. Perzentil weiblich entspricht (Jürgens 1999, B-1.2.63).



50. Perzentil männlich

76. Perzentil männlich

40. Perzentil weiblich

Abbildung 138: Verteilung der Berührfläche zwischen Hand und Lenkrad unterschiedlich großer Hände beim Lenkrad mit kleiner Lenkradkranzdicke ($\varnothing = 28,6 \text{ mm}$)

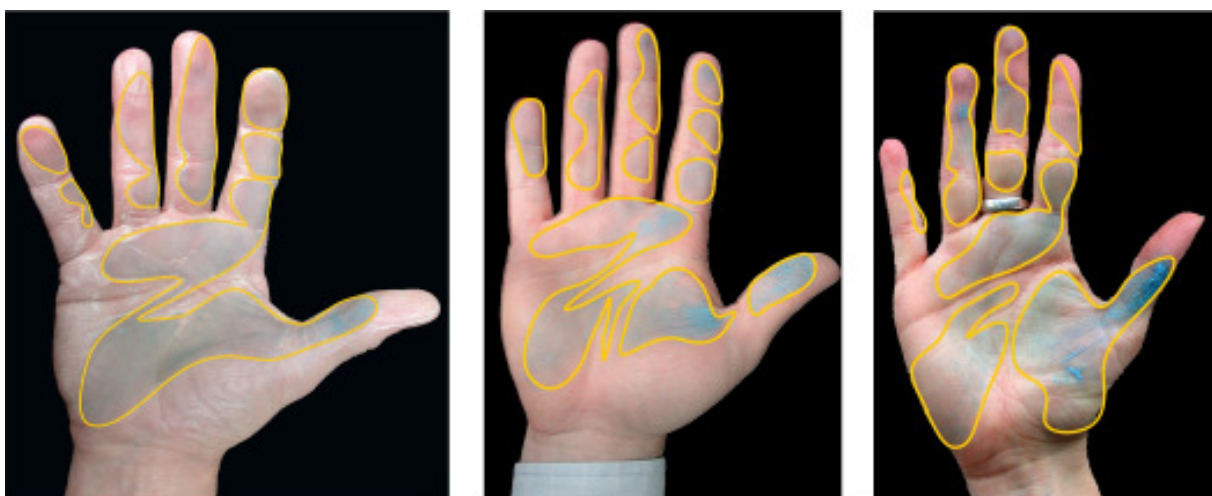
In Abbildung 138 sind die Abdrücke der drei Perzentile für eine kleine Lenkradkranzdicke von 28,6 mm Durchmesser abgebildet. Größere Unterschiede zwischen den einzelnen Perzentilen lassen nicht nur im Bereich des Daumens und beim Verbund einzelner Abdruckflächen erkennen.

Zum Vergleich wurde Messung an einem Lenkrad mit größerer Lenkradkranzdicke vorgenommen. Die Probanden sollten ebenso wie beim Versuch zuvor ihre Daumen oberhalb der Speiche einhängen (siehe Abbildung 139).



Abbildung 139: Gemessene Handposition auf einem Lenkrad mit großer Lenkradkranzdicke ($\varnothing= 33,1\text{ mm}$)

Die Unterschiede unter den einzelnen Perzentilen für die große Lenkradkranzdicke ist ausgeprägter als bei der kleineren Lenkradkranzdicke. Vor allem das weibliche Perzentil scheint im Bereich des Daumenballens eine größere Auflagefläche zu haben, allerdings liegen in diesem Bereich keine markanten Stimulationsfelder der vier Hautsensoren. Ebenso liegen die kleinen Finger bei allen Perzentilen weniger gut am Lenkrad auf, als bei einer kleineren Lenkradkranzdicke, wobei aber auch in dem angesprochenen Bereich keine nennenswerten rezeptiven Felder auf der Handfläche betroffen sind.



50. Perzentil männlich

76. Perzentil männlich

40. Perzentil weiblich

Abbildung 140: Verteilung der Berührfläche zwischen Hand und Lenkrad unterschiedlich großer Hände beim Lenkrad mit großer Lenkradkranzdicke ($\varnothing= 33,1\text{ mm}$)

Aus dem Versuch lassen sich folgende Aussagen ableiten:

1. Der Einfluss der Lenkradkranzdicke auf die Berührfläche und somit auf die rezeptiven Felder der Mechanorezeptoren unterscheidet sich nicht erkennbar und kann damit in der Wirkung auf das Lenkgefühl nicht eindeutig nachgewiesen werden.
2. Männliche Hände sind zwar überwiegend breiter als weibliche, haben aber keine wesentlich größere bzw. andere Berührgeometrie. Es scheint so, dass die ausgeprägteren Handfalten bei den männlichen Versuchspersonen etwas mehr Einfluss auf die Berührflächengeometrie haben als bei den weiblichen.
3. Bei der weiblichen Versuchsperson liegt bei einem dicken Lenkradkranzquerschnitt der Daumenballen deutlich mehr auf als bei einem kleineren Querschnitt (siehe Abbildung 140 rechtes Bild). Bei den beiden männlichen Perzentilen ist dieser Effekt nicht sichtbar.
4. Die Berührung des Daumens weist bei den beiden männlichen Probanden erhebliche Unterschiede auf (liegt beim 50. Perzentil nicht richtig auf), was aber ohne Bedeutung ist, da im Daumen kaum Mechanorezeptoren vorhanden sind.
5. Der Handballen, auf dem die für Vibrationsempfindungen wichtigen Pacini-Körperchen sitzen, hat nahezu bei allen Probanden einen gleich guten Berührkontakt.
6. Tendenziell kann bei größerer Lenkradkranzdicke ein besseres Aufliegen der Fingergliedflächen beobachtet werden.

Weiterhin kann festgestellt werden, dass durch den Einsatz von Lenkradtasten und die Verwendung zusätzlicher Lenkstockhebel (z.B. für Tempomat), die Finger während des Fahrens mit einem geringeren Zeitanteil auf der Lenkradoberfläche aufliegen (Abbildung 141). Während der Fahrt ist zu erwarten, dass die Finger für Fahrstreifenwechsel, Abbiegen, Fernlicht, Lichthupe und der Bedienung von Zusatzfunktionen (z.B. Bordcomputeranzeige) fast während der gesamten Fahrzeit auf dem linken Lenkstockhebel aufliegen.



Abbildung 141: Typische Handhaltung der linken Hand bei Bedienung von Blinkerhebel mit Zusatzfunktion und Lenkradtasten

Bei den Fahrversuchen zu Kapitel 3.3.4 kam zum Vorschein, dass zu große Lenkradkranzdicken zu einem Unsicherheitsgefühl bei dem Fahrer bzgl. des Lenkens führen können. Offensichtlich ist dabei entscheidend, ob der Fahrer bzw. die Fahrerin das Lenkrad noch vollständig mit einem Umfassungsgriff umgreifen kann. Für die Auslegung der Lenkradkranzdicke müsste man sich also am 5. Perzentil weiblich des entsprechenden Maßes

für die Umfassung zur Auslegung berücksichtigt werden. Um einen Umfassungsgriff zu gewährleisten, dürfte das Lenkrad nicht dicker als 33,74 mm sein. Der Umfang entspricht unter der Voraussetzung eines kreisrunden Querschnitts 106 mm (*Jürgens* 1999, B-1.2.68 und B-1.4.68).

Insgesamt kann also behauptet werden, dass die Lenkradkranzdicke eher einen Einfluss auf das Komfortempfinden (Komfort im Sinne von Gefallen und wie in der vorliegenden Arbeit definiert) besitzt, als physiologisch begründbare Effekte.

3.3.4 Versuch 4 – Realfahrversuch mit vier unterschiedlichen Lenkungen und Fahrzeugen

Ein weiterer Versuch zum Lenkgefühl ist ein realer Fahrversuch auf öffentlicher Straße mit vier Fahrzeugen und Probanden, die allesamt als Normalfahrer einzuordnen sind. Der Versuch teilt sich vier Einzelversuche auf. Alle Fahrzeuge stammen von ein und demselben Hersteller, sind aber den vier verschiedenen Fahrzeugklassen

- § Roadstersegment (BMW Z4),
- § Mittelklasse (BMW 3er),
- § obere Mittelklasse (BMW 5er) und
- § SUV-Segment (BMW X3) zuzuordnen.

Ihre Lenkungscharakteristik unterscheidet sich in den objektiven Lenkungsparametern deutlich voneinander. Die Fahrzeuge wurden bis auf das Fahrzeug der oberen Mittelklasse in ihren Fahrdynamik- und Lenkungseigenschaften vermessen, wobei die Daten nicht zur Veröffentlichung bestimmt sind.

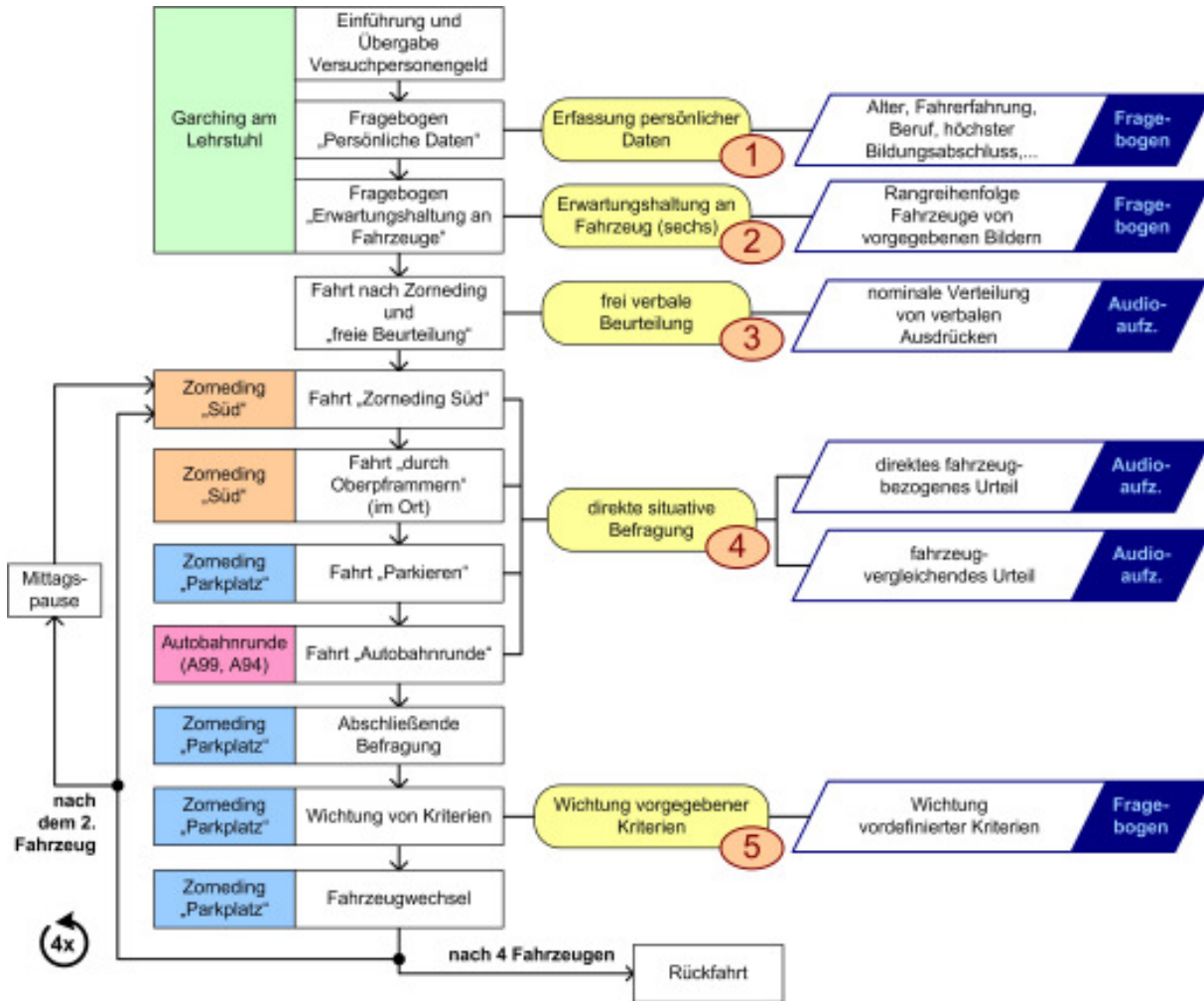


Abbildung 142: Versuchsablaufschema des Versuchs Nr. 4 – Realfahrversuch mit vier unterschiedlichen Lenkungscharakteristiken und Fahrzeugen

In Abbildung 142 ist der Versuchsablauf für einen Probanden dargestellt. Zunächst wurden die persönlichen Daten des Probanden erfasst (siehe Abbildung 142 Nr. 1), woraus sich die charakteristischen Eigenschaften des Probandenkollektivs ergeben, was weiter unten dargelegt wird. Als erster Versuchsteil wurden den Probanden Fahrzeugbilder vorgelegt, mit Hilfe derer sie bezogen auf vorgegebene Sätze eine Rangreihenfolge aller Fahrzeuge erstellen sollten, die wiederum den Grad ihrer Zustimmung widerspiegelt (siehe Abbildung 142 Nr. 2). Im Anschluss daran wurden die Probanden auf die vier Fahrzeuge verteilt. Die Fahrt ins Testgebiet dauerte ca. 45 Minuten und wurde dazu genutzt, dass die Probanden die Fahrzeuglenkung frei und ohne gezielte Befragung beschreiben sollten (siehe Abbildung 142 Nr. 3 und Abbildung 143). Diese Fahrt wurde jeweils nur einmal pro Versuchstag durchgeführt.

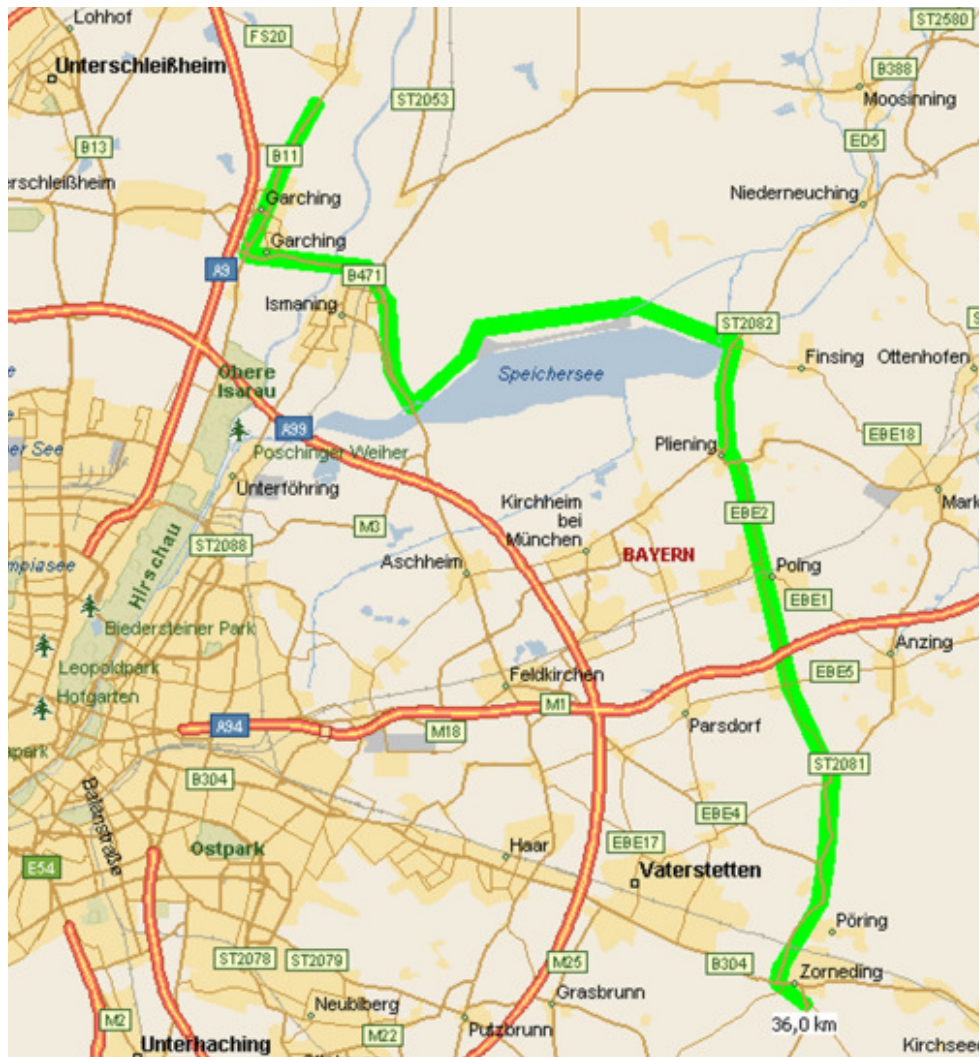


Abbildung 143: Versuchsstrecke der Transferfahrt ins Zielgebiet (östlich von München) genutzt für die freie verbale Lenkungsbeschreibung durch die Probanden

Im Zielgebiet wurden alle vier Fahrzeuge von jedem Probanden auf den vier Abschnitten (innerorts, Autobahn, Landstraße, Parkplatz) gefahren (siehe Abbildung 144), wobei den Probanden bei diesen Abschnitten gezielte Fragen gestellt wurden. Nach zwei Fahrzeugen erfolgt eine Pause von ca. 1,5 Stunden (siehe Abbildung 142 Nr. 4). Nach allen vier Fahrzeugen wurde zum Lehrstuhl zurückgefahren.

Nach jedem gefahrenen Fahrzeug wurde den Probanden ein Fragebogen übergeben, bei dem sie bestimmte Kriterien wichten sollten (Abbildung 142 Nr. 5). Die Kriterien beziehen sich auf die Lenkungs- und Handlungseigenschaften der Fahrzeuge.



Abbildung 144: Vier verschiedene Versuchsstreckenabschnitte im Versuchszielgebiet (östlich von München)

Die Versuche wurden an sechs Testtagen durchgeführt. Die Tabelle 28 zeigt die Witterungsverhältnisse an diesen Testtagen. Die Temperaturen waren bis auf einen Tag vergleichbar, ebenso die Fahrbahnverhältnisse, die bis auf einen Tag allesamt trocken waren.

| | | 10. Mai 2005 | 11. Mai 2005 | 12. Mai 2005 | 13. Mai 2005 | 18. Mai 2005 | 20. Mai 2005 |
|----------------------|-------------|----------------|----------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| Außen-temperatur* | vormittags | 12,0° | 12,0° | 10,0° | 10,0° | 8,0° | 13,0° |
| | nachmittags | k.A. | 13,0° | 14,0° | 16,0° | 9,0° | 19,5° |
| Wetter | vormittags | leicht bewölkt | sonnig | sonnig | sonnig | stark bewölkt | sonnig |
| | nachmittags | | leicht bewölkt | | | | |
| Fahrbahnverhältnisse | | feucht | trocken | trocken | trocken | trocken | trocken |

* Messung mit Hilfe der vorhandenen Außentemperaturanzeige in den Fahrzeugen

Tabelle 28: Witterungsverhältnisse an den sechs Versuchstagen

Insgesamt wurden 24 Probanden für den Fahrversuch herangezogen. Das Kollektiv besteht aus 17 männlichen (70,8%) und 7 weiblichen (29,2%) Probanden. Das durchschnittliche Alter beträgt 41,7 Jahre (44,6 Jahre bei den Frauen, 40,5 Jahre bei den Männern). Die Altersverteilung ist der Abbildung 145 zu entnehmen, worin zu erkennen ist, dass die meisten Probanden aus der Altersklasse 21-25 Jahre und aus der Altersklasse 56-60 Jahre stammen.

Unter den Probanden befanden sich ein Paar zweieiige männliche Zwillinge. Bei den Versuchen werden v.a. beim Subjektivurteile der zweieiigen Probanden zusätzlich statistische Auswertungen vorgenommen.

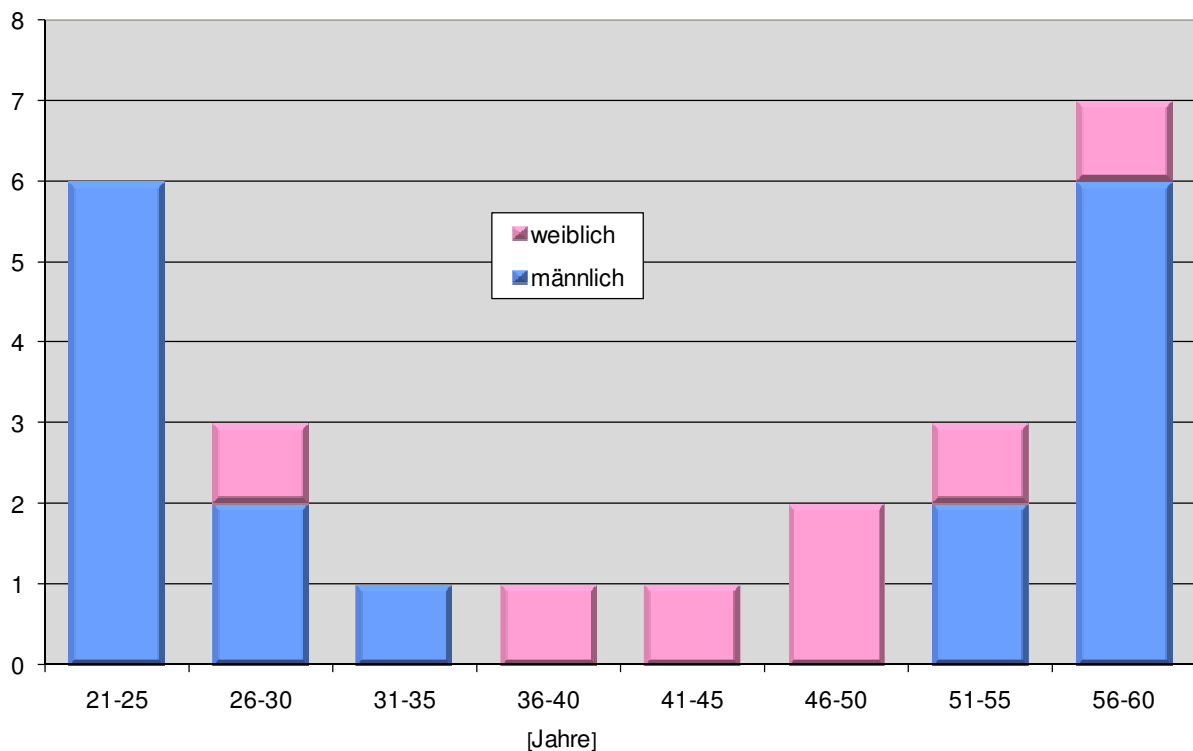


Abbildung 145: Altersverteilung des Probandenkollektivs zum Versuch Nr. 4

Es wurde ebenso abgefragt, ob die Probanden einen technischen oder nichttechnischen Beruf ausüben und welchen höchsten Bildungsabschluss sie haben. 62% aller Probanden haben einen Hochschulabschluss, Abitur oder eine Promotion als höchsten Bildungsabschluss bzw. akademischen Grad, während 38% über eine Ausbildung oder Lehre verfügen. 54,2% der Probanden üben bzw. übten einen technischen Beruf aus und 45,8% einen nichttechnischen.

Die jährlich gefahrenen Kilometer reichen von 2.000 km bis 50.000 km. Die Verteilung der jährlichen Kilometerleistung ist der Abbildung 146 zu entnehmen. Dort und in der Abbildung 145, sowie in der Abbildung 147 sind zusätzlich Unterscheidungen zwischen männlichen und weiblichen Probanden vorgenommen.

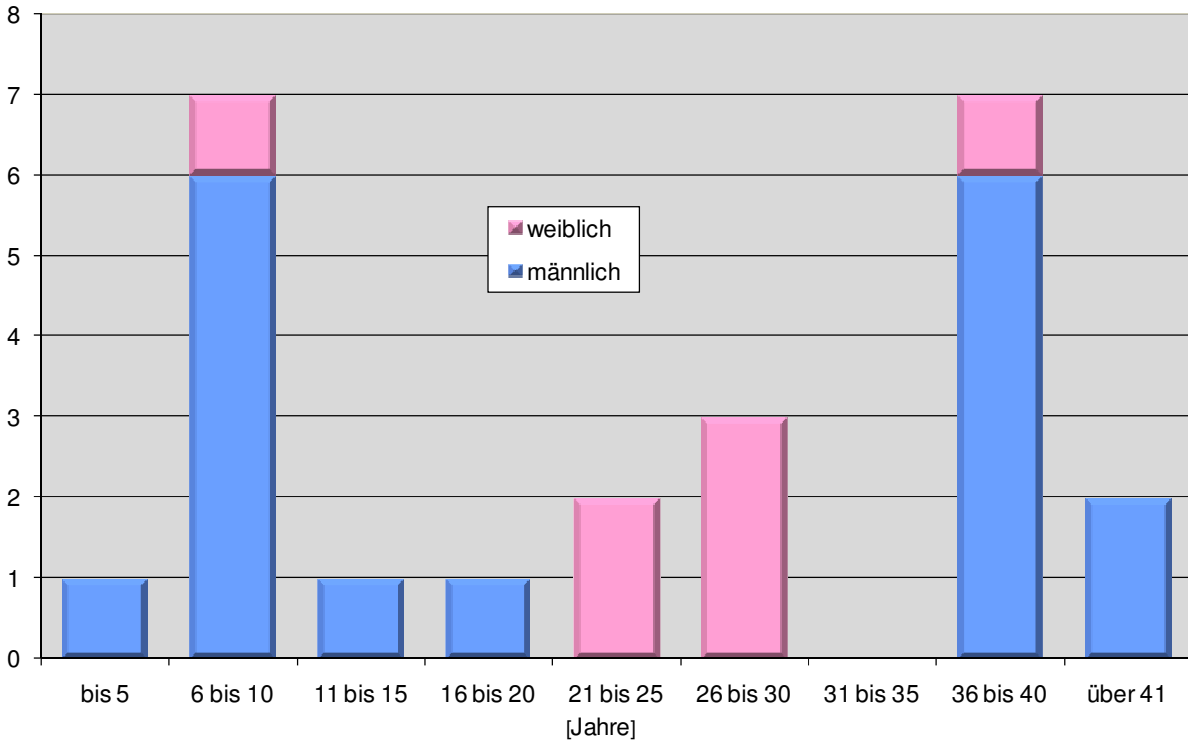


Abbildung 146: Fahrleistung des Probandenkollektivs mit Geschlechterunterscheidung

Die Fahrerfahrung in Jahren entspricht in ihrer geometrischen Verteilung in etwa der der Altersverteilung (U-förmig und Verteilung männlich / weiblich), da die meisten Probanden mit 18 Jahren ihren Führerschein erhielten. Die Spanne des Führerscheinbesitzes reicht von fünf Jahren bis über 40 Jahren. Die Fahrer sind allesamt als Normalfahrer einzuordnen.

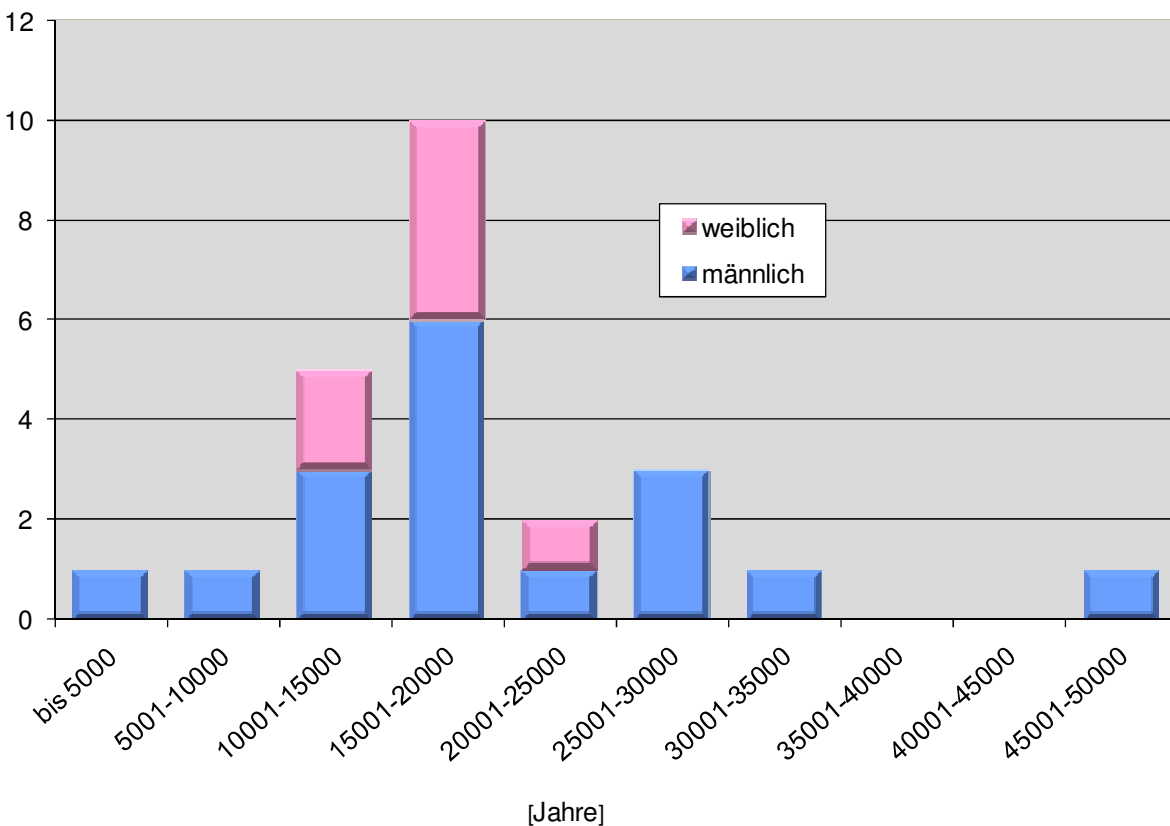


Abbildung 147: Fahrerfahrung des Probandenkollektivs mit Geschlechterunterscheidung

Die Versuchsfahrt teilt sich in vier einzelne Versuchsteile bzw. Auswertungen wie es in Tabelle 29 dargestellt ist. In der Tabelle sind die Versuchsart, die zugehörigen Auswertungen mit den notwendigen statistischen Tests aufgeführt.

| | Versuchsart | Auswertung | Statistik |
|--|-------------------------------------|--|--|
| Erwartungshaltung Kunde | Fragebogen zu imaginären Fahrzeugen | Reihenfolgenbildung | Mittelwert und Standardabweichung, Varianzanalyse, T-Test |
| verbale Beschreibung Lenkung | Realfahrversuch | Nennung von Schlüsselwörtern Abhängigkeit der Nennung von pers. Daten | nominal Chi-Quadrat-Test („Abhängigkeitstest“) |
| Einzelbeurteilung Kunde | Realfahrversuch | Zuordnung positives, eingeschränkt negatives und negatives Urteil Abweichung Expertenbeurteilung Absicherung Urteilsabhängigkeit von Fahrzeugreihenfolge | nominal (prozentual) nominal (prozentual) gegenüber gleichen oder ähnlichen Expertenkriterien Chi-Quadrat-Test („Abhängigkeitstest“) |
| Wichtung Kriterien nach Einzelfahrt | Fragebogen zu Realfahrzeugen | Reihenfolgenbildung vorgegebener Kriterien | Mittelwert und Standardabweichung, Varianzanalyse, T-Test |

Tabelle 29: Versuchsteile mit zugehöriger Auswertung und Tests zur statistischen Absicherung

Zunächst wurde die Erwartungshaltung der Kunden an bestimmte Fahrzeuge auf Grundlage vorgegebener Fahrzeugbilder und Fahrzeugeigenschaften ermittelt. Als Auswertung wurde eine Reihenfolge bezogen auf die vorgegebenen Fahrzeugeigenschaften ermittelt. Die statistische Absicherung erfolgt durch Mittelwertbildung, Standardabweichung, sowie der Varianzanalyse und T-Tests.

Während der Transferfahrt ins Testgebiet sollten die Probanden die Lenkung mit eigenen Worten frei verbal beschreiben. Hierzu wurden den Probanden keine konkreten Fragen gestellt. Zur Auswertung wurde zum einen die Nennungen zu einzelnen Fahrzeugen nominal erfasst und zum anderen wurde die Antworten mit Hilfe eines Chi-Quadrat-Tests auf Abhängigkeit von persönlichen Merkmalen (u.a. Alter) getestet.

Bei den Einzelbeurteilungen durch die Probanden wurden drei verschiedene Auswertungen vorgenommen. Zunächst wird auf nomineller Basis (Nominalskalenniveau) bestimmt, inwieweit zu einzelnen Kriterien die Kunde die Fahrzeuge als positiv, eingeschränkt positiv bzw. negativ und negativ bewerten. In einer weiteren Auswertung wurde dieses Probandenurteil mit dem Expertenurteil verglichen, wobei die Abweichungen bei den

einzelnen Fahrzeugen und Kriterien bestimmt wurde. Zur statistischen Absicherung wurde ein Chi-Quadrat-Test durchgeführt, der absichern soll, dass die Urteile der Probanden nicht von der Fahrzeugreihenfolge abhängen, wie z.B. dass das erstgefahrte Fahrzeug grundsätzlich besser oder schlechter beurteilt wurde.

Nach jedem Fahrzeug wurden die Probanden mit Hilfe eines Fragebogens dazu aufgefordert, Kriterien zu den gefahrenen Fahrzeugen zu gewichten. Als Auswertung ist die Reihenfolge der einzelnen Fahrzeuge von Bedeutung, die mit Hilfe von Mittelwert, Standardabweichung, Varianzanalyse und T-Test bestimmt wurde.

Die detaillierte Beschreibung der einzelnen Versuche ist den nachfolgenden Kapiteln zu entnehmen.

3.3.4.1 Erwartungshaltung an vorgegebene Fahrzeuge

In einem ersten Versuchsteil sollten die Probanden anhand vorgelegter Bilder und vorgefertigter Sätze eine Rangreihenfolge bilden, wobei die Rangreihenfolge die Meinung der Probanden widerspiegelt, wie stark die Aussagen in den Sätzen auf die einzelnen Fahrzeuge zutreffen. Ziel der Befragung war es herauszubekommen, inwieweit die Erwartungshaltung der Probanden in Bezug auf die Lenkung des Fahrzeugs abhängig von bestimmten Fahrzeugklassen ist. Wichtig ist auch, dass die Personen, die Fahrzeug zuvor nicht fuhren, sondern rein aufgrund von vorgelegten Bildern urteilen sollten. Dazu wurden den Probanden Fotos von Fahrzeugen vorgelegt, die jeweils die entsprechende Fahrzeugklasse repräsentieren. Die Probanden sollten jeweils die sechs Fahrzeuge zu 19 Sätzen (siehe Abbildung 148, Abbildung 149 und Abbildung 150) so in eine Rangreihenfolge bringen, dass ihre Erwartungshaltung an das einzelne Fahrzeug widergespiegelt wird. Fahrzeuge, die gleichwertig angesehen wurden, wurden mit dem gleichen Rang bewertet.

Folgende Fahrzeuge wurden den Probanden in Form von Abbildungen vorgelegt:

- Fahrzeug A als ein Fahrzeug der Mittelklasse,
- Fahrzeug B als ein Fahrzeug der oberen Mittelklasse,
- Fahrzeug C als ein Fahrzeug der Oberklasse,
- Fahrzeug D als ein Fahrzeug aus dem Roadstersegment,
- Fahrzeug E als ein SUV-Fahrzeug und
- Fahrzeug F als ein Fahrzeug Kompaktklasse.

Das Ergebnis ist in den Abbildung 148, Abbildung 149 und Abbildung 150 durch den Mittelwert aller 24 Probanden zu erkennen. Zusätzlich zum Mittelwert ist die Standardabweichung miteingezeichnet. Allerdings lässt sich aus dieser Art der Darstellung keine sichere Rangreihenfolge der Fahrzeuge für die einzelnen Sätze ableiten. Um das zu klären, wurden eine Varianzanalyse und paarweise T-Tests durchgeführt. In den Abbildungen ist durch rote rechteckige Kästen gekennzeichnet, welche Fahrzeuge sich signifikant unterscheiden (Signifikanzniveau $\leq 0,05$). Ebenso ist zur Aufstellung der Reihenfolge und insbesondere für den Nachweis von gleicher Platzierung zweier Fahrzeuge der T-Test geeignet. Ist das Signifikanzniveau im paarweisen T-Test $\geq 0,25$, so kann mit großer Sicherheit davon ausgegangen werden, dass beide miteinander verglichene Fahrzeuge beim entsprechenden Kriterium gleich bewertet wurden.

Die Fahrzeugreihenfolge, die den Grad der Zustimmung der Probanden von einzelnen Fahrzeugen zu einzelnen Sätzen widerspiegelt, ist in den Abbildungen ebenfalls ersichtlich. Das hier an erster Stelle stehende Fahrzeug entspricht dem Fahrzeug, das die durchschnittlich größte Zustimmung im relativen Vergleich erhielt. Die absolute Zustimmung ist durch den entsprechenden Skalenwert abzulesen.

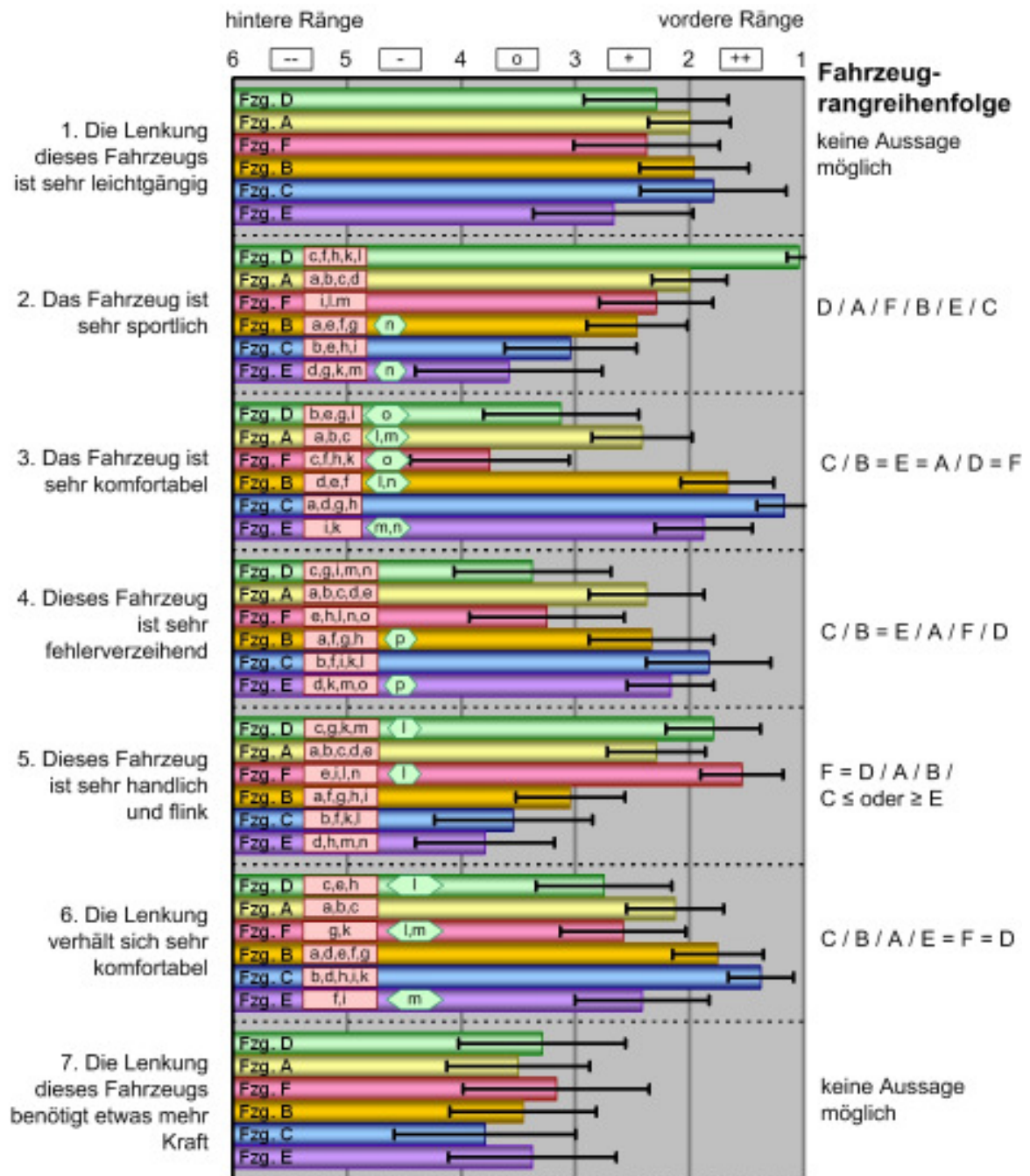


Abbildung 148: Mittelwert und Standardabweichung der Rangreihenfolge einzelner Fahrzeuge und der Fragen 1 bis 7

- Probanden erwarten bei allen Fahrzeugen eine Leichtgängigkeit der Lenkung (1.). Jedoch konnten die Probanden keine eindeutige Rangreihenfolge festlegen.
- Bezüglich der Sportlichkeit (2.) sehen die Probanden das Fahrzeug des Roadster-Segments am sportlichsten an, das Fahrzeug aus dem SUV-Segment als das am wenigsten sportlichsten.
- Das Fahrzeug der Oberklasse wird am komfortabelsten angesehen (3.). Die Fahrzeuge der oberen Mittelklasse, der Mittelklasse und des SUV-Segments folgen dicht dahinter. Die Fahrzeuge aus dem Roadstersegment liegen im deutlichen Abstand auf den hinteren Rängen. Bezüglich der Komfoteinschätzung scheinen sich die Probanden stark an der Größe des Fahrzeugs zu orientieren. Offenbar besteht auch ein Zusammenhang mit der Einschätzung als Luxusfahrzeug.

- Ähnlich zur Einschätzung der Probanden zum Komfort ist auch die Erwartung an die Fehlerverzeihbarkeit (4.). Das jeweilige Fahrzeug der Kompaktklasse und der Roadster-Klasse wird gegenüber den restlichen Fahrzeugen als weniger fehlerverzeihend angesehen. Offensichtlich spielt hier das äußere Erscheinungsbild in Form der Fahrzeuggröße eine Rolle. Das Fahrzeug der Oberklasse wird als am fehlerverzeihendsten eingeschätzt, jedoch nur knapp vor den Fahrzeugen der oberen Mittelklasse und des SUV-Segments.
- Bei der Einschätzung der Handlichkeit und Flinkheit (5.) scheint ebenso die Erwartung an die Fahrzeuggröße geknüpft zu sein. Optisch kleinere Fahrzeuge, wie das Roadster- und das Kleinwagenfahrzeug, werden als flink und handlich angesehen. Je größer das Fahrzeug ist, desto weniger handlich scheint es beurteilt zu werden.
- Die Erwartung des Lenkkomforts (6.) ist ähnlich dem Gesamtkomfort (3.). Bei allen Fahrzeugen wird eine komfortable Lenkung erwartet. Beim Roadster und Kleinwagen scheinen die Erwartungen nicht ganz so hoch zu sein, jedoch ist hier auch die Standardabweichung höher, was auf größere Uneinigkeit der Probanden schließen lässt.
- Uneinheitlich ist die Beurteilung des Lenkkraftniveaus (7.). Hier ist deutlich zu erkennen, dass an kein Fahrzeug eine höhere Erwartung gestellt wird als an ein anderes. Auch der Durchschnittswert und die zugehörige relativ hohe Standardabweichung weist darauf hin, dass nicht klar ist, ob ein Fahrzeug eher eine weichere oder härtere Lenkung haben soll.

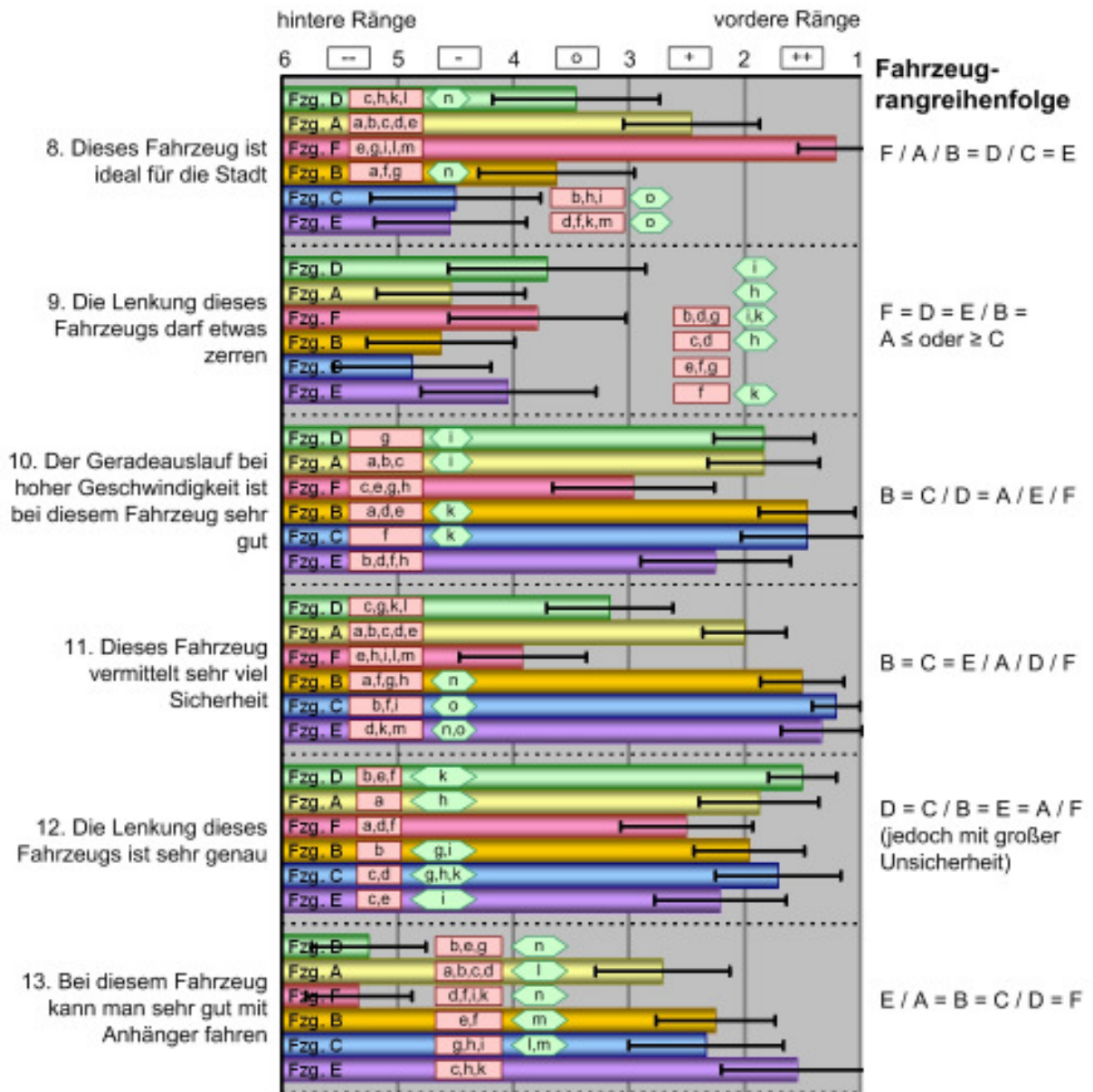


Abbildung 149: Mittelwert und Standardabweichung der Rangreihenfolge einzelner Fahrzeuge und der Fragen 8 bis 13

- Auf die Frage nach der Einschätzung für die Eignung in der Stadt (8.) ist klar erkennbar, dass die Reihenfolge stark von der Fahrzeuggröße abhängt. Der Kleinwagen ist hier deutlich auf dem vordersten Rang. Einzig auffällig ist, dass sich der Roadster weniger für die Stadt zu eignen scheint als es anzunehmen ist.
- Die Lenkung eines Fahrzeugs darf nicht zerren (9.), jedoch scheinen die Probanden gegenüber Kleinwagen, Roadstern und SUVs diesbezüglich toleranter zu sein.
- Ein guter Geradeauslauf (10.) scheint am ehesten beim Fahrzeug der Oberklasse und beim Fahrzeug der oberen Mittelklasse erwartet zu werden. Es folgen dann der Roadster und das Mittelklassefahrzeug und diesen beiden noch der SUV. Im deutlichen Abstand hierzu folgt auf dem letzten Platz der Kleinwagen.
- Bei der Frage, welches Fahrzeug am ehesten hohe Sicherheit vermittelt (11.), ergibt sich wieder eine Rangreihenfolge nach der Fahrzeuggröße. Der Kleinwagen und der Roadster sind hier an letzter Stelle. Die relativ weit hintere Platzierung des Roadsters kann auch damit zusammenhängen, dass es sich um ein offenes Fahrzeug (Cabrio) handelt.

- Die Präzision der Lenkung (12.) wird für alle Fahrzeuge erwartet. Eine eindeutige Reihenfolge kann nicht bestimmt werden. Aus dem Ergebnis lässt sich jedoch ableiten, dass vom Fahrzeug aus dem Roadstersegment eine präzisere Lenkung als vom Fahrzeug aus der Kompaktklasse erwartet wird.
- Für die Fahrt mit einem Anhänger (13.) wird das SUV-Fahrzeug als am besten geeignet angesehen, das Roadster- und Kompaktfahrzeug wird davon ausgegangen, dass man mit dem Anhänger nicht gut fahren kann.

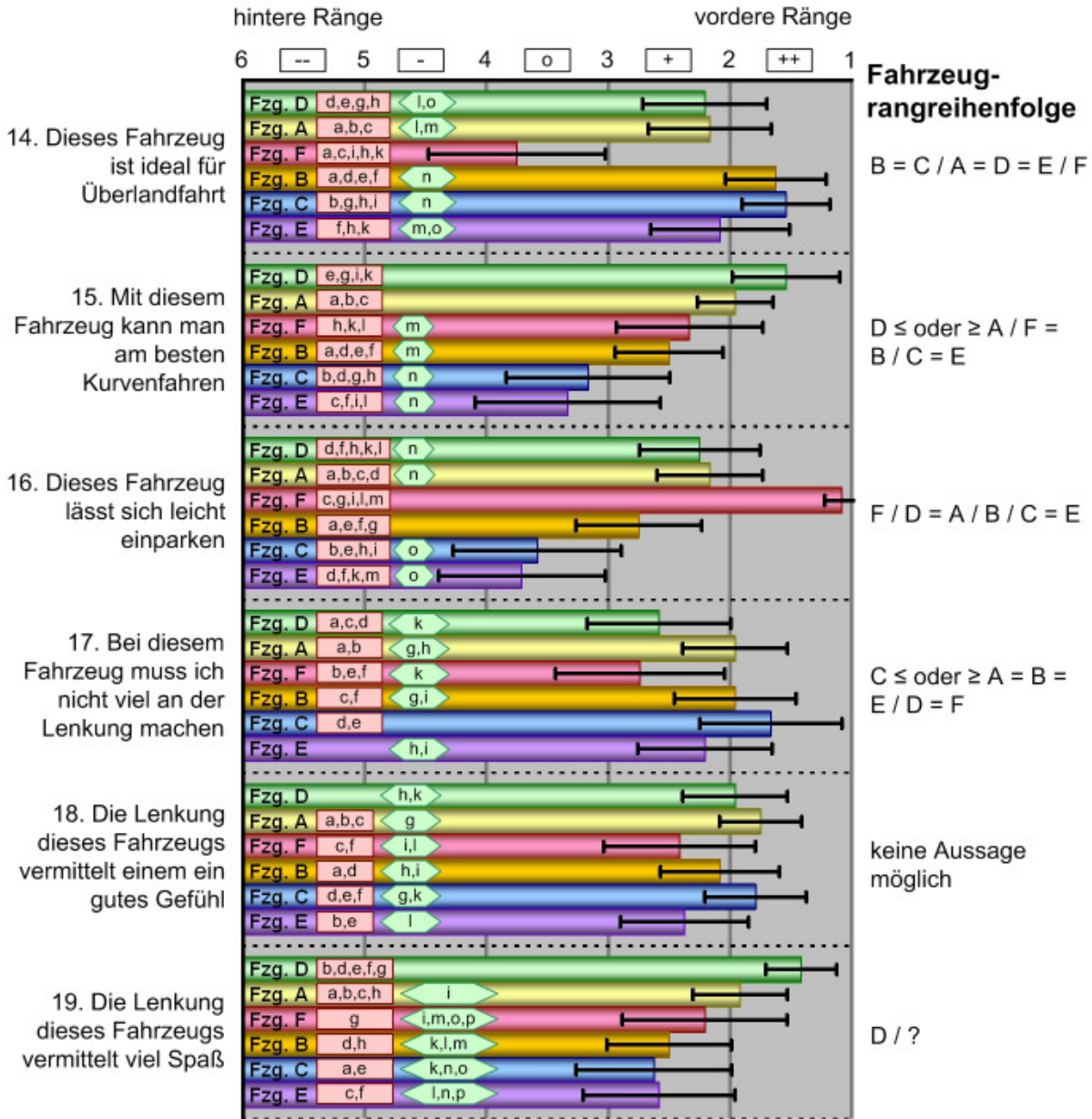


Abbildung 150: Mittelwert und Standardabweichung der Rangreihenfolge einzelner Fahrzeuge und der Fragen 14 bis 19

- Die Reihenfolge der Eignung für die Überlandfahrt ist (14.) abhängig von der Fahrzeuggröße und teilweise auch von der Fahrzeugkategorie. Die Fahrzeuge aus Oberklasse, Mittelklasse, oberer Mittelklasse und der SUV scheinen als geeignet angesehen zu werden, während der Kleinwagen als im großen Abstand zu den anderen tendenziell als wenig geeignet erscheint. Der Abstand zum Roadster scheint sich dadurch zu ergeben, dass ein Cabrio für die Überlandfahrt von Haus aus geeigneter zu sein scheint.

- Die Bewertung der Eignung für die Kurvenfahrt (15.) entspricht in der Reihenfolge in etwa der Sportlichkeit (8.) mit dem Unterschied, dass der Kleinwagen und das Fahrzeug der oberen Mittelklasse, sowie das Fahrzeug der Oberklasse und der SUV als gleich geeignet angesehen werden. Vermutlich ist das Fahrzeug der Mittelklasse und der Roadster ebenso gleich, nur kann dies mit den angewandten statistischen Methoden nicht eindeutig nachgewiesen werden. Bei dieser Frage scheint die Fahrzeuggröße einen großen Anteil an der Einschätzung zu haben, wenn auch nicht alleine.
- Die Beurteilung für das Einparken (16.) zeigt sich in der Reihenfolge eine eindeutige Abhängigkeit von der Fahrzeuggröße. Kleinere Fahrzeuge nehmen gegenüber den optisch größeren die vorderen Ränge ein.
- Bei der Frage, „wie viel man bei bestimmten Fahrzeugen an der Lenkung machen muss“ (17.) ergibt sich keine wirkliche Reihenfolge. Die Frage wurde bewusst umgangssprachliche und damit weniger technisch formuliert, um technisch nicht versierten Probanden adäquate Antwortmöglichkeit einzuräumen. Jedoch scheint beim Kleinwagen und Roadster erwartet zu werden, dass der Lenkaufwand höher ist als bei den anderen Fahrzeugen. Unklar ist, ob beim Fahrzeug der Oberklassen erwartet wird, am wenigsten tun zu müssen oder ob es mit den restlichen Fahrzeugen gleichzusetzen ist.
- Aufgrund der Frage, ob die Lenkung eines bestimmten Fahrzeugs einem ein gutes Gefühl vermittelt kann (18.), lässt sich keine Reihenfolge aufstellen. Generell wird dies aber von der Lenkung erwartet.
- Ähnlich zur Frage Nr. 18 kann bei der Frage, ob welche Lenkung von welchem Fahrzeugtyp Spaß vermittelt (19.), keine Reihenfolge gebildet werden. Bestimmen lässt nur, dass das Roadsterfahrzeug an vorderster Stelle gesehen wird. Dies hängt vermutlich mit der Imagevorstellung eines Roadsters zusammen.

| | abhängiger Parameter | | | Oberklasse | obere Mittelklasse | Mittelklasse | Kleinwagen | Roadster | SUV |
|--|--------------------------------------|--|--|------------|--------------------|--------------|------------|----------|-----|
| | Ausprägung der Parameterabhängigkeit | abhängige Größe bzw. abhängiger Faktor | Zusammenhang | | | | | | |
| 1. Die Lenkung dieses Fahrzeugs ist sehr leichtgängig | | unbekannt | | ? | ? | ? | ? | ? | ? |
| 2. Das Fahrzeug ist sehr sportlich | ++ | Fahrzeugklasse, Fahrzeuggröße | Roadster am besten, SUV am wenigsten | o | + | + | + | ++ | o |
| 3. Das Fahrzeug ist sehr komfortabel | ++ | Fahrzeuggröße | je größer desto besser | ++ | ++ | + | o | o | ++ |
| 4. Dieses Fahrzeug ist sehr fehlerverzeihend | + | Fahrzeuggröße | je größer desto besser | ++ | + | + | o | o | + |
| 5. Dieses Fahrzeug ist sehr handlich und flink | + | Fahrzeuggröße | kleiner besser | o | o | o | ++ | ++ | o |
| 6. Die Lenkung verhält sich sehr komfortabel | + | Fahrzeugklasse | Limousinen etwas besser | ++ | ++ | + | + | + | + |
| 7. Die Lenkung dieses Fahrzeugs benötigt etwas mehr Kraft | | unbekannt | | o | o | o | o | o | o |
| 8. Dieses Fahrzeug ist ideal für die Stadt | ++ | Fahrzeuggröße | je größer desto schlechter | - | o | + | ++ | o | - |
| 9. Die Lenkung dieses Fahrzeugs darf etwas zerrn | ++ | Komforterwartung | bei Roadster, Kleinwagen und SUV toleranter | - | - | - | o | o | o |
| 10. Der Geradeauslauf bei hoher Geschwindigkeit ist bei diesem Fahrzeug sehr gut | | unbekannt | | ? | ? | ? | ? | ? | ? |
| 11. Dieses Fahrzeug vermittelt sehr viel Sicherheit | ++ | Fahrzeuggröße | je größer desto besser | ++ | ++ | + | o | o | ++ |
| 12. Die Lenkung dieses Fahrzeugs ist sehr genau | | unbekannt | | ? | ? | ? | ? | ? | ? |
| 13. Bei diesem Fahrzeug kann man sehr gut mit Anhänger fahren | ++ | Fahrzeuggröße, Fahrzeugklasse | je kleiner desto schlechter, bei Allrad besser | ++ | + | + | -- | -- | + |
| 14. Dieses Fahrzeug ist ideal für Überlandfahrt | o | Fahrzeuggröße | je größer | ++ | ++ | + | o | + | + |
| 15. Mit diesem Fahrzeug kann man am besten Kurvenfahren | ++ | Fahrzeuggröße und Fahrzeugklasse | größere schneiden schlechter ab | o | + | ++ | + | ++ | o |
| 16. Dieses Fahrzeug lässt sich leicht einparken | ++ | Fahrzeuggröße | je kleiner, desto besser | o | + | + | ++ | + | o |
| 17. Bei diesem Fahrzeug muss ich nicht viel an der Lenkung machen | + | Fahrzeuggröße | je kleiner, desto schlechter | ++ | ++ | ++ | + | + | + |
| 18. Die Lenkung dieses Fahrzeugs vermittelt einem ein gutes Gefühl | | unbekannt | | ? | ? | ? | ? | ? | ? |
| 19. Die Lenkung dieses Fahrzeugs vermittelt viel Spaß | | unbekannt | | ? | ? | ? | ? | ++ | ? |

Tabelle 30: Übersicht der Ergebnisse zur Erwartungshaltung an die Fahrzeuglenkung anhand vorgelegter Abbildung der entsprechenden Fahrzeuge

Die Tabelle 30 zeigt die Ergebnisse der Rangreihenfolge der 19 gestellten Fragen und der sechs Fahrzeuge in einer Zusammenfassung. Auffällig ist, dass bei den meisten Fragen die Probanden Reihenfolgen aufgrund der Fahrzeuggröße festzulegen scheinen, d.h. den Erfüllungsgrad bestimmter Eigenschaften, die zu größten Teil mit dem Fahrwerk in Verbindung stehen, in Abhängigkeit von der Fahrzeuggröße sehen. Die Ergebnis einiger Fragen scheinen auch noch vom Fahrzeugimage abzuhängen, was bedeutet, dass sie von Vorstellungen, dass ein Fahrzeug bestimmte Eigenschaft besser oder schlechter erfüllen kann, abhängen (z.B. besondere Sportlichkeit, Eignung zum Wochenendausflug, etc.).

Die 19 Fragen beziehen sich auf das Fahrverhalten des Fahrzeugs und somit auch auf die Fahrwerkseigenschaften. Die Probanden sehen eine Abhängigkeit vom Fahrverhalten und dem optischen Erscheinungsbild in Form der Fahrzeuggröße, obwohl dies in den wenigsten Fällen technisch voneinander abhängt.

3.3.4.2 Subjektive Lenkungsbeurteilung und objektive Fahrzeugkenngrößen

Um die subjektive Lenkungsbeurteilung der Kunden, zunächst unabhängig von den objektiven Fahrzeugkenngrößen, zu bestimmen, wurden den Probanden direkt unter dem Befahren des zugehörigen Streckenabschnittes Fragen zu bestimmten Kundenkriterien gestellt. Die nachfolgende Tabelle 31 enthält eine Übersicht über die Fragen der Kundenkriterien, die während der einzelnen Streckenabschnitte an die Probanden gestellt wurden. Bei den Fragen wurde bewusst darauf geachtet, dass sie für die Probanden verständlich sind. Beispielsweise wurde der Begriff „Lenkmoment“ durch „Lenkkraft“ ersetzt.

Die Fragen wurden sinngemäß den Probanden von vier verschiedenen Versuchsleitern gestellt, wobei manche Fragen mehrfach an die Versuchspersonen gerichtet wurden. Da jeweils an einem Versuchstag mit vier Probanden parallel gefahren wird, kann nicht garantiert werden, dass alle Probanden exakt gleich formulierte Fragen gestellt bekommen. Eine Prüfung der Antwortkonsistenz einzelner Versuchspersonen ist durch die direkte Befragung während des Fahrens nicht möglich, da hierfür ein und derselbe Streckenabschnitt befahren und die zugehörige Frage anders formuliert werden müsste, damit sich der Proband nicht mehr an die erste Antwort erinnern kann.

Um dennoch eine Aussage über die Konsistenz der Antworten zu erhalten, werden die Antworten zweier Versuchspersonen, die zweieiige Zwillinge sind, näher betrachten. Anhand von Zwillingen lässt sich am ehesten erkennen, ob der Inhalt der Antworten dem tatsächlich subjektiven Eindruck entspricht oder ob sie eher willkürlicher Natur sind. Eine Kommunikation der Zwillinge untereinander war in Bezug auf das Urteil ausgeschlossen, da diese an zwei unterschiedlichen Tagen fuhren. Damit ist auch ein möglicher Effekt der gegenseitigen Beeinflussungen der Probanden in ihrem Antwortverhalten ausgeschlossen. Die Antworten der zweieiigen Zwillinge zeigen eine relativ hohe Konsistenz. Die Konsistenzprüfung wurde in Bezug auf positive, eingeschränkt negative und negative Antworten vorgenommen. Eine inhaltliche Überprüfung ist durch weitere statistische Methode nicht möglich.

Auf die Ergebnisse der einzelnen Kriterien wird mit Ausnahme des Lenkaufwandes nicht detailliert eingegangen. Allerdings sind die Ergebnisse in Abbildung 152 dargestellt.

| Kundenkriterium | Frage | Strecke | | | |
|-------------------------------------|---|----------|-----------------------------|-----------|----------|
| | | Überland | innerhalb geschl. Ortschaft | Parkieren | Autobahn |
| Center-Point-Feeling | Wie gut fühlen Sie die Geradeausstellung des Lenkrads? | ■ | | | ■ |
| Zielgenauigkeit | Wie genau erfüllt die Lenkung Ihre Lenkbefehle? | ■ | | | ■ |
| | Müssen Sie häufig nachkorrigieren? | ■ | ■ | | ■ |
| | Fährt das Fahrzeug dorthin wo Sie vorhergesehen haben, dass es hinfahren soll? | ■ | | | ■ |
| Lenkkraftniveau | Wie ist der Lenkkraftanstieg aus der Mittellage (zu schwer, gerade recht, zu leicht)? | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Lenkkraftverlauf | Ist der Verlauf der Kraft beim Einlenken harmonisch? | ■ | ■ | | ■ |
| | Wird die Lenkkraft spürbar größer bei größerer Fliehkraft bzw. Querschleunigung? | ■ | | | ■ |
| Rückmeldung | Wie gut vermittelt die Lenkung in Ihren Augen die Straßenbeschaffenheit? | ■ | | | ■ |
| | Bekommen Sie das Berühren des Fahrbahnrandes über die Lenkung ausreichend mitgeteilt? | ■ | | | ■ |
| Fahrbahnkontakt | Wie gut überträgt Ihrer Meinung nach die Lenkung den Kontakt zwischen Reifen und Fahrbahn? | ■ | | | ■ |
| Lenkungsruhe | Verhält sich die Lenkung in ihren Augen eher ruhig oder eher unruhig? | ■ | ■ | | ■ |
| Lenkungsstößigkeit | Empfinden Sie störende Stöße (Schläge) in der Lenkung? | ■ | ■ | | ■ |
| Rückstellverhalten | Wie empfinden Sie das Halten der Lenkung in Kurven? (schwer, leicht) | ■ | | | |
| | Stellt sich die Lenkung selbsttätig ausreichend zurück oder ist es gar zu viel oder zu schnell? | ■ | ■ | | |
| Lenkaufwand (Lenkwinkel, Lenkkraft) | Wie empfinden Sie den Lenkaufwand? | | ■ | ■ | |
| | Müssen Sie sich anstrengen? | | ■ | ■ | |
| | Ist die Kurbelei zu viel? | | ■ | ■ | |
| Spurtreue | Wie gut glauben Sie hält das Auto die Spur gegen Störungen? | ■ | | | ■ |
| Fremderregte Vibrationen | Spüren Sie irgendwelche Vibrationen (z.B. vom Motor)? Störend? | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Gefühl der Kontrolle | Haben Sie das Gefühl, das Fahrzeug unter Kontrolle zu haben? | ■ | | | ■ |
| Agilität | Verhält sich das Fahrzeug ausreichend agil oder ist es etwas träge? | ■ | | | ■ |
| Ansprechverhalten | Wie gut schnell reagiert das Fahrzeug auf ihre Lenkbewegungen? | ■ | | | ■ |
| Sicherheitsgefühl | Fühlen Sie sich mit dem Auto unsicher? (wenn ja, wie stark und wann?) | ■ | | | ■ |

Tabelle 31: Fragen zu den einzelnen Kundenkriterien, die während des Fahrversuch an die Probanden gestellt wurden

Der Lenkaufwand ist die Beurteilung der vom Fahrer aufzubringenden Lenkkraft in Kombination mit dem aufzubringenden Lenkwinkel. Der Lenkaufwand ist in der Fahrwerksentwicklung kein Objektivkriterium, da dort Lenkwinkel und Lenkkraft üblicherweise gesondert voneinander betrachtet werden. Zum Lenkaufwand werden die Probanden während des Parkierens und beim Fahren innerhalb geschlossener Ortschaft befragt.

Der Lenkaufwand beim Parkieren ist beim Fahrzeug des SUV-Segments von einem großen Teil der Probanden als zu hoch beschrieben, obwohl die Lenkung insgesamt als leichtgängig und das Lenkkraftniveau beim Parkieren als niedrig beurteilt wurde. Das Fahrzeug verfügt im Gegensatz zu den anderen Fahrzeugen über keine progressive Zahnteilung und damit größere statische Lenkübersetzung im Bereich der Lenkansschläge. Der Proband merkt hier also deutlich, dass der Lenkwinkelbedarf für das Parkieren zu groß ist. Ähnlich äußern sich die Probanden auch während der Fahrt durch die geschlossene Ortschaft.

Beim Fahrzeug des Roadstersegments ist in über 80% der Urteile positiv beurteilt, jedoch ist im Gegensatz zum SUV das Urteil gemessen an den Anteilen positiver Urteile für das Parkieren schlechter. Hier wird offenbar das höhere Lenkkraftniveau für einen Sportwagen noch als tolerabel und angemessen angesehen. Einzelne Urteile untermauern dies.

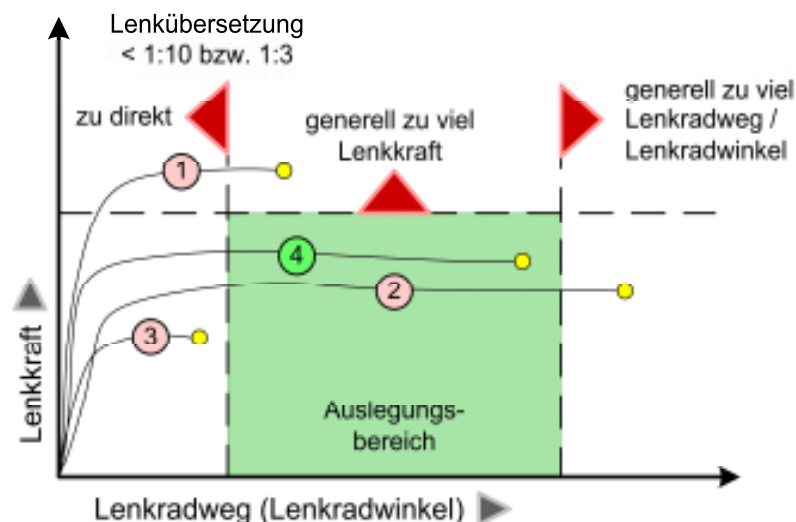


Abbildung 151: Hypothetische Darstellung des Lenkaufwandes mit Beurteilungsgrenzen

Abbildung 151 zeigt hypothetisch die Darstellung des Lenkaufwandes mit den sich aus den Versuchen ergebenden Beurteilungsgrenzen. Der Lenkungsrücklauf ist in den Verläufen in der Abbildung nicht eingezeichnet.

Zunächst erscheint es so, dass der Fahrer ausschließlich die Größe der Fläche unter dem Verlauf der Lenkkraft über dem Lenkradwinkel beurteilt. Die Aussagen der Fahrversuche lassen jedoch noch auf drei weitere Beurteilungsgrenzen schließen.

Aufgrund der Erkenntnis, dass der Fahrer sowohl eine Grenze für die Lenkkraft, als auch für den Lenkradwinkel hat, ist der Verlauf Nr. 1 zu vermeiden. Zwar ist der Lenkradwinkel nicht zu hoch und nicht zu niedrig, aber die Lenkkraft ist generell zu hoch. Zwei andere Grenzfälle ergeben sich durch den Lenkweg bzw. Lenkwinkel. Bei Verlauf Nr. 2 muss der Fahrer wie beim Fahrzeug aus dem SUV-Segment zu viel Lenkweg aufbringen, obwohl das Lenkkraftniveau an für sich nicht als zu hoch beurteilt wird. Ebenso gibt es noch den Fall, dass der Lenkradwinkel zu gering ausfällt (Verlauf Nr. 3). Hier ist aus anderen Untersuchungen bekannt, dass die Lenkübersetzung für das Parkieren und Rangieren nicht direkter als 1:3 sein sollte und für das Fahren innerhalb geschlossener Ortschaft bzw. mit niedriger Geschwindigkeit nicht direkter als 1:10. Die beiden Grenzen entstehen durch die Problematik, dass der Fahrer bei zu direkten Übersetzungen, den Lenkradwinkel nicht mehr

eindeutig dem Einschlagwinkel der Vorderräder zuordnen kann. Der Verlauf Nr. 4 wäre innerhalb des Auslegungsbereiches. Hier ist weder die Lenkkraft zu hoch, noch der Lenkradwinkel zu groß oder zu klein.

Aus den Fahrversuchen können noch andere objektive Kenngröße abgeleitet werden, die nicht durch direkte Befragung betrachtet wurden. Zum einen scheint die Dicke des Lenkradkranzes eine Rolle zu spielen. Dazu liegen Aussagen von Probanden vor, dass ein zu dicker Lenkradkranz das Gefühl der Kontrolle und der Sicherheit beim Lenken negativ beeinflusst. Um das zu umgehen, sollte ein zu dicker Lenkradkranz vermieden werden. Hierfür ist es sinnvoll, dass der Lenkradkranz nicht dicker als der Umfassunggriff für das 5. Perzentil weiblich ist. Dieser beträgt im Umfang 110 mm.

Desweiteren erwähnen einzelne Probanden, dass die Gürtellinie des Fahrzeugs zu hoch ist (Höhe der Seitenlinie, höheres Türblech, kleinere Fensterflächen) und ihr Fahrgefühl negativ beeinträchtigt ist. Vor allem ist das auffällig bei älteren Fahrern, die offenbar von früheren Fahrzeugen niedrigere Gürtellinien gewohnt sind.

In der Tabelle 32 und Tabelle 33 ist nach *Heißing und Brandl* (2002) zusammengefasst, welche, der in den Fahrversuchen zum Lenkgefühl herangezogenen Objektivkriterien von welchen Fahrwerksparametern beeinflusst werden. Es sind in den Tabellen nicht alle Objektivkriterien des Fahrversuchs zum Lenkgefühl aufgeführt, sondern nur die, zu denen *Heißing und Brandl* (2002) Entwicklungsziele definieren konnten. In den beiden Tabellen ist sowohl in Summe dargestellt, wieviele Objektivkriterien von einem Parameter beeinflusst werden, als auch wieviele Parameter einen Einfluss auf die Gestaltung eines Objektivkriteriums haben und somit die Komplexität widerspiegeln.

Den Einfluss auf die meisten Kriterien haben gemäß der Aufstellung von *Heißing und Brandl* (2002) die Reifeneigenschaften vor dem Kennfeld der Servolenkung und der Kinematik / Elastokinematik. Die Objektivkriterien, welche durch die meisten Parameter beeinflusst werden, sind das Ansprechverhalten und die Zielgenauigkeit, das Lenkungs-zittern wird nach *Heißing und Brandl* (2002) durch die geringste Zahl an Parametern beeinflusst.

| Fahrzeugparameter | Anspruchverhalten | Fahrbahnkontakt | Geradeauslauf | Lenkkräfteniveau beim Parkieren | Lenkkräfteniveau im Proportionalbereich | Lenkkräfteniveau im Mittenbereich | Lenkungsflattern | Lenkungs-zittern | Lenkungs-spendeln | Mittengefühl (Center-Point-Feeling) | Rückstellverhalten | Stößigkeit | Zielgenauigkeit | Summe (Kriterien pro Parameter) |
|--|-------------------|-----------------|---------------|---------------------------------|---|-----------------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------------------------|--------------------|------------|-----------------|---------------------------------|
| Lenkgeometrie (Ackermann-Näherung, Spurdifferenzwinkel) | * | | | * | | | | | | | * | | | 3 |
| Anlenkung des Stabilisators | | | | | | | | | * | | * | | | 2 |
| Kinematik und Elastokinematik der Vorder- und Hinterachse | * | * | * | | * | * | | | * | | | | * | 7 |
| Auslegung der Achsgeometrie | | | | * | * | * | | | | | | | * | 4 |
| Achseinstellwerte | | | * | | | | | | | | | | | 1 |
| Längsfederung und Dämpfung der Radaufhängung | | | | | | | * | | | | | | | 1 |
| Querelastizitäten der Vorder- und Hinterachse | | | | | | | | | | * | | | * | 2 |
| Auslegung des Lenkungsstranges nach Steifigkeit und Dämpfung | | | | | | | * | | | | | | | 1 |
| Elastizitäten, Trägheitsmomente, Reibung und Dämpfung des Lenkungsstranges | | | | | | | | | * | | | * | * | 3 |
| Elastizitäten, Dämpfung und Reibung im Lenkungsstrang und in der Vorderradaufhängung | | | | | | | | | | * | | | | 1 |
| mechanische und hydraulische Rückstellunterstützung (Zentrierfeder, Servolenkventil) | | | | | | | | | | | * | | | 1 |
| Elastizitäten in der Radaufhängung | | | | | | | | | | | | * | | 1 |
| Auslegung der kinematischen Lenkungs-rückstellung (Nachlauf, Spreizung) | | | | | | | | | | * | * | | * | 3 |
| Masse des Lenkrads | | | | | | | * | * | | | | * | | 3 |
| Trägheitsmoment des Lenkrads | | | | | | | * | | | | | | | 1 |
| Abstimmung von Federn, Stabilisierung und Dämpfung | | * | | | | | | | * | | | * | | 3 |
| Auslegung ggf. vorhandener elektronischer Feder- und Dämpferregelsysteme | | | | | | | | | | | | * | | 1 |
| Kennfeld der Servolenkung | * | | * | * | * | * | | | | | | | * | 6 |
| Lenkungscharakteristik | | * | * | | | | | | * | | | | | 3 |
| Zwischensumme (Parameter pro Kriterium) | 3 | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 1 | 5 | 3 | 4 | 5 | 6 | |

Tabelle 32: Ausgewählte Beurteilungskriterien für die Lenkung und die damit zusammenhängenden Fahrzeugparameter nach Heißing und Brandl (2002)

| Fahrzeugparameter | Anspruchverhalten | Fahrbahnkontakt | Geradeauslauf | Lenkkräfteniveau beim Parkieren | Lenkkräfteniveau im Proportionalbereich | Lenkkräfteniveau im Mittenbereich | Lenkungsflattern | Lenkungs-zittern | Lenkungs-spendeln | Mittengefühl (Center-Point-Feeling) | Rückstellverhalten | Stößigkeit | Zielgenauigkeit | Summe (Kriterien pro Parameter) |
|--|-------------------|-----------------|---------------|---------------------------------|---|-----------------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------------------------|--------------------|------------|-----------------|---------------------------------|
| statische Lenkübersetzung | * | | | * | * | * | | | | | | | * | 5 |
| dynamische Lenkübersetzung | * | | | | * | * | | | | | | | * | 4 |
| Achs- und Lenkungskonzept | | | | | | | * | | | | | * | | 2 |
| Lenksäulenkonzept | | | | | | | | * | | | | | | 1 |
| Störkräftebelarm | | | | | | | | | | | | * | | 1 |
| Biegesteifigkeit und Dämpfung der Lenksäule | | | | | | | | * | | | | | | 1 |
| Reifeneigenschaften (Raddimension) | * | * | * | * | * | * | | | * | * | * | * | | 10 |
| Reifeneigenschaften (Verschleißzustand) | | | | | | | | | * | | | | | 1 |
| Wankabstützung | | | | | | | | | | | | | * | 1 |
| Wankkinematik | * | | | | | | | | | | | | | 1 |
| Elastizitäten, Reibungen und Dämpfung der Fahrwerkslager | | * | | | | | | | | | | | | 1 |
| Vorderachslast | | | | * | | | | | | | | | | 1 |
| Achslastverteilung | * | | * | | * | * | | | * | | | | | 5 |
| dynamische Achslastverteilung unter Längskräften | | | | | * | * | | | | | | | | 2 |
| globale und lokale Karosseriesteifigkeit | | | | | | | * | | | | | | | 1 |
| aerodynamische Eigenschaften | * | | * | | | | | | * | | | | * | 4 |
| Massenträgheit des Fahrzeugs (Hochachse) | * | | | | | | | | | | | | | 1 |
| Radstand | | | * | | | | | | | | | | | 1 |
| Antriebskonzept | | | | | | | | | | | * | | | 1 |
| Gesamtsumme (Parameter pro Kriterium) | 10 | 5 | 8 | 6 | 8 | 8 | 5 | 3 | 9 | 4 | 5 | 8 | 10 | |

Tabelle 33: Ausgewählte Beurteilungskriterien für die Lenkung und die damit zusammenhängenden Fahrzeugparameter nach Heißing und Brandl (2002) (Fortsetzung)

3.3.4.3 Zusammenhang subjektiver Beurteilungen und objektiver Lenkungskriterien

Den Zusammenhang zwischen subjektiver Beurteilung und objektiven Kenngrößen zeigt die nachfolgende Abbildung 152. Hier sind mit blauen ovalen Symbolen die Beurteilungskriterien gekennzeichnet, während die weißen rechteckigen Symbole die Einflussfaktoren verdeutlichen. Die Einflussfaktoren können entweder negativ oder positiv auf die Beurteilung eines Kriteriums wirken, was durch rote Minus- oder grüne Pluszeichen gekennzeichnet ist. Damit lässt sich leicht erkennen, wann und in welcher Situation (z.B. in bestimmten Fahrbereichen) ein Einflussfaktor eine positive oder negative Beurteilung nach sich ziehen kann. Es bestehen nicht jedoch nicht nur ausschließlich Zusammenhänge zwischen Einflussfaktoren und Beurteilungskriterien, sondern auch zwischen zwei oder mehreren Beurteilungskriterien an sich. Die negativen und positiven Zusammenhänge gelten nicht zwangsläufig reziprok, d.h. dass die gegenteilige Ausprägung eines Merkmals aus einem positiven Effekt einen negativen und umgekehrt macht. Beispielsweise wirken zu viele Stöße negativ auf den Fahrbahnkontakt. Das bedeutet aber nicht, dass keine Stöße unbedingt positiv darauf wirken.

Sehr deutlich erkennbar ist, dass das Kriterium „Rückstellverhalten“ mit den Einflussfaktoren „Restwinkel“, „Rücklauf“ und „aktive Lenkungsrückstellung“, das einzige Beurteilungskriterium ist, das nicht oder nur schwach mit den anderen Kriterien und Einflussfaktoren vernetzt ist. Ursache hierfür ist, dass das erwähnte Kriterium die Normalfahrer nur bei niedrigen Geschwindigkeiten innerorts und beim Abbiegen beurteilen und der Normalfahrer das „Rückstellverhalten“ bei höherer Geschwindigkeit und im Bereich des On-Center-Handlings nicht mehr adäquat beurteilen kann.

Weiterhin lässt sich aus der Abbildung 152 erkennen, dass das Gefühl der Kontrolle bzw. das Gefühl der Sicherheit von vergleichsweise vielen Einflussfaktoren und Beurteilungskriterien beeinflusst wird. Das Gefühl der Kontrolle wird durch guten Fahrbahnkontakt, gut spürbarer Lenkwiderstand um die Mitte und geringen Lenkaufwand positiv beeinflusst.

Einen vergleichsweise großen Einfluss hat die Fahrgeschwindigkeit. Die drei Beurteilungskriterien „Zielgenauigkeit“, „Center-Point-Feeling“ und „Ansprechverhalten“ werden mit zunehmender Fahrgeschwindigkeit besser beurteilt.

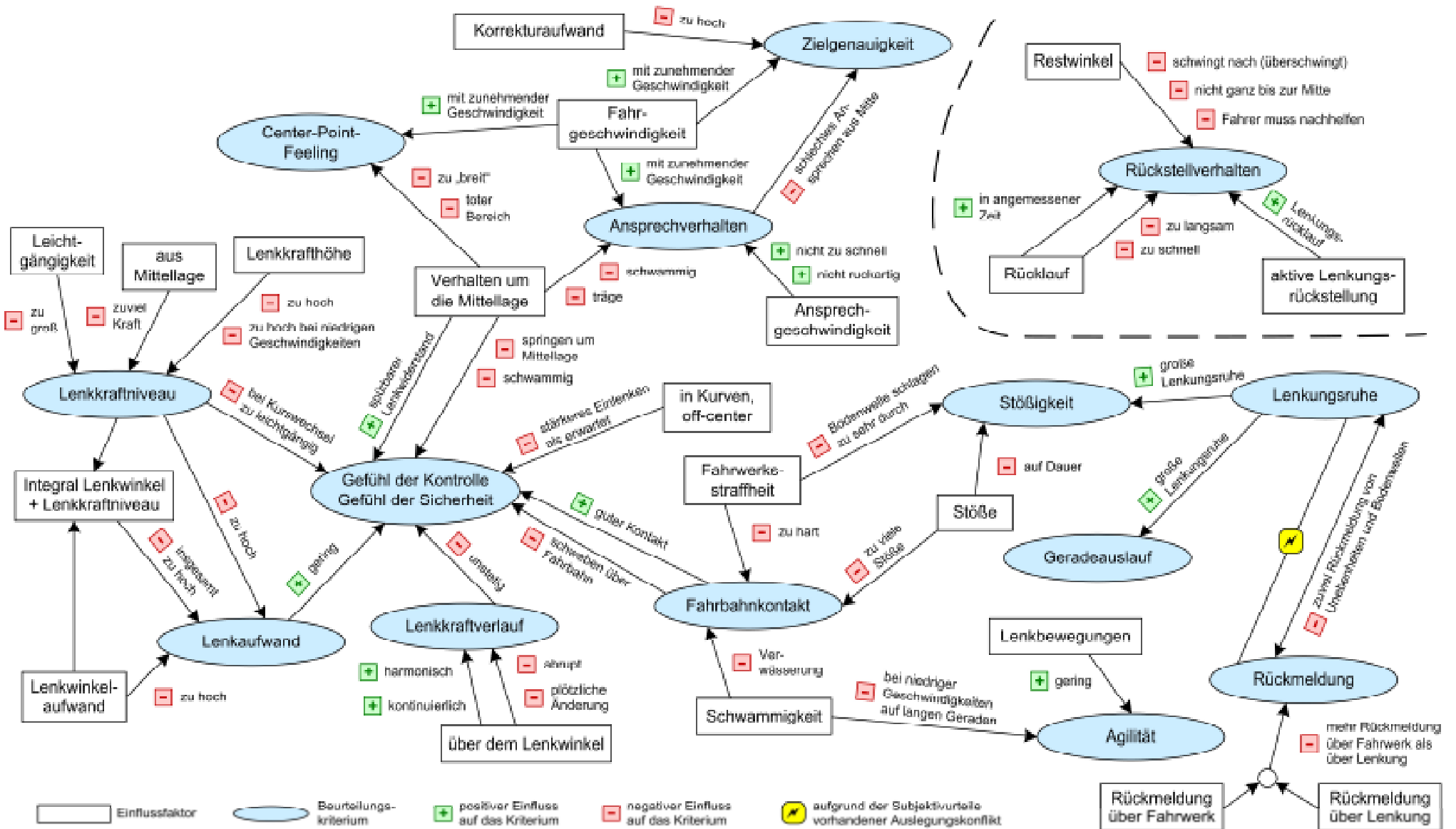


Abbildung 152: Mögliche Zusammenhänge des Lenkgefühl auf Basis von definierten Kriterien und Kundensubjektivurteilen (nur für Fahrzeuge mit Hinterradantrieb gültig)

3.3.4.4 Verbale Beurteilung von Fahrzeuglenkungen durch Kunden

Ein weiterer wichtiger Schritt zum Verständnis des Lenkgefühls ist es festzustellen, mit welchem Sprachgebrauch, mit welcher Exaktheit und Differenzierung Probanden eine Lenkung beschreiben können. Dies wird mit Hilfe eines eigenen Teilversuchs ermittelt. Aus den Versuchsergebnissen lassen sich Rückschlüsse ziehen, welche Wahrnehmungen der Probanden gegenüber der Lenkung haben und wie fein sie diese Wahrnehmungen auflösen können.

Die Probanden sollten während der Transferfahrt in das Testgebiet die Lenkung der gefahrenen Fahrzeuge unerzwungen, d.h. ohne konkrete Befragung durch die Versuchsleiter beschreiben. Da an sechs unterschiedlichen Tagen Versuche durchgeführt wurden, liegen pro Fahrzeug sechs Einzelurteile vor. Die Probanden hatten ca. 45 Minuten Zeit, die Lenkung des Fahrzeugs zu beurteilen. Die Fahrtstrecke führte im wesentlichen über Landstraßenabschnitte. Die Urteile wurden sofort und ohne Verzögerung durch ein elektronisches Aufzeichnungsgerät aufgenommen, um den Einfluss von Gedächtniseffekten, wie Verzerrungen und Verblässen, bei den Probanden zu vermeiden. Die nachfolgende Tabelle 34 beinhaltet verbale Beurteilungen in der deutschsprachigen Fachpresse. In der Tabelle ist die Übereinstimmung des aufgelisteten Pressewortgebrauchs mit der Wortverwendung durch die Probanden durch Kreuze gekennzeichnet.

In der Tabelle ist zusätzlich mit angegeben,

- welches Geschlecht die Probanden haben (m/w),
- ob die Probanden einen technischen (t) bzw. nichttechnischen (nt) Beruf ausüben bzw. ausübten,
- ob sie kein (n), gelegentlicher (g) oder regelmäßiger (j) Leser einer Autozeitschrift sind und
- wie groß die jährliche Kilometerleistung der Probanden ist.

Die Tabelle enthält auf der linken Seite verbale Urteile, die in der Fachpresse gefunden wurden. Positive Urteile sind „grün“ und negative Urteile „rot“ und neutrale oder nicht eindeutig zuzuordnende Urteile „grau“ gekennzeichnet.

| Vpn | Fzg. 1 | | | | | | Fzg. 2 | | | | | | Fzg. 3 | | | | | | Fzg. 4 | | | | | | Anzahl der Nennungen | Rang (Anzahl Nennungen) |
|---------------------------|--------|----|----|---|----|----|--------|----|----|----|----|----|--------|----|----|----|----|----|--------|----|----|----|----|----|----------------------|-------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | | |
| | t | nt | nt | t | t | nt | nt | nt | t | t | t | nt | t | nt | t | nt | t | nt | t | t | nt | t | t | nt | | |
| Beruf | m | w | w | m | m | m | w | m | m | m | m | w | m | m | m | m | w | m | m | m | m | w | m | w | | |
| Geschlecht | n | g | g | g | g | g | g | n | g | g | g | j | g | g | j | g | n | g | g | g | g | j | g | j | | |
| km/a (in Tausend) | 13 | 25 | 12 | 6 | 20 | 15 | 20 | 35 | 20 | 20 | 30 | 12 | 20 | 20 | 20 | 50 | 5 | 20 | 15 | 30 | 20 | 30 | 25 | 20 | | |
| Antriebseinflüsse nicht | X | | | | | X | X | | | | | | X | | | | X | X | | | | | X | | 7 | 5 |
| Antriebseinflüsse spürbar | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| diffus | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| direkt | | | | X | | | | X | X | X | | | | X | X | | | | | X | X | | | | 8 | 4 |
| indirekt | | | | | | | | | | | | | X | | | X | | | | | | | | | 2 | 10 |
| dosierend | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| echt | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| unecht | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | 1 | 11 |
| exakt | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 11 |
| unexakt | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| Fahrbahnkontakt (viel) | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | X | | | X | X | | 4 | 8 |
| Fahrbahnkontakt (wenig) | X | | | | | | X | | | | X | | | | | X | X | X | | | | | | X | 7 | 5 |
| gedämpft | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| gefühlvoll | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 11 |
| gefühllos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | 1 | 11 |
| geschmeidig | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 11 |
| gesprächig | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| gewöhnungsbedürftig | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | 1 | 11 |
| giftig | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| gut | X | X | X | X | | | X | | | | | | | | | | | | | X | | | | | 6 | 6 |
| schlecht | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | 1 | 11 |
| handlich | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | 1 | 11 |
| indifferent | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| langsam reagierend | | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 11 |
| leichtgängig | | | | | | | | X | X | | X | X | X | X | X | X | X | | X | | | | | 9 | 3 | |
| schwergängig | | X | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 2 | 10 |
| zu leichtgängig | | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 11 |
| mangelnd | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| nervös | | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | | | | | 1 | 11 |
| präzise | | | | X | | | | X | X | X | | | | | | | | | | | | | | | 4 | 8 |
| unpräzise | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | X | | | | | 2 | |
| ruhig | | | X | | X | X | | | | | | | X | | | X | X | X | X | X | | X | X | X | 10 | 2 |
| unruhig | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| Rückmeldung (viel) | | | | X | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | X | | 3 | 9 |
| Rückmeldung (wenig) | X | | | | | X | | | | | | | X | | | X | X | | | | | | X | | 6 | 6 |
| sahnig | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| schlecht | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| schwammig | | | | | X | | | | | | | | | | | X | | | | X | | | | | 3 | 9 |
| schnell reagierend | X | X | | | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | | | | | X | X | | X | | | 13 | 1 |
| langsam reagierend | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | 1 | 11 |
| sicher | | | | | X | | X | X | | | X | | | | | X | | | | X | | X | | | 7 | 5 |
| unsicher | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| stößig | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| streng | | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 11 |
| synthetisch | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| träge | X | | | | | | | | | | | | X | | | | | | | | | | | | 2 | 10 |
| teigig | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| weich | | | | | X | | X | | | | | | | X | X | | | | | | | | X | | 5 | 7 |
| hart | | | | X | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | X | | 3 | 9 |
| verzögert | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| zäh | X | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | 11 |
| zerrend | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 0 | |
| zielgenau | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | X | | | | | 1 | 11 |

Tabelle 34: Verwendetes Vokabular bei der verbalen Beschreibung der Lenkung und Vergleich mit in der Presse üblichen Sprachgebrauch

Mit Hilfe eines Chi-Quadrat-Test konnte herausgefunden werden, dass die verbalen Beurteilungen in Zahl und Qualität nicht vom von Geschlecht, technischer oder nichttechnischer Berufsausübung und Jahreskilometerleistung abhängen und ebenso wenig davon, ob es sich um regelmäßige, gelegentliche oder keine Leser von Autozeitschriften handelt. Vereinzelt konnten leichte Zusammenhänge mit Geschlecht und bestimmten Wörtern gefunden, allerdings lassen sich daraus keine brauchbaren Aussagen ableiten.

3.3.4.5 Wichtung vorgegebener Kriterien in Bezug auf die Lenkung

Bei jedem Fahrzeugwechsel wurde den Probanden ein Fragebogen zur Kriterienwichtung vorgelegt. Zunächst sollten die Probanden auf einer Skala von 1 („unwichtig“) bis 8 („wichtig“) die Wichtigkeit der Oberkriterien

- „Parkierkomfort“,
- „Geradeausfahrt“,
- „Kurvenfahrt“ und
- „Kontakt Fahrer-Fahrbahn“ nach jedem Fahrzeugdurchlauf beurteilen.

Für jedes Oberkriterium gibt es die folgenden Unterkriterien, die ebenso von den Probanden beurteilt wurden:

Für das Oberkriterium „Parkierkomfort“ die Unterkriterien

- „Lenkwinkelbedarf“,
- „Höhe der Lenkkraft“ und
- „gewünschte Kraft“ (auf einer Skala von 1 „komfortabel – niedrig bis 4 „sportlich – hoch“).

Für das Oberkriterium „Geradeausfahrt“ die Unterkriterien

- „Fühlbarkeit der Mitte“,
- „Ansprechen aus der Mitte“,
- „Lenkkraft um Mitte“ und
- „gewünschte Kraft“ (auf einer Skala von 1 „komfortabel – niedrig bis 4 „sportlich – hoch“).

Für das Oberkriterium „Kurvenfahrt“ die Unterkriterien

- „Kurvenwilligkeit“,
- „Zielgenauigkeit“,
- „Lenkkraft beim Anlenken“ und
- „gewünschte Kraft“ (auf einer Skala von 1 „komfortabel – niedrig bis 4 „sportlich – hoch“).

Für das Oberkriterium „Kontakt Fahrer-Fahrbahn“ die Unterkriterien

- „Vermittlung der Haftgrenze der Vorderräder“ und
- „Vermittlung der Fahrbahnoberfläche“.

Bei den Skalen wurden bewusst geradzahlige Anker gewählt, damit die Probanden keine Mitte angeben konnten und somit die bei ungeraden Skalen auftretende Tendenz zur Mitte ausgeschlossen ist. Der Tendenz zu begegnen, dass Probanden extreme Bewertungen an den Skalenenden vermeiden, wurde eine ausreichende Skalenweite durch einen 8-fach-Anker gewählt. Bei den gewünschten Lenkkraften wurde nur eine 4-fach-Skala verwendet, um zu großen Streuungen bei den Antworten zu vermeiden.

Die Vermittlung der Haftgrenze bezieht sich im Fragebogen auf die Vorderräder („Vermittlung der Haftgrenze der Vorderräder“). Dadurch soll den Probanden beim Ausfüllen des Bogens erleichtert werden, was der Begriff zu bedeuten hat. Hiermit ist selbstverständlicherweise ebenso die Haftgrenze der Hinterräder gemeint.

Ebenso ersetzt im Fragebogen das Wort „Lenkkraft“ gezielt den in der Fahrwerksentwicklung üblichen Begriff „Lenkmoment“, weil zu einem der Fahrer tatsächlich nur Kräfte spüren kann und keine Momente und zum anderen, was im konkreten Fall bedeutsamer ist, weil Probanden ohne technische Kenntnisse eventuell mit dem Begriff „Moment“ keine adäquaten Vorstellungen verknüpfen können, d.h. nicht wissen, was mit dem Begriff tatsächlich gemeint ist.

Die nachfolgenden Abbildungen beinhalten die Mittelwerte der Beurteilungen der einzelnen Fahrzeuge, die zugehörige Standardabweichungen und durch einen schwarzen Balken gekennzeichnet den Mittelwert des Kriteriums ohne Aufteilung nach Fahrzeugen. Da die nach Fahrzeugen unterschiedenen Mittelwerte bei den meisten Kriterien sehr dicht beieinander liegen und die Standardabweichung recht hoch ist, wird zusätzlich ein T-Test durchgeführt, um dennoch Unterschiedlichkeiten in den Kriterien nachweisen zu können. Die Fahrzeuge 1-4 sind wie folgt den Fahrzeugsegmenten zuzuordnen:

- § Mittelklasse (Fahrzeug 1),
- § obere Mittelklasse (Fahrzeug 2),
- § SUV-Segment (Fahrzeug 3) und
- § Roadstersegment (Fahrzeug 4).

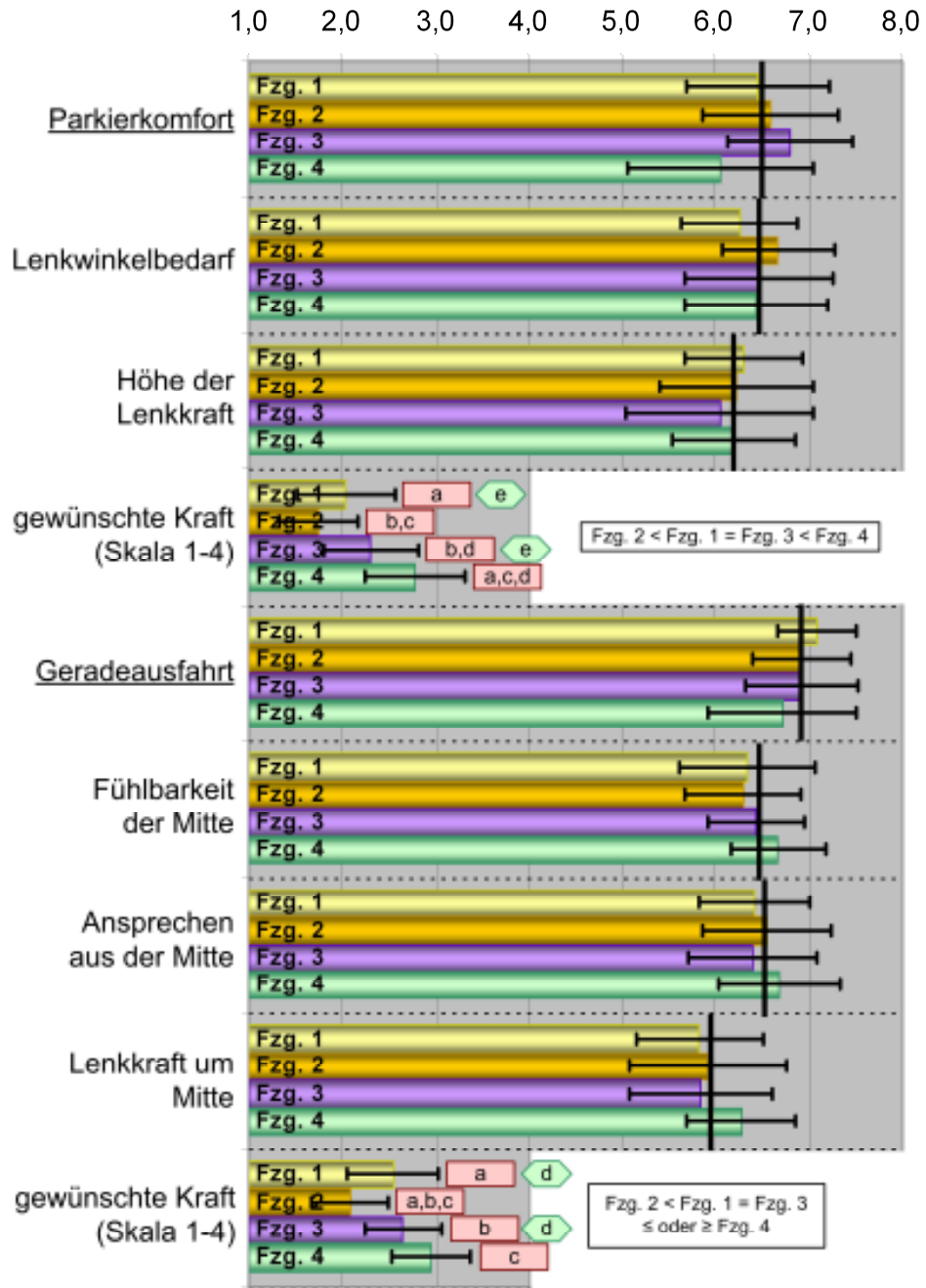


Abbildung 153: Kriterienwichtung der Probanden nach jedem Fahrzeug für die Kriterien „Parkieren“ und „Geradeauslauf“

Dazu wird für alle Kriterien eine Varianzanalyse durchgeführt, wobei zunächst geklärt werden soll, ob es zwischen den vier Fahrzeugen zu signifikanten Innersubjektiveffekten kommt. Ist dies der Fall, muss noch mit Hilfe eines T-Tests überprüft werden, inwieweit es tatsächlich zu Unterschiedlichkeiten kommt. In der Abbildung 153 und der Abbildung 154 ist durch Buchstaben (a bis d) gekennzeichnet, welche beiden Fahrzeug (gepaarte Stichprobe) im Vergleich zueinander unterschiedlich sind. Demnach können Aussagen bei den gewünschten Kräften bei der Kurvenfahrt, beim Parkieren und bei der Geradeausfahrt, sowie für die Kurvenfahrt sicher getroffen werden.

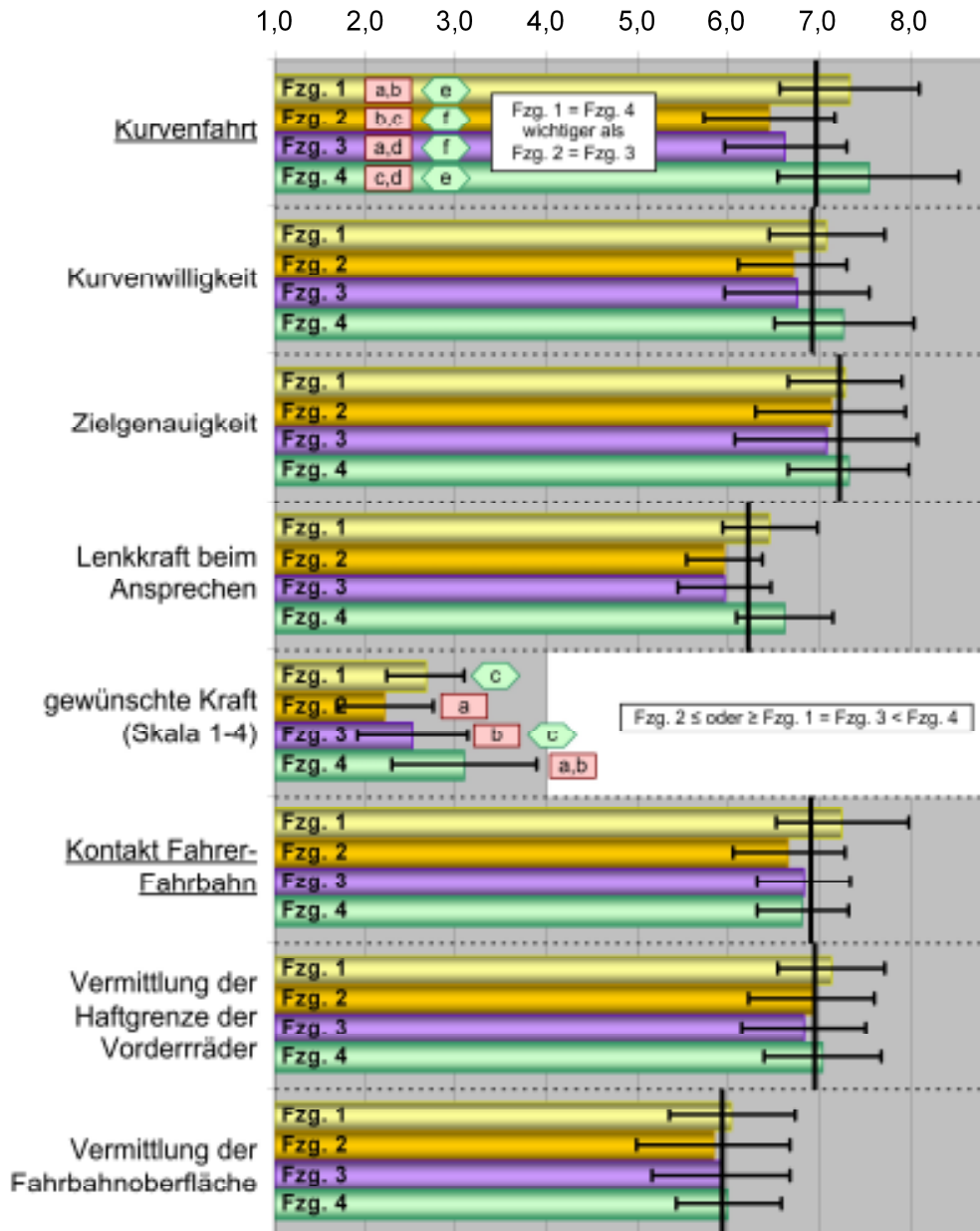


Abbildung 154: Kriterienwichtung der Probanden nach jedem Fahrzeug für die Kriterien „Kurvenfahrt“ und „Kontakt Fahrer-Fahrbahn“

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt interpretieren.

- Das Hauptkriterium „Geradausfahrt“ scheint wichtiger zu sein als die ebenfalls als wichtig eingestuft Hauptkriterien „Parkierkomfort“, „Kurvenfahrt“ und „Kontakt Fahrer-Fahrbahn“.
- Keines der Kriterien wurde als unwichtig von den Probanden eingeschätzt.
- Innerhalb des Hauptkriteriums „Kontakt Fahrer-Fahrbahn“ scheint das Unterkriterium „Vermittlung der Haftgrenze der Vorderräder“ wichtiger zu sein als das Unterkriterium „Vermittlung der Fahrbahnoberfläche“. Vermutlich nicht zuletzt deswegen, da die Information über den Haftungszustand der Vorderräder für die Sicherheit bedeutender ist. Allerdings bleibt zweifelhaft, ob ein Normalfahrer zwischen beiden adäquat unterscheiden kann.

- Gemessen an den Mittelwerten der Kriterien ohne Aufteilung nach den Fahrzeugen sind die Lenkkräfte für das Parkieren, für die Kurvenfahrt und das Ansprechen aus der Mitte in der Geradeausfahrt tendenziell etwas weniger wichtig als die restlichen Unterkriterien. Bei der Kurvenfahrt ist tendenziell die Zielgenauigkeit wichtiger als die Kurvenwilligkeit und die Lenkkraft beim Ansprechen.
- Die Kurvenfahrt scheint bei den Fahrzeugen 1 und 4, die beide gleich sind, wichtiger zu sein als die der Fahrzeuge 2 und 3, die ebenfalls untereinander gleich sind.
- Bei der gewünschten Lenkkraft für das Parkieren sollte die Kraft für Fahrzeug 2 am geringsten von allen Fahrzeugen sein, gefolgt von den Fahrzeugen 1 und 3, bei denen sie gleich hoch sein sollte. Für das Fahrzeug 4 wird die höchste Lenkkraft gewünscht und zusätzlich sollte diese auch sportlich hoch sein, was die Tatsache widerlegt, dass generell beim Parkieren eine niedrige Lenkkraft gewünscht wird.
- Bei der Geradeausfahrt sollte die gewünschte Kraft bei Fahrzeug 2 am niedrigsten von allen sein, während Fahrzeug 1 und 3 gleich hohe Kräfte haben sollen. Für das Fahrzeug 4 lässt sich lediglich sagen, dass die Wunschkraft höher sein sollte als bei Fahrzeug 2. Gegenüber den Fahrzeugen 1 und 3 ist nichts bekannt.
- Bei der gewünschten Lenkkraft während der Kurvenfahrt wird für das Fahrzeug 4 erwartet, dass es schwergängiger sein sollte als die beiden Fahrzeuge 2 und 3. Für das Fahrzeug 1 lassen sich keine eindeutigen Aussagen finden.
- Generell bleibt also festzuhalten, dass bei Fahrzeug 1 und 3 die gewünschte Lenkkraft in den befragten Situationen gleich hoch sein sollte, bei Fahrzeug 2 tendenziell niedriger und bei Fahrzeug 4 tendenziell hoch.

3.3.4.6 Vergleich von Kunden- und Expertenurteilen

Eine wichtige Erkenntnis in Zusammenhang mit dem Lenkgefühl, ist es herauszufinden, inwieweit sich die Urteile von Kunden und Experten voneinander unterscheiden. Der Grund ist der, dass die Lenkung bei der Fahrzeugentwicklung aufgrund von Expertenurteilen ausgelegt wird, wobei davon ausgegangen wird, dass sich die Expertenbeurteilung an der Kundenbeurteilung orientiert. Diese Art der Vorgehensweise ist in der Industrie üblich, nicht zuletzt weil dadurch der Gefahr aus dem Wege gegangen werden soll, dass Informationen über ein bestimmtes neues Produkt vorzeitig an die Öffentlichkeit gelangen.



Abbildung 155: Vorgehensweise beim Vergleich von Kunden- und Expertenurteil der untersuchten Fahrzeugen

Abbildung 155 zeigt die Vorgehensweise, um die Expertenurteile und die Kundenurteile zu den Fahrzeugen vergleichen zu können. Das Kundenurteil wurde zu bestimmten vorgegebenen Kriterien während der Fahrt durch direkte Befragung ermittelt. Die Probanden mussten hierfür nur ihr verbales Urteil abgeben. Eine Einordnung der Urteile auf einer Skala erfolgt nicht. Die Antworten werden in der Auswertung nominal den Kategorien „positives Urteil“, „eingeschränktes Urteil“ oder „negatives Urteil“ zugeordnet. Damit ist es möglich, prozentual zu bestimmen, wieviele Urteile bei einem Fahrzeug und einem Kriterium positiv sind.

Um einen Vergleichswert zwischen Experten- und Kundenurteil zu erhalten, muss das Expertenurteil in einen prozentualen Wert umgerechnet werden. Hierfür muss zum Kundenkriterium ein passendes Expertenkriterium gefunden werden (siehe Abbildung 156), sofern es nicht identisch ist. Der Unterschied von Experten- und Kundenkriterien ergibt sich in den meisten Fällen dadurch, dass Urteile zu Expertenkriterien zum Großteil durch reproduzierbare Standardfahrmanöver auf abgesperrten Messgeländen gewonnen werden, während die Urteile zu den Kundenkriterien im vorliegenden Fall auf öffentlichen Straßen ermittelt worden sind. Letzteres lässt sich dadurch rechtfertigen, dass der Kunde meist keine

Erfahrung mit abgesperrten Messgeländen und Standardfahrmanövern hat und es nicht garantiert werden kann, dass die Ergebnisse tatsächlich denen einer Realfahrt entsprechen.

Das Expertenurteil liegt in Form von Kennzahlen vor, die sich durch eine Fragebogenskala ergeben. Um vom Skalenwert auf den entsprechenden prozentualen Wert zu gelangen, wird der sich ergebende Skalenwert (hier der Durchschnittswert allen beurteilenden Experten) für ein Fahrzeug und ein Expertenkriterium umgerechnet. Das wird dadurch realisiert, dass Werte, die der vollen Zustimmung entsprechen, mit 100% umgerechnet werden. Werte die keinerlei Zustimmung entsprechen und somit die Ränder der Skala sind, werden mit 0% umgerechnet. Der exakte Prozentwert ergibt sich durch Interpolation. Durch den Vergleich des Prozentwertes positiver Urteile der Kundenprobanden und der der Experten ist es möglich, größere Abweichungen in der Beurteilung zu finden.

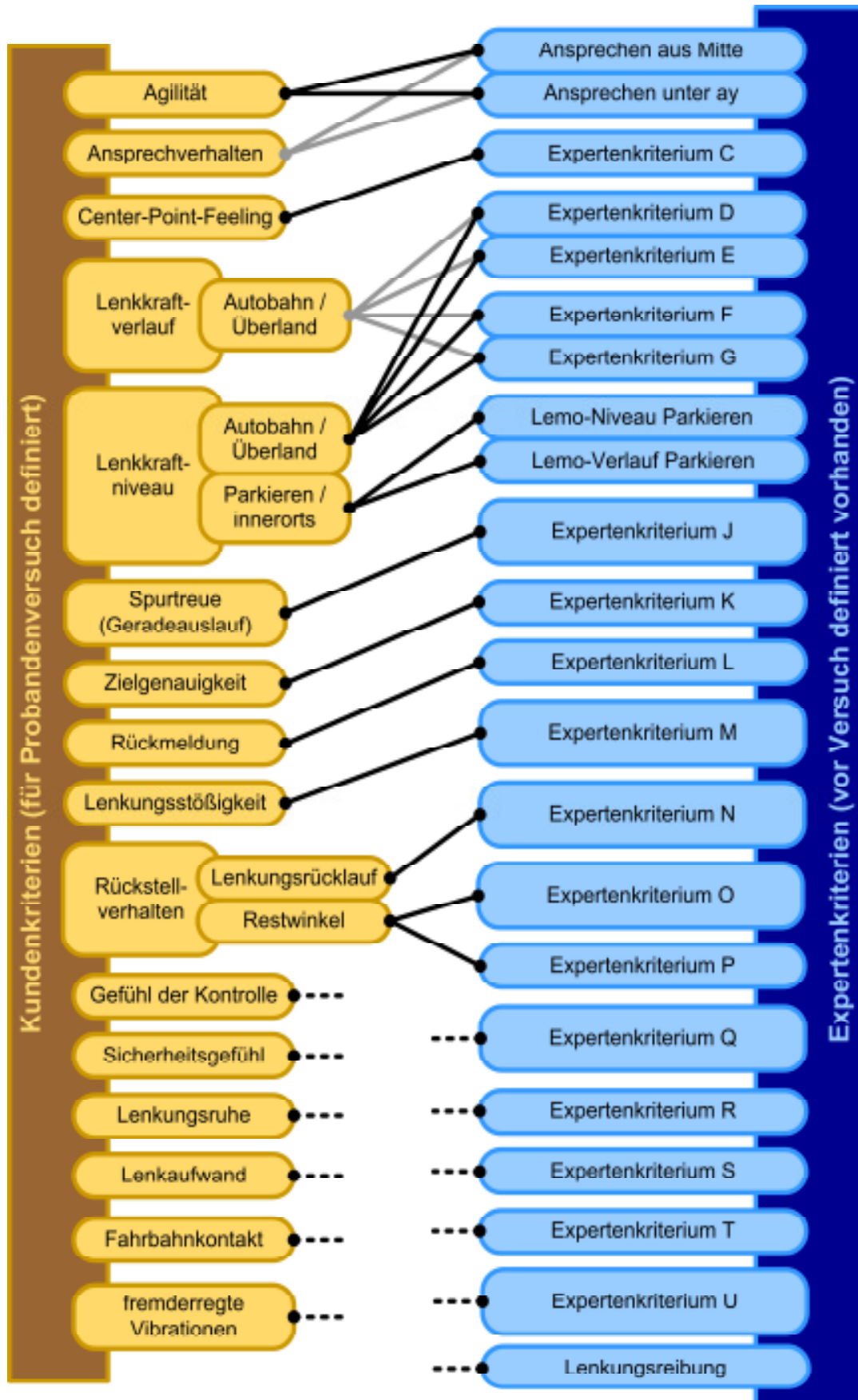


Abbildung 156: Vergleich von Kundenaussagen zu bestimmten Kundenkriterien und Expertenkriterien (teilneutralisiert)

Abbildung 156 zeigt, welche Kundenkriterien mit den Expertenkriterien (hier firmeninterne und firmenspezifische Kriterien) verglichen wurden. Die Expertenkriterien sind Bestandteil der Expertenbeurteilung, welche auf Basis exakt definiert Fahrmanöver auf einem abgesperrten Versuchsgelände und somit ohne Straßenverkehr durchgeführt wurden. Da die Befragung der Kunden (Probanden) auf einer öffentlichen Straße unter realen Bedingungen stattfand, wurden auch keine standardisierten Fahrmanöver durchgeführt. Dadurch können manche Kundenkriterien mit den Expertenkriterien nur annäherungsweise verglichen werden. Desweiteren gibt es zu einigen wenigen Kundenkriterien keine Expertenkriterien, mit denen ein verglichen werden kann. Der Grund hierfür ist, dass es zu den erwähnten Kundenkriterien kein standardisiertes bzw. genormtes Fahrmanöver gibt und dass sich keine objektiven Daten finden lassen, denen ein Zusammenhang mit dem Kriterium nachgewiesen werden kann.

Die höchste Übereinstimmung herrscht beim Geradeauslauf, der mit dem Korrekturaufwand gleichgesetzt wurde.

Hohe Übereinstimmungen gibt es beim Ansprechverhalten und bei der Zielgenauigkeit.

Akzeptable Abweichungen ergeben sich für die Stößigkeit, das Rückstellverhalten und das Lenkkraftniveau und den Lenkkraftverlauf über dem Lenkwinkel. Vermutlich ergeben sich die größeren Unterschied dadurch, dass diese Kriterien beim Experten nochmals untergliedert werden (z.B. bei verschiedenen Geschwindigkeiten in Konstantfahrt). Es kann also in diesen Fällen nicht eindeutig gesagt werden, dass die Normalfahrer tatsächlich in einem solchen deutlichen Maß vom Experten abweichen.

Große Abweichungen ergeben sich beim Mittengefühl (hier unterscheiden die Experten drei Geschwindigkeitsbereich, während die Kundenprobanden nur zwischen Autobahn und Landstraße unterscheiden) und der Rückmeldung. Bei der Rückmeldung erscheint es so, dass den Kundenprobanden nicht einheitlich klar ist, was unter der Rückmeldung zu verstehen ist.

Generell und unabhängig von den Kriterien ist auffällig, dass die Kundenprobanden weniger gut urteilen, als die Experten. Durch einen statistischen Test wurde sichergestellt, dass diese Tendenz nicht an der Reihenfolge der gefahrenen Fahrzeuge liegt. D.h. dass die zuerst gefahrenen Fahrzeuge tendenziell besser oder schlechter gesehen wurden als die Fahrzeug, die in der Reihenfolge als zweites, drittes oder viertes Fahrzeug gefahren wurden.

Es liegt die Vermutung nahe, da die Experten Produkte aus dem eigenen Haus beurteilen, hier tendenziell etwas besser urteilen. Weiterhin kann nicht ausgeschlossen werden, dass sie aufgrund des ausgeprägten technischen Hintergrundes, etwas differenziertere und genauer definierte Anforderungen an einzelne Beurteilungskriterien stellen.

3.3.5 Versuch 5 – Kennzahlenidentifikation mit Hilfe von Daten aus der Fahrzeugpresse

Auf Basis von Fahrzeugtests in der zugehörigen Fachpresse soll ermittelt werden, ob sich Kennzahlen bzw. Kennzahlenbereiche identifiziert lassen, welche die Pressebeurteilung zu letztlich erklären bzw. bestimmen.

Als objektive Basis werden die angegebenen Daten verwendet, die sich aus gemessenen Daten und Werksdaten zusammensetzen. Jedes Urteil wird als ein Subjektivurteil angesehen. Beim Presseurteil werden die Verbalurteile der Zeitschrift *Auto, Motor und Sport* (2002, 2003, 2004, 2005 und 2006) in Bezug auf das Handling und die Lenkung herangezogen, da in dieser Zeitschrift beides getrennt voneinander am Fahrzeug beurteilt wird. Zu beachten ist, dass die objektiven Daten nicht mehr auf Richtigkeit überprüft werden können, es wird aber im nachfolgenden davon ausgegangen, dass diese mit gängigen Messmethoden ermittelt wurden, sodass ihre Objektivität nicht angezweifelt wird.

Es wird davon ausgegangen, dass ein Großteil der Kunden (Normalfahrer) in Bezug auf die Beurteilung ebenso kritisch ist wie die Presse. Das ähnlich verwendete Vokabular bei der

Beschreibung der Fahrzeuglenkung aus dem Versuch 4 (siehe Kapitel 3.3.4) lässt diesen Schluss zu.

In der Tabelle 35 ist dargestellt, welche Objektivparameter entweder mit dem Presseurteil des Fahrzeughandling oder mit dem Presseurteil der Fahrzeuglenkung verglichen werden. Die Objektivparameter werden teilweise entweder direkt und unverändert zum Vergleich übernommen oder es werden neue Parameter durch Rechenoperationen generiert und dann mit den Subjektivurteilen verglichen.

| Betrachtete bzw. kombinierte Parameter | Presseverbal- beurteilung „Fahrzeughandling“ | Presseverbal- beurteilung „Fahrzeuglenkung“ |
|---|--|---|
| Lenkweg für das Einstellen von 1° Lenkwinkel an den Vorderrädern (Ackermannbedingung) | | X |
| Durchfahrener Kurvenradius bei 50mm Lenkweg am Lenkrad (Ackermannbedingung) | X | X |
| Gewicht / Spurfläche | X | |
| Lenkraddurchmesserklassen | X | X |
| Lenkübersetzungsklassen | X | X |
| Lenkwegeklassen | X | X |
| Kurvenradiusklassen | X | X |
| Lenkraddurchmesser und Lenkübersetzung | | X |
| Kurvenradius bei 50mm Lenkweg und Lenkweg für 1° | | X |

Tabelle 35: Übersicht der mit den Beurteilungskriterien „Fahrzeughandling“ und „Fahrzeuglenkung“ betrachteten und kombinierten Parameter

Bei den angegebenen Lenkübersetzungen dürfte es sich vermutlich um die reine geometrische und über die gesamte Lenkwinkelweite (vom linken bis zum rechten Lenkradanschlag) gemittelte Lenkübersetzung handeln. Es ist zu erwarten, dass die meisten aufgeführten Fahrzeuge über eine Zahnstangenlenkung verfügen, bei der üblicherweise in Nähe der Nulllage eine indirektere Übersetzung und mit zunehmendem Lenkwinkel eine direktere Übersetzung gewählt wird. Letzteres wird durch eine Erhöhung der Zahnteilung erreicht. Dadurch wird bei größeren Lenkwinkeln ein geringerer Lenkaufwand erreicht und bei hohen Geschwindigkeiten die Lenkempfindlichkeit und somit die Gefahr des Lenkungsverreißen reduziert und das Rangieren durch Reduzierung des Lenkwinkelaufwandes erleichtert.

Mit Hilfe des Lenkraddurchmessers und der geometrischen Lenkübersetzung lässt sich der Lenkweg bestimmen, der am Außendurchmesser des Lenkrades vom Fahrer zurückgelegt werden muss, um die Vorderräder beispielsweise um ein Grad (hier ist der mittlere Wert zwischen kurvenäußeren und -inneren Rad gemeint) zu drehen. Folgende Formel wird zur Berechnung des Lenkweges für einen Grad Radeinschlag verwendet:

$$\text{Lenkweg (Radwinkel} = 1^\circ) = \frac{\pi * \text{Lenkraddurchmesser} * \text{Lenkübersetzung}}{360} \text{ [mm]}$$

Wird zusätzlich der Radstand des Fahrzeugs als Parameter berücksichtigt, kann unter der Annahme der vereinfachten Ackermannbedingung (Reimpell und Betzler 2000) mit nachfolgender Formel berechnet werden, welcher Kurvenradius bei einem eingestellten Lenkweg von 50 mm am Lenkradaußendurchmesser durchfahren wird (Abbildung 159).

$$\text{Kurvenradius (Lenkweg = 50mm)} = \frac{\text{Lenkraddurchmesser} * \text{Lenkübersetzung} * \text{Radstand} * \pi}{2\pi * 50\text{mm}}$$

Durch diese Art der Darstellung lässt sich die dem Menschen dargebotenen Direktheit der Lenkung erkennen. Die vereinfachte Ackermannbedingung berücksichtigt im Einspurmodell nur den Kurvenradius, den Radstand und den mittleren Lenkwinkel und gilt nur bei langsamer Kurvenfahrt und kleinen Lenkwinkeln. Die Schwerpunktslage, die angreifenden Querbeschleunigungskräfte und somit die Schräglaufwinkel an den Rädern und der Schwimmwinkel sind in der vereinfachten Ackermannbedingung nicht enthalten. Diese Parameter können in vorliegendem Fall für die Berechnung nicht verwendet werden, weil die zugehörigen Daten der einzelnen Fahrzeuge dem Verfasser nicht vorliegen und ohne Fahrversuch bzw. Fahrzeugvermessung nicht bestimmt werden können.

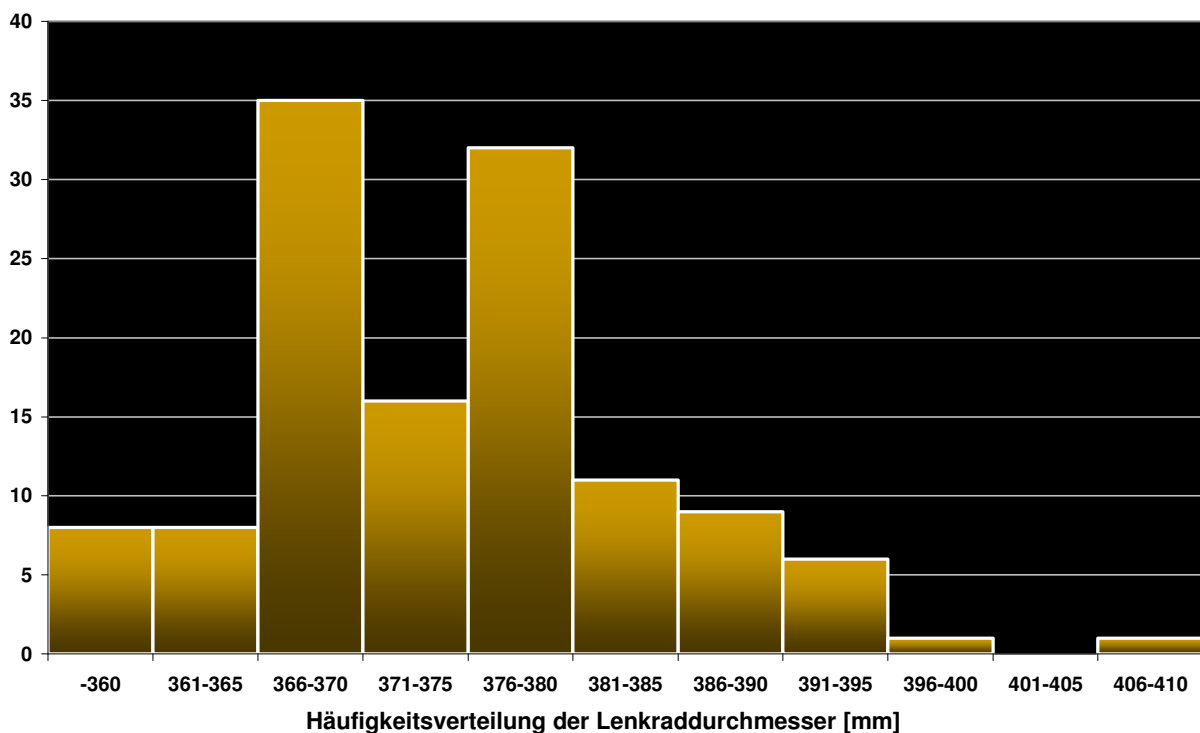


Abbildung 157: Häufigkeitsverteilung der angegebenen Lenkraddurchmesser aus den Einzeltests von Auto, Motor und Sport (2002, 2003, 2004, 2005 und 2006)

Abbildung 157 zeigt die aus den Daten der Einzeltest ermittelte Häufigkeitsverteilung der Lenkraddurchmesser in elf Klassen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Lenkraddurchmesser der meisten Fahrzeuge einen Wert zwischen 366 und 390 mm aufweisen, wobei bei einer Aufteilung dieses Bereichs in sechs Klassen die meisten Durchmesser in der Klasse 376-380 mm und 366-370 mm zu finden sind. Ursächlich für die doppelte Spitze in der Häufigkeitsverteilung ist, dass häufig in der geometrischen Konstruktion „runde“ Zahlenwerte wie 380 mm und 370 mm verwendet werden. Eine Darstellung (die hier nicht abgebildet ist) mit jeweils einer Klasse pro Millimereinheit beweist dies.

In der Abbildung 158 ist die Pressebeurteilung der Lenkung über die beiden Objektivgrößen „durchfahrener Kurvenradius bei 50 mm Lenkweg“ und „erforderlicher Lenkweg für 1° Radeinschlag“ aufgetragen. Dort ist unterschieden, ob die Lenkung positiv, eingeschränkt positiv oder negativ seitens der Presse beurteilt wird. Bei positiver Beurteilung wird noch weiter differenziert, ob die Lenkung als mit der Eigenschaft „leichtgängig“ verbalisiert ist.

Aus 77 Einzeltests können dann im Diagramm Bereiche zu den vier Kategorien gebildet werden, indem die Randwerte miteinander umschlossen werden.

Als Ergebnis kann lediglich festgehalten werden, dass die Beurteilung in den genannten Kategorien nicht von den beiden Objektivgrößen abhängig ist. Als einzige Auffälligkeit bei dieser Art der Darstellung bleibt zu bemerken, dass ab einem Lenkweg von etwa 59 mm zum Erreichen eines 1° Radeinschlags (hier sei nochmals erwähnt, dass es sich um einen statischen Wert bei stehendem Fahrzeug handelt) die Lenkung nicht mehr negativ oder eingeschränkt negativ beurteilt wird (siehe Abbildung 158 Nr. 1). In allen anderen Bereichen gibt es alle vier der genannten Beurteilungsmöglichkeiten.

Die Darstellung des gleichen Diagramms wie in Abbildung 157 (in dieser Arbeit nicht abgebildet) mit dem Unterschied, dass nicht der durchfahrene Kurvenradius bei 50 mm Lenkweg dargestellt wird, sondern der durchfahrene Kurvenradius bei 1° Radeinschlag, führt zwar zunächst zu einem anderen Bild, ändert aber nichts an den zuvor gemachten Aussagen.

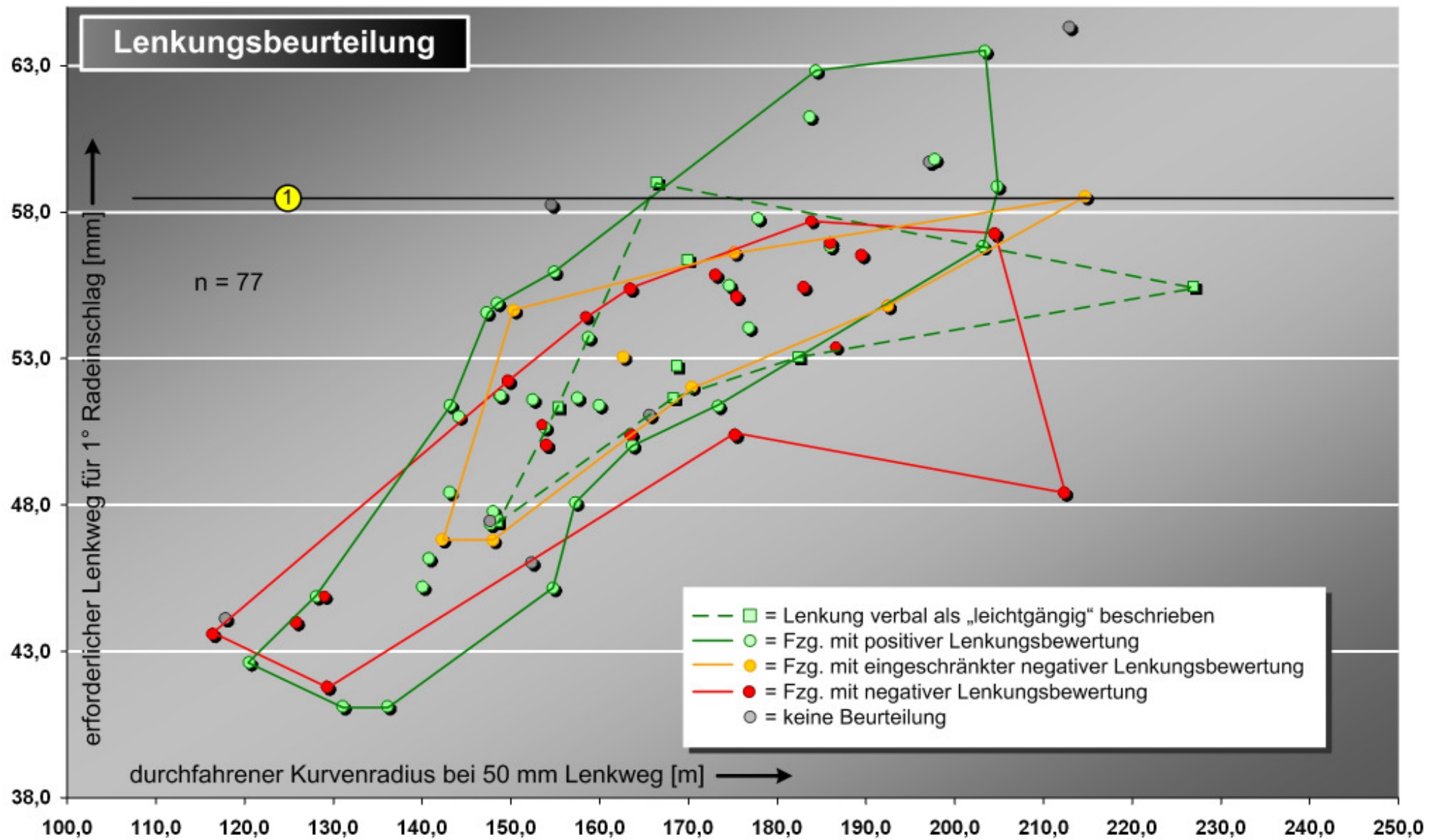


Abbildung 158: Lenkungsbeurteilung verschiedener Fahrzeugmodelle durch Auto, Motor und Sport (2002, 2003, 2004, 2005 und 2006) unter Berücksichtigung von Lenkraddurchmesser und Lenkübersetzung

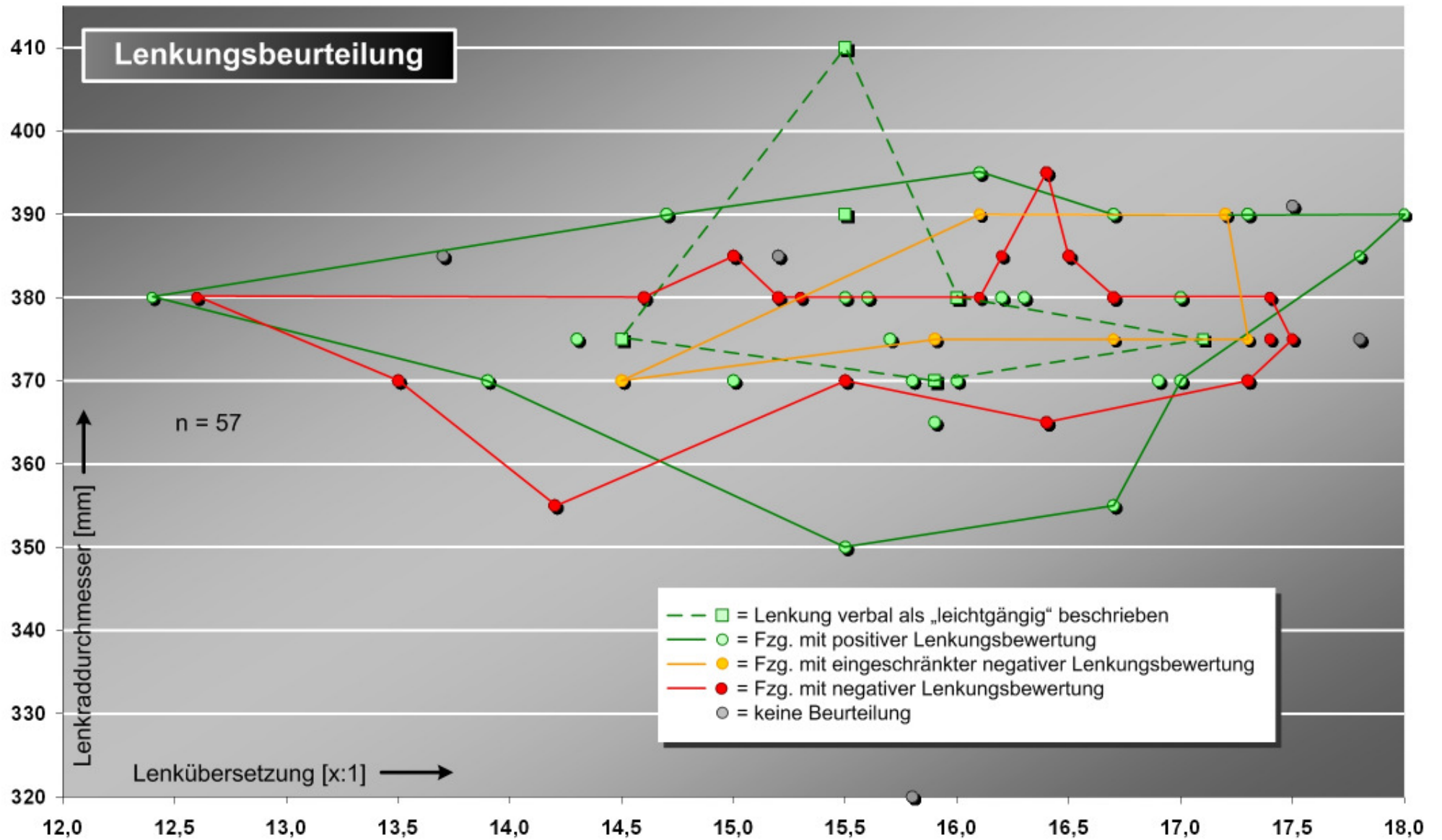


Abbildung 159: Handlingsbeurteilung verschiedener Fahrzeugmodelle durch Auto, Motor und Sport (2002, 2003, 2004, 2005 und 2006) unter Berücksichtigung von Lenkraddurchmesser und Lenkübersetzung

In Abbildung 159 ist die Bewertung der Lenkung in Abhängigkeit der Objektivgrößen „Lenkraddurchmesser“ und „Lenkübersetzung“ angegeben. Wie schon in Abbildung 158 ist neben der negativen und eingeschränkt negativen Bewertung bei der positiven Beurteilung noch unterschieden, ob die Lenkung zusätzlich als leichtgängig bewertet wurde. Aus der Darstellung kann nichts Wesentliches herausgelesen werden, was für das Lenkgefühl relevant ist. Die Stichprobenzahl liegt bei 57. Es gibt keinen erkennbaren Bereich, in dem die negativen Urteile, eingeschränkten negativen Urteile, Positivurteile und leichtgängige Beurteilungen voneinander deutlich unterscheiden. Damit scheint die Lenkübersetzung in Kombination mit dem Lenkraddurchmesser betrachtet keine wesentliche bestimmende Größe für das Lenkgefühl zu sein.

Abbildung 160 zeigt die Handlingsbewertung aus der Presse (*Auto, Motor und Sport* 2002, 2003, 2004, 2005 und 2006) in Abhängigkeit des erforderlichen Lenkweges am Lenkradaußendurchmesser und des durchfahrenen Kurvenradiuses bei eingestelltem 50 mm Lenkweg. Es wird zur besseren Ergebnisüberprüfung ebenfalls ein Diagramm (hier nicht abgebildet) erstellt, das anstelle des eingestellten Lenkweges von 50 mm einen eingestellten Lenkwinkel von 1° zeigt.

Neben den negativen, eingeschränkt negativen Bewertungen wird bei den positiven noch unterschieden, ob das Handling verbal als „sehr gut“ oder als „flink“, „sportlich“ oder „agil“ bezeichnet wird. In der Abbildung sind die entsprechenden Bereiche, in denen die beurteilten Fahrzeuge zu finden sind, umrandet. Auffällig bei der Lage der umrandeten Zonen ist, dass es im Bereich der flinken, sportlichen und agilen Fahrzeuge (gestrichelte grüne Linie) nahezu keine negativen Bewertungen gibt. Desweiteren ist im unteren linken Bereich (siehe Abbildung 160 Detail Nr. 1), also bei kleinen erforderlichen Lenkwegen und eng durchfahrenen Kurvenradien keine negative Bewertung mehr zu finden und die Fahrzeugen werden relativ oft als „flink“, „sportlich“ oder „agil“ bezeichnet.

Unterhalb von ca. 147 m Kurvenradius (siehe Abbildung 160 Detail Nr. 2) wird kein Fahrzeug mehr negativ beurteilt. Das ist auch im nicht abgebildeten Diagramm mit 1° Radeinschlag gleich. Ebenso auffällig ist, dass oberhalb eines Lenkweges von ca. 57 mm (siehe Abbildung 160 Detail Nr. 3) zum Einstellen eines Grad Lenkwinkels an den Vorderrädern. Allerdings ist diese Grenze im nicht abgebildeten Diagramm bei ca. 61 mm.

Aus dem Ergebnis kann abgeleitet werden, dass zu große Kurvenradien bei gegebenen Lenkradwinkel als mangelndes Handling beurteilt wird und dass zu große Lenkwege dem Fahrer zwar bzgl. der Einstellgenauigkeit entgegenkommen, aber die Einstellgeschwindigkeit und damit das Ansprechen des Fahrzeugs als zu gering angesehen werden kann. Weiterhin scheint der Fahrer bei größeren Lenkwegen auch etwas größere Lenkradien zu tolerieren.

Es sollte jedoch dem Sachverhalt hinzugefügt werden, dass nicht alleine aufgrund der Parameter Lenkweg und Kurvenradius eine Aussage über die Ansprechzeiten und über das Handling gemacht werden kann.

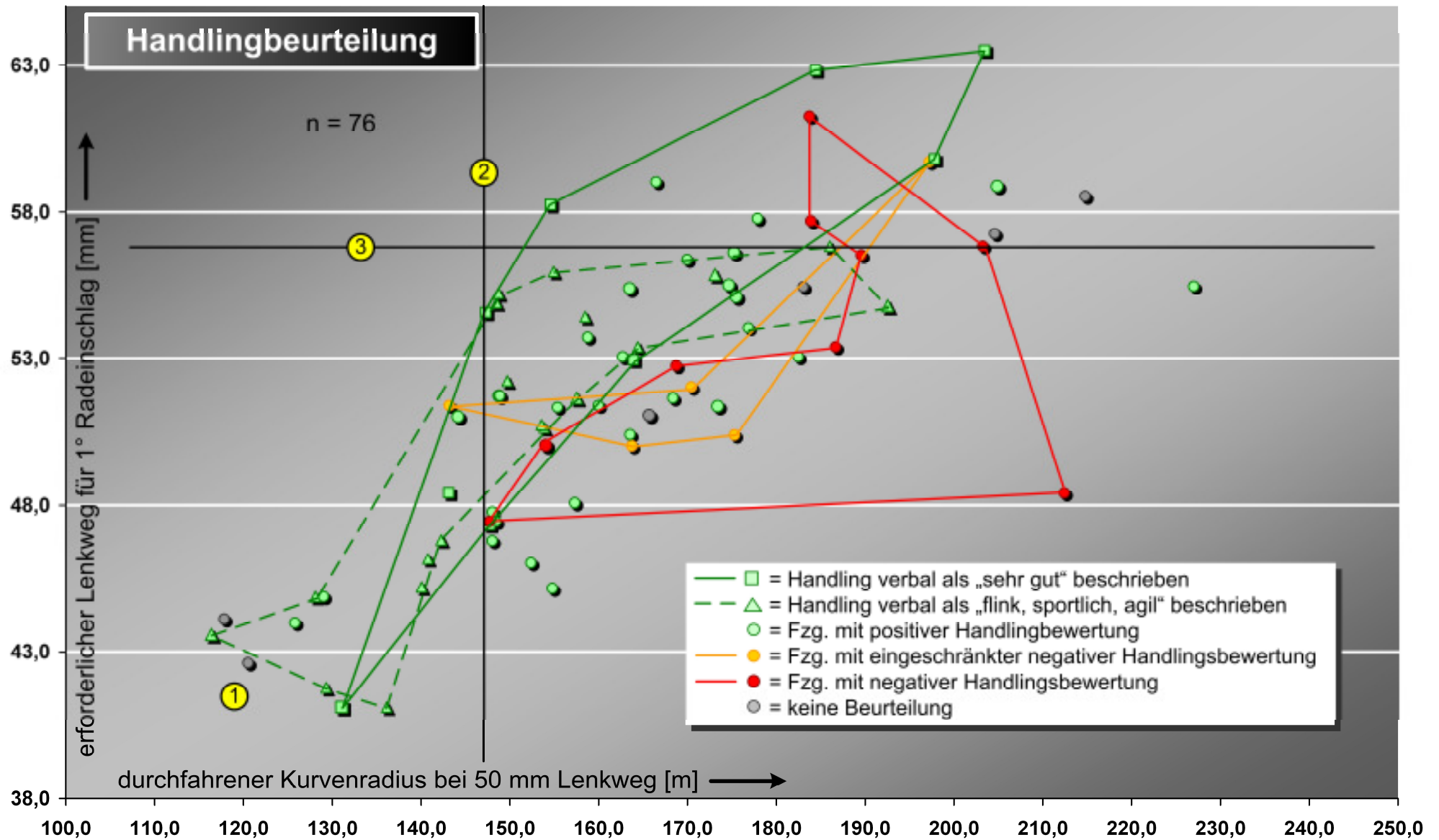


Abbildung 160: Handlingbeurteilung verschiedener Fahrzeugmodelle durch Auto, Motor und Sport (2002, 2003, 2004, 2005 und 2006) unter Berücksichtigung des Lenkweges für ein Grad Lenkwinkel und des durchfahrenen Kurvenradius bei 50 mm Lenkweg

3.3.6 Versuch 6 – Wahrnehmungsschwellen für die Lenkkraftwahrnehmung

Es soll mit Hilfe eines Laborversuchs geklärt werden, welcher Verteilung die Wahrnehmungsschwellen für die Lenkkraft am Lenkrad folgen, weil es bisher in der wissenschaftlichen Literatur zu wenige belastbare Untersuchungen hierfür gibt (siehe Kapitel 2.5.2.4). Diese haptische Wahrnehmung kann für den Fahrer auf zwei Arten erfolgen. Zum einen die Wahrnehmung und Bestimmung der Kraft über den Muskel-Sehnen-Komplex (Tiefensensibilität) und zum anderen über die Wahrnehmung kleinere Bewegungen und Kräfte über die Dehnung der Haut der am Lenkrad aufliegenden Hand (Oberflächensensibilität).

Es werden Messungen zur Absolutwahrnehmungs- und Differenzschwelle in einem Mock-Up durchgeführt. Bei der Absolutwahrnehmung wird bei vorgegebenen und konstant gehaltenen Winkelstellungen des Lenkrads die Kraft von null linear erhöht.

Zum Zeitpunkt zu dem die Probanden eine Kraft bzw. eine Kraftänderung spüren, signalisieren sie dies durch Anheben des Fußes an der Fußablage. Bei der Differenzwahrnehmung wird eine bereits am Lenkrad anliegende Kraft erhöht bzw. vermindert. Absolutwahrnehmungsschwellen lassen sich zur Übertragung auf eine reale Fahrt nur um den Nullpunkt bzw. im On-Center-Bereich sinnvoll messen. Für höhere Lenkwinkel muss die Differenzwahrnehmungsschwellen herangezogen werden, da im realen Fahrbetrieb bei großen Winkeln immer eine Rückstellkraft wirkt, die in ihrer Höhe hauptsächlich von der Querbeschleunigung und damit wiederum von Kurvenradius und Fahrgeschwindigkeit abhängt.

3.3.6.1 Versuchsaufbau

Abbildung 162 und Abbildung 163 zeigen den Versuchstand mit dem die Wahrnehmungsschwellen der Lenkkraft bestimmt werden sollen. Er besteht aus einem verstellbaren Autositz und einer Pkw-Serienlenksäule (Gelenkwellen sind nicht mehr vorhanden). Das Lenkrad ist ein Airbag-Lenkrad, das allerdings aus Sicherheitsgründen über keinen Airbag mehr verfügt. Die Lenksäule ist am Rahmentraggestell durch einen Querträger fixiert.

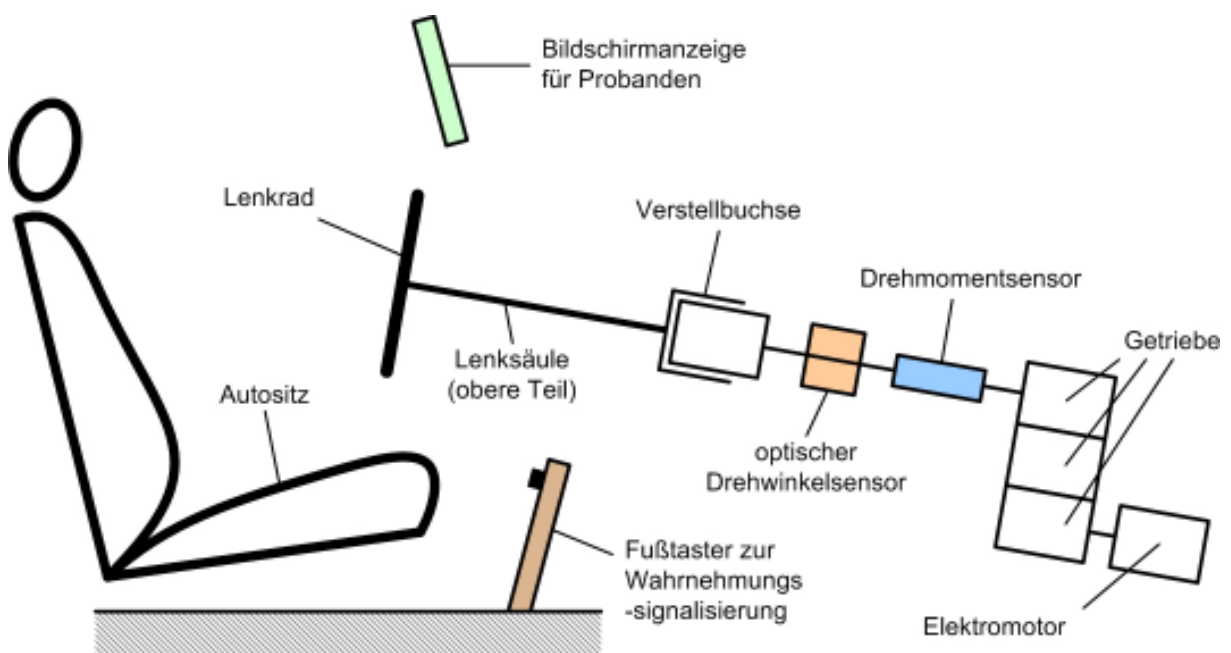


Abbildung 161: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus



Abbildung 162: Sitzgestell mit Lenksäule eines Serienfahrzeugs

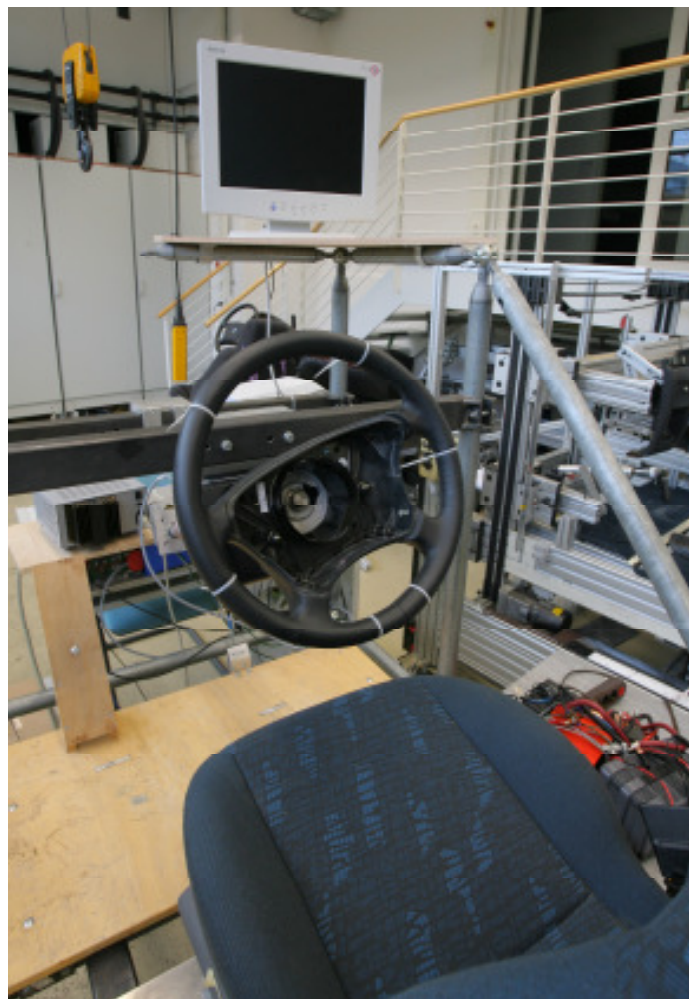


Abbildung 163: Sitzgestell mit Lenksäule eines Serienfahrzeugs und Ablesedisplay, sowie Lenkrad mit Markierungen für die drei verschiedenen Auflagehöhen



Abbildung 164: Drehwinkelsensor (optisch) und Drehmomentsensor (links im Bild) zur Messung von Lenkmoment und Lenkwinkel

Am Ende der Lenksäule (es handelt sich um die Stelle, an der in der Regel die Gelenkwellen angeflanscht werden), befinden sich zwei Messsensoren. Zunächst (vom Lenkrad weg gesehen) erfolgt die Messung des Verdrehwinkels über einen optischen Inkrementensensor. Die Messung kann allerdings nicht absolut, sondern in Relation zur Lenkwellenverstellung erfolgen. Aufgrund der hohen Übersetzung zum Motor (ca. 1:2000) ist ein direktes Verdrehen des Lenkrades auf die gewünschten Messlenkwinkel innerhalb einer annehmbaren Zeit nicht möglich. Hierfür müsste der Motor das Lenkrad in die richtige Position verschieben, was aufgrund der hohen Untersetzung mehrere Minuten dauern würde und wodurch die Versuchsdauer pro Person sich unverhältnismäßig lang in die Länge ziehen würde. Um das zu umgehen, wird vor dem Lenkwinkelsensor eine Buchse angebracht, mit der über eine Steckverbindung die zu messenden Lenkwinkel eingestellt werden können. Bei der Umsteckung erfolgt somit keine Messung der Lenkwinkeländerung durch den Lenkwinkelsensor. Nach dem Winkelsensor (orange im Bild) folgt der Drehmomentsensor (blau). Der Drehmomentsensor besitzt einen Nennmessbereich bis 12 Nm.

Der Lenksäule nach unten folgenden werden zwei Getriebe angeflanscht (siehe Abbildung 165), die zusammen mit dem integrierten Getriebe des Elektromotors (ca. 1:2000). Die Übersetzung des Motorgetriebes ist nicht genau bekannt und kann sie nur geschätzt werden, da es sich um ein altes am Lehrstuhl vorhandenes Teil handelt und die Übersetzung nicht abzulesen ist. Der Elektromotor besitzt eine Nennspannung von 12 V, die bei Bedarf auf bis zur 14 V ohne Probleme erhöht werden kann.

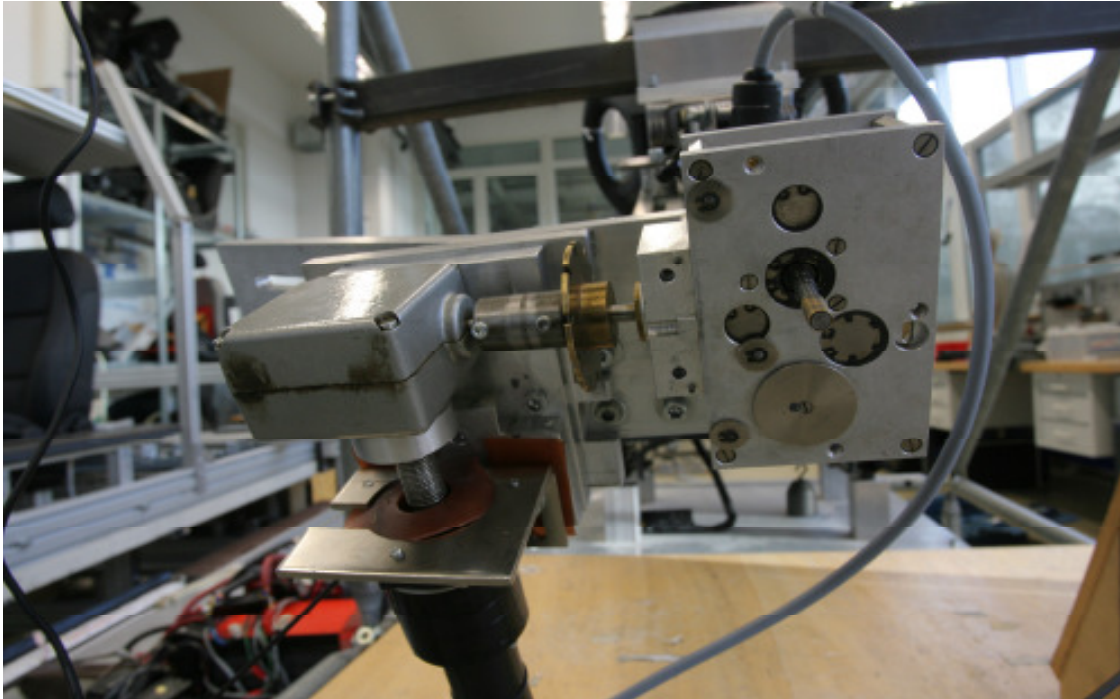


Abbildung 165: Antriebsmotor (von unten angeflanscht) und zwei zusätzliche Getriebe, die eine sehr hohen Untersetzung der Motordrehzahl zum Lenkrad ermöglichen

Vor der Versuchsdurchführung ist nicht auszuschließen, dass sich aufgrund anderer Hand-Arm-Stellungen zum Lenkrad bedingt durch die unterschiedlichen Probandenanthropometrien, Einflüsse auf die Wahrnehmungsschwellen ergeben. Um dem entgegenzuwirken sollen die Probanden in etwa gleiche Armstellungen einnehmen. Hierzu wird eine Schablone verwendet, die nahezu gleiche Winkel zwischen Unter- und Oberarm ermöglichen. Weiterhin wird sichergestellt, dass die Sitzhöhe gegenüber dem Lenkrad dabei bei allen Probanden nahezu gleich ist.

| variierte Parameter | Parametervarianten |
|----------------------------|---|
| Lenkwinkel | 0°, 5°, 10°, 35° (einseitig) |
| Handhöhe auf dem Lenkrad | hoch, Mitte, tief |
| Lenkmoment | absolut (0°, 5°, 10°), auf Differenzwahrnehmung (35°) |

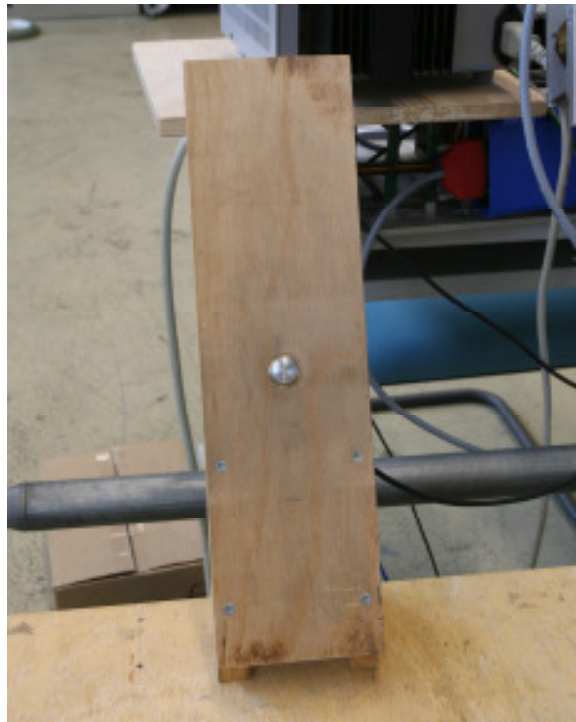
Tabelle 36: Versuchsvarianten des Versuchs zur Bestimmung der Verteilung der Wahrnehmungsschwelle der Lenkkraft

Tabelle 36 zeigt die zu untersuchenden Versuchsvarianten. Es werden die Lenkwinkel 0°, 5°, 10° und 35° gemessen. Die ersten drei Winkel werden zur Messung der Absolutwahrnehmungsschwellen eingesetzt, der Winkel von 35° zur Messung der Differenzwahrnehmungsschwellen. Bei den Differenzschwellen werden jeweils eine Momentenerhöhung und eine Momentenverringerung gemessen, da überprüft werden soll, ob eine Erhöhung des Moments andere Schwellwerte ergibt als eine Verminderung.

Zusätzlich werden drei verschiedene Greifhöhen (hoch, Mitte, tief) untersucht. Hintergrund ist, dass sich durch die unterschiedlichen Greifhöhen andere Winkelverhältnisse der Armhaltung ergeben. Bei einer tieferen Greifhaltung liegen die Oberarme mehr am Brustkorb an, was unter Umständen zu anderen Wahrnehmungsschwellen führen kann.

3.3.6.2 Versuchsablauf

Der Versuch beginnt zunächst mit den Messungen der Absolutwahrnehmungsschwellen bei den Winkeln 0° , 5° und 10° . Damit liegt keine Lenkkraft zu Beginn des Versuchs an. Die Lenkkraft wird sukzessive von null erhöht bis der Proband das Überschreiten seiner individuellen Wahrnehmungsschwelle verspürt. Die Signalisierung des Erreichens der Wahrnehmungsschwellen erfolgt über einen Fußtaster (siehe Abbildung 166), wobei die Signalisierung durch Loslassen der Fußtaste erfolgt.



*Abbildung 166: Fußablage mit Fußtaster zur Signalisierung einer Wahrnehmung
(Signalisierung erfolgt durch Abheben des Fußes)*

Die Messung eines Winkels erfolgt jeweils mit den drei verschiedenen Haltungshöhen unten, Mitte, oben. Die Haltungshöhen sind den Probanden durch Ratschenbänder vorgegeben (siehe Abbildung 167). Der Schnelligkeit der Versuchsdurchführung halber werden für jeden Winkel die Handhaltungen am Lenkrad gewechselt, da dadurch an der Welle weniger umgesteckt werden muss. Der Lenkradradius zur Lenkradnabe beträgt bei der oberen Handposition 175 mm, bei der mittleren 177 mm und bei der unteren 180 mm.



Abbildung 167: Markierungen für drei unterschiedliche Handhaltungshöhen (oben, Mitte, unten) am Lenkrad bei denen die Wahrnehmungsschwellen gemessen werden (die Markierung bezieht sich auf die Handunterkante)

Für den 35°-Winkel ist zwar eine Messung der Absolutschwelle möglich, dies ist aber nicht sinnvoll, da im realen Fahrbetrieb bei größeren Lenkwinkeln eine Rückstellkraft anliegt und damit ein Grundreiz vorhanden ist. Deshalb werden zwei anliegende Lenkmomente einmal reduziert und einmal erhöht. Analog zur Wahrnehmung der Absolutschwellen signalisiert der Proband, sobald er eine Änderung (Erhöhung oder Verminderung) der anliegenden Ausgangskraft verspürt.

Um gleich eingestellte Lenkwinkel zu gewährleisten und den Probanden die Winkeleinstellung zu erleichtern, wird mit Hilfe eines Displays der aktuelle Lenkwinkel angezeigt. Die Anzeige erfolgt auf 0,5° genau. Damit soll gewährleistet sein, dass sich die Probanden nicht zu lange mit der exakten Lenkradeinstellung beschäftigen, was bei einer genaueren Anzeige (z.B. auf 0,01° genau) der Fall sein kann, da die Anzeige sich im Wert permanent ändern würde und der Proband wenig Möglichkeit hätte, den Wert zu halten.

3.3.6.3 Probandenkollektiv

Das Probandenkollektiv (Abbildung 168) besteht aus 40 Versuchspersonen, wovon 35% weiblich sind. Eine Versuchsperson verfügt über keinen Führerschein. Das Durchschnittsalter liegt im arithmetischen Mittel bei 29,5 Jahre und im Median bei 24,0 Jahren. Die jüngste Versuchsperson ist 19 Jahre, die älteste 63 Jahre. Die jährliche Kilometerleistung der Probanden beträgt im arithmetischen Mittel 15.569 km und im Median 12.000 km. Der Führerscheinbesitz beträgt im arithmetischen Mittel 11 Jahre und im Median 7 Jahre. Damit ergibt sich für alle Eigenschaften des Probandenkollektivs eine linksschiefe Verteilung zu geringeren Werten hin.

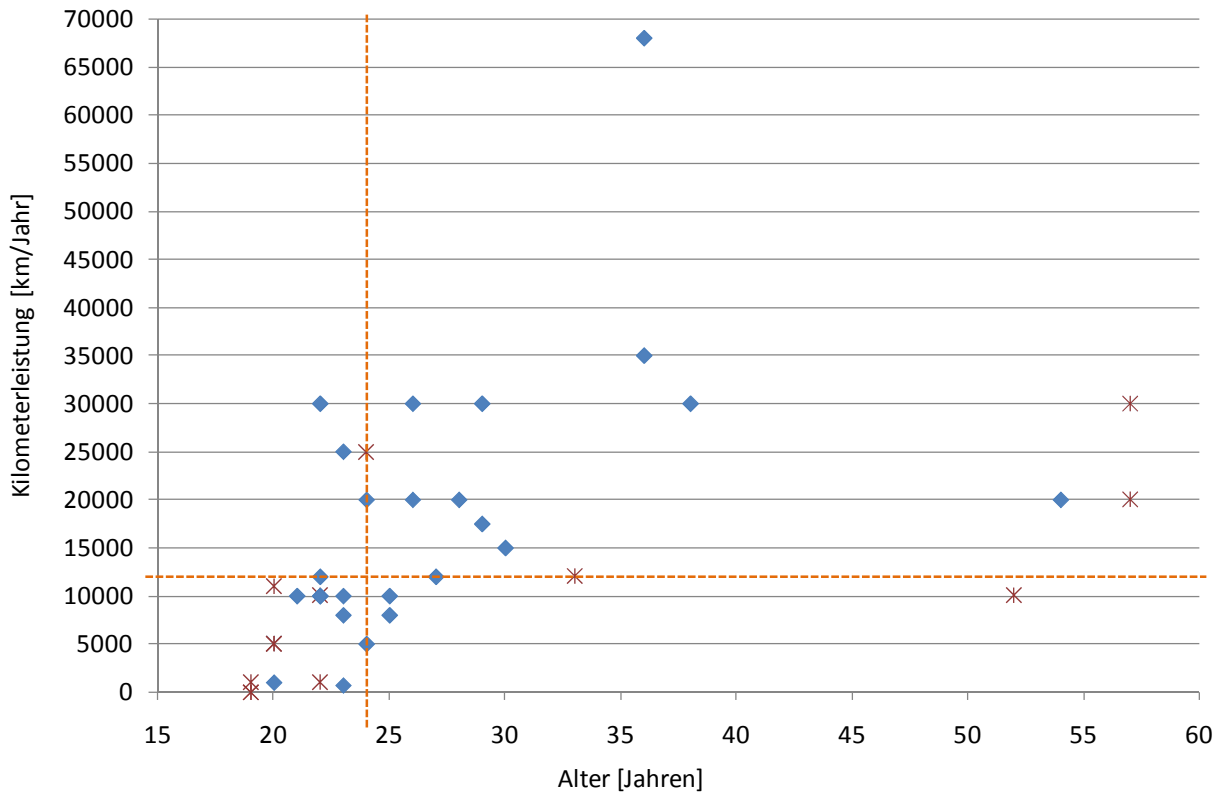


Abbildung 168: Probandenkollektiv nach Kilometerleistung im Jahr, Geschlecht (Sterne = weiblich, Rauten = männlich) und Alter (gestrichelte Linie entspricht Median)

Die Abbildung 169 zeigt die prozentuale Verteilung nach technischen und nicht-technischen Berufen, wobei Studenten eines technischen Studiengangs unter die technische Berufsbildung fallen. Die Verteilung der Leser von Autozeitschriften im Probandenkollektiv wird ebenfalls bestimmt. Demnach sind 12 % regelmäßige und 55 % unregelmäßige Leser von Autozeitschriften, während 33 % angeben, nie eine Autozeitschrift zu lesen.

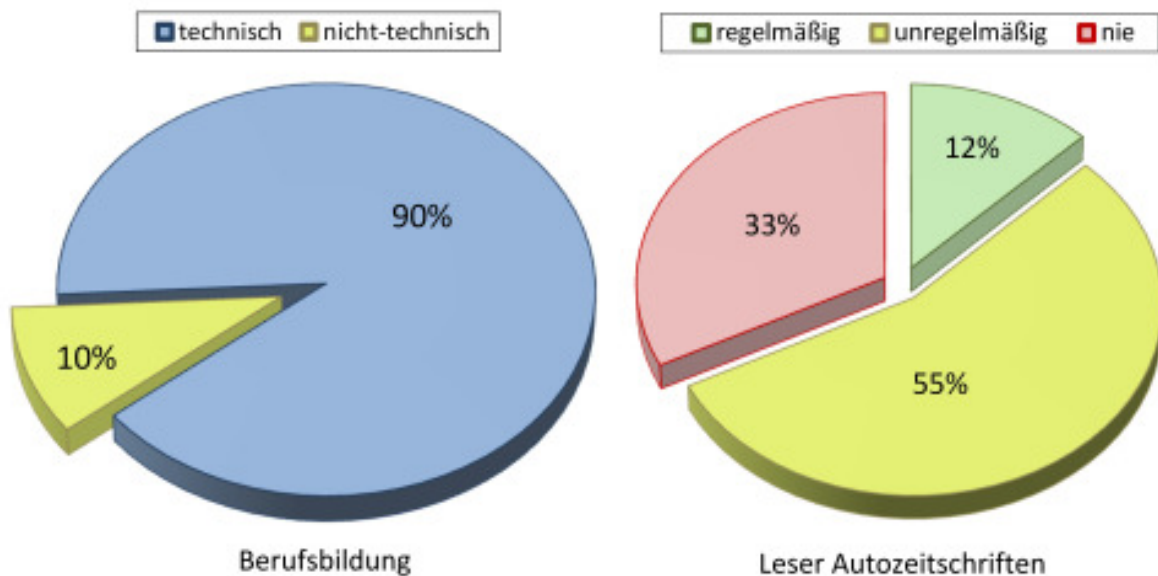


Abbildung 169: Prozentuale Verteilung der Berufsbildung nach technischen und nicht-technischen Berufen und der Leser von Autozeitschriften im Probandenkollektiv

3.3.6.4 Versuchsergebnisse und Diskussion

Die nachfolgende Tabelle 37 und Tabelle 38 zeigen die Ergebnisse aller Versuchskonstellationen. Neben dem arithmetischen Mittel ist die Standardabweichung für das Maß der Streuung der Ergebnisse angegeben. Es folgt ein Test der Verteilungen der einzelnen Versuchskonstellationen auf Normalverteilung. Dabei haben die Kennzeichnungen folgende Bedeutung:

- (++) Verteilung ist eine Normalverteilung,
- (+) Verteilung ist wahrscheinlich eine Normalverteilung,
- (-) Verteilung ist wahrscheinliche keine Normalverteilung und
- (--) Verteilung ist keine Normalverteilung.

Ist eine Normalverteilung anzunehmen, dann ist die Angabe des 5. Perzentils und des 95. Perzentils auf Basis einer Extrapolation möglich. Die Einteilung von Perzentilen ist aber grundsätzlich nur ab einer Versuchspersonenzahl von 100 sinnvoll möglich. Liegt keine Normalverteilung vor, dann wird neben dem arithmetischen Mittelwert und der Standardabweichung nur noch der Median (50. Perzentil) angegeben.

Auf Basis einer Varianzanalyse und eines anschließenden T-Tests wird durch paarweisen Vergleich festgestellt, welche Versuchsvarianten gleiche Verteilungen besitzen. Das ist vor allem bei nahezu gleichen arithmetischen Mittelwerten bei relativ großer Standardabweichung von Bedeutung. Die Kennzeichnung erfolgt durch Großbuchstaben in den beiden Tabellen.

| | | arithm. Mittel | Standard-abweichung | Varianzanalyse | signifikant gleich | Normal-Verteilung | 5. Perzentil | Median (50. Perzentil) | 95. Perzentil |
|-----|-------|----------------|---------------------|------------------|--------------------|-------------------|--------------|------------------------|---------------|
| 0° | oben | 2,73 N | 1,21 N | b, h, n, o | B, H, O | ++ | 0,80 N | 2,69 N | 4,77 N |
| | Mitte | 3,14 N | 2,24 N | p | | ++ | 0,98 N | 2,70 N | 6,79 N |
| | unten | 2,40 N | 1,92 N | o, p | O | + | 0,50 N | 1,60 N | 5,72 N |
| 5° | oben | 3,02 N | 1,99 N | h, i | H, I | ++ | 1,06 N | 2,49 N | 7,35 N |
| | Mitte | 3,89 N | 2,91 N | c, g, k, l, m, n | C | + | 1,18 N | 2,05 N | 9,69 N |
| | unten | 2,56 N | 2,37 N | f, k, m | F | -- | | 1,79 N | |
| 10° | oben | 2,98 N | 2,28 N | a, b, d, i | B, I | ++ | 1,02 N | 2,17N | 7,92 N |
| | Mitte | 3,76 N | 2,81 N | a, c, d, e | C | + | 1,32 N | 2,82 N | 9,70 N |
| | unten | 2,59 N | 1,70 N | e, f, g, l | F | -- | | 2,13 N | |

Tabelle 37: Ergebnis der Absolutwahrnehmungsschwellen am Lenkrad für die Winkel 0°, 5° und 10°

Für die Absolutschwelle kann folgendes festgehalten werden:

- In 0° sind die Haltungen „oben“ und „unten“ gleich,
- die Haltungen „oben“, „Mitte“ und „unten“ unterscheiden sich bei 5° und 10° nicht mehr
- und die Haltung „oben“ ist bei allen Lenkwinkeln gleich.

Es bleibt also festzuhalten, dass in den unteren Handhaltungen die Schwellwerte am geringsten auszufallen scheinen und in den mittleren am größten. Der eingestellte Lenkwinkel scheint damit im untersuchten Bereich keinen Einfluss auf die Absolutschwellen zu haben.

Nachfolgende Tabelle 38 zeigt, welche Ergebnisse der Versuch der Differenzwahrnehmungsschwelle aufweist. Alle Wahrnehmungsschwellen werden in Prozent vom Grundreiz (2 Nm oder 4 Nm) angegeben. Beispielsweise bedeuten 50% bei 2 Nm Verminderung, dass eine Lenkmomentenverminderung bei 1 Nm für das zugehörige Perzentil wahrgenommen wird.

Anders ausgedrückt wird für die sicherer Wahrnehmung von 95% (95. Perzentil) des Probandenkollektivs eines sich von 2 Nm erhöhenden Lenkmoments in oberen Handhaltung, eine Änderung um mindestens 54,0% (2 Nm x 0,54 = 1,08 Nm) benötigt.

| | | | arithm. Mittel | Standardabweichung | Varianzanalyse | signifikant gleich | Normalverteilung | 5. Perzentil | Median (50. Perzentil) | 95. Perzentil |
|--------------|------|-------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|------------------|--------------|------------------------|---------------|
| Verminderung | 2 Nm | oben | 32,2 % | 28,8 % | b, f | | -- | | 25,4 % | |
| | 2 Nm | Mitte | 32,7 % | 29,0 % | | | - | | 25,4 % | |
| | 2 Nm | unten | 28,5 % | 29,0 % | | | - | | 21,8 % | |
| | 4 Nm | oben | 43,1 % | 45,3 % | b | | -- | | 30,4% | |
| | 4 Nm | Mitte | 44,4 % | 38,4 % | c | | + | 10,5 % | 34,8 % | 106,0 % |
| | 4 Nm | unten | 35,4 % | 38,4 % | c | | -- | | 19,4 % | |
| Erhöhung | 2 Nm | oben | 25,8 % | 15,8 % | | | ++ | 8,3 % | 20,5 % | 54,0 % |
| | 2 Nm | Mitte | 30,0 % | 18,4 % | a | | - | | 24,3 % | |
| | 2 Nm | unten | 23,0 % | 14,2 % | a | | - | | 20,3 % | |
| | 4 Nm | oben | 20,9 % | 10,4 % | e, f | | ++ | 8,3 % | 20,8 % | 39,4 % |
| | 4 Nm | Mitte | 25,4 % | 15,4 % | d, e | | ++ | 7,7 % | 22,5 % | 49,5 % |
| | 4 Nm | unten | 20,1 % | 12,5 % | d | | ++ | 7,2 % | 16,3 % | 48,0 % |

Tabelle 38: Ergebnis der Differenzwahrnehmungsschwellen bei 35° Lenkwinkel und zwei Ausgangsmomenten von 2 Nm und 4 Nm, sowie jeweils für eine Momentenerhöhung und eine Momentenverminderung

Es wäre zu erwarten gewesen, dass die Wahrnehmungsschwellen für die Differenz dem Gesetz von Weber folgen, das besagt, dass eine umso größere Reizänderung für eine Wahrnehmung notwendig ist, je größer der Ausgangsreiz (Grundreiz) ist. Das würde für den vorliegenden Versuch bedeuten, dass die prozentuale Änderung für eine 4 Nm anliegende Kraft gleich der prozentualen Änderung für eine 2 Nm anliegende Kraft sein müsste. Aufgrund der Standardabweichungen kann nicht mit Sicherheit gesagt, ob das Webersche Gesetz tatsächlich bei der Lenkkraftwahrnehmung Gültigkeit besitzt. Allerdings kann behauptet werden, dass sich die Verhältnisse im Bereich der üblichen Lenkkräfte und Lenkmomente (in vorliegenden Versuch bis 4 Nm) ähnlich dem Gesetz von Weber verhalten.

Bei Lenkmomentenerhöhungen sind die Schwellen bei nahezu allen Perzentilen „empfindlicher“ als bei Lenkmomentverminderungen. Allerdings ist dieser Effekt bei 4 Nm deutlicher sichtbar als bei 2 Nm. Die Standardabweichung als Maß für die Streuung ist bei Lenkmomentenverminderung deutlich größer als bei Erhöhungen. Damit empfinden die Probanden bei Verminderungen des Lenkmoments uneinheitlicher.

Eine Auffälligkeit ergibt sich bei Lenkmomentenverminderung von 2 Nm jeweils bei oberer und mittlerer Handhaltung. Hier ist in beiden Fällen der Median gleich groß. Ebenso sind Standardabweichung und das arithmetische Mittel nahezu gleich groß. Die Kennwerte weisen zunächst auf eine gleiche Verteilung für beide Versuchsvarianten hin, jedoch zeigen Varianzanalyse und T-Test, dass beide Varianten in ihren Ergebnisverteilungen unterschiedlich sind. Weiterhin zeigt der Test der Normalverteilung, dass beide Versuchsvarianten nicht bzw. mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht normalverteilt sind. Bei genauer Betrachtung der Verteilung der beiden Varianten kann festgestellt werden, dass die erste Versuchsvariante (Lenkmomentenverminderung 2 Nm in oberer Handhaltung) eine zweigipfelige Verteilung besitzt, die insgesamt linksschief ist. Die zweite Versuchsvariante ist eine eingipfelige Verteilung, die ebenfalls linksschief ist.

Wie in Tabelle 38 erkennbar, liegt die Wahrnehmungsschwelle für die Lenkmomentenverminderung bei den oberen Perzentile teilweise über 100%. Das bedeutet, dass das anliegende Gegenmoment auf null abfällt, die Richtung umkehrt und sich um einen entsprechend Wert erhöht, bis der Proband die Wahrnehmung signalisiert. De facto wird dann die Verminderung von den meisten Probanden gar nicht bemerkt.

Tendenziell verfügen weibliche Probanden über geringere Wahrnehmungsschwellen als männliche. Vermutlich korreliert die größere Empfindlichkeit mit der körperlichen Maximalkraft. Allerdings zeigen im Versuch nicht alle weiblichen Probanden deutlich geringere Wahrnehmungsschwellen als männliche.

Weiterhin bleibt festzustellen, dass bei erfahreneren Probanden (bezogen auf die Dauer des Führerscheinbesitzes), die Schwellen ebenfalls geringer ausfallen als bei Probanden, die vergleichsweise eine geringere Erfahrung haben. Ebenso fallen bei erfahreneren Autofahrern die Streuungen bezogen auf die verschiedenen Versuchsteile geringer aus.

Unterschiede im Ergebnis ergeben sich ebenso bei den drei verschiedenen Handhaltungshöhen am Lenkrad (unten, Mitte, oben). Rein theoretisch wäre davon auszugehen, dass die Handhaltung unten am Lenkrad die geringsten Schwellen aufweist, während die obere Handhaltung die höchsten, da durch die untere Haltung die Oberarme mehr am Körper anliegen und dadurch in ihrer Position stärker fixiert sind. Allerdings kann das Ergebnis diese Theorie nicht bestätigen, da in den mittleren Handhaltungspositionen die Wahrnehmungsschwellen vergleichsweise am größten sind.

Für die Lenkungsauslegung empfiehlt sich die Verwendung des Median (50. Perzentil). Ausnahme bildet, wenn eine Lenkraft bzw. Lenkkraftänderung nicht spürbar sein soll. Hier sollte das 5. Perzentil verwendet werden. Sollte eine sichere Wahrnehmung einer Lenkkraft bzw. Lenkkraftänderung garantiert werden, so sollte das 95. Perzentil angewendet werden, evtl. mit einem Zuschlag, wenn es sich um eine sicherheitskritische Situation handelt (z.B. haptische Warnung eines Fahrerassistenzsystems für die Querführung).

4 Maßnahmen für die Lenkungsauslegung und Konsequenzen für Durchführung von Lenkgefühlsversuchen

Aus den Untersuchungen und mit Hilfe der Sichtung der Literatur unter besonderer Berücksichtigung der Ergonomie lassen sich Maßnahmen für die Auslegung einer Pkw-Lenkung ableiten, die das Lenkgefühl des Fahrers unterstützen und positiv beeinflussen können. In den nachfolgenden Kapiteln wird anhand ausgewählter Fahrsituationen die notwendige und ergonomisch sinnvolle Lenkungsauslegung für die jeweilige Situation erörtert.

Im darauffolgenden Schritt wird dargelegt, wie eine Lenkung unabhängig von der Fahrsituation für das Erreichen eines guten Lenkgefühls ausgelegt sein müsste. Die Darstellung enthält 16 Einzelmaßnahmen. Diese sind als Möglichkeit zu sehen und basieren im wesentlichen auf theoriegeleiteten Annahmen. Die kurzfristige praktische Umsetzbarkeit, zulassungstechnische und betriebswirtschaftliche Fragestellungen sind bei den Maßnahmen nicht geprüft und berücksichtigt worden. Es ist lediglich dargestellt, welche Unklarheiten sich für die einzelnen Maßnahmen aus technischer Sicht ergeben.

Die Konsequenzen für die Durchführung von zukünftigen Lenkgefühlsversuchen werden im Anschluss an die Maßnahmen erörtert. Im wesentlichen wird dabei dargelegt, welche Schwierigkeiten auftreten können und wie Versuche sinnvollerweise für aussagekräftige Ergebnisse aufgebaut werden sollten, wozu auch Erfahrungen aus anderen ergonomischen Untersuchungen mit einfließen.

4.1 Ergonomisches Auslegungskonzept einer Fahrzeuglenkung mit Lenkwinkel- und Lenkmomentenregelung

Kapitel 4.1.1 beschreibt in Tabellenform für typische Fahrsituationen Kriterien und Auslegungen für eine Fahrzeuglenkung aus Sicht der Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug. Das darauf folgende Kapitel 4.1.2 erläutert drei ausgewählte Maßnahmen, von denen angenommen wird, dass sie in bestimmten Situationen zu einer Verbesserung des Lenkgefühls führen.

4.1.1 Kriterien und Daten für die Auslegung einer Fahrzeuglenkung unter ergonomischen Aspekten

4.1.1.1 Auslegung bezogen auf die geometrischen anthropometrischen Verhältnisse

| Parameter | | Fahrer / Fahrzeug | Kriterien | Auslegung (Parameter) |
|--|-------------------------|--|---|--|
| Lenkradgeometrie und physikalische Lenkradparameter | Lenkrad-vertikalneigung | <ul style="list-style-type: none"> Kinematik System-Hand-Arm | <ul style="list-style-type: none"> exakt definierte Vertikalneigung | <ul style="list-style-type: none"> genau 4,5° (möglichst konstant, auch bei Lenksäulenverstellung) |
| | Lenkrad-kranzdicke | <ul style="list-style-type: none"> Gefühl der Kontrolle und der Sicherheit | <ul style="list-style-type: none"> nicht zu dick | <ul style="list-style-type: none"> Umfassungsgriff 5. Perzentil weiblich |
| | Oberflächen-temperatur | <ul style="list-style-type: none"> Auskühlung der Hände (Diskomfort) | <ul style="list-style-type: none"> Wärmeleitwert nicht zu hoch und nicht zu niedrig | <ul style="list-style-type: none"> Wärmeleitwert gering |
| | | <ul style="list-style-type: none"> Lenkrad zu heiß | <ul style="list-style-type: none"> Lenkradoberflächentemperatur 80% der DIN EN 563 für maximale Oberflächentemperaturen (Sicherheitsnorm gegen Verbrennung) verminderte Wärmeannahme durch Wärmestrahlung | <ul style="list-style-type: none"> infrarotreflektierende Beschichtung der Scheiben und des Lenkrades Lenkradoberflächentemperatur nicht über 56 °C (80% des Normgrenzwertes für glatter heißen Kunststoff gegen Verbrennung der DIN EN 563) |
| Lage Lenkrad zu Sitz und Pedalerie | Lenkrad zu Sitz | <ul style="list-style-type: none"> Einfluss der Körperhaltung am Lenkrad auf das Lenkgefühl | <ul style="list-style-type: none"> kein Versatz der Mittenachse Lenkrad und Sitz zueinander keine seitliche Verdrehung (Winkelung) der Mittenachse Lenkrad und Mittenachse Sitz zueinander | <ul style="list-style-type: none"> genaue Werte für Winkel und Versatz unbekannt, vermutlich aber im Zentimeter- und Gradbereich |
| | Lenkrad zu Pedalerie | <ul style="list-style-type: none"> Einfluss der Körperhaltung am Lenkrad auf das Lenkgefühl | <ul style="list-style-type: none"> kein Versatz der Mittenachse Lenkrad und Pedalerie zueinander keine seitliche Verdrehung (Winkelung) der Mittenachse Lenkrad und Mittenachse Pedalerie zueinander | <ul style="list-style-type: none"> genaue Werte für Winkel und Versatz unbekannt, vermutlich aber im Zentimeter- und Gradbereich |
| | Pedalerie zu Sitz | <ul style="list-style-type: none"> Einfluss der Körperhaltung am Lenkrad auf das Lenkgefühl | <ul style="list-style-type: none"> kein Versatz der Mittenachse Pedalerie und Sitz zueinander keine seitliche Verdrehung (Winkelung) der Mittenachse Pedalerie und Mittenachse Sitz zueinander | <ul style="list-style-type: none"> genaue Werte für Winkel und Versatz unbekannt, vermutlich aber im Zentimeter- und Gradbereich |

Tabelle 39: Datentabelle für die Lenkungsauslegung bezogen auf die geometrischen und anthropometrischen Verhältnisse

4.1.1.2 Auslegung bezogen auf das Lenkgefühl im erweiterten Sinn in bestimmten Fahrsituationen und Fahrmanövern


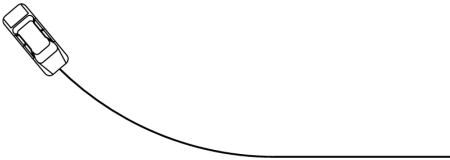
| Fahrsituation / Fahrmanöver | Fahrer / Fahrzeug | Kriterien | Auslegung (Parameter) | |
|---|--|--|---|---|
| Anlenken einer Kurve  | innerorts (Einbiegen in eine Straße) oder niedrige Geschwindigkeit (bis ca. 45 km/h) | <ul style="list-style-type: none"> Fahrer regelt vorwiegend nach dem Krümmungsverlauf (Regelstrecke 0. Ordnung), vom Fahrer durch innere Modelle als Folgeaufgabe definiert | <ul style="list-style-type: none"> geringe Lenkkräfte geringe Lenkwinkel Zielgenauigkeit | <ul style="list-style-type: none"> keine Lenkmomentumkehr beim Lenkansschlag Lenkkraftreduktion Lenkwinkelreduktion (max. ca. 90°) ausreichend großer Gradient Rückstellmoment-Lenkwinkel |
| | Landstraße (ab 45 km/h) | <ul style="list-style-type: none"> Fahrer regelt zunehmend nach der Gierwinkelgeschwindigkeit (Regelstrecke 0. Ordnung), Kompensationsaufgabe | <ul style="list-style-type: none"> geringer Zeitverzug des Ansprechens Zielgenauigkeit genaue Krafrückmeldung des Lenkwinkels | <ul style="list-style-type: none"> weiche Federeigenschaften und geringe Dämpfung ausreichend fühlbare Lenkungs-Mittellage nicht zu großer Gradient Lenkmoment-Querschleunigung |
| | Autobahn | <ul style="list-style-type: none"> (wie zuvor) | <ul style="list-style-type: none"> geringer, aber nicht zu kurzer Zeitverzug Zielgenauigkeit genaue Krafrückmeldung des Lenkwinkels | <ul style="list-style-type: none"> (wie zuvor) Anlenkmomente nicht zu gering |
| Kurvenausfahrt in Gerade  | innerorts (Einbiegen in eine Straße) oder niedrige Geschwindigkeit (bis ca. 45 km/h) | <ul style="list-style-type: none"> Zu schnelle Lenkungs-rückstellung als unangenehm empfunden Fahrer muss verbleibende Restwinkel am Lenkrad selbst zurückstellen | <ul style="list-style-type: none"> angepasste Lenkungs-rückstellung nicht zu große Gierverstärkung | <ul style="list-style-type: none"> Rückstellmomente ausreichend groß Lenkübersetzung nicht zu direkt weiche Federeigenschaften und geringe Dämpfung |
| | mittlere und hohe Geschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> Fahrer regelt vorwiegend nach seitlichem Abstand | <ul style="list-style-type: none"> positive Restwinkel kein oder nur geringfügiges Überschwingen der Lenkung Zielgenauigkeit geringe Haltekräfte bei Rückstellung | <ul style="list-style-type: none"> ausreichend hohe Dämpfung schneller Abbau einer möglichen Überschwingungsamplitude nicht zu kleine Lenkwege exakte Mittenzentrierung |
| Eingriff Fahrerassistenzsystem (z.B. Heading Control) | | <ul style="list-style-type: none"> Rückmeldung an den Fahrer | <ul style="list-style-type: none"> Rückmeldung für alle Fahrer (mindestens 97%) spürbar | <ul style="list-style-type: none"> Lenkmomentänderung richtungskompatibel und mindestens 2 N |

Tabelle 40: Datentabelle für die Lenkungsauslegung in bestimmten Fahrsituationen

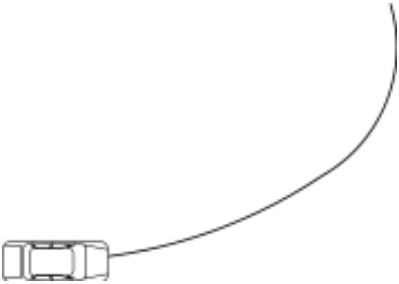

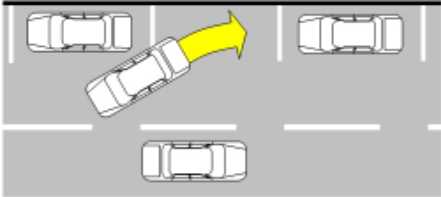
| Fahrmanöver / Fahrsituation | Fahrer / Fahrzeug | Kriterien | Auslegung (Parameter) | |
|---|---|---|--|--|
| Krümmungsänderung (Off-Center-Handling)  | Kurvenradius wird kleiner + konstante Geschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> • Lenkwinkelschlag durch Fahrer bei sehr engen Kurven nicht ausreichend | <ul style="list-style-type: none"> • Einhaltung des vorgegebenen Kurvenradius • für engere Kurven Lenkwinkel nicht zu groß (unter 120°) • exakte Rückmeldung des Lenkwinkels über die Lenkkraft | <ul style="list-style-type: none"> • ausreichend direkte Lenkübersetzung für mittlere Geschwindigkeiten |
| | Kurvenradius wird kleiner + Fahrzeug bremst | <ul style="list-style-type: none"> • Lenkaktivität des Fahrers gegebenenfalls unzureichend | <ul style="list-style-type: none"> • Einhaltung des vorgegebenen Kurvenradius | <ul style="list-style-type: none"> • Lenkwinkelingriff und / oder durch Bremskraftverteilung |
| | Kurvenradius wird kleiner + Fahrzeug beschleunigt | <ul style="list-style-type: none"> • Fahrer wartet Fahrzeugreaktion ab (leichtes Unter- oder Übersteuern) • Fahrer lenkt nach dem enger werdenden Kurvenradius und damit evtl. zu wenig nach | <ul style="list-style-type: none"> • Einhaltung des durch den Lenkwinkel vorgegebenen Kurvenradius | <ul style="list-style-type: none"> • Lenkwinkelingriff (und/oder: Torque Vectoring) • Rückmeldung des Lenkwinkelingriffs durch spürbare Änderung des Lenkmoments |
| Richtungswechsel über Lenkmitte  | Stadt (z.B. Ausfahrt aus dem Kreisverkehr) | <ul style="list-style-type: none"> • Fahrer muss verbleibende Restwinkel am Lenkrad selbst zurückstellen und zusätzlich Einlenken | <ul style="list-style-type: none"> • Zeitverzug der Fahrzeugreaktion nicht zu schnell und nicht zu langsam • geringe Lenkwinkel | <ul style="list-style-type: none"> • 50 bis 150 ms Zeitverzug der Fahrzeugreaktion • ausreichend große Lenkübersetzung • ausreichende Lenkungsrückstellung |
| | schneller Wechsel (außerorts) | <ul style="list-style-type: none"> • maximal 1,5 Hz vom Fahrer aufbringbar (Sinuslenken) | <ul style="list-style-type: none"> • ausreichend schnelle Fahrzeugreaktion • Zielgenauigkeit | <ul style="list-style-type: none"> • nicht zu kleine Lenkwege • Lenkmoment beim Richtungswechsel zwischen 0,98 Nm und 1,96 Nm • nicht zu große Dämpfung • ausreichend fühlbare Lenkungsmittellage • direktere Lenkübersetzung |
| Parkieren / Rangieren  | | <ul style="list-style-type: none"> • große Lenkwinkel (Erreichen des Endanschlags) • relativ große Lenkwinkelgeschwindigkeiten • häufiger Richtungswechsel • häufige Einhandbedienung • Folgeaufgabe | <ul style="list-style-type: none"> • kein eindrehendes Lenkmoment • geringe Lenkwinkel • geringe Lenkkräfte • spürbare Mittellage nicht notwendig | <ul style="list-style-type: none"> • keine Lenkmomentumkehr beim Lenkansschlag • Lenkkraftreduktion (Handkraft < 200 N) • Lenkwinkelreduktion (max. ca. 100°) • Lenkübersetzung nicht direkter als 1:10 |

Tabelle 41: Datentabelle für die Lenkungsauslegung in bestimmten Fahrsituationen (Fortsetzung)




| Fahrmanöver / Fahrsituation | | Fahrer / Fahrzeug | Kriterien | Auslegung (Parameter) |
|---|---|--|---|---|
| Bremsen und Ausweichen  | von niedriger Geschwindigkeit auf null (Vollbremsung) | <ul style="list-style-type: none"> Fahrer lenkt nicht selbsttätig weit genug ein | <ul style="list-style-type: none"> konstante Gierwinkelgeschwindigkeit Direkte Lenkübersetzung | <ul style="list-style-type: none"> zusätzlicher Lenkwinkel zur Aufrechterhaltung einer konstanten Gierwinkelgeschwindigkeit |
| | von mittlerer bis hoher Geschwindigkeit auf null (Vollbremsung) | <ul style="list-style-type: none"> Fahrer lenkt zu stark (kein ESP-Eingriff); eher bei hoher Geschwindigkeit Fahrer lenkt zu wenig und nutzt Querbeschleunigungspotenzial nicht (siehe Abbildung 73) | <ul style="list-style-type: none"> Fahrzeug bleibt stabil Indirektere Lenkübersetzung direktere Lenkübersetzung in der Situation um mehr Lenkradwinkel zu Verfügung zu stellen | <ul style="list-style-type: none"> Abmilderung der Lenkaktivität des Fahrers durch Lenkwinkelregelung zusätzlicher Lenkwinkel, sodass Fahrer leichter Ausweichen kann (ggf. mit Koppelung an Fahrerassistenzsystem) |
| | | | | |
| Durchfahren eines konstanten Kurvenradius  | Komfortbremsung und Beschleunigung (bis 0,4 g) | <ul style="list-style-type: none"> Fahrzeug weicht geringfügig vom dem Lenkwinkel entsprechenden Sollkurs ab Fahrer behält konstanten Lenkwinkel aufrecht | <ul style="list-style-type: none"> konstante dem Lenkwinkel entsprechende Gierwinkelgeschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> Lenkwinkelregelung zur Aufrechterhaltung einer konstanten Gierwinkelgeschwindigkeit (eventuell über Torque Vectoring) |
| | starkes Bremsen (mehr als 0,4 g) | <ul style="list-style-type: none"> Fahrzeug verhält sich leicht untersteuernd oder leicht übersteuernd Fahrer behält Lenkwinkel bei | <ul style="list-style-type: none"> konstante dem Lenkwinkel entsprechende Kurvendurchfahrt | <ul style="list-style-type: none"> Aufrechterhaltung der konstanten Kurvenfahrt durch geregelte Bremskraftverteilung an den Rädern |
| | stationäre Durchfahrt (Normalfahrbereich) | <ul style="list-style-type: none"> konstant gehaltener Lenkwinkel durch den Fahrer | <ul style="list-style-type: none"> konstantes Lenkmoment kein eindrehendes Lenkmoment | <ul style="list-style-type: none"> dem konstant gehaltenen Lenkwinkel entsprechender konstant durchfahrener Kurvenradius |
| | stationäre Durchfahrt (Annäherung Grenzbereich) | <ul style="list-style-type: none"> konstant gehaltener Lenkwinkel durch den Fahrer | <ul style="list-style-type: none"> Rückmeldung über Annäherung an den Grenzbereich Fahrbahnkontakt | <ul style="list-style-type: none"> Rückmeldung der Annäherung an den Grenzbereich durch weicher werdendes Lenkmoment |
| Durchfahren von Spurrillen  | Spurrillensituation erkennbar | <ul style="list-style-type: none"> Fahrer fährt etwas auf Spurrillen hinauf um mehr Lenkkraft zu fühlen | <ul style="list-style-type: none"> stabile Geradeausfahrt | <ul style="list-style-type: none"> deutliches Center-Point-Feeling (evtl. durch steileren Gradienten Lenkmoment / Lenkwinkel) |
| | Spurrillen nicht vorhersehbar | <ul style="list-style-type: none"> Fahrzeug wird ungewollt in die Spurrillen „gezogen“ | <ul style="list-style-type: none"> stabile Geradeausfahrt Rückmeldung (Spurrilleninformation) an den Fahrer | <ul style="list-style-type: none"> ausreichende Lenkmomentenänderung zur Spurrilleninformationen (Lenkmoment und Fahrzeugabdriftrichtung kompatibel) |

Tabelle 42: Datentabelle für die Lenkungsauslegung in bestimmten Fahrsituationen (Fortsetzung)

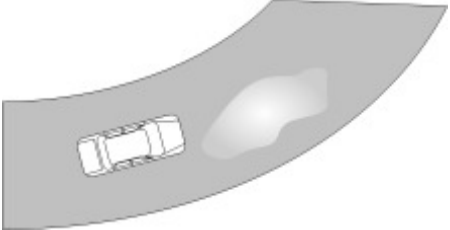
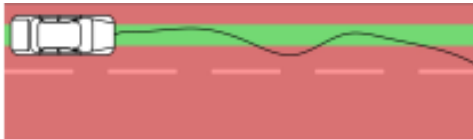
| Fahrmanöver / Fahrsituation | | Fahrer / Fahrzeug | Kriterien | Auslegung (Parameter) |
|---|--|---|---|--|
| Reibwertänderung Reifen-Fahrbahn  | Kurvenfahrt, Kraftschluss Fahrbahn wird geringer (unvorhergesehen) | <ul style="list-style-type: none"> je nach Situation Über- bzw. Untersteuern | <ul style="list-style-type: none"> Rückmeldung der Situation an den Fahrer Fahrzeugreaktionen angemessen | <ul style="list-style-type: none"> Lenkung wird weicher (degressiver Verlauf des Gradienten Lenkmoment-Lenkwinkel) |
| | Kurvenfahrt, Kraftschluss Fahrbahn wird größer (unvorhergesehen) | <ul style="list-style-type: none"> je nach Situation Über- bzw. Untersteuern | <ul style="list-style-type: none"> (wie zuvor) | <ul style="list-style-type: none"> Lenkung wird härter (progressiver Verlauf des Gradienten Lenkmoment-Lenkwinkel) |
| | Aquaplaningsituation (unvorhergesehen) | <ul style="list-style-type: none"> Gefahr des Nichterkennens der Situation oder des Erschreckens bzw. des Überreagierens | <ul style="list-style-type: none"> Warnmeldung an Fahrer kein „Ziehen“ des Fahrzeugs | <ul style="list-style-type: none"> mögliches „Ziehen“ des Fahrzeugs ausgeregelt durch Lenkwinkelregelung (falls Teilkraftschluss) haptische Anzeige der Situation durch Lenkmomentenänderung während Kurvenfahrt |
| Geradeauslauf / Geradeausfahrt (On-Center-Handling, Spurfolgen)  | Tagfahrt | <ul style="list-style-type: none"> Lenkkraftsuche durch den Fahrer (Suche der Mitte) Steueranteil größer als Regelanteil, Fahrer regelt nach dem Gierwinkel und sucht Lenkkraft | <ul style="list-style-type: none"> geringe seitliche Abweichung vom Sollkurs geringer Gierwinkelfehler zu kleiner Gradient Lenkmoment / Querbeschleunigung verursacht ungenaue Spurfolge | <ul style="list-style-type: none"> seitliche Abweichungen und Gierwinkelfehler nicht zu groß ausreichend großer Gradient Lenkmoment-Querbeschleunigung (mindestens 15 Nm/g) bzw. Lenkkraft-Lenkwinkel tendenziell etwas indirektere Lenkübersetzung |
| | Nachtfahrt bzw. Nebelfahrt | <ul style="list-style-type: none"> Sichtweite begrenzt Fahrer regelt vorwiegend nach seitlichem Abstand (Regelstrecke 2. Ordnung) | <ul style="list-style-type: none"> deutlich fühlbare Lenkungsmittellage hoher Grad an Rückmeldung erforderlich | <ul style="list-style-type: none"> deutliches Center-Point-Feeling Verringerung der Lenkmomententotzone steilerer Gradient Lenkmoment-Lenkwinkel tendenziell etwas indirektere Lenkübersetzung |
| | Baustellenfahrt (Autobahn) | <ul style="list-style-type: none"> (wie zuvor) geringer seitlicher Fahrraum relativ hohe Anforderung an den Fahrer durch die Lenkaufgabe (hohe Beanspruchung) | <ul style="list-style-type: none"> (wie zuvor) stabile Geradeausfahrt | <ul style="list-style-type: none"> (wie zuvor) |

Tabelle 43: Datentabelle für die Lenkungsauslegung in bestimmten Fahrsituationen (Fortsetzung)


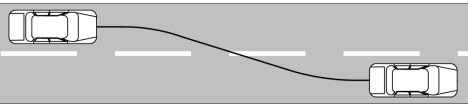
| Fahrmanöver / Fahrsituation | Fahrer / Fahrzeug | Kriterien | Auslegung (Parameter) | |
|--|---|--|--|--|
| Störung des Geradeauslaufs  | beidseitiges „symmetrisches“ Einfedern | <ul style="list-style-type: none"> • bei Einhandbedienung ungewollte Lenkwinkeländerung durch Vertikaldynamik | <ul style="list-style-type: none"> • keine bzw. geringfügige Lenkwinkeländerung | <ul style="list-style-type: none"> • Ausgleich durch Lenkwinkelregelung • Ausreichend steiler Lenkkraftgradient aus Mittellage und Lenkungsämpfung |
| | einseitiges Einfedern (unruhige Fahrbahn) | <ul style="list-style-type: none"> • bei Einhandbedienung ungewollte Lenkwinkeländerung durch Vertikaldynamik und Elastokinetik (Vorderachse) | <ul style="list-style-type: none"> • geringe bzw. keine Lenkwinkeländerung | <ul style="list-style-type: none"> • Ausgleich durch Lenkwinkelregelung • Ausreichend steiler Lenkkraftgradient aus Mittellage und Lenkungsämpfung |
| | Seitenwind | <ul style="list-style-type: none"> • bis 0,5 Hz Fahrer besser • ab 0,5 bis 2 Hz Fahrzeug besser (Fahrer übersteuert) • ab 2 Hz keiner im Vorteil | <ul style="list-style-type: none"> • Störungsanzeige für den Fahrer • Ermöglichen einer schnellen Fahrergegenreaktion | <ul style="list-style-type: none"> • Lenkmomentenänderung • Lenkwinkelregelung (direktere Lenkübersetzung) ab 0,5 Hz |
| | Kopfsteinpflaster | <ul style="list-style-type: none"> • v.a. bei Einhandbedienung ungewollte Lenkbewegung möglich (jedoch abh. von Anregungsfrequenz) | <ul style="list-style-type: none"> • Komfort | <ul style="list-style-type: none"> • vertikales Dämpfungsmaß während Überfahrt erhöhen |
| Fahrstreifenwechsel  | mittlere und hohe Geschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> • Fahrer regelt vorwiegend nach dem seitlichen Abstand, da er sich an Mittellinie orientiert (Regelstrecke 2. Ordnung) • Fahrer lenkt zu wenig, wenn Gradient Lenkmoment / Querbeschleunigung zu hoch | <ul style="list-style-type: none"> • Zielgenauigkeit (kein „Überfahren“ des Sollkurses durch hohe Querbeschleunigung) | <ul style="list-style-type: none"> • Gradient Lenkmoment-Querbeschleunigung nicht zu hoch (siehe Abbildung 12) |
| | Notsituation (unvorhergesehener, erzwungener Fahrstreifenwechsel) | <ul style="list-style-type: none"> • Bei hoher Geschwindigkeit neigt Fahrer zum Überlenken des Fahrzeugs | <ul style="list-style-type: none"> • Zielgenauigkeit (kein „Überfahren“ des Sollkurses durch hohe Querbeschleunigung) • Fahrzeug bleibt stabil | <ul style="list-style-type: none"> • Gradient Lenkmoment-Querbeschleunigung nicht zu hoch (siehe Abbildung 12) |
| | Überfahren von Spurrillen oder Schneeanhäufungen (mittlere bzw. hohe Geschwindigkeit) | <ul style="list-style-type: none"> • deutliche Lenkwinkeländerung • mögliches Gefühl des Kontrollverlusts • Instabilität (Giermomentenstoß, evtl. ESP-Eingriff) | <ul style="list-style-type: none"> • Aufrechterhaltung einer kontinuierlichen glatt verlaufenden Quergeschwindigkeit und Querbeschleunigung | <ul style="list-style-type: none"> • Lenkwinkelregelung |

Tabelle 44: Datentabelle für die Lenkungsauslegung in bestimmten Fahrsituationen (Fortsetzung)

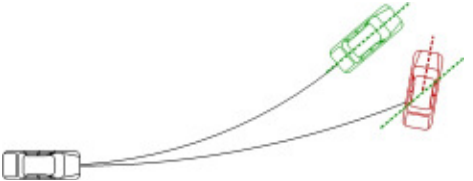


| Fahrmanöver / Fahrsituation | Fahrer / Fahrzeug | Kriterien | Auslegung |
|---|--|---|--|
| <p>Instationärer Fahrzustand Fahrzeug übersteuert</p>  | <p>Schräglaufwinkel Hinterachse > Vorderachse</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Querbeschleunigung für Lenkwinkel zu gering • Queranteil des Bildverschiebungsfeld für Lenkwinkel zu groß • Soll-Kurvenradius für Lenkwinkel deutlich zu groß • Lenkwinkelaktivität Fahrer eventuell zu hoch | <ul style="list-style-type: none"> • Vorwarnung Fahrer mit Hilfe Lenkmomenten-Änderung |
| <p>Instationärer Fahrzustand Fahrzeug untersteuert</p>  | <p>Schräglaufwinkel Vorderachse > Hinterachse</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Querbeschleunigung für Lenkwinkel zu gering • Lenkaktivität (Lenkwinkel) Fahrer zu hoch • Soll-Kurvenradius für Lenkwinkel deutlich zu klein | <ul style="list-style-type: none"> • Vorwarnung Fahrer mit Hilfe Lenkmomenten-Änderung • Lenkwinkelreduzierung |
| <p>Instationärer Fahrzustand Fahrzeug neutralsteuernd</p>  | <p>Schräglaufwinkel Vorderachse = Hinterachse</p> | <ul style="list-style-type: none"> • Fahrer erkennt zu weit gefahrenen Radius und lenkt deswegen stärker ein oder • Fahrer erkennt zu weit gefahrenen Radius, reagiert aber nicht | <ul style="list-style-type: none"> • Lenkwinkelreduzierung |

Tabelle 45: Datentabelle für die Lenkungsauslegung in bestimmten Fahrsituationen (Fortsetzung)

4.1.2 Diskussion einzelner ausgewählter Maßnahmen zur möglichen Verbesserung des Lenkgefühls

4.1.2.1 Situationsabhängiges Center-Point-Feeling

Die erste Maßnahme ist eine von der Fahrsituation abhängige unterschiedlich stark fühlbare Lenkungsmittellage (Center-Point-Feeling). Aus den Erfahrungen mit dem aktiven Bedienelement und konventionellen Steuerknüppeln ging hervor, dass die Regelleistung des Menschen bei fühlbarer Mittellage bei Regelstrecken höherer Ordnung verbessert werden kann. Beim Autofahren ist die Regelung des seitlichen Abstandes eine Beschleunigungssteuerung (Regelstrecke 2. Ordnung, „Nebelorientierung“). Eine solche Regelstrecke ist zu erwarten bei

- Baustellenfahrten,
- starken Sichteinschränkungen (Gischt, Nebel, Regen, dichtes Auffahren, etc.),
- Nachtfahrten mit Abblendlicht (auch Tunnelfahrten),
- tendenziell bei Fahranfängern,
- zusätzlich neben weiteren Regelstrecken beim Fahrstreifenwechsel,
- etc..

Konventionelle Lenkungen bieten zwar eine gewisse fühlbare Mittellage (Lenkradwinkel um null), diese wird aber durch die Momententotzone (aufgrund der vorhandenen Lenkelastizitäten und Lenkungsreibung, die zwar reduziert aber nicht eliminiert werden können) und durch zu große Leichtgängigkeit (Differenzwahrnehmungsschwelle) verwässert (siehe Abbildung 170). Die Momententotzone beschreibt den Bereich der Lenkungshysterese, bei dem das Moment trotz vorhandenem Lenkwinkel null ist. Dadurch ist die Lenkungsmittellage nicht deutlich genug fühlbar. Vorteilhaft kann hier eine Lenkung mit Lenkmomentenvorhalt sein (*Chai et al.* 2004a und 2004b).

Der Vorteil einer exakt fühlbaren Lenkungsmittellage ist die sehr genaue Rückmeldung über die Geradeausstellung der Vorderräder an den Fahrer. Im Falle der Beschleunigungssteuerung können somit Korrekturbewegungen am Lenkrad um die Nulllage reduziert werden. Es ist bislang unklar, ob eine Lenkung ohne Momententotzone technische realisierbar ist. Dazu werden eine sehr feine Messung des Lenkwinkels und ein synthetisches Zusatzmoment benötigt. Eine weitere offene Frage ergibt sich aus den Ergebnissen des SANTOS-Projektes (*König et al.* 2002). Demnach wird vom Fahrer bei Geradeausfahrt die Lenkung soweit ausgelenkt bis er eine deutlich spürbare Lenkkraft spürt. Das hätte aber bei einer spielfreien Lenkung den Nachteil, dass das Fahrzeug nicht mehr geradeaus fährt, weil die Räder schon etwas eingeschlagen sind. Ein weiterer Aspekt in diesem Zusammenhang ist, dass der Gradient Lenkmoment zum Lenkwinkel ausreichend steil ist, damit der Fahrer schon frühzeitig eine Krafrückmeldung fühlt.

Bei Regelstrecken der 0. Ordnung (Lagesteuerung, „Scheinwerferorientierung“, „Popometer“) bringt eine deutlich fühlbare Mittellage keine Vorteile für die Regelgüte und kann unter Umständen (bei sehr deutlicher Ausprägung der Mittellage) störend wirken.

Ist die deutliche fühlbare Mittellage mit einem starken Gieransprechen verbunden, dann kann das Lenkgefühl als „zu spitze Lenkempfindlichkeit“ beurteilt werden.

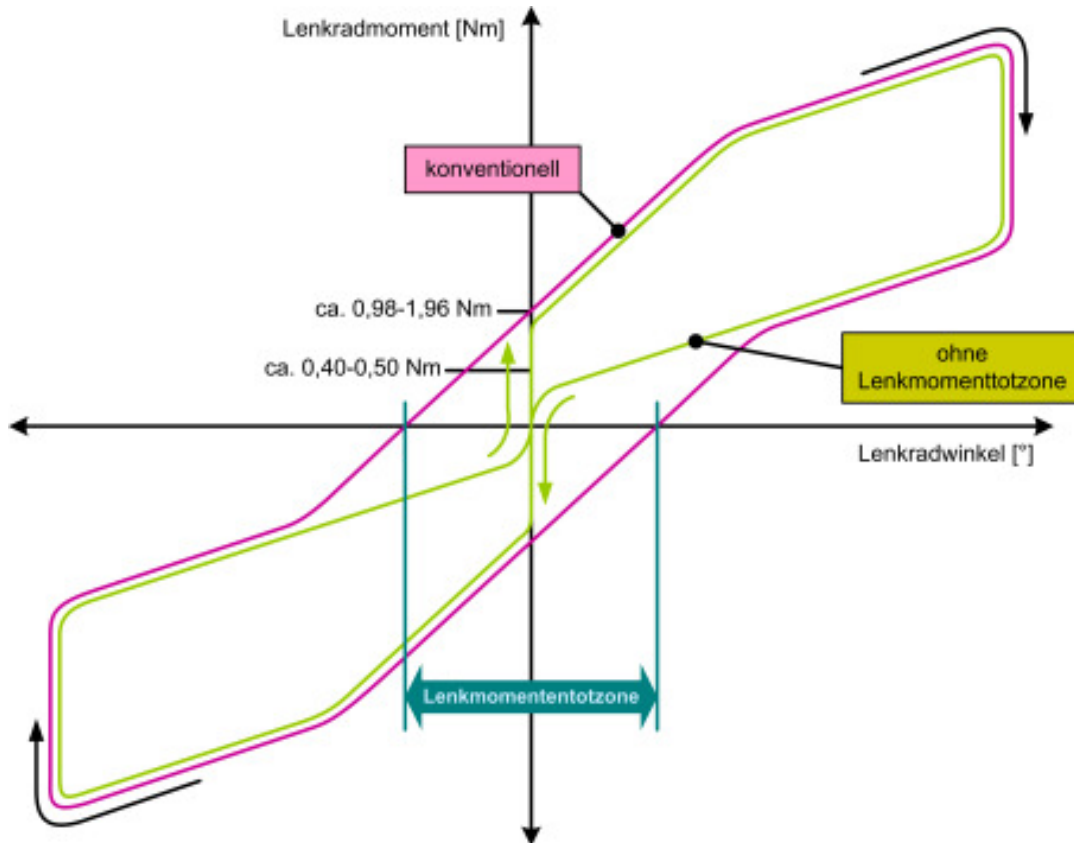


Abbildung 170: Prinzip einer fühlbaren Lenkungsmittellage ohne Lenkradmomenttotzone

Abbildung 170 zeigt die prinzipielle Umsetzung für eine Lenkmomentenregelung (Lenkmoment über Lenkwinkel). Das Lenkmoment sollte beim Anlenken nach den Versuchsergebnissen von *Sato et al.* (1990) zwischen 0,98 und 1,96 Nm liegen. Nach *Buschardt* (2003) sollte für eine sichere Lenkmomentenwahrnehmung ein Wert von 0,8 Nm gewählt werden.

Offen bleibt die Frage, ob eine fühlbare Lenkungsmittellage nur in bestimmten Fahrsituationen (z.B. Geradeausfahrt an Engstellen) zur Verfügung stehen soll. Ist das vorgesehen, dann muss geklärt werden, wie die Fahrsituation bzw. der Bedarf des Fahrers nach Nullpunktsinformation durch die Fahrzeugsensorik erkannt werden kann. Zur Erkennung der zuvor genannten Fahrsituationen werden die nachfolgenden Vorschläge gemacht:

- **Baustellenfahrt**
Sensorik: Messung des Lenkfrequenzspektrums, Fahrgeschwindigkeitsverlauf, Fahrspurerkennung
Kriterium: „Rudern“ um Nullpunkt, zuvor höher gefahrene Geschwindigkeit
- **starke Sichteinschränkung (z.B. durch Regen)**
Sensorik: Wischfrequenz der Scheibenwischer (Regensensor)
Kriterium: längere Zeit ununterbrochenes Wischintervall oder Schnellwischen
oder
Sensorik: Kameraerfassung der Fahrersicht
Kriterium: maximal möglicher Vorausschauabstand von weniger als 1,5s
- **Nachtfahrt mit Ablendlicht (auch Tunnelfahrt)**
Sensorik: Lichtsensor
Kriterium: Dämmerung oder Nacht, Ablendlicht aktiviert, Fernlicht deaktiviert

Neben den Situationen, in denen eine deutlich fühlbare Lenkungsmittellage nützlich ist, gibt es auch Situationen, in denen dies störend ist. Dazu können

- Stadtfahrten,
- kurvenreiche Landstraßenfahrten
- oder Geländefahrten gehören.

Inwieweit dies tatsächlich störend ist, muss experimentell genauer untersucht werden. Von Vorteil ist eine leichtgängige Lenkung im Stadtverkehr bis ca. 40 km/h. Hier wird kein ausgeprägtes Center-Point-Feeling benötigt. Die Minderung des Lenkaufwandes (Erhöhung des Komforts) steht stattdessen im Vordergrund.

4.1.2.2 Ausregeln der Abweichung bei Kurvenfahrt des vom Fahrer vorherbestimmten Kurs (Kurvenassistent)

Das Ziel der Auslegungsmaßnahme 10 ist die nachhaltige Verbesserung des Lenkgefühls bei Kurvendurchfahrt. Gemäß dem „inneren Modell“, erwartet der Mensch bei einer bestimmten unveränderten Lenkradstellung ein Durchfahren der Kurve mit einem konstantem Radius und konstanter Gierwinkelgeschwindigkeit, die durch den Menschen durch Vorausberechnung und dem daraus gebildeten Sollkurs als ideal ansieht.

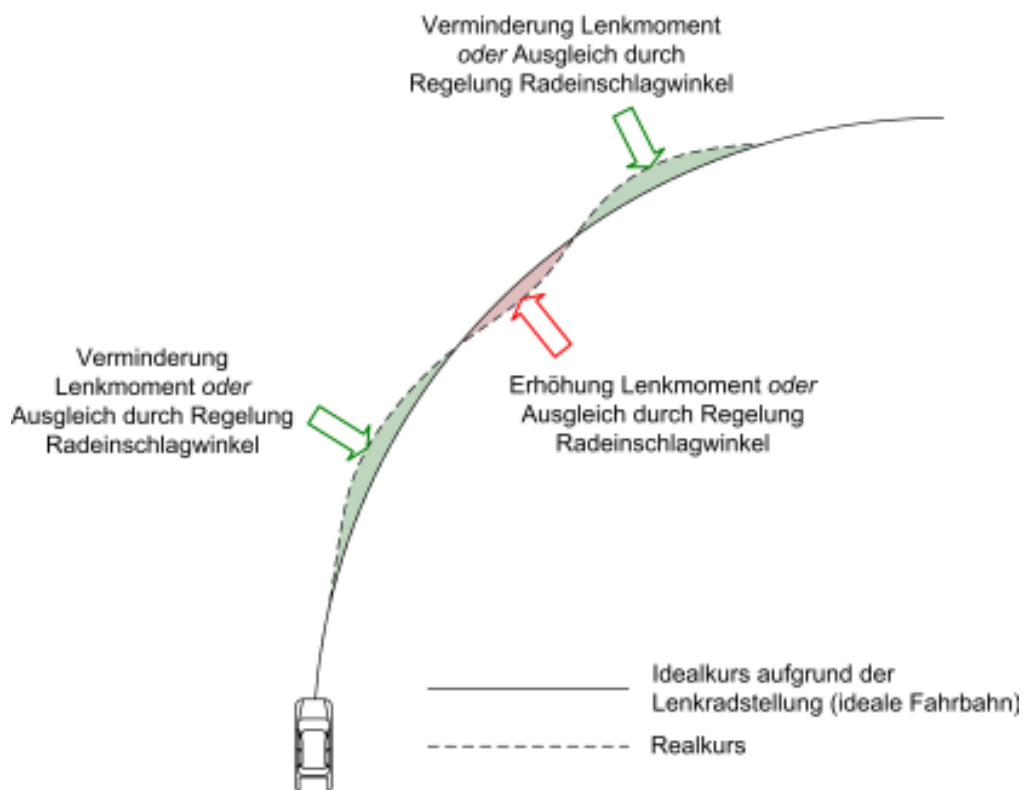


Abbildung 171: Kompensation der Kursabweichung eines Pkw bei Kurvendurchfahrt

In Abbildung 171 ist die Kurvendurchfahrt eines Pkw grafisch dargestellt. Durch das Setzen eines bestimmten Lenkwinkels sind bei konstanter Fahrgeschwindigkeit ein konstanter Radius und ein konstante Gierwinkelgeschwindigkeit die Folge. Durch Störungen, wie etwa Seitenwind, Unebenheit oder Schrägen in der Fahrbahn, kann das Fahrzeug vom theoretischen Idealkurs abweichen. Der dann durchzufahrene Kurvenradius ist entweder zu groß oder klein. Bei Fahrzeugen mit konventionellen Lenkungen bleibt dem Fahrer in zuvor genannter Situation nur die Möglichkeit, selbsttätig durch Lenkkorrekturen den ursprünglich gewählten Kurs wiederherzustellen.

Durch eine Radeinschlagwinkel- oder Lenkmomentenregelung besteht jedoch die Möglichkeit, die Kursabweichung aktiv auszugleichen, solange der Fahrer nicht gleichzeitig auf Störungen reagiert. Ein aktiver Ausgleich ist durch die Radeinschlagwinkelregelung möglich, bei Fahrzeugen mit geregelter Allradantrieb theoretisch auch durch die Antriebsmomentenverteilung (Torque Vectoring).

Die Lenkmomentenregelung könnte durch eine Lenkmomentenänderung den Fahrer zum selbsttätigen Ausgleich auffordern. Probleme bereitet in diesem Zusammenhang die Frage, ob beispielsweise eine synthetische Erhöhung des Lenkmoments eine Vergrößerung oder Verkleinerung des Lenkradwinkels hervorruft.

Da der Mensch die Eigenschaft besitzt, mit Hilfe des Längen- und Kraftservomechanismus der Muskulatur den von ihm gewünschten und eingestellten Weg aufrechtzuerhalten und gegen Störungen abzusichern, ist zu erwarten, dass der Fahrer den Lenkwinkel durch eine gefühlte Lenkmomentenänderung nicht ändern wird, sofern er dies nicht als Aufforderungen versteht.

Demnach ist es also unerheblich, ob das Lenkmoment erhöht oder vermindert wird, solange es für den Fahrer nicht unterscheidbar ist, ob die Ursache der Lenkmomentenänderung eine Fahrbahnstörung oder eine gewollte Information an den Fahrer über einen Regeleingriff seitens eines Assistenzsystems ist. In diesem Fall sollte die Lenkmomentenänderung eine Erhöhung sein, da damit die Wahrnehmung sicherer gewährleistet ist (siehe 3.3.6 „Versuch 6 – Wahrnehmungsschwellen für die Lenkkraftwahrnehmung“).

Eine sinnvolle technische Umsetzung wäre also, durch eine Radeinschlagwinkelregelung den zuvor vom Fahrer gewählten Kurvenradius konstant zu halten und regelnde Änderungen des Lenkwinkel dem Fahrer durch eine Änderung des Lenkmoments knapp oberhalb der Wahrnehmungsschwelle anzuzeigen. Die Regelung muss dann neu einsetzen, wenn der Lenkwinkel des Fahrers neu gesetzt wird. Dabei sollte jedoch eine Toleranz beachtet werden innerhalb der Fahrer das Lenkrad minimal bewegt, aber keine Richtungsänderung wünscht.

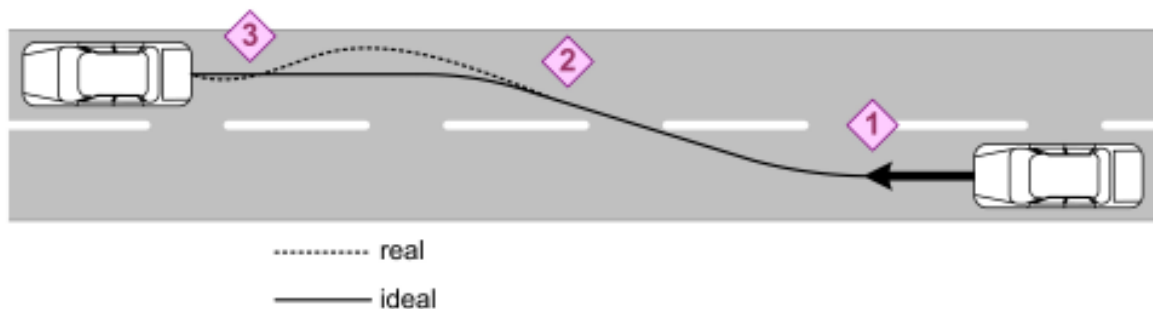


Abbildung 172: Fahrstreifenwechsel eines Pkw mit hoher Geschwindigkeit (nach Sato et al. 1990)

Hilfreich kann die Radeinschlagwinkelregelung bei entsprechender Auslegung beim Fahrstreifenwechsel bei Autobahnfahrt sein. In Abbildung 172 wird durch Sato et al. (1990) dargestellt, wie der reale Verlauf eines Fahrstreifenwechsels bei Autobahngeschwindigkeit gegenüber einem theoretischen Idealverlauf aussieht (1). Durch die hohe Fahrgeschwindigkeit ist auch die Querbewegung beim Spurwechsel entsprechend hoch. Lenkt nun der Fahrer beim Erreichen des anderen Fahrstreifens nicht rechtzeitig oder ausreichend genug zurück, um der hohen Querbewegung entgegenzuwirken oder ist die Lenkungsrückstellung unzureichend (2), dann weicht die tatsächliche Fahrspur zu weit nach außen von der Idealspur ab. In der darauf folgenden Phase (3) korrigiert der Fahrer die Abweichung. Er pendelt das Fahrzeug nach einiger Zeit durch Regelungstätigkeit in der Nähe der Idealspur ein. Dieses Phänomen dürfte bei Fahrern auftreten, die einen Fahrstreifenwechsel relativ zügig durchführen oder dies durch eine Gefahrensituation tun, sowie bei Fahrzeugen mit schlechtem Lenkungsrückstellverhalten. Ebenso ist davon auszugehen, dass dieser Effekt durch die Änderung der Lenkübersetzung zum Indirekten vermehrt auftreten kann. Eine Milderung

kann durch die entsprechende Auslegung der Lenkwinkelregelung erreicht werden. Lenkt der Fahrer in Phase 2 in Abbildung 172 wieder nach links, dann kann das Fahrzeug entgegen der Querbeschleunigung durch einen größeren Lenkwinkel als der, der bei dieser Fahrgeschwindigkeit durch die Lenkübersetzung vorgesehenen ist, früher auf den idealen Kurs gebracht werden.

Sato et al. (1990) legen dar, dass noch ein weiterer Effekt beim Lenken auftreten kann, der das Fahrzeug vom Fahrer ursprünglich vorhergesehenen Kurs abbringt. Bei sehr langsamem Abbiegen kann es vorkommen, dass das Fahrzeug zu eng in die Kurve einlenkt und der Fahrer auf den ursprünglichen Kurs zurücklenken muss (Abbildung 173). Durch eine mangelnde Lenkungsrückstellung kann ein solcher Effekt begünstigt werden. Inwieweit ein Auftreten dieses Phänomens in der Realität tatsächlich vorkommt, ist fraglich. Dennoch kann eine sehr direkte Lenkübersetzung im niedrigen Geschwindigkeitsbereich, wie sie die Aktivlenkung anbietet, dies ebenfalls begünstigen. Einige Fahrzeug mit elektromechanischer Servolenkung haben eine aktive Lenkungsrückstellung für niedrige Geschwindigkeiten.

Probleme bereitet das Ausregeln dieses Effekts über den Lenkwinkel. Zweifelhaft ist, ob es durch die Sensorik erkennbar ist, dass das zu starke Einlenken aufgrund des Fahrerwunsches entsteht oder aufgrund mangelnder Lenkungsrückstellung. Dazu muss einem Fahrerassistenzsystem der genaue Wunschverlauf bzw. Straßenverlauf bekannt sein.

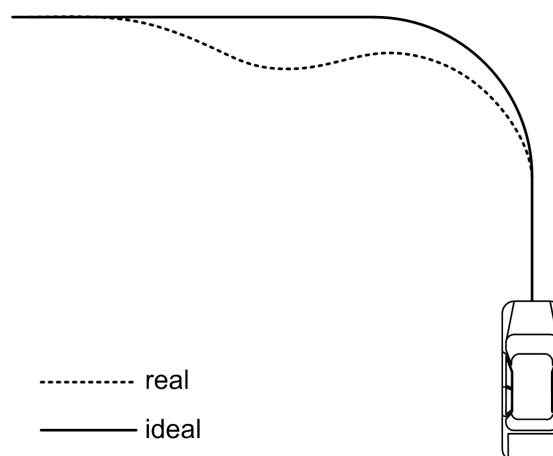


Abbildung 173: Abbiegevorgang eines Pkw (nach Sato et al. 1990)

Ein wesentlicher Vorteil dieser Art der Lenkwinkelregelung ist, dass sich das mit unterschiedlicher Reifendimension ändernde Lenkverhalten des Fahrzeugs, welches sich dem Menschen darbietet, zumindest teilweise kompensiert werden kann. Je niedriger der Querschnitt des Reifens ist und je breiter der Reifen selbst ist (z.B. 245/35 R 18 statt 195/65 R 15), desto mehr folgt er und somit auch das Fahrzeug Störungen in der Fahrbahn, wie Spurrillen oder Unebenheiten. Vor allen bei modernen Autos, bei denen die Reifen nur einen geringen Schräglaufwinkel zulassen, ist dieser Effekt deutlich ausgeprägt. Dadurch wird vom Fahrer ein häufiges Nachkorrigieren notwendig, dass sich in einer negativen Bewertung der Fähigkeit der Lenkung zur Zielgenauigkeit widerspiegeln kann.

4.1.2.3 Verbesserung des Gefühls für den Fahrbahnkontakt

Mit der Maßnahme soll das Gefühl des Fahrers für den Fahrbahnkontakt zwischen Reifenaufstandfläche und Fahrbahn und damit auch für die verbleibende Sicherheitsreserve bis zur Haftgrenze verbessert werden. Bisher kann der Fahrbahnkontakt nicht völlig unverfälscht an den Fahrer über die Lenkung nach oben weitergegeben werden. Eine Annäherung an den Grenzbereich sollte dem Fahrer durch ein abnehmendes Lenkmoment haptisch angezeigt werden. noch nicht endgültig geklärt ist, welche Fahrzeugmessgrößen

zuverlässig zur Bestimmung der Reserve zur Haftgrenze (Seitenkraftreserve) verwendet werden kann. Eventuell sind der Schwimmwinkel oder die zeitlichen Ableitung Schwimmwinkelgeschwindigkeit und Schwimmwinkelbeschleunigung geeignete Größen. Eine zuverlässige Messung kann über optische Schwimmwinkelsensoren erfolgen, sofern eine Bestimmung und Berechnung aus der üblicherweise vorhandenen Fahrzeugsensorik nicht erfolgen kann. Ebenso wäre die direkte Messung über Sensoren in den Reifen möglich. Ungeklärt ist hierbei aber, wie die Messungen aus den vier einzelnen Reifen zu einer dem Fahrer anzuzeigenden Größe verrechnet werden kann.

4.2 Konsequenzen für die Durchführung von Lenkgefühlsversuchen

Aus den zum Bericht und in der Literatur zum Lenkgefühl durchgeführten Versuchen können auf Basis der dort gewonnen Erfahrungen für zukünftige Versuche, die sich mit dem Lenkgefühl beschäftigen, Empfehlungen für deren Durchführung formuliert werden. Sie sollen dazu beitragen, methodische und technische Probleme mit Auswirkungen auf das Versuchsergebnis zu vermeiden.

Bei zukünftigen Untersuchungen, die zum Lenkgefühl oder auch zum Fahrgefühl durchgeführt werden, sollte folgendes beachtet werden. Soweit es sich nicht um Fragestellungen um das On-Center-Handling handelt, sollte so weit als möglich auf Simulatorversuche verzichtet werden. Die Begründung ist zum einen, dass der Proband sich zumindest zeitweise des Simulators bewusst ist und eine direkte Übertragung auf eine Realfahrsituation kritisch hinterfragt werden muss. Zum anderen entspricht die Bewegungssimulation in bewegten Fahrsimulatoren aus technischen Gründen nur zum Teil der Realität und ist für bestimmte Fahrmanöver unzureichend (z.B. Kurvenfahrt auf Autobahn mit hoher Geschwindigkeit).

Bei Fahrgefühlsversuchen sollte immer die Eigenschaften des Menschen als Fahrer bzw. Regler miteinbezogen werden. Dazu sind Kenntnisse über das Regel- und Wahrnehmungsverhalten (Wahrnehmungsschwellen, Zeitwahrnehmung) des Menschen notwendig. Sollen Wahrnehmungsschwellen mitberücksichtigt werden, so kann es notwendig sein, die entsprechenden relevanten Fahrdynamikgrößen mit einem Messhelm oder ähnlichem in Vestibularorgan- und somit Kopfnähe zu messen. Eine Umrechnung der im Fahrzeugschwerpunkt gemessenen Werte auf den Kopf des Fahrer ist nicht zielführend, da Nachmessungen ergeben haben, dass die Verzögerungen einzelner Fahrdynamikgrößen in Kopfnähe höher sein können als bei einer Messung im Fahrzeugschwerpunkt.

Grundsätzlich ist die direkte Befragung von Probanden noch während des Fahrversuchs gegenüber einer späteren Befragung zu bevorzugen, weil eine nachträgliche Befragung, auch wenn diese nur nach wenigen Minuten erfolgt, zu Verzerrungs- und Verblässungseffekten im Erinnerungsvermögen der Probanden führen kann. Nachteilig ist jedoch, dass durch eine komplexe Verkehrssituation der Proband so beansprucht sein kann, dass er nur sehr knapp antwortet. Weiterhin können in der Regel bei einer direkten Befragung weniger Fragen gestellt werden, weil den Probanden zur Beantwortung nur wenig Zeit bleibt. Ferner kann nicht sichergestellt werden, dass alle Probanden immer ein und dieselben Fragen in der immer gleichen Fahrsituation gestellt bekommen. Damit ist eine Prüfung auf Konsistenz der Antworten nicht mehr möglich.

Bei dem Vergleich zwischen Kundenurteil und Expertenbeurteilung (die meist firmenintern vorhanden sind) sollte darauf geachtet werden, dass sich für die statistische Auswertung ein gleiches Skalenniveau ergibt. Bei nicht gleichen Skalenniveaus besteht die Gefahr, dass die Aussagen der beiden Gruppen statistisch nur schwer oder gar nicht miteinander zu vergleichen sind. Weiterhin können die komplexen Fragebögen einer Expertenbefragung nicht unbedingt Normalfahrern (Kunden) zugemutet werden.

Sollen Korrelationen zwischen objektiven Kenngrößen und der subjektiven Empfindung gefunden werden, so sollte beachtet werden, dass die Korrelation nur den Grad des Zusammenhangs zwischen dem Subjektivurteil und dem objektiven Parametern angibt. Es kann somit nicht ohne weiteres gesagt werden, mit welchem Wert ein bestimmter Parameter ein positives bzw. negatives Subjektivurteil nach sich zieht, da eine Korrelation immer mehrere Werte der zu vergleichenden Parameter zur Basis hat.

5 Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit war es, das Lenkgefühl mit Hilfe ergonomischer Erkenntnisse und Methoden zu betrachten, die ebenso in anderen Bereichen als der Fahrzeuglenkung angewendet werden. Es stellte sich heraus, dass es notwendig ist, das Lenkgefühl nicht nur engeren, sondern im erweiterten Sinn zu betrachten. Beim erweiterten Lenkgefühl kommt die gesamte Fahrzeugreaktion mit ins Spiel und bezieht sich somit auf das Handling des Fahrzeugs. Ein weiterer Grund für die Zweiteilung war, dass das Lenkgefühl häufig nur mit dem Lenkgefühl im engeren Sinne in Verbindung gebracht wird, was sich vorwiegend auf die Wahrnehmungen direkt am Lenkrad bezieht. Die Reaktion des Fahrzeugs spiegelt sich also im erweiterten Lenkgefühl wieder. Die Fahrzeugreaktion nimmt der Fahrer rückgemeldet wiederum war und zieht damit Rückschlüsse bei der Beurteilung der Lenkeigenschaften eines Kraftfahrzeugs.

Um das Lenkgefühl seitens der Ergonomie anzugehen, wurde am Anfang der Arbeit der Sachstand in einen Fahrwerksteil und einen ergonomischen Teil untergliedert. Im Fahrwerksteil, sind alle Untersuchungen enthalten, die sich von der fahrwerkstechnischen Seite mit dem Lenkgefühl beschäftigen. Hier werden auch die Reglermodelle für die Fahrzeugquerführung angerissen, die seit Mitte der 50er des 20. Jahrhunderts entwickelt wurden. Die Ansätze sind seitens der Mathematik vielfältig und reichen bis hin zu Fuzzy-Logiken und neuronalen Netzen. Allerdings gelten nahezu alle Modelle nur unter bestimmten Voraussetzungen (z.B. vereinfachte Annahmen, oder bestimmte Fahrerverstärkungsfaktoren) oder für bestimmte Fahrmanöver (z.B. doppelter Spurwechsel). In diesem ersten Kapitel des Sachstandes wurden Empfehlungen für die Lenkungsauslegung gesammelt. Das Kapitel orientiert sich an objektiven Größen, wie u.a. Lenkmomentenverlauf über der Querbeschleunigung. Es werden bewusst nur solche Untersuchungen besprochen und aufgezählt, die nicht explizit einen ergonomischen Untersuchungsansatz verfolgen, da solche im darauf folgenden Kapitel näher behandelt werden.

Der Teil der ergonomischen Herangehensweise (das zweite Kapitel des Sachstandes) orientiert sich am Regelkreisparadigma der Systemergonomie. Hier wird die Aufgabenstellung des Lenkens eines Kraftfahrzeugs als Informationsverarbeitungsprozess angesehen und unterteilt sich in die drei Phasen Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung und Informationsumsetzung.

In der Informationsaufnahme wurden die Wahrnehmungen der einzelnen Sinnesmodalitäten behandelt, insbesondere die kinästhetische und visuelle (optische) Wahrnehmung. Im Falle der Fahrzeugquerführung erfolgt die Informationsaufnahme visuell (optisch), haptisch (per Definition an den Körper angreifende Kräfte und Körperteilstellungen) und kinästhetisch (per Definition nur Wahrnehmung von Eigenbewegungen des Körpers). Die Wahrnehmungsschwellen des optischen Sinns sind gut mit geringen Streubreiten bekannt, während die Wahrnehmungsschwellen für die Kinästhesie je nach Literaturstelle und Versuchskonfiguration (z.B. stehend oder sitzend) stark unterschiedlich ausfallen und somit stark streuen (bis zum 100-fache). Das gilt vor allem für die Gierbewegungen, wohingegen für die Querbeschleunigung geringere Streuungen auftreten. Durch die relativ großen Streuungen können die Wahrnehmungsschwellen nur eingeschränkt angewendet werden, z.B. bei der zeitlichen Bestimmung, wann die Wahrnehmung einer Fahrzeugreaktion genau erfolgt. Eine weitere wichtige Erkenntnis ist, dass der haptische Informationskanal der einzige ist, der dem Menschen eine ca. 4- bis 6-fache schnellere Reaktion erlaubt als bei der Informationsaufnahme über andere Sinneskanäle (ohne Beteiligung des haptischen Kanals). Dadurch bekommen Lenkwinkel- und Lenkmomentenänderung eine große Bedeutung bei der

Fahrzeugquerführung. Veröffentlichungen nach scheint das Lenkmoment wesentliche Informationen über die Charakteristik des Lenkverhaltens zu übermitteln. Wie das genau geschieht ist allerdings noch unklar.

Desweiteren wurde auf die zeitlichen Aspekte der Wahrnehmung eingegangen, wobei die obere zeitliche Grenze der Fahrzeugreaktion bei ca. 100-150 ms liegen sollten und die untere wird bei ca. 50 ms vermutet, wobei die Existenz bzw. Relevanz für das Lenken bisher nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden konnte.

Bei der Informationsverarbeitung wurde auf das innere Modell zur Erklärung des Lenkgefühls eingegangen. Bei der Informationsverarbeitung wurde das Regelverhalten des Menschen an der Lenkung näher erläutert. Hier gibt es grundsätzlich drei mögliche Regelstrecken (Lagesteuerung, Geschwindigkeitssteuerung, Beschleunigungssteuerung), die unterschiedlich schwer für den Menschen zu regeln sind. Problematisch bei den Regelstrecken ist, dass nicht immer zweifelsfrei gesagt werden kann, nach welcher bzw. welchen Regelstrecke(n) der Fahrer in einer bestimmten Fahrsituation die Fahraufgabe „Querführung“ zu erfüllen versucht. Weiterhin sind die drei Regelstrecken in den fünf Möglichkeiten, die Querführungsaufgabe über eine Änderung des Lenkwinkels zu beeinflussen enthalten (Beeinflussung von Querbeschleunigung, Bahnkrümmung, Giergeschwindigkeit, Gierwinkel, seitlichen Abstand). Es wird davon ausgegangen, dass der Fahrer bei guter Voraussicht nach allen fünf Aufgabenstellungen und damit nach allen drei Regelstrecken gleichzeitig regelt, und sich damit die Gesamtaufgabe „Querführung“ erheblich erleichtert. Alle drei möglichen Regelstrecken benötigen etwas unterschiedliche Lenkcharakteristiken. So sollte die Mittellage der Lenkung bei der Beschleunigungssteuerung deutlich fühlbar sein, während das bei der Lagesteuerung eher hinderlich sein kann (in Bezug auf die Qualität der Regelung).

Bei der Informationsumsetzung kommen vor allem Aspekte des Hand-Arm-Systems zum Tragen. Im Kapitel wurde auf den menschlichen Längen- und Kraftservomechanismus eingegangen. Beide Mechanismen lassen sich nicht völlig voneinander trennen und somit unabhängig betrachten. Zwar ist rein physikalisch gesehen die Kraft die Initiale einer Bewegung, allerdings regelt der Mensch solange den Weg (Längenservomechanismus) bis er die Zielposition erreicht hat und sichert diese gegen Störungen ab (Kraftservomechanismus). Es wurden auch Angaben zu den vom Fahrer aufbringbaren Lenkwinkeln und Lenkwinkelgeschwindigkeiten gemacht. Desweiteren wurde von der Art des Stellteils unabhängig erläutert, welche Auswirkung viskose Dämpfung, tote Zone, Spiel, Reibung und die Massenträgheit auf die Informationsumsetzung durch das Hand-Arm-System haben.

Das letzte Kapitel im Ergonomieteil beschäftigte sich mit Packagefragen rund um Anordnung von Sitz relativ zur Pedalerie, Lenksäulenlage und der Geometrie des Lenkrades an sich. Diese Elemente haben nachgewiesener Maßen einen Einfluss auf Lenkgefühl, v.a. nach längerer Fahrtdauer. Als Ergebnis konnte festgehalten werden, dass die Ausrichtung der Lenksäule gerade und ohne seitlichen Parallelversatz zum Fahrer sein soll. Die Lenkradkranzdicke darf nicht zu groß sein, da vereinzelte Probanden sich dadurch beim Lenken verunsichert fühlen können, sobald sich nicht mehr mit einem Umfassungsgriff das Lenkrad umfassen können.

Im Anschluss an den Sachstand wurden die Versuche erläutert, die sich aus mehreren Teilversuchen zusammensetzen. Im ersten Versuch wurde herausgefunden, dass die Querbeschleunigung in Kopfnähe ein anderes Frequenzverhalten zeigt und damit auch ein unterschiedliches Zeitverhalten gegenüber dem Lenkbefehl als die Querbeschleunigung im Fahrzeugschwerpunkt.

Im zweiten Versuch wurde die Bildverschiebung bei Kurvenfahrt mit Hilfe einer eigens für den Versuch erstellten Software näher betrachtet. Als Ergebnis konnte herausgefunden werden, dass der Fahrer viele visuelle Informationen für die Fahrzeugquerführung nutzt bzw. nutzen kann.

Eine der wichtigsten Aussagen des Versuchs ist, dass der Fahrer ein Untersteuern oder Übersteuern des Fahrzeugs schon bei niedrigen Geschwindigkeiten bestimmen kann. Bisher wurde angenommen, dass das dem Fahrer nur durch seine kinästhetisch (vestibuläre) Wahrnehmung möglich ist.

Im Versuch 3 wurde ermittelt, inwieweit eine geringe und eine größere Lenkradkranzdicke in Abhängigkeit der Handanthropometrie eine andere Berührflächengeometrie hervorruft und dadurch andere Mechanorezeptoren (insgesamt gibt es in der menschlichen Haut vier verschiedene Mechanorezeptoren) angesprochen werden, was wiederum zu einem anderen Lenkgefühl führt. Im Ergebnis war jedoch festzustellen, dass diese Abhängigkeit nicht vorhanden zu sein scheint.

Im vierten Versuch wurde anhand eines Realfahrversuchs mit vier Fahrzeugen ein Zusammenhang zwischen der verbalen Beurteilung der Probanden und den objektiven Fahrzeuggrößen hergestellt. Zusätzlich wurde das Urteil der Normalfahrer mit Urteilen von Experten verglichen. Es konnte festgestellt werden, dass Normalfahrer in der Lage sind relativ genau das Lenkgefühl zu beschreiben. Auch die Abweichungen der Urteile von Experten- und Normalfahrern wurde durch statistische Auswertung bestimmt. Hier kommt es unter anderem beim Fahrbahnkontakt zu größeren Abweichungen. Auffällig ist weiterhin, dass Normalfahrer technische Unterschiede (z.B. ein Fahrzeug einmal mit und ohne Überlagerungsgetriebe) zwar durchaus wahrnehmen und in gewisser Weise auch mitteilen können, aber es ihnen häufig nicht gelingt, es an technischen Merkmalen festzumachen. Allerdings gilt das eher für Normalfahrer, die keinen technischen Beruf ausüben.

Der fünfte Versuch sollte die Verteilung der Wahrnehmungsschwelle für die Lenkkraft ermitteln, da in diesem Bereich nur wenige Untersuchungsergebnisse existieren, die sich teils widersprechen bzw. nicht wirklich ein einheitliches Bild ergeben. Es wurden vier verschiedene Lenkwinkel (0° , 5° , 10° und 35°) gemessen, sowie drei verschiedene Greifhöhen am Lenkrad. Im Offcenterbereich von 35° wurde nur auf Differenzwahrnehmungsschwelle gemessen, da bei solch hohen Lenkwinkeln im realen Fahrbetrieb bereits eine Gegenkraft (Rückstellkraft) anliegen dürfte. Mit den Winkeln 0° , 5° und 10° wurden nur Absolutwahrnehmungsschwellen untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass sich bei unterschiedlichen Lenkwinkeln keine signifikanten Unterschiede bei den Absolutschwellen erkennen lassen. Allerdings sind die Schwellen in unterer Haltung am geringsten und in mittlerer am größten.

Ebenso sind bei Lenkkrafterhöhungen die Wahrnehmungsschwellen geringer als bei Lenkkraftverminderungen. Allerdings zeigt sich das erst bei 4 Nm (gegenüber 2 Nm) am deutlichsten. Weiterhin kann festgestellt werden, dass bei erfahreneren Personen (bezogen auf den Führerscheinbesitz) die Schwellen ebenso geringer zu sein scheinen.

In den Abbildung 174 und Abbildung 175 werden die Einflüsse durch die ergonomischen Parameter an den Zusammenhang zwischen fahrwerkstechnischen Parametern und der verbalen Beurteilung geknüpft. Der Zusammenhang zwischen fahrwerkstechnischen Parametern und der verbalen Beurteilung bzw. der Lenkungeigenschaften basiert auf den Ergebnissen von Braess (2001). In den beiden Abbildungen sind die Eigenschaften der Lenkung und die möglichen „verbalen“ Beurteilungen der entsprechenden Eigenschaften durch farbige Verbinder an die entsprechenden fahrwerkstechnischen und ergonomischen Parameter geknüpft. In beiden Abbildung 174 und Abbildung 175 sind die fahrwerkstechnischen Parameter und die Lenkungeigenschaften dieselben. Die Abbildungen unterscheiden sich nur durch die Ergonomischen Parameter. Die Abbildung 174 beinhaltet nur die ergonomischen Parameter für das Lenkgefühl im engeren Sinn, die Abbildung 175 die ergonomischen Parameter für das Lenkgefühl im erweiterten Sinn.

Zieht man in der Abbildung 175 die erste Eigenschaft „Fähigkeit zur Führung des Fahrzeugs, Zielgenauigkeit, Dosierbarkeit“ beispielhaft heran, so sind die möglichen verbalen

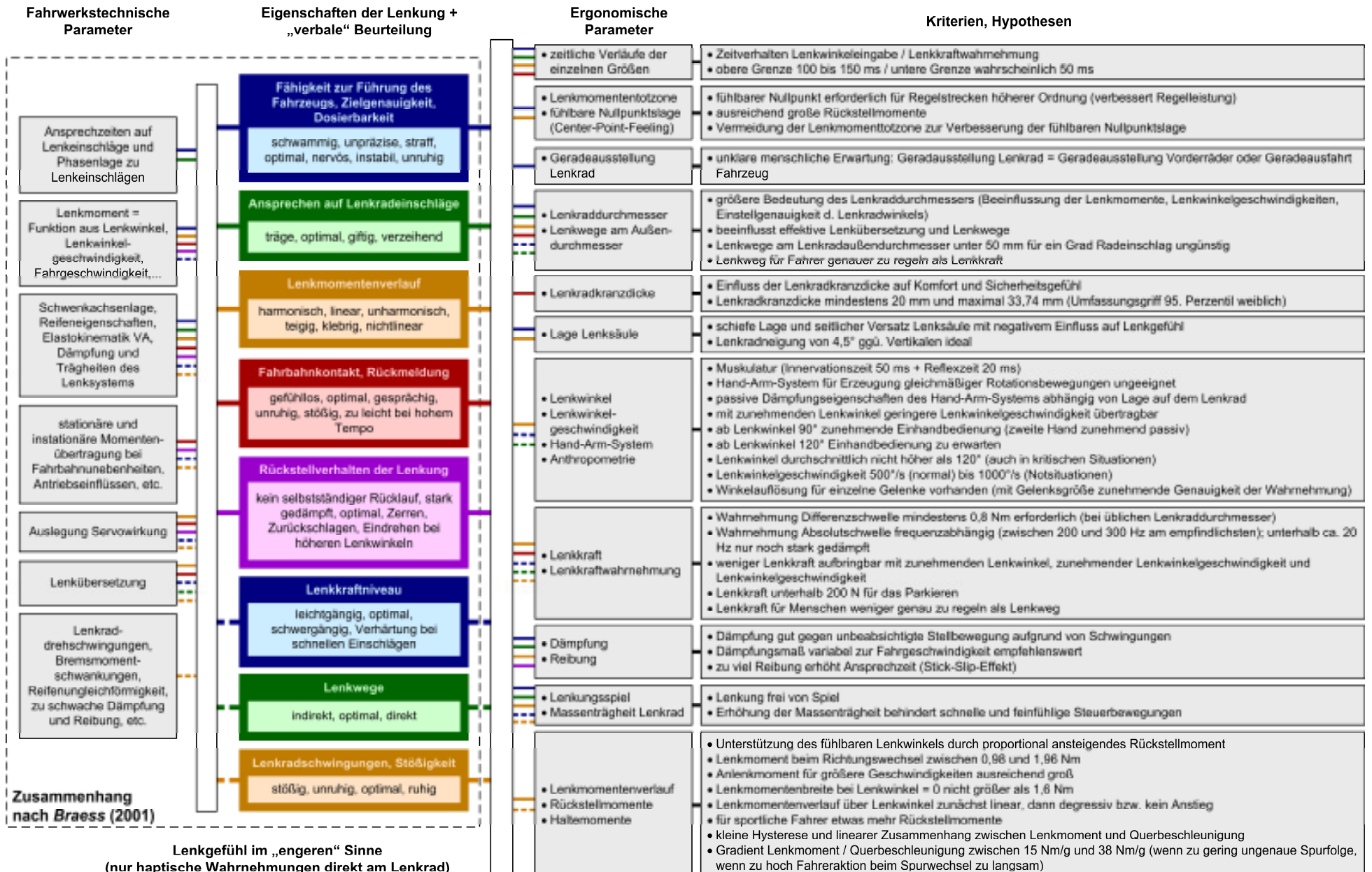
Beurteilungen nach *Braess* (2001) „schwammig, unpräzise, straff, optimal, nervös, instabil, unruhig“. Die beeinflussenden Parameter seitens der Fahrdynamik sind

- „Ansprechzeiten auf Lenkeinschläge und Phasenlage zu Lenkeinschlägen“,
- „Lenkmoment als Funktion Lenkwinkel, Lenkwinkelgeschwindigkeit, Fahrgeschwindigkeit, usw.“ und
- Schwenkachsenlage, Reifeneigenschaften, Elastokinematik der Vorderachse, Dämpfung und Trägheit des Lenksystems“.

Die beeinflussenden Parameter seitens der Ergonomie für das Lenkgefühl im engeren Sinne sind

- „zeitliche Verläufe der einzelnen Größen“ (Lenkwinkel, etc.),
- „Lenkmomententotzone, fühlbare Mittellage (Center-Point-Feeling)“,
- „Geradausstellung der Lenkung“,
- „Lenkraddurchmesser, Lenkwege am Außendurchmesser“,
- „Lage Lenksäule“,
- „Dämpfung und Reibung“ und
- „Lenkungsspiel, Massenträgheit Lenkrad“.

Zu den erwähnten ergonomischen Parametern sind soweit als möglich konkrete Werte, Empfehlungen und Sachzusammenhänge erläutert.



Lenkgefühl im „engeren“ Sinne
(nur haptische Wahrnehmungen direkt am Lenkrad)

Abbildung 174: Zusammenhang zwischen fahrwerkstechnischen und ergonomischen Parametern bezüglich des Lenkgefühls im „engeren“ Sinne

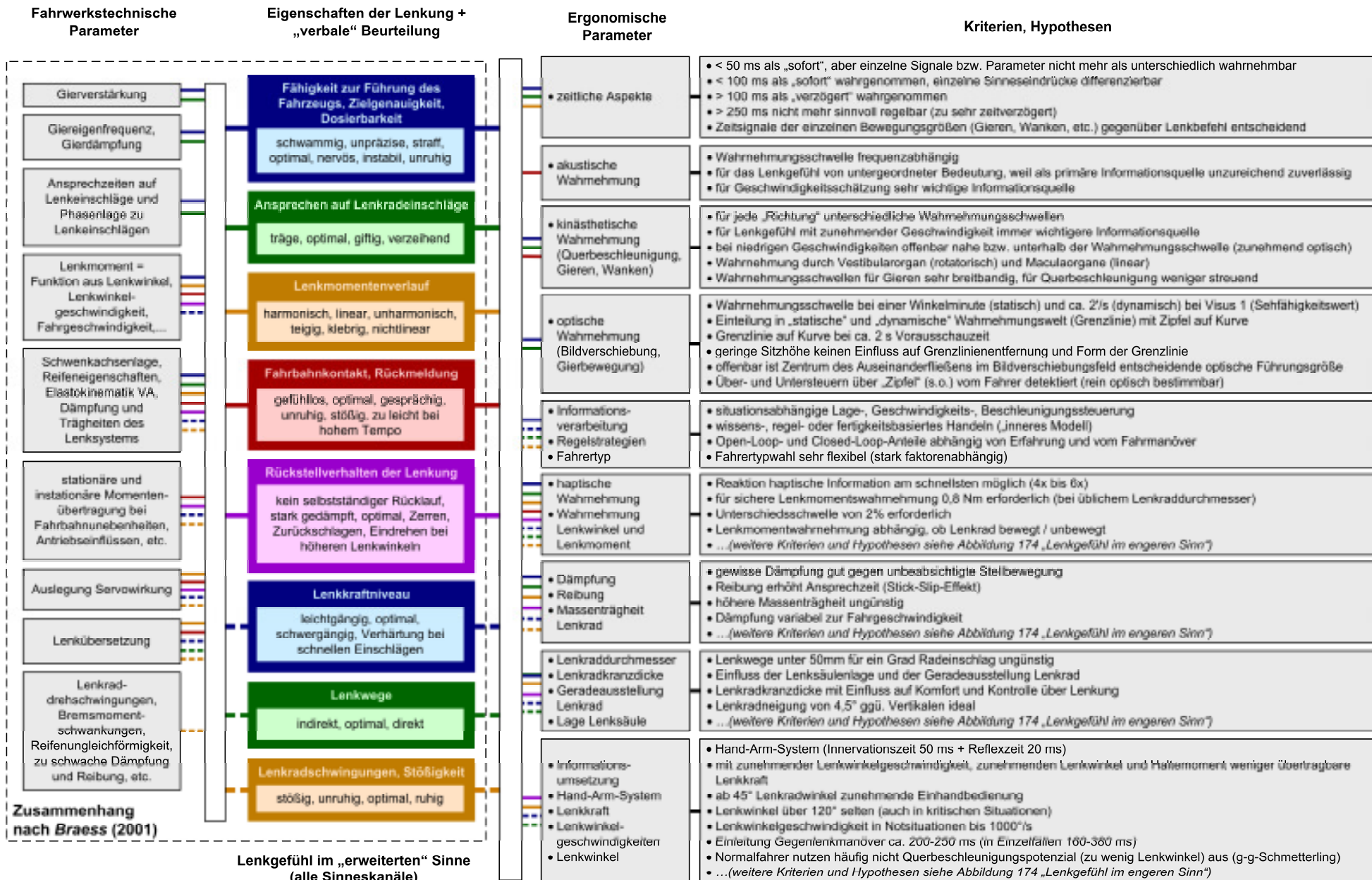


Abbildung 175: Zusammenhang zwischen fahrwerkstechnischen und ergonomischen Parametern bezüglich des Lenkgefühls im „erweiterten“ Sinne

Abbildung 176 zeigt ein umfassendes Modell für das Lenkgefühl. Basierend auf dem Regelkreisparadigma der Systemergonomie tritt der Mensch anstelle des technischen Reglers und bedient die Maschine, im konkreten Fall das Fahrzeug. Der rötlich eingefärbte Teil stellt den Menschen dar, dessen Informationsverarbeitungsprozess in die drei Abschnitte Informationsaufnahme, Informationsverarbeitung und Informationsumsetzung untergliedert ist.

Ähnlich wie der Systemteil „Mensch“ bzw. „Fahrer“ ist der Systemteil „Fahrzeug“ unterteilt. So sind auf der Eingangsseite die Bedienelemente und auf der Ausgangsseite die Fahrzeugreaktionen in Form der Quer-, Längs- und Vertikaldynamik zu finden. Die für das Lenkgefühl entscheidende Querdynamik wird nochmals in Wankreaktion, Gierreaktion und Querbeschleunigung untergliedert. Direkte Rückmeldungen vom Systemelement „Fahrzeug“ erhält das Systemelement „Fahrer“ von den Fahrzeug-Eingangselementen Sitzdruck (als Teil des Popometers), Lenkkraft und Lenkwinkel. Das Geräuschspektrum seitens der Räder und des Fahrwerks erhält er mittelbar. Die Ausgangselemente des Systemelements „Fahrzeug“ sind Wankreaktion, Gierreaktion und Querbeschleunigung. Die Rückmeldungen der einzelnen gerade erwähnten Elemente erfolgt durch Wahrnehmung der entsprechenden Informationsaufnahme Kanäle. Sie sind in der Abbildung durch sechseckige grüne Symbole gekennzeichnet.

In der Darstellung von Abbildung 176 sind die Einzellemente des Systemblocks „Fahrzeug“ der Ordnung halber mit gelben kreisrunden Symbolen gekennzeichnet, alle Rückmeldungsgrößen des Systemblocks „Fahrzeug“ an den Systemblock „Fahrer“ durch grüne sechseckige Symbolik. Die rosafarbenen Rechtecke kennzeichnen Parameter (hiermit sind Parameter im erweiterten Sinn gemeint), die für das Lenkgefühl von Bedeutung sind. Diese Parameter sind entweder verbal qualitativer Natur und damit Empfehlungen oder wichtige Erkenntnisse oder zahlenmäßig beschrieben quantitativer Natur und damit konkrete Zahlenwerte oder Zahlenbereiche (siehe hierzu Tabelle 46 bis Tabelle 52).

Innerhalb des Regelkreises können, wie häufig bei Regelkreisen in denen der technische Regler durch den Regler Mensch ersetzt ist, nicht wie bei konventionellen Regelkreisen mathematische Berechnungen so ohne weiteres durchgeführt werden. Der Grund hierfür liegt in der mathematischen Abbildung des Reglers Menschen. Beispielsweise kann der Verstärkungsfaktor für den Fall der Fahrzeugquerführung einen Zahlenwert zwischen 1 und 100 einnehmen, der von der Fahrervoraussicht abhängt, die wiederum nicht eindeutig für jede angenommene Fahrsituation vorhergesagt werden kann oder bekannt ist.

Wichtig für alle (zukünftigen) Fahrermodelle, die die Querregelaufgabe beim Führen eines Fahrzeugs betrachten, ist die Berücksichtigung des Lenkmoments und des Lenkwinkels, wobei beide Größen zum Fahrer zurückgeführt werden sollten (Rückmeldung). Dem Lenkmoment sollte dabei eine gleich hohe Bedeutung wie dem Lenkwinkel zugemessen werden.

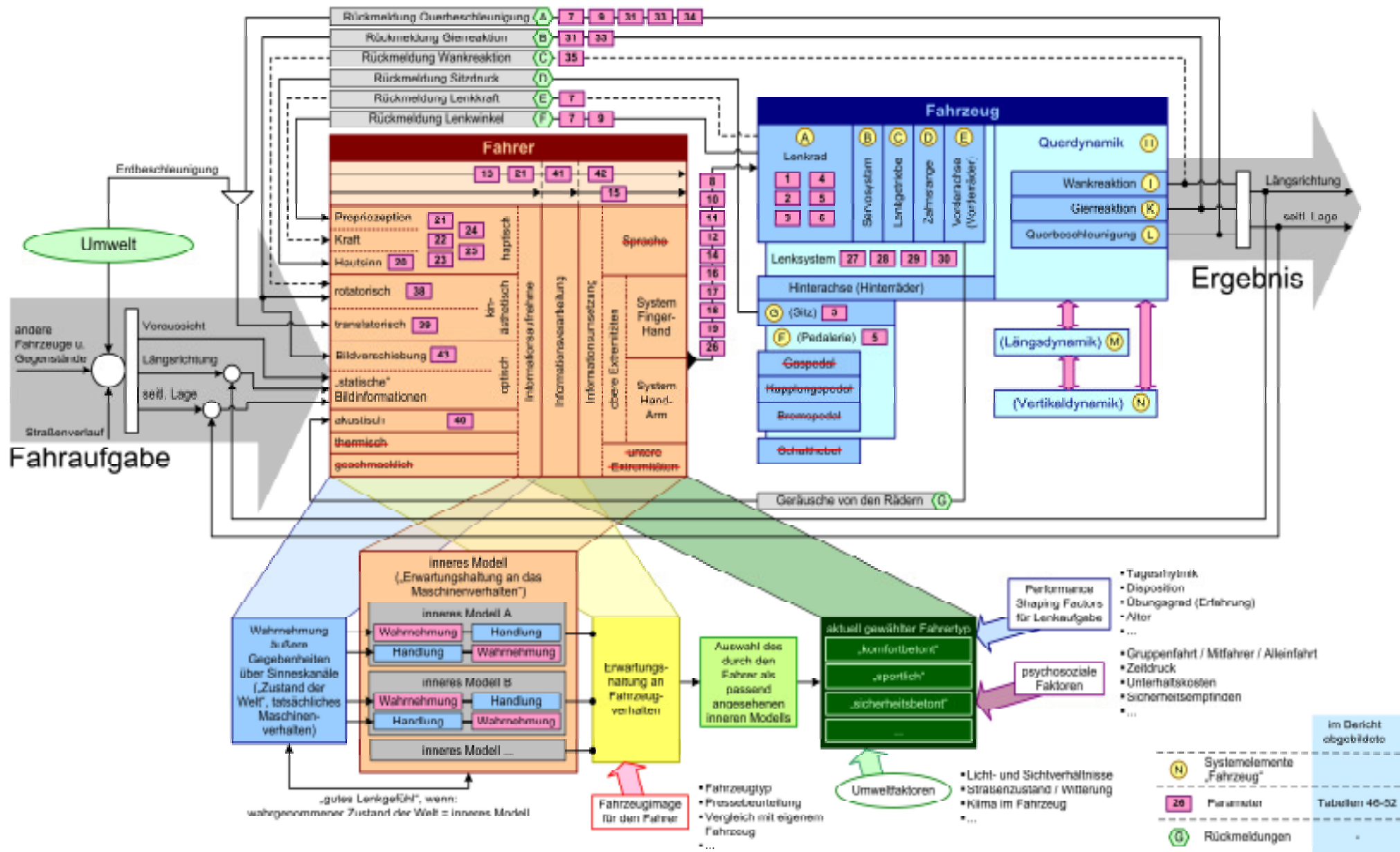


Abbildung 176: Schematische und gesamthafte Darstellung des Lenkgefühls als Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis

| | Parameter | optimaler Wertebereich bzw. Gegebenheit | Bemerkung, offene Fragen und Literatur | Querverweis | | Nr. | |
|------------------------------------|---|---|--|---|----------------------|-----|------------------|
| | | | | Kapitel | Abb. / Tab. | | |
| Lenkradgeometrie | Lenkraddurchmesser (Außendurchmesser) | 360 mm bis 410 mm | in Zusammenhang mit Lenkübersetzung zu sehen (Lenkweg) | 2.5.5.3 | Tab. 19 | 1 | |
| | Lenkradkranzdicke | ca. 20 mm (LfE-Daten aus EKIDES) | Lenkradkranzdicke mit Einfluss auf Komfort- und Sicherheitsempfinden | 2.5.5.4 | - | 2 | |
| | | maximal nicht mehr als 33,74 mm | LfE-eigenes Ergebnis (abgeleitet aus Umfassungsgriff 95. Perzentil weiblich) | 3.1.2.4 | - | | |
| | Exzentrizität Lenkraddurchmesser | keine Exzentrizität | Hypothese | - | - | 3 | |
| | Lenkradneigung gegenüber Vertikalen | ca. 4,5 ° | LfE-eigenes Untersuchungsergebnis | 2.5.5.5 | - | 4 | |
| | räumliche Lage der Lenksäule im Fahrzeug | keine schiefe Lage; kein seitlicher paralleler Versatz gegenüber der Sitzmitte / Fahrermitte | LfE-eigenes Untersuchungsergebnis (Bäumler 1992) | 2.5.5.2 2.5.5.3 2.5.5.5 | - | 5 | |
| Massenträgheit der Lenkung | ungleich null und nicht zu groß | Massenträgheit erhöht Einstellgenauigkeit; zu große Massenträgheit begünstigt Gierschwingungen nach Anreißen; im hochdynamischen Bereich fraglich | 2.5.5.4 | - | | | |
| Lenkmoment / Lenkkrft | | Anlenkmoment steil genug; für sportliche Fahrer etwas höhere Rückstellmomente | - | 2.2.1.1 | Abb. 8, 9 und 10 | 7 | |
| | Grad der Servounterstützung | keine genauen Werte vorhanden | hohe Servounterstützung erhöht zwar das Gefühl der Agilität, verschlechtert aber das Gefühl der Rückmeldung und die Vorhersagbarkeit des Grenzbereichs | 2.3 | Tab. 2 | | |
| | Lenkmomentenverlauf über Lenkwinkel | Lenkwinkel bei Lenkmoment = 0 | positive Restwinkel | kein Lenkungsüberschwingen beim Loslassen der Lenkung | 2.2.1.1 | | Abb. 8, 9 und 10 |
| | | Lenkmoment bei Lenkwinkel = 0 | 0,98 Nm bis 1,96 Nm | - | 2.2.1.1 | | Abb. 8, 9 und 10 |
| | Center-Point-Feeling | keine Lenkmomententotzone | Grad der notwendigen Ausprägung und Effekt auf Lenkgefühl unklar (Gradient Lenkmoment-Lenk Winkel sollte steil genug sein) | 2.2.1.1 2.5.2.4 | Abb. 8, 9 und 10 | | |
| | Lenkmomententotzone | keine Lenkmomententotzone | Hypothese; unterstützt Regelstrecken 2. Ordnung; kann Geradeausfahrt stabilisieren | 2.2.1.1 2.5.2.4 2.5.5.4 | Abb. 8, 9, 10 und 67 | | |
| | aufgeschaltetes Zusatzlenkmoment (z.B. bei Fahrerassistenzsystemen für die Querführung) | hervorgerufene Lenkwinkeländerung nicht größer als 3° | wenn größer als 3° hervorgerufene Lenkwinkeländerung, dann Zusatzlenkmoment als störend empfunden (Gradenegger et al. 2005) | 2.5.2.4 | - | | |
| in Kurven fällt Fahrerreaktion auf | | Grund für größere Fahrerreaktion dürfte auch die empfindlichere Fahrzeugreaktion auf Lenkmomentänderungen in Kurven sein (Schmidt et al. 2007) | 2.5.2.4 | - | | | |

Tabelle 46: Übersicht der Parameter des Lenkgefühls mit optimalen Wertebereichen

| | Parameter | optimaler Wertebereich bzw. Gegebenheit | Bemerkung, offene Fragen und Literatur | Querverweis | | Nr. | |
|---|---|--|---|--|-----------------------------|-----|--------------------|
| | | | | Kapitel | Abb. / Tab. | | |
| Lenkmoment / Lenkkrft | Lenkmomentenverlauf im Grenzbereich | k.A. | unklar, ob degressiver, progressiver (Endanschlag?) oder proportionaler Verlauf und wann nichtlinearer Bereich als Vorankündigung beginnen soll | 2.2.1.2 2.2.1.3 2.5.2.4 | Abb. 65 | 7 | |
| | Lenkmomentenverlauf über Querbeschleunigung | möglichst kleine Hysterese zwischen Lenkmoment und Querbeschleunigung | - | 2.2.1.2 | Abb. 12 | | |
| | | Gradient Lenkmoment / Querbeschleunigung | 15 Nm/g bis 38 Nm/g; linearer und proportionaler Verlauf. Obere und untere Grenze in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit vorhanden | wenn zu klein, dann ungenauer Spurfolge; wenn zu hoch, dann Fahrer beim Spurwechsel zu langsam; zu wenig Fahrbahinformation bei Werten unter 15 Nm/g | 2.2.1.2 | | Abb. 13 Abb. 12 |
| | | Lenkmoment bei Querbeschleunigung = 0 | 0 Nm bis 1,96 Nm | - | 2.2.1.2 | | Abb. 13 |
| | Querbeschleunigung bei Lenkmoment = 0 | 0,1 g bis 0,13 g | - | 2.2.1.2 | Abb. 13 | | |
| System Hand-Arm (Informationsumsetzung) | vom Menschen maximal eingestellte Lenkwinkel | maximal in kritischen Situationen | ca. 120° bis 150° (<i>Zomotor 1976</i>) ca. 120° bis 260° (<i>Breuer 1998</i>) | 2.5.4.2 | Abb. 104, 105, 106, und 107 | 8 | |
| | | Zeitbudget (time-to-collision) ca. 1s | ca. 150° (bei etwa 60 km/h) ca. 100° (bei etwa 100 km/h) | | | | - |
| | | Zeitbudget (time-to-collision) ca. 2s | ca. 135° (bei etwa 40 km/h) ca. 70° (bei etwa 100 und 60 km/h) | | | | - |
| | Lenkwinkel über Querbeschleunigung | Lenkwinkel proportional zunehmend, jedoch nicht 1:1; oberhalb 6 m/s ² nicht degressiv abfallend | oberhalb 6 m/s ² unklare Empfehlungen | 2.2.10.2 | Abb. 23 | | 9 |
| | vom Menschen erzeugbare Lenkwinkelgeschwindigkeit | maximal bis ca. 1350°/s (ca. 3,75 Hz); ca. 13% der Probanden über 1000°/s, bei Expertenfahrern tendenziell weniger | individuell unterschiedlich und von verschiedenen Parametern abhängig (Sitzposition, Handposition, individuelle Trainiertheit, etc.); erzeugbare Verkürzungsgeschwindigkeit indirekt proportional zur am Muskel anliegenden Kraft | 2.5.4.2 | Abb. 106 und 108 | 12 | |
| Zeitbedarf | Lenkgeschwindigkeit unter 200°/s | minimal ca. 200 ms, maximal ca. 500 ms; minimal ca. 150 ms, maximal ca. 350 ms (doppelter ISO-Spurwechsel) | Daten doppelter ISO-Spurwechsel basierend auf <i>Breuer (1998)</i> | 2.5.4.2 | Abb. 106 und 108 | 12 | |
| | Lenkgeschwindigkeit über 200°/s | minimal ca. 300 ms, maximal ca. 500 ms; minimal ca. 150 ms, maximal ca. 350 ms (doppelter ISO-Spurwechsel) | Daten doppelter ISO-Spurwechsel basierend auf <i>Breuer (1998)</i> | | | | |
| | Einleitung Gegenlenksituation | 200-250 ms; in Einzelfällen 160-380 ms | Daten basierend auf <i>Barthel (2004)</i> | 2.5.2.4 | - | 13 | |

Tabelle 47: Übersicht der Parameter des Lenkgefühls mit optimalen Wertebereichen (Fortsetzung)

| | Parameter | optimaler Wertebereich bzw. Gegebenheit | Bemerkung, offene Fragen und Literatur | Querverweis | | Nr. |
|---|--|---|---|----------------------|-----------------------|---------|
| | | | | Kapitel | Abb. / Tab. | |
| System Hand-Arm (Informationsumsetzung) | Auflösung Krafteinstellung | ca. 1-2% der aufgebrauchten Kraft | - | 2.5.4.1 | - | 11 |
| | vom Menschen erzeugbare Lenkfrequenz | beim Sinuslenken max ca. 1,5 Hz - 2,0 Hz | - | 2.5.4.2 | - | 14 |
| | vom Menschen erzeugbare Lenkkraft | k.A. | vom Menschen aufbringbare Lenkkraft abhängig von der Muskelverkürzungsgeschwindigkeit und vom anliegenden Rückstellkraft; individuell unterschiedlich | 2.5.4.2 | Abb. 108 | 10 |
| | Muskelnervationsdauer | 50 ms | - | 2.5.4.1 | Abb. 102 | 15 |
| | Reflexzeit | 20 ms | - | 2.5.4.1 | Abb. 102 | |
| | Lenkwege am Außendurchmesser ("Zielgenauigkeit") | max. 56 mm für einen Grad Radeinschlag | unterhalb des Wertes auffällig häufig negative Lenkungsbeurteilung durch Fachpresse; vorausgesetzt Ackermannbedingung | 3.1.2.5 2.5.5.3 | Abb. 158 | 16 |
| | | max. 180 m Kurvenradius bei 50 mm | oberhalb des Wertes auffällig häufig negative Lenkungsbeurteilung durch Fachpresse; vorausgesetzt Ackermannbedingung | 3.1.2.5 2.5.5.3 | Abb. 160 | 17 |
| | | Mensch kann Weg wesentlich feiner regeln als Kraft | <i>Bolte (1991)</i> | 2.5.4.1 | - | 18 |
| | Schnittfrequenz Führungsgröße | obere Grenzfrequenz | 2,5 Hz | - | - | Abb. 90 |
| | | optimaler Wert | 0,4 bis 0,6 Hz | je nach Regelstrecke | - | |
| untere Grenzfrequenz | | 0,17 Hz | hängt vom Bedienelementeigenschaften ab | - | | |
| Schnittfrequenzen und Phasenreserve (Querführung) | Geradeausfahrt | 0,1 und 0,2 Hz mit ca. 10 bis 80° | siehe <i>Mitschke und Wallentowitz (2004)</i> ; je höher Schnittfrequenz, desto geringer die menschliche Totzeit | 2.5.3.3 | Abb. 90 Abb. 91 | |
| | Kurvenfahrt | ca. 0,35 Hz mit ca. 30 bis 50° | | | | |
| | Ausweichmanöver (kritische Situation) | 0,5 Hz mit ca. 20° bis 40° | | | | |
| haptische Wahrnehmung | Stimulationsbereich Mechanorezeptoren | 0-10 Hz (Merkelscheiben und Ruffini-Körperchen); 20-50 Hz (Meissner-Körperchen); 100-300 Hz (Pacini-Körperchen) | Merkelscheiben und Ruffini-Körper messen Intensität von Druck, statische Kraft und Scherung. Meissner-Körperchen messen Geschwindigkeit. Pacini-Körperchen messen Beschleunigung. | 2.5.2.4 | Abb. 55, 56 und 58 | 20 |
| | haptische Wahrnehmung | vier bis sechsmal schnellere Reaktion möglich als über andere Sinneskanäle | Lenkinformationen "von unten nach oben" möglichst über haptischen Kanal | 2.5.2.4 | - | 21 |
| | Lenkradvibration | mit zunehmender Frequenz unempfindlicher (für gleiche Wahrnehmung mehr Lenkradbeschleunigung notwendig) | genauer Verlauf Lenkradbeschleunigung über Frequenz siehe (<i>Giacomin et al. 2004</i>) | 2.5.2.4 | Abb. 58 | 23 |
| | Lenkkräfteniveau (haptische Wahrnehmung) | Handkraft unterhalb 200 N; für sichere Wahrnehmung ca. 2 N erforderlich | - | 2.2.1.1 2.5.2.4 | Abb. 10 | 22 |

Tabelle 48: Übersicht der Parameter des Lenkgefühls mit optimalen Wertebereichen (Fortsetzung)

| | Parameter | optimaler Wertebereich bzw. Gegebenheit | Bemerkung, offene Fragen und Literatur | Querverweis | | Nr. | | |
|--|---|--|---|---|--------------------|-----|---------|---|
| | | | | Kapitel | Abb. / Tab. | | | |
| Lenkgefühl im erweiterten Sinne Lenkgefühl im engeren Sinne | Absolutschwelle Lenkkraftwahrnehmung | 2,70 N bei 0° Lenkwinkel (mittig) | In 0° sind die Haltungen „oben“ und „unten“ gleich, die Haltungen „oben“, „Mitte“ und „unten“ unterscheiden sich bei 5° und 10° nicht mehr und die Haltung „oben“ ist bei allen Lenkwinkeln gleich. | 3.1.2.6 | Tab. 37 | 22 | | |
| | | 2,95 N bei 5° Lenkwinkel (mittig) | | | | | | |
| | | 2,82 N bei 10° Lenkwinkel (mittig) | | | | | | |
| | Differenzschwelle (JND) Lenkkraftwahrnehmung | frequenzabhängig; bei 200 und 300 Hz am empfindlichsten (ca. 0,025 Nm) | individuell unterschiedlich; bei bewegtem Lenkrad etwas eher wahrgenommen (siehe <i>Buschardt</i> 2003); zughörige Lenkraddurchmesser nicht bekannt | 2.5.2.4 | Abb. 60, 61 und 62 | | | |
| | | für sichere Wahrnehmung 0,8 Nm; für Warnungen ca. 1,0 bis 1,2 Nm | | | | | | |
| | | 16,5% (0,87 N) bei 5,25 N | | | | | 2.5.2.4 | - |
| | | 15% (1,58 N) bei 10,5 N | | | | | | |
| | 11,5% (2,42 N) bei 21 N | alle Haltungen signifikant unterschiedlich | 3.1.2.6 | Tab. 38 | | | | |
| | 24,3% bei 35° Lenkwinkel (mittig) und 2 Nm (Erhöhung) | | | | | | | |
| | 25,4% bei 35° Lenkwinkel (mittig) und 2 Nm (Verminderung) | | | | | | | |
| | 22,5% bei 35° Lenkwinkel (mittig) und 4 Nm (Erhöhung) | | | | | | | |
| | Differenzschwelle (JND) Kraftwahrnehmung | 34,8% bei 35° Lenkwinkel (mittig) und 4 Nm (Verminderung) | weitgehend unabhängig vom betreffenden Muskelsystem und Betrag der Kraft | 2.5.2.4 | - | | | |
| | | 5 bis 10 % (7%) | | | | | | |
| | Differenzschwelle (JND) | Finger | 2,5° | Werte aus <i>Tan et al.</i> (1994) (in <i>Burdea</i> 1996), <i>Biggs und Srinivasan</i> (2002), <i>Doerrer</i> (2003). Genauigkeit der Auflösung nimmt mit Gelenksgröße zu. | 2.5.2.4 | | - | |
| Handgelenk | | 2,0° | | | | | | |
| Ellenbogen | | 2,0° | | | | | | |
| Schulter | | 0,8° | | | | | | |
| Winkelauflösung | am Lenkrad | 17% (0,68°) bei 4° Lenkwinkel | 2.5.2.4 | - | | | | |
| | | 14% (1,12°) bei 8° Lenkwinkel | | | | | | |
| | | 11,5% (1,84°) bei 16° Lenkwinkel | | | | | | |
| Schwellwerte für bewegtes Hand-Arm-System | Schultergelenk | 0,2 bis 0,4° (bei 0,3°/s) | Werte aus <i>Schmidt und Thews</i> (1995). Auflösungsgenauigkeit nimmt mit Gelenksgröße zu. | 2.5.2.4 | - | | | |
| | Fingergelenk | 1,0 bis 1,3° (bei 12,5°/s) | | | | | | |
| | Fahrerreaktion auf Lenkkrafterhöhung | Lenkkrafterhöhung erzeugt ein Weglenken vom Gefahrenort | <i>Mann und Popken</i> (2004) | 2.5.2.4 | - | 26 | | |

Tabelle 49: Übersicht der Parameter des Lenkgefühls mit optimalen Wertebereichen (Fortsetzung)

| | Parameter | optimaler Wertebereich bzw. Gegebenheit | Bemerkung, offene Fragen und Literatur | Querverweis | | Nr. |
|---------------------------------|--|---|---|--------------------|-------------|-----|
| | | | | Kapitel | Abb. / Tab. | |
| Lenkgefühl im engeren Sinn | Lenkübersetzung | zwischen 0 und 40 km/h konstant und Lenkradwinkel von etwa 100° und konstant; ab 40 km/h 1/v-Beziehung | unklar, welche maximale Lenkübersetzung im hohen Geschwindigkeitsbereich noch akzeptabel ist | 2.2.2.2 | - | 27 |
| | | ab ca. 200 km/h keine Abhängigkeit der Lenkübersetzung mehr | genaue Geschwindigkeit unklar | 2.2.2.2 | - | |
| | | bei spektraler Leistungsdichte des Lenkwinkels führen geringere Werte zu besseren Subjektivurteilen | <i>Waldmann (1974a), Mitschke (1984), Kreil und Schweizer (1968)</i> | 2.2.2.1 | - | |
| Lenkungs­dämpfung | ungleich null, nicht negativ und nicht zu hoch; für Steer-By-Wire-Lenkungen zwischen 40 und 70 km/h bei 0,005 Nm*s/° | 0,17 Nm*s/° | variable Änderung mit der Fahrgeschwindigkeit; optimaler Wertebereich unbekannt; Daten aus <i>Buschardt (2003)</i> | 2.2.4 2.5.4.4 | - | 28 |
| | | | <i>Braess (1970)</i> | | | |
| | Lenkungsspiel | kein Lenkungsspiel | zu viel Lenkungsspiel verschlechtert Rückmeldung (<i>Harnett 2002</i>) | 2.3 2.5.4.4 | Tab. 2 | 30 |
| | Lenkungsreibung | ungleich null, nicht negativ und nicht zu hoch | variable Änderung mit der Fahrgeschwindigkeit; optimaler Wertebereich unbekannt. Zu viel Lenksäulenreibung verschlechtert Sicherheitsgefühl und Vorhersagbarkeit des Grenzbereichs. Zahnstangenreibung ähnlicher, aber geringerer negativer Einfluss. | 2.3 2.5.4.4 | Tab. 2 | 29 |
| Lenkgefühl im erweiterten Sinne | Querbeschleunigung | Erfahrungsbereich des Normalfahrers reicht bis ca. 4 m/s ² | <i>Harrer (2006) und Braess und Donges (2006)</i> | 2.5.2.1 2.5.4.2 | Abb. 42 | 33 |
| | | Querbeschleunigung bei niedrigeren und höheren Geschwindigkeiten < 4 m/s ² , sowie bei größeren Längsbeschleunigungen und -verzögerungen < 1,5 m/s ² (Normalfahrer) | <i>Harrer (2006) und Braess und Donges (2006)</i> | 2.5.2.1 2.5.4.2 | Abb. 42 | |
| | | nicht zu früher Abfall des Amplitudengangs der Querbeschleunigung (bis ca. 1 Hz) | - | 2.2.10.2 | Abb. 22 | |
| | | schnellerer und steilerer Anstieg in Kopfnähe durch Wankstabilisierung (Erhöhung der Wanksteifigkeit) | - | 2.5.2.1 | Abb. 45 | |

Tabelle 50: Übersicht der Parameter des Lenkgefühls mit optimalen Wertebereichen (Fortsetzung)

Lenkgefühl im erweiterten Sinne

| Parameter | optimaler Wertebereich bzw. Gegebenheit | Bemerkung, offene Fragen und Literatur | Querverweis | | Nr. | | | |
|--|--|---|--|--|---------|--------------------|---|----|
| | | | Kapitel | Abb. / Tab. | | | | |
| Gieverhalten | Gierverstärkung | bei 80 km/h zwischen 0,14 und 0,4 1/s; zwischen 50 und 150 km/h konstant zwischen 0,4 und 0,44 1/s | | Weir und DiMarco (1978) | 2.2.9.2 | Abb. 19 | 32 | |
| | Gierwinkelgeschwindigkeit bzw. Gierrate | nicht zu große Überhöhung der Gierwinkelgeschwindigkeit | größere Überhöhung bedingt kurze Gierreaktion, erhöht jedoch Unfallrisiko und verunsichert Fahrer | | 2.2.9.1 | - | | |
| | Phasenverzug Gierreaktion Lenkeingabe | 50 ms bis 150 ms | Unterhalb 50 ms? Messort menschlicher Kopf oder Gesäß? Kein schnelleres Ansprechen der Gierreaktion durch Wankstabilisierung | | 2.5.2.1 | Abb. 44 | | |
| Zeitkonstanten Ansprechen Querbewegung und Gieren | Zeitkonstanten in etwa gleich groß und möglichst zwischen 0,05 und 0,10 s | Wenn Querbewegung ggü. Gieren zu stark verzögert, dann mangelndes Gefühl an Fahrstabilität. Wenn Gieren ggü. Querbewegung zu stark verzögert, dann inkompatibles Gefühl über Fahrzeugrichtung. | | | 2.2.11 | Abb. 24 | 31 | |
| Phasenverzug Bedienbefehl und Wahrnehmung (Wank- und Gierreaktion, Querbewegung, Bildverschiebung) | oberhalb 100 ms als verzögert; unterhalb als "sofort"; unterhalb 50 ms als zu "heftig" | Hypothetische und abgeleitete theoretische Werte; unklar, ob untere Grenze überhaupt existent | | | 2.5.2.5 | Abb. 77, 81 und 82 | 36 | |
| Wahrnehmungsschwelle | optische Wahrnehmung | statisch | ca. eine Winkelminute | Sehfähigkeit Visus = 1 oder besser von mehr als 50% der Bevölkerung (Schmidtke und Schober 1967) | 2.5.2.2 | Abb. 52 | 37 | |
| | | dynamisch (Giergeschwindigkeit) | ca. 2°/s (Visus 1) | | 2.5.2.2 | | | |
| | kinästhetische Wahrnehmung | Gierbewegung (Gierbeschleunigung) | 0,034 °/s ² bis 5 °/s ² | sehr große Bandbreite in den Literaturstellen | | 2.5.2.1 | Tab. 8, 9, 10 und Abb. 37, 38, 39, 40, 41, 43 | 38 |
| | | Wankbewegung (Wankbeschleunigung) | maximal 2,5 °/s ² empfohlen | ergibt sich aus Analyse der Verteilung unterschiedlicher Literaturstellen | | - | | |
| | | Wankbewegung (Wankbeschleunigung) | 0,1 m/s ² bis 0,2 m/s ² | unklar welche Bedeutung für Lenkungsbeurteilung | | 2.5.2.1 | | |
| | | Querbewegung | 0,05 m/s ² bis 0,1 m/s ² | je nach Autor unterschiedliche Werte | | 2.5.2.1 | | |
| Querbewegung | 0,10 m/s ² bis 0,18 m/s ² | je nach Autor unterschiedliche Werte | | 2.5.2.1 | 39 | | | |
| akustische Wahrnehmung | frequenzabhängige Wahrnehmungsschwelle | Diagramme mit exakten Werten vorhanden; für Lenkgefühl von geringer Bedeutung, da unzuverlässige Informationsquelle für den Fahrer (z.B. auf Schnee) | | | 2.5.2.3 | - | 40 | |

Tabelle 51: Übersicht der Parameter des Lenkgefühls mit optimalen Wertebereichen (Fortsetzung)

Lenkgefühl im erweiterten Sinn

| Parameter | optimaler Wertebereich bzw. Gegebenheit | Bemerkung, offene Fragen und Literatur | Querverweis | | Nr. | |
|---|--|--|--|-------------|---------------|---------------|
| | | | Kapitel | Abb. / Tab. | | |
| Schwimmwinkel | nicht zu klein | - | 2.2.6 | - | 34 | |
| Schwimmwinkelbeschleunigung | k.A. | unklar, welche Bedeutung für das Lenkgefühl | - | - | | |
| Wankwinkel (Wanken, Rollen) | Wankwinkel nicht positiv (In-die-Kurve-legen) und nicht gleich null (geringer Restwinkel), Grenzbereich durch zunehmendes Wanken angekündigt | Wankwinkel überwiegend als Komfortgröße gesehen | 2.2.8 2.5.2.1 | - | 35 | |
| schnellst mögliche menschl. Reaktionszeit | auf optische Wahrnehmung | ca. 200 ms | 2.5.2.2 | - | 41 | |
| | auf haptische Wahrnehmung | ca. 50 ms | 2.5.2.2 | - | 42 | |
| Zentrum des Auseinanderfließens | Lage Geradeausfahrt | am Horizont in Geradeausrichtung | Lee (1974) | | 2.5.2.2 | Abb. 49 |
| | Kurveneinfahrt | Fahrer versucht Zentrum auf Kurve zu "schieben" | unklar wie Sachverhalt bei engeren und kürzeren Kurven | | 2.5.2.2 | Abb. 49 |
| | bei Sichtverdeckung | wird vom Fahrer offenbar geschätzt | - | | 2.5.2.2 | Abb. 50 |
| | Schätzbarkeit des Zentrum | auf 0,5 bis 1 Grad genau | Warren (1995) | | 2.5.2.2 | Abb. 49 |
| "Zipfel" Grenzlinie dyn. / stat. Wahrnehmungswelt | Untersteuern | wandert nach außen (von Kurvenmitte weg) | - | | 3.1.2.2 | Abb. 131, 132 |
| | Übersteuern | wandert nach innen (zur Kurvenmitte hin) | - | | 3.1.2.2 | Abb. 129, 130 |
| | Normalfahrt | auf Kurve in ca. 2 s Vorausschauentfernung | - | | 3.1.2.2 | Abb. 128 |
| | Veränderung mit Geschwindigkeit | Schnittpunkt mit Kurve nahezu unverändert bei 2 s Vorausschauzeit | - | | 3.1.2.2 | Abb. 128 |
| Einfluss der Sitzhöhe über Grund | geringer Einfluss; bei erhöhter Sitzposition etwas bessere Übersicht | keine Änderung der geometrischen Verhältnisse zwischen statischer und dynamischer Welt | 3.1.2.2 | | Abb. 133 | |
| Schätzbarkeit Abstandsveränderungen zum Vorausfahrenden | Annähern etwas später bemerkt als Abstandsvergrößerungen | - | 2.5.2.2 | | Abb. 53 | |
| Schätzbarkeit anderer Fahrzeuge innerhalb statischer Wahrnehmungswelt | dynamisches Verhalten nicht mehr abschätzbar | z.B. Abschätzung, ob Fahrzeuge stehen oder noch fahren oder ob Fahrzeug auf Landstraße bei leichter Rechtskurve überholen oder hintereinander fahren | 3.1.2.2 | | Abb. 122, 123 | |

Tabelle 52: Übersicht der Parameter des Lenkgefühls mit optimalen Wertebereichen (Fortsetzung)

Die Abbildung 177 zeigt abschließend die Einflussfaktoren und die Einflussgrößen, die das Lenkgefühl des Fahrers bestimmen und beeinflussen. Diese Einflussfaktoren und Einflussgröße sind 13 Oberbegriffen zugeordnet, die selbst wiederum das Lenkgefühl beeinflussen. Die Oberbegriffe sind

- Reaktionszeit Fahrzeug, Ansprechverhalten, Handling,
- Off-Center-Handling,
- On-Center-Handling, Center-Point-Feeling, Geradeauslauf,
- Anthropometrie, Lenkradgeometrie, Position zum Lenkrad,
- Zielgenauigkeit, Aufgabenerfüllung,
- Aufgabenstellung, Aufgabenerfüllung,
- Lenkaufwand, Lenkarbeit,
- Rückmeldung,
- Lenkungsstößigkeit,
- Fahrbahnkontakt,
- Fehlertoleranz,
- Fahrererwartung und
- Fahrerphysiologie.



Abbildung 177: Kategorisierung von Einflussgrößen und Einflussfaktoren, die das Lenkgefühl bestimmen

5.2 Ausblick

In der Vergangenheit wurde mit mehr oder weniger gutem Erfolg versucht, das Lenkgefühl durch regelungstechnische Modelle zu beschreiben oder die verbalen Beschreibungen (subjektive Größen) mit technischen Parametern (objektive Größen) statistisch zu korrelieren. Bei einem korrelativen Ansatz muss beachtet werden, dass eine Korrelation streng genommen nur den statistischen Zusammenhang zwischen zwei oder mehreren untersuchten Items widerspiegelt. In der Regel wird versucht, einen Zusammenhang zwischen den objektiven Fahrwerkskenngrößen und den subjektiven Urteilen zu finden. Das kann für das Auffinden von Zusammenhängen hilfreich sein, liefert aber keine Aussage darüber, in welchem Bereich objektive Größen tatsächlich liegen müssen. Korrelationen liefern damit keine kausalen Zusammenhänge.

Regelungstechnische Modelle sind zur Untersuchung des Lenkgefühls bedingt einsetzbar. Sie benötigen eine ausreichende Abbildung der tatsächlichen Verhältnisse. Auffällig ist, dass bei vielen Fahrermodellen für die Fahrzeugquerführung die Rückführung des Lenkmoments bzw. der Lenkkraft fehlt, es sich aber herausgestellt hat, dass die Lenkkraft eine wesentliche Rückmeldeinformation für den Fahrer ist. Bei den meisten Modellen wird nur der Lenkwinkel zum Fahrer zurückgeführt. Für eine umfassende Untersuchung im Rahmen des Lenkgefühls ist dies nicht ausreichend. Ebenso beziehen sich Modelle zur Reduzierung der Komplexität auf vordefinierte Fahrmanöver (z.B. doppelter Spurwechsel) und sind dadurch auch nur für solche gültig. Es wird sich in der nächsten Zeit noch zeigen, ob es möglich ist umfassende Fahrermodelle für die Fahrzeugquerführung zu generieren.

Es sollten für ein weitergehendes Verständnis des Lenkgefühls und zur Generierung von objektiven Kennzahlen für ein gutes Lenkgefühl weitere Versuche durchgeführt werden. Zwar existieren grundlegende Untersuchungen aus anderen Bereichen, die für das Lenkgefühl wichtige Erkenntnisse liefern, nur ist eine vollständige Übertragbarkeit der Ergebnisse nicht immer gewährleistet. So muss zum Beispiel genauer bestimmt werden, wie eine Verteilung der Wahrnehmungsschwellen für die Bewegungsgrößen im speziellen Fall des Autofahrens aussieht.

Weiterer Untersuchungsbedarf ergibt sich in Hinblick auf die Lenkungsstößigkeit. Hierzu existieren zwar wenige anwendbare Untersuchungen zum Empfinden, nur ist die Beurteilung einer stößigen Lenkung bezüglich der Grenzen noch zu unscharf. Aus dem Bereich der Arbeitswissenschaft können Ergebnisse nicht direkt übertragen werden, da diese sich nur auf Gesundheitsgrenzen für Vibrationen auf 8-stündige und auf die Lebensarbeitszeit bezogene Tätigkeiten beziehen. Eine unter der Gesundheitsgrenze liegende Komfortgrenze kann nicht abgeleitet werden. In diesem Zusammenhang wäre es ebenfalls von Interesse zu erforschen, inwieweit der Fahrer Lenkraddrehschwingungen von Vibrationen unterscheiden kann.

Bei den Drehschwingungen und Vibrationen kann es für die Fahrzeughersteller wichtig sein, herauszufinden, in welchen Bereichen der Fahrer diese noch voneinander unterscheiden kann und in welchen nicht mehr. Dies gilt ebenso, ob der Fahrer jede Form von Stößigkeit, Vibration und Drehschwingung als gleich unkomfortabel ansieht. Existieren solche Werte (z.B. Frequenzwert), dann muss die Lenkung nicht zwangsläufig mit den heute betriebenen Aufwand ruhig gestellt werden, was den eventuelle Zeit- und Kostenaufwand (auch in der Produktion der Lenksysteme) vermindern kann. Die Ergebnisse einer solchen Untersuchung können ebenfalls für die zukünftige Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen, die Informationen bzw. Warnungen über die Lenkung transportieren, hilfreich sein.

Im Zusammenhang mit dem Lenkgefühl ist unklar, welche Rolle das voreilende Lenkmoment hat. Das Verhalten sollte zunächst mit Hilfe eines Reifenprüfstandes näher untersucht werden, da die Existenz des voreilenden Moments umstritten ist. Erst nach eingehender Untersuchung sollte die Bedeutung für das Lenkgefühl geklärt werden. Generell scheint die Rolle des

Lenkmoments in der bisherigen Literatur unterschätzt zu sein. Auch bei Reglermodellen Fahrer-Fahrzeugquerführung, die in den letzten Jahren entwickelt wurden, zeigt sich, dass häufig nur der Lenkwinkel berücksichtigt ist und nur bei wenigen zusätzlich das Lenkmoment. Wichtig wäre es zudem, genauere und speziell auf die Fahraufgabe bezogene Wahrnehmungsschwellen für die kinästhetische Wahrnehmung zu finden. Bisher ist bei der Angabe von Schwellwerten problematisch, dass fast ausschließlich Durchschnittswerte und Wertebereiche angegeben werden. Teilweise beruhen die Ergebnisse auf Versuchskonstellationen, die nicht auf die Fahraufgabe übertragen werden können (z.B. mit verbundenen Augen oder bei liegender Probandenanordnung). Die Ermittlung von in der Ergonomie üblicherweise verwendeten Verteilungen wäre anzustreben.

Nicht eindeutig für das Lenkgefühl ist die Rolle der Schwimmwinkelbeschleunigung. In der zugehörigen Fachliteratur lässt sich nur sehr wenig über ihre Bedeutung ableiten. Vermutlich steht die Schwimmwinkelbeschleunigung in engen Zusammenhang mit dem Gefühl des Fahrbahnkontakts. Seitens der Ergonomie ergeht der Vorschlag die Schwimmwinkelbeschleunigung dem Fahrer haptisch über eine Kraftänderung anzuzeigen und die Auswirkungen auf das Lenkgefühl zu untersuchen. Damit soll auch eine verbesserte Vermittlung des Fahrbahnkontakts erreicht werden.

Bis heute liegt völlig im Unklaren, welche Kräfte der Fahrer an der Lenkung im hochdynamischen Fahrbereich ($> 0,2g$ Querbewegung) aufbringt. Hier sind weniger die Kräfte für die Drehbewegung gemeint, denn diese sind durch das Lenksystem relativ einfach bestimmbar, sondern die Kräfte, die zur Abstützung am Lenkrad aufgebracht werden.

Inwieweit das Lenkgefühl von der Fahrertypwahl abhängig ist, konnte bislang nicht ausreichend beantwortet werden, ebenso wie die Frage, ob bestimmte Fahrertypen bestimmte Merkmalsausprägungen am Lenkgefühl bevorzugen. Es kann sein, dass das Lenkgefühl überhaupt nicht von bestimmten Fahrertypen abhängt.

Einen sehr großen Einfluss auf das Lenkgefühl haben die Reifen, sowohl in Bezug auf ihre Dimension (v.a. Breite und Querschnittshöhe bzw. Verhältnis der Querschnittshöhe zur Reifenbreite) als auch in weiteren Merkmalsausprägungen, wie Gummimischung, Profil und innerer Aufbau (z.B. Run-Flat-Fähigkeiten). Der Reifen hat neben der Auslegung des Lenkstrangs selbst den zweitgrößten Einfluss. Es muss noch untersucht werden, wie stark sich unterschiedliche Reifencharakteristika auf das Lenkgefühl auswirken. Der Fahrzeughersteller sollte dabei beachten, die passenden Reifen für das entsprechende Produkt so auszuwählen, dass das Lenkgefühl nicht zusätzlich negativ beeinträchtigt wird.

Die Auflösung der programmierten Bildverschiebungssoftware (siehe Kapitel 3.3.2) hat derzeit die physikalische Auflösung von TFT-Bildschirmen und damit eine Dimension von 1280 (horizontal) x 1024 (vertikal) Punkte pro Zoll (dots per inch, dpi). Diese Auflösung kann aber im Bereich größere Entfernung vom Fahrzeug zu Problemen in der Darstellung führen. Vermutlich wird für eine ausreichende Darstellung eine ca. 3-fach so hohe Auflösung benötigt, die aber derzeit nur wenige Computerbildschirme oder Beamer anzeigen können. Eine höhere Auflösung würde die Interpretation der Verschiebungslinien in größerer Vorausschauentfernung vom Fahrzeug weg erleichtern.

Aus der heutigen Sicht ist zu erwarten, dass sich zunehmend Fahrzeuge mit echten Steer-By-Wire-Systemen (keine mechanische Verbindung mehr zu den Vorderrädern) etablieren werden. Allerdings dürfte zunächst ein solches Steer-By-Wire-Fahrzeug über ein konventionelles Lenkrad verfügen und möglicherweise nach einiger Zeit zum Stick-Fahrzeug übergehen. Bei einem Stick-Fahrzeug bleibt abzuwarten, wie schwer sich Fahrer tun werden, von einem Fahrzeug mit konventioneller Lenkung auf ein Fahrzeug mit Stick-Bedienelement zu wechseln. Zudem ist nicht klar, welche Konsequenzen das für die individuelle Fahrsicherheit hat.

Unklar ist bislang auch noch, inwieweit hierfür ein neuer Führerschein benötigt wird. Es ist beispielsweise denkbar, dass in einem Zusatzkurs Besitzer eines konventionellen Führerscheins, eine Fahrberechtigung für Stick-Fahrzeuge erwerben können. Allerdings liegen die Vorteile eines Stick-Bedien-Fahrzeugs gegenüber einem Fahrzeug mit konventionellem Lenkrad auf der Hand, wie z.B. dass für die Sitzverstellung ein kleineres Sitzverstellfeld benötigt wird, die Sicht auf die Instrumentenkombination besser ist, die Pedalerie entfällt, der Fahrer leichter Bremsen und Ausweichen kann, u.a..

Da in Zukunft, aufgrund Ressourcenknappheit bei Benzin und Diesel und gegenüber Verbrauchseinsparungen überproportional zunehmenden Kraftstoffkosten, reine Elektroantriebe in Fahrzeugen zu erwarten sind, ergeben sich auch Konsequenzen für das Lenkgefühl. Da beim Einsatz eines reinen Elektroantriebs davon auszugehen ist, dass mindestens zwei Räder über Radnabenmotoren angetrieben werden, ergibt sich eine für das einzelne Rad höhere ungefederte Masse. Diese höhere Masse kann zum Erreichen eines ggü. konventionellen Fahrzeugen unveränderten Federungskomforts u.a. durch längere Federwege erreicht werden.

Ebenso ist es nicht auszuschließen, dass die Räder (evtl. alle Räder) des Fahrzeugs aufgrund einer besseren Einparkbarkeit weiter einschlagen könnten. Sowohl die größeren Lenkwinkel als auch die größeren Federwege bedingen andere Achsen bzw. andere Achskonzepte. Wird eine mechanische Lenkverbindung vorgeschrieben bleiben, sind zusätzlich höhere Lenkkräfte zu erwarten. Damit muss überprüft werden, welche neuen Auswirkungen sich für das Lenkgefühl ergeben.

6 Verzeichnisse

6.1 Glossar

Active Cruise Control (ACC)

Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung des Fahrer bei der Regelung der Längsführung des Fahrzeugs. Regelt in einem gewissen Geschwindigkeitsbereich automatisch den Sicherheitsabstand zum vorausfahrenden Fahrzeug.

Aktives Lenkrad

Begriff der nicht zu verwechseln ist mit der aktiven Lenkung. Beim aktiven Lenkrad werden mittels Servomotoren analog dem aktiven Fahrpedal synthetische Lenkmomente erzeugt.

Aktive Lenkung (Aktivlenkung)

Bezeichnung für eine Fahrzeuglenkung, bei der mit Hilfe eines Überlagerungsgetriebes in der Lenksäule ein automatischer Lenkwinkleingriff möglich ist (Lenkwinkelregelung). Vom Fahrer eingestellte Lenkwinkel lassen sich im Rahmen der Verstellgeschwindigkeit des Überlagerungsgetriebes verstärken oder abmildern. Deshalb wird diese Art der Lenkung auch Additionslenkung bzw. Überlagerungslenkung genannt.

Anthropometrie

Üblicher Fachbegriff in der Ergonomie und streng genommen eine Bezeichnung für die Lehre der Vermessung des Menschen in Bezug auf Körpermaße, Körperkräfte und Bewegungszeiten.

Aufgabenstellung

Begriff der Systemergonomie, der die für eine Tätigkeit als ideal erachtete Aufgabe beschreibt (*Bubb* 1993, S. 306).

Aufgabenerfüllung

Begriff der Systemergonomie, der die reale Verwirklichung der Aufgabenstellung bezogen auf eine Tätigkeit beschreibt (*Bubb* 1993, S. 306).

Aktives Bedienelement

Stick-Bedienelement ähnlich eines Joysticks, das mit Hilfe einer Weg- und Krafterückmeldung Zustandsgrößen eines technischen Systems bzw. einer Maschine dem Menschen auf haptischem Weg anzeigen kann (haptische Informationsrückmeldung) und es ihm ermöglicht danach zu regeln.

Bremsassistent, Bremsassistentensysteme (BAS)

Fahrerassistenzsystem, das eine Notbremssituation durch Messgrößen an Gas- und Bremspedal erkennen kann und daraufhin einen maximalen Bremsdruck im Bremszylinder erzeugt. Die Notwendigkeit dieser Assistenzfunktion liegt in der nachgewiesenen Tatsache begründet, dass viele Autofahrer bei einer Vollbremsung nicht genügend Bremsdruck erzeugen.

Diskomfort

Modellvorstellung in der Ergonomie, die die diskomfortable Auswirkung eines technischen Systems bzw. Gegenstandes im Sinne des „Erleidens“ beschreibt. Ist orthogonal zum Komfort und somit von diesem in der Ausprägung unabhängig.

Einflussfaktoren

Einflüsse, die nicht quantifizierbar sind, aber deren Wirkung nachgewiesen ist oder vermutet wird.

Einflussgrößen

Einflüsse, die im Gegensatz zu den Einflussfaktoren eindeutig quantifizierbar sind.

Einspurmodell

In der Fahrwerktechnik verwendetes Modell, bei dem zur mechanischen und geometrischen Berechnung nur eine Spur mit Vorder- und Hinterrad eines Personenkraftwagen berücksichtigt wird. Wird zunehmend durch den Einsatz neuer Rechnertechnologien und Berechnungsmethoden (Mehrkörpersimulation) und durch realere Modelle abgelöst.

Elektrische Servolenkung (Electrical Power Steering, EPS)

Auch Elektrolenkung genannt. Servolenkung bei dem die Servounterstützung über ein rein elektrisches System erzeugt wird. Bisher nur bei Fahrzeugen mit geringen Zahnstangenkräften einsetzbar, wie z.B. bei Fahrzeugen mit geringem Gewicht und nicht zu großen Raddimensionen (z.B. BMW Z4, VW Golf V, etc.)

Elektronisches-Stabilitäts-Programm (ESP)

Von der Firma Daimler-Chrysler eingeführtes und namentlich geschütztes aktives Sicherheitssystem, das instabile Fahrzustände, wie Über- oder Untersteuern durch Aufbau von Giergegenmomenten, erzeugt durch die Abbremsung einzelner Räder, in einen stabileren Fahrzustand zurückführen kann. Bei vielen Neuwagen in Europa Bestandteil der Serienausstattung und unter unterschiedlichen Namen angeboten.

Fahrbahnkontakt

Gängige aber nicht genau spezifizierte Bezeichnung in der Fahrwerkstechnik und bei der subjektiven Beurteilung des Fahrverhaltens, dass dem Fahrer das Gefühl über die real vorliegenden Kraftschlussverhältnisse zwischen Reifen und Fahrbahn vermittelt.

Fahrerassistenzsystem (FAS)

Elektronisches technisches System, das dem Fahrer die Erfüllung der Fahraufgabe erleichtert und gegebenenfalls regelnd eingreift, sobald menschliche Regelgrenze überschritten werden oder vom System erkannte menschliche Fehler kompensiert werden sollen.

Gieren

Drehbewegung um die Fahrzeughochachse. Davon abgeleitet ergeben sich die Begriffe Gierwinkel, Gier(winkel)geschwindigkeit (Gierate), Gier(winkel)beschleunigung, Gierdämpfung, etc..

Heading Control (HC)

Fahrerassistenzsystem zur Unterstützung des Fahrers bei der Regelung der Querverführung des Fahrzeugs. Auch Spurführungsassistent oder Spurhaltungsassistent genannt.

Information

Alle durch den menschlichen Organismus aufnehmbare Wahrnehmungen, die den momentanen Zustand der Umwelt des Menschen widerspiegeln. Der Informationsgehalt ist umso höher, je geringer die Entropie der Information ist.

Informationsaufnahme

In der Ergonomie gängige Bezeichnung für die menschliche Wahrnehmung sämtlicher Informationen aus der Umwelt mit Hilfe der Sinnesorgane. Analog werden unterschiedliche Informationsaufnahme Kanäle definiert. Erster von drei Schritten im Informationsverarbeitungsprozess.

Informationsverarbeitung

Bezeichnung für die Verarbeitung der aufgenommenen Informationen durch das menschliche Gehirn im psychologischen und weniger im informationstechnischen Sinn. Folgt unmittelbar auf die Informationsaufnahme.

Informationsumsetzung

Eingabe bzw. Stellgröße an einem technischen System (z.B. durch ein Bedienelement) als Reaktion des Menschen auf eine gegebene Situation. Dritte und letzte Stufe des Informationsverarbeitungsprozesses. Erfolgt nach der Entscheidungsfindung der als angemessen angesehenen Handlung in der Informationsverarbeitung des Menschen.

Komfort

Modellvorstellung in der Ergonomie, die die mit einem technischen System bzw. Gegenstandes in Verbindung gebrachte menschliche Vorstellungen im Sinne des „Gefallens“ beschreibt. Der Komfort ist orthogonal zum Diskomfort und somit von diesem in der Ausprägung unabhängig. Allerdings wird kontrovers diskutiert, ob ein sehr hoher Diskomfort zeitgleich einen Komfort zulassen kann.

Lane Departure Warning (LDW)

Bezeichnung für ein Fahrerassistenzsystem, das den Fahrer vor Verlassen des Fahrzeugs von der Fahrbahn oder des Fahrstreifens warnt.

Lenkwinkel

Begriff, der in zweierlei Hinsicht verwendet wird. Einmal ist der Winkel des Lenkeinschlags der Vorderräder gemeint, an anderem Mal ist er gleichbedeutend mit dem Lenkradwinkel. Gemäß DIN 70 000 und SAE-Richtlinie J 670e verändert der Lenkradwinkel den mittleren Lenkwinkel, der sich aus dem Lenkwinkel von innerem und äußerem Rad ergibt (Stoll 1992, S. 25).

linear

Im Zusammenhang mit dem „inneren Modell“ und im Bereich der Ergonomie bedeutet linear, dass sich das Maschinenverhalten gegenüber dem Menschen an der Mensch-Maschine-Schnittstelle nahezu gleich verhält und der Mensch dadurch seine „inneren Modelle“ leichter zur Anwendung bringen kann. Somit ist mit „linear“ nicht zwangsläufig ein rein mathematischer streng linearer Zusammenhang zwischen zwei oder mehreren Größen gemeint.

dynamische Lenkübersetzung

Die dynamische Lenkübersetzung setzt sich aus der kinematischen Lenkübersetzung und einem weiteren Anteil, der sich aus den Elastizitäten am Fahrwerk ergibt zusammen. Die dynamische Lenkübersetzung wird deswegen auch wirksame integrale Lenkübersetzung genannt (Stoll 1992, S. 46).

effektive Lenkübersetzung

Berücksichtigt neben der dynamischen Lenkübersetzung zusätzlich den Lenkraddurchmesser, wobei größere Lenkraddurchmesser die effektive Lenkübersetzung in Richtung „indirekt“ beeinflussen.

kinematische Lenkübersetzung

Die kinematische Lenkübersetzung ergibt sich aus dem Verhältnis Lenkradwinkel zu mittlerem Lenkwinkel.

„inneres Modell“

Begriff für den Erfahrungsumfang eines Menschen, welcher im Gehirn gespeichert ist. In der Psychologie häufig auch als „Programm“ bezeichnet.

neutral

Bezeichnung für den fahrdynamischen Zustand, bei dem der Schräglaufwinkel an der Vorderachse im Einspurmodell gleich dem Schräglaufwinkel der Hinterachse ist (Zomotor 1987, S. 111). Das Fahrzeug hat somit die ideale Gierwinkelgeschwindigkeit, die es zum Durchfahren einer Kurve benötigt.

Nicken

Gängige Bezeichnung für die Dreh- bzw. Kippbewegung um die Fahrzeugquersachse. Davon abgeleitet ergeben sich die Begriffe Nickwinkel, Nick(winkel)geschwindigkeit (Nickrate) und Nick(winkel)beschleunigung.

RAMSIS

Abkürzung für das **R**echnergestützte **A**nthropometrische **M**athematische **S**ystem zur **I**nsassen-Simulation. Von der Fa. Human Solutions (vormals Tecmath) entwickeltes und vertriebenes Softwareprogramm, mit dem vorwiegend anthropometrische Untersuchungen in einer virtuellen CAD-Welt möglich sind. Weit verbreitetes Standardwerkzeug in der Automobilentwicklung.

Rollen

Andere Bezeichnung für die Wankbewegung eines Fahrzeugs.

Rückmeldung

Begriff der Systemergonomie für Informationen, die der Mensch nach seiner Aktion an einem technischen System durch nochmalige Informationsaufnahme bemerkt. Entspricht der Nachführgröße in einem technischen Regelkreis. Haptische, akustische, optische und kinästhetische Rückmeldungen beziehen sich somit auf den entsprechenden Informationsaufnahme kanal des Menschen.

Spurwechselassistent

Fahrerassistenzsystem, das dem Fahrer beim Wechsel der Fahrspur unterstützt. Überwacht den Seitenraum eines Fahrzeugs und dient zur Kollisionsvermeidung durch einen Spurwechsel. Vor allem bei mehrspurigen Autobahnen sinnvoll, aber auch bei Überholvorgängen auf Landstraßen oder beim Abbiegen in der Stadt.

Steer-by-Wire (SbW)

Übertragung des Begriffes „Fly-by-Wire“ auf die Fahrzeugführung. Zu unterscheiden sind ein „echtes“ Steer-by-Wire, bei dem die mechanische Verbindung zwischen Lenkrad (oder einem anderen Bedienelement) und den Vorderrädern völlig unterbrochen ist, und eine Steer-by-Wire-Funktionalität durch eine Lenkmomentenregelung (üblicherweise elektrische Servolenkung) oder Lenkwinkelregelung.

neutral steuernd

siehe „neutral“

technisches System

Allgemeine und umfassende Bezeichnung für eine Maschine jeglicher Art, mit dem der Mensch in Interaktion steht.

Systemergonomie

Disziplin der Ergonomie, die den menschlichen Arbeitsprozess als Informationswandelung im Mensch-Maschine-System mit Hilfe systemtechnischer und kybernetischer Methoden analysiert. Hierunter fallen die Steuerung von technischen Systemen jeglicher Art und die Mensch-Maschine-Interaktion. Ziele der Systemergonomie sind die Erhöhung der Systemleistung und der Systemzuverlässigkeit (Bubb 1993, S. 307).

Übersteuern

Bezeichnung für den fahrdynamischen Zustand, bei dem der Schräglaufwinkel an der Vorderachse im Einspurmodell kleiner ist als der Schräglaufwinkel der Hinterachse (Zomotor 1987, S. 111). Das Fahrzeug hat somit eine größere Gierwinkelgeschwindigkeit als es zum Durchfahren der Kurve benötigt.

Umwelt

Gleichbedeutend mit dem Begriff „Umfeld“. Nicht zu verwechseln mit der Umwelt im ökologischen Sinn. Umwelteinflüsse sind demzufolge Einflussfaktoren und Einflussgrößen, die das Zusammenwirken des Mensch-Maschine-Systems verändern oder eventuell stören.

Untersteuern

Bezeichnung für den fahrdynamischen Zustand, bei dem der Schräglaufwinkel an der Vorderachse im Einspurmodell größer ist als der Schräglaufwinkel der Hinterachse (Zomotor 1987, S. 111). Das Fahrzeug hat somit eine kleinere Gierwinkelgeschwindigkeit als es zum Durchfahren der Kurve benötigt und schiebt über die Vorderräder.

neutrales Verhalten

siehe „neutral“

Wahrnehmungsschwelle

Bei der Wahrnehmungsschwelle ist zwischen einer Absolutwahrnehmungsschwelle und einer Differenzwahrnehmungsschwelle zu unterscheiden. Die Absolutwahrnehmungsschwelle ist dann überschritten, wenn der Mensch zum ersten Mal einen von null ansteigenden Wert bemerkt. Die Differenzwahrnehmungsschwelle ist dann überschritten, wenn der Mensch zum ersten Mal einen Unterschied von einer zuvor verspürten Größe wahrnimmt.

haptische Wahrnehmung

Wahrnehmung von Druckreizen und Körperteilstellungen, sowie von der Muskulatur aufgewendete Kräfte. Hierunter fallen ebenfalls die Schmerzwahrnehmung und die thermische Wahrnehmung, sofern letzteren nicht ein eigener Sinneskanal zugewiesen wurde. Darunter fällt nicht die Wahrnehmung von aufgebrachtten Kräften durch die Muskulatur, sowie Körperteilstellungen. In manchen wissenschaftlichen Disziplinen anders definiert.

kinästhetisch Wahrnehmung

Wahrnehmung der an den Körper eines Menschen angreifenden Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, sowie die Lage des Körpers im Raum (Gravitationsrichtung) durch das Vestibularorgan und die Macularorgane. Häufig als vestibularische Informationsaufnahme bezeichnet.

optische Wahrnehmung

Bezeichnung der Systemergonomie für die Informationsaufnahme durch den visuellen Sinn. Nicht zu verwechseln mit dem Begriff „Optik“ im technisch-physikalischen Sinne. In anderen Bereichen wird der Begriff „visuelle Wahrnehmung“ verwendet und ist der „optischen Wahrnehmung“ gleichbedeutend.

Wanken

Gängige Bezeichnung für die Dreh- bzw. Kippbewegung der Karosserie um die Fahrzeuglängsachse. Davon abgeleitet ergeben sich die Begriffe Wankwinkel, Wank(winkel)geschwindigkeit (Wankrate) und Wank(winkel)beschleunigung. Häufig auch als Rollen bezeichnet.

6.2 Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1: | Überlagerungsgetriebe der Aktivlenkung von BMW (Bild: BMW) | 4 |
| Abbildung 2: | Evolutionäre Weiterentwicklung der Fahrzeuglenkung (in Anlehnung an Fleck 2003) | 5 |
| Abbildung 3: | Prognose des Stückzahlenanteils von Lenksystemen in Westeuropa auf Basis von 2001 (in Anlehnung an Wallentowitz 2002 und Barthenheier 2004) | 7 |
| Abbildung 4: | Vorgehensmethodik bei der Untersuchung des Lenkgefühls | 10 |
| Abbildung 5: | Definition des Lenkgefühls im engeren und erweiterten Sinn | 11 |
| Abbildung 6: | Einflüsse auf das Lenkverhalten vorderachsgelenkter Pkw (nach Braess 2001, S. 18)..... | 12 |
| Abbildung 7: | Fahrwerkstechnische Parameter und deren Verhaltensweisen mit Einfluss auf das Lenkgefühl | 13 |
| Abbildung 8: | Typische Merkmale einer Lenkmoment-Lenkwinkel-Hysterese | 14 |
| Abbildung 9: | Qualitative Darstellung der Anteile am Lenkmoment über dem Lenkradwinkel (nach Deppermann 1989a)..... | 15 |
| Abbildung 10: | Empfohlene optimale Werte für den Verlauf des Lenkmoments über dem Lenkwinkel | 16 |
| Abbildung 11: | Frequenzgänge des Lenkmoments gegenüber dem Lenkwinkel bei verschiedenen Auslegungsvarianten (nach Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 611)..... | 17 |
| Abbildung 12: | Empfohlene Gradienten Lenkradmoment-Querbeschleunigung nach Jaksch (1983), Segel (1965) und Waldmann (1971) (aus Mitschke und Wallentowitz 2004)..... | 19 |
| Abbildung 13: | Empfohlene optimale Werte für den Verlauf der Querbeschleunigung über dem Lenkmoment (quasi-stationär) | 20 |
| Abbildung 14: | Qualitativer Verlauf einer günstigen variablen statischen Lenkübersetzung über dem Lenkradwinkel (nach Heathershaw 2000)..... | 22 |
| Abbildung 15: | Lenkungshysterese (Lenkmoment – Lenkradwinkel) mit empfohlenen Werten nach Sato et al. (1990)..... | 23 |
| Abbildung 16: | Definition des Schwimmwinkels..... | 26 |
| Abbildung 17: | Theoretischer Verlauf des Roll- und Schwimmwinkels, sowie der Querbeschleunigung und der Gierwinkelgeschwindigkeit bei Kurvenfahrt (Nordeen 1965)..... | 27 |
| Abbildung 18: | Frequenzgänge des Schwimmwinkels gegenüber dem Lenkwinkel bei verschiedenen Auslegungsvarianten (nach Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 611)..... | 28 |
| Abbildung 19: | Optimaler Bereich der Gierverstärkung für 80 km/h nach Weir und DiMarco (1978) | 30 |
| Abbildung 20: | Frequenzgänge der Gierwinkelgeschwindigkeit gegenüber dem Lenkwinkel bei verschiedenen Auslegungsvarianten (nach Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 611)..... | 32 |
| Abbildung 21: | Theoretischer Vergleich des Frequenzganges der Gierwinkelgeschwindigkeit gegenüber dem Lenkwinkel zwischen unbeladenem und beladenem Fahrzeug (Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 612)..... | 33 |
| Abbildung 22: | Frequenzgänge der Querbeschleunigung gegenüber dem Lenkwinkel bei verschiedenen Auslegungsvarianten (nach Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 611)..... | 35 |
| Abbildung 23: | Optimales Kennfeld von Lenkradwinkel und Querbeschleunigung zur Vermeidung von negativer Subjektivbewertung (aus Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 572)..... | 36 |
| Abbildung 24: | Einfluss unterschiedlicher Zeitkonstanten der Gierrate und Querbeschleunigung (Fujinami et al. 1995) | 37 |
| Abbildung 25: | Korrelation von Beurteilung und Zeitverzug von Lenkwinkel gegenüber der Gier- und Querbeschleunigung (Kudritzki 1989, S. 55)..... | 42 |
| Abbildung 26: | „Stammbaum“ von regelungstechnischen Fahrermodellen bis 2001 für die Fahrzeugquerführung (basierend auf Jürgensohn 1997) | 44 |
| Abbildung 27: | Fahrerverstärkungsfaktoren für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Vorausschauzeiten (aus Mitschke und Wallentowitz 2004 S. 658, basierend auf Risse 1991) | 45 |
| Abbildung 28: | Informationsverarbeitungsprozess beim Lenken eines Fahrzeugs und zugehörige menschliche Parameter | 50 |
| Abbildung 29: | Diskomfortpyramide zur Wichtung einzelner möglicher Diskomfortwirkungen auf den Menschen | 51 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 30: Diskomfortpyramide mit möglichen Diskomfortwirkungen beim Lenken eines Kraftfahrzeugs..... | 52 |
| Abbildung 31: Informationsverarbeitungsschema des Menschen für den Fahrer eines Kraftfahrzeugs | 53 |
| Abbildung 32: Prinzip der Informationsaufnahme durch den Fahrer bzgl. der Lenkaufgabe | 55 |
| Abbildung 33: Vestibularorgan, Macularorgan und räumlich-funktionale Anbindung an die Gehörschnecke (Bild: http://www.gened.arizona.edu/jallen/psy101lectures/sensation/Vestibular.jpg)..... | 57 |
| Abbildung 34: An der kinästhetische Wahrnehmung beteiligte Organe..... | 57 |
| Abbildung 35: Auf den Gleichgewichtssinn einwirkende resultierende Kraft aus Querbeschleunigung und Erdgravitation..... | 58 |
| Abbildung 36: Reafferenzprinzip nach v. Holst (1957)..... | 58 |
| Abbildung 37: Wahrnehmungszeit in Abhängigkeit der Wankbeschleunigung bei optischer Fixation (Gundry 1978a) | 61 |
| Abbildung 38: Wahrnehmungsschwellen der Giergeschwindigkeit in Abhängigkeit der Frequenz und zweier verschiedener Aufgaben (Kolev et al. 2000) | 62 |
| Abbildung 39: Versuchsergebnisse für die Wahrnehmung einer sinus- und dreiecksförmig ansteigenden Gierbewegung (Muragushi et al. 2006)..... | 62 |
| Abbildung 40: Wahrnehmungsschwellen für die Fahrzeugbewegungsgröße Gieren, Nicken, Rollen, Vertikal- und Querbewegung unterschieden für rein visuelle und haptisch-kinästhetische Information (Muragushi et al. 2006) | 63 |
| Abbildung 41: Zusammenstellung von Untersuchung von Querbeschleunigungs-Wahrnehmungsschwellen (Gundry 1978b)..... | 64 |
| Abbildung 42: Übliche Querbeschleunigungsnutzung in Längs- und Querrichtung für Normalfahrer (Wegscheider und Prokop 2005) | 65 |
| Abbildung 43: Verteilung der Wahrnehmungsschwelle für Gierbeschleunigungen von 53 männlichen Probanden (basierend auf Clark und Stewart 1969)..... | 66 |
| Abbildung 44: Phasenverzug der Giergeschwindigkeit auf die Lenkeingabe (rot) (basierend auf Riedel und Arbinger 1997) | 67 |
| Abbildung 45: Einfluss unterschiedlicher Wankfedersteifigkeit (a) und Wankdämpfung (b) auf den zeitlichen Verlauf der Querbeschleunigung in Kopfnähe (Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 768) | 68 |
| Abbildung 46: Einfluss unterschiedlicher Wankdämpfungen (b) und Wankfedersteifigkeiten (d) auf die Gierwinkelgeschwindigkeit bei einer Lenkwinkelrampe auf 80° (a) (Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 766)..... | 69 |
| Abbildung 47: Bildverschiebungsvektoren nach Gordon (1966) | 70 |
| Abbildung 48: Blick- (A, B) und Gesichtsfeld (C, D) bei strammen und aufrechten Stehen (Lange 1991)..... | 70 |
| Abbildung 49: Zentrum des Auseinanderfließens beim Fahren durch eine Rechtskurve bzw. bei Geradeausfahrt und Kurvenmittelpunkt (basierend auf Lee 1974)..... | 71 |
| Abbildung 50: Zentrum des Auseinanderfließens einer langgezogenen Kurve für den Fall der Sichtverdeckung | 72 |
| Abbildung 51: Hauptblickbereich auf den Scheitelpunkt einer Kurve aus der Sicht des Fahrers (basierend auf Land und Lee 1994) | 73 |
| Abbildung 52: Summenhäufigkeit (Perzentil) der Netto-Sehschärfe (Visus) für das Weitsehen aus 9468 Vpn (Schmidtke und Schober 1967) | 74 |
| Abbildung 53: Schwellwerte für die Wahrnehmung von Relativgeschwindigkeiten aufeinanderfolgender Fahrzeuge (nach Todosiev 1963) | 75 |
| Abbildung 54: Zwei Komponenten des haptischen Sinns (basierend auf Doerrerr 2003) | 77 |
| Abbildung 55: Hautrezeptoren des Menschen und ihre Eigenschaften (in Anlehnung an Doerrerr 2003)..... | 78 |
| Abbildung 56: Rezeptive Felder und Dichte der einzelnen Hautrezeptoren auf der menschlichen Hand (Handwerker 2004) | 79 |
| Abbildung 57: Darstellung der Frequenzabhängigkeit der Vibrationsschwellen (Müller-Limmroth 1993, S. 44) | 80 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 58: Kurve gleicher Wahrnehmung bezogen auf 63 Hz und 1 m/s ² ohne Pause für die Versuchsprobanden bei einem Lenkraddurchmesser von 325 mm (basierend auf Giacomini et al. 2004)..... | 81 |
| Abbildung 59: Schematische Darstellung der Lenkkraftwahrnehmung..... | 82 |
| Abbildung 60: Mittlere absolute Wahrnehmungsschwellen beim taktilen Vibrationsempfinden von periodischen Lenkmomentänderungen (Buschardt 2003, S. 156)..... | 83 |
| Abbildung 61: Differenzwahrnehmungsschwelle (JND) für das Lenkmoment aus den Untersuchungen von Buschardt (2003) und Schumann (1994) und basierend auf der Interpretation von Barthenheier (2004)..... | 84 |
| Abbildung 62: Hypothetisch-qualitative Häufigkeitsverteilung der Differenzwahrnehmungsschwellen des Lenkmoments eines fiktive Probandenkollektivs..... | 85 |
| Abbildung 63: Hypothetische Darstellung der Kraftwahrnehmung am Lenkrad in Abhängigkeit der Krafthöhe und des Auslenkungsweges am Lenkradkranz..... | 86 |
| Abbildung 64: Phasenverzug zwischen Lenkradwinkel und Lenkmoment beim Anlenken und Durchlenken ohne Erreichen des Lenkanschlags (in Anlehnung an Fuchs 1993, Abbildung nicht maßstabsgerecht)..... | 87 |
| Abbildung 65: Grundsätzlicher und qualitativer Verlauf des Lenkmoments über der Querbewegung mit degressivem Vorwarnbereich..... | 88 |
| Abbildung 66: Schematische Darstellung der Lenkwinkelwahrnehmung..... | 89 |
| Abbildung 67: Lenkkraftsuche des Fahrers aufgrund fehlender Regelgrößen bei Geradeausfahrt..... | 91 |
| Abbildung 68: Verlauf der statisch-kinematischen (i_s) und dynamisch-elastokinematischen (i_{dyn}) Lenkübersetzung über dem Lenkwinkel aufgetragen als Funktion des Lenkwinkels und des Lenkmoments (Servounterstützung) (Stoll 1992, S. 47)..... | 92 |
| Abbildung 69: Auswirkung einer Servounterstützung auf die dynamische Lenkübersetzung in Abhängigkeit des Lenkradwinkels (Stoll 1992, S. 48)..... | 93 |
| Abbildung 70: Begriffe Rückmeldung und Fahrbahnkontakt als Elemente der haptischen Nutzinformation..... | 94 |
| Abbildung 71: Auswirkung der Verringerung der maximal möglichen Reibung auf den Reifennachlauf (nach Gough 1962 und Gengenbach 1969)..... | 95 |
| Abbildung 72: Transversaler Spannungsverlauf auf nasser und trockener Straße (nach Bubb 1975)..... | 96 |
| Abbildung 73: Nutzung des Kraftschlusspotenzials von Normalfahrern auf unterschiedlich haftenden Untergründen anhand des Kammschen Kreises (nicht maßstabsgerecht) (Braess und Donges 2006, S.8)..... | 97 |
| Abbildung 74: Einordnung verschiedener Formen von Lenkradschwingungen (basierend auf Elser 2007)..... | 98 |
| Abbildung 75: Hypothetische Darstellung der empfundenen Lenkungsstößigkeit über Frequenz und Beschleunigung einer Lenkradschwingung..... | 99 |
| Abbildung 76: Verlauf der als störend empfundene Vibrationen des Lenkrades über der Frequenz (Giacomini et al. 2004)..... | 99 |
| Abbildung 77: Laufzeitunterschied einzelner Fahrdynamik- und Lenkungsgrößen beim Lenkwinkelsprung basierend auf einer Simulation (Werte qualitativ und gültig für 100 km/h und stationäre Querbewegung von 6 m/s ²)..... | 101 |
| Abbildung 78: Laufzeitunterschiede der Wahrnehmung von Gierwinkel, Gierwinkelgeschwindigkeit und Gierbeschleunigung beim Anlenken (Simulation)..... | 103 |
| Abbildung 79: Laufzeitunterschiede der Wahrnehmung von Gierwinkel, Gierwinkelgeschwindigkeit und Gierbeschleunigung beim Anlenken (Simulation)..... | 104 |
| Abbildung 80: Zeitliches Erleben von Sinneseindrücken beim Anlenken eines Fahrzeugs (bildliche Darstellung basierend Vaas 2005 und Pöppel 2000)..... | 106 |
| Abbildung 81: Ermittelte Bereiche eines „guten Gefühls“ von Zeitverzug und Lenkmomentamplitude für die erste von zwei Versuchspersonen (aus Chai et al. 2004b)..... | 110 |
| Abbildung 82: Ermittelte Bereiche eines „guten Gefühls“ von Zeitverzug und Lenkmomentamplitude für die zweite von zwei Versuchspersonen (aus Chai et al. 2004b)..... | 110 |
| Abbildung 83: Informationsverarbeitungsprinzip von Bubb (2002b)..... | 112 |
| Abbildung 84: Informationsverarbeitungsmodell nach Rasmussen (1987)..... | 113 |
| Abbildung 85: Modellvorstellung über die Entstehung des Lenkgefühls..... | 114 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 86: Regelkreis der menschlichen Aufgabenerfüllung und Definition der Qualität..... | 115 |
| Abbildung 87: Schätzungen und tatsächliche Wahrnehmung bzw. tatsächliche dynamische Werte an der Mensch-Maschine-Schnittstelle für den Fall des Lenkens | 116 |
| Abbildung 88: Regelgrößen des Reglers „Mensch“ an der Regelstrecke „Maschine“ | 117 |
| Abbildung 89: D-Verhalten des Reglers „Mensch“ in Abhängigkeit der Zeit (ohne Reaktion auf haptisches Signal) (Bubb 2004)..... | 117 |
| Abbildung 90: Bodediagramm eines grundsätzlichen Frequenzgangs und Definition der Schnittfrequenz und des Phasenrandes | 118 |
| Abbildung 91: Schnittfrequenzen und Phasenreserven des offenen Querregelkreises in verschiedenen Fahrsituationen (Mitschke und Wallentowitz 2004, S. 659) | 119 |
| Abbildung 92: Antizipationszeit vor einem potenziellen kritischen Zeitpunkt (in Anlehnung Braess und Donges 2006) | 120 |
| Abbildung 93: Geometrie der idealisierten Kurvendurchfahrt eines Pkw ohne Reifenschräglauf | 122 |
| Abbildung 94: Auswirkung zweier unterschiedlicher Darstellungen der Voraussicht mit konventionellem Bedienelement Lenkrad bei Kurveneinfahrt..... | 124 |
| Abbildung 95: Frequenzgang eines geschlossenen Fahrer-Fahrzeug-Regelkreises eines Aktiven Bedienelements im Vergleich zu einem konventionellen Lenkrad (Bubb und Bolte 1990).... | 128 |
| Abbildung 96: Lenkradwinkel über der Fahrzeuglängsgeschwindigkeit, die gerade zu einem wahrnehmbaren Ereignis führen, bezogen auf die Querbeschleunigung bzw. die Gierwinkelgeschwindigkeit (in Anlehnung an Bubb 2004) | 129 |
| Abbildung 97: Notwendige Informationen für den Fahrer bei der Fahraufgabe „Lenken“ | 131 |
| Abbildung 98: Klassifizierung destruktiver Informationen für den Fahrer bei der Fahraufgabe „Lenken“ | 134 |
| Abbildung 99: Prinzip des Längenservomechanismus der menschlichen Muskulatur (in Anlehnung an Bubb 1977a und Frederich und Schmidt 1971)..... | 136 |
| Abbildung 100: Prinzip des Kraftservomechanismus der menschlichen Muskulatur (in Anlehnung an Bubb 1977a und Frederich und Schmidt 1971) | 137 |
| Abbildung 101: Blockschaltbild der Frequenzgänge der einzelnen Komponenten des Hand-Arm-Systems des Mensch als Regler (basierend auf Bubb 1977a)..... | 138 |
| Abbildung 102: Berechnung der minimal möglichen menschlichen Reaktionszeit (basierend auf Bubb 1977a)..... | 139 |
| Abbildung 103: Blockschaltbild des Längen- und Kraftservomechanismus der menschlichen Informationsumsetzung über das Hand-Arm-System an einer Fahrzeuglenkung | 140 |
| Abbildung 104: Lenkwinkel beim Ausweichen vor einem Hindernis mit unterschiedlichem Zeitbudget (nach Uno und Hiramatsu 1999) | 142 |
| Abbildung 105: Vom Fahrer eingestellte Lenkwinkelgeschwindigkeiten, Lenkwinkel-Amplituden und zugehörige Einstellzeiten in Notsituationen basierend auf Zomotor (1976) | 143 |
| Abbildung 106: Maximale Lenkwinkelgeschwindigkeiten und zugehörige maximale Lenkwinkel in Notsituationen (basierend auf Zomotor 1976) und beim Elchtest (basierend auf Breuer 1998) | 144 |
| Abbildung 107: Markante Lenkwinkel-Punkte eines rechtsseitigen Lenkradeinschlages | 145 |
| Abbildung 108: Qualitativer Verlauf der Muskelkraft über der Muskelverkürzungsgeschwindigkeit bei Muskelextension und Muskelkontraktion | 146 |
| Abbildung 109: Mögliche anthropometrische Einflüsse auf das Lenkgefühl..... | 152 |
| Abbildung 110: Verteilung der Hände auf dem Lenkrad getrennt nach linker und rechter Seite aus Versuch mit 18 Vpn (basierend auf Kolling 1998, S. 67) | 153 |
| Abbildung 111: Nachschwingverhalten des Systems Fahrzeug-„passiver Fahrer“ nach Anreißen (Jürgensohn et al. 2002, S.155)..... | 154 |
| Abbildung 112: Verschiedene Lenkwinkelbereiche für Zwei- oder Einhandbedienung und Anlenkbereich für einen Lenkeinschlag nach rechts | 155 |
| Abbildung 113: Wirkungsgefüge zwischen den Urteilen von Presse, Kunden, Experten und den Eigenschaften und Parametern, die die Fahrzeugcharakteristik widerspiegeln..... | 161 |
| Abbildung 114: Frequenzgang (Bode-Diagramm) von Querbeschleunigung gegenüber Lenkwinkel gemessen im Fahrzeugschwerpunkt (Fahrzeug der oberen Mittelklasse) bei 100 km/h und 4 m/s ² Querbeschleunigung | 167 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 115: Vier Frequenzgänge der Querschleunigung im Fahrzeugschwerpunkt gegenüber Helm als Vergleich eines SUV und einer Limousine von vier Fahrern | 168 |
| Abbildung 116: Prinzip der Wahrnehmung von Bildverschiebungsvektoren | 170 |
| Abbildung 117: Verschiebungsvektoren und Verschiebungslinien eines regelmäßigen Gitters bei Längsverschiebung (links) und Rotation (Mitte und rechts) | 170 |
| Abbildung 118: Fahrersicht der Bildverschiebungssoftware für einen maximalen Öffnungswinkel > 200° | 172 |
| Abbildung 119: Unterschied zwischen der Darstellung mit Bildverschiebungslinien (oben) und Bildverschiebungsvektoren (unten) | 173 |
| Abbildung 120: Darstellung zur Erklärung des in der Software einstellbaren Offsets | 174 |
| Abbildung 121: Fahrersicht in Ansicht der Bildverschiebungslinien und zugehörige Draufsicht mit Bereichen der dynamischen Wahrnehmungsschwelle | 176 |
| Abbildung 122: Aufbau und Merkmale der Draufsicht | 177 |
| Abbildung 123: Bereich der statischen und dynamischen Wahrnehmungswelt bezogen auf das Gegenwartserleben (ca. 3s) | 178 |
| Abbildung 124: Relativer Radius von innerem Sollkurs und Kurvenmitte bei einer engen und einer weiten Kurve | 179 |
| Abbildung 125: Abweichung der Bildverschiebung eines im Horizont liegenden Bezugspunktes gegenüber dem vom Fahrer festgelegten „inneren“ Sollkurses | 179 |
| Abbildung 126: Absolute Geradeausfahrt | 180 |
| Abbildung 127: Schräge Geradeausfahrt unter einem Winkel von 5° nach rechts | 181 |
| Abbildung 128: Lage der Grenzlinie zwischen statischer und dynamischer Wahrnehmungswelt in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit bei konstantem Kurvenradius | 182 |
| Abbildung 129: Veränderung der Grenzlinie zwischen statischer und dynamischer Wahrnehmungswelt beim Übersteuern (positiver Offset) des Fahrzeugs in der Draufsicht (mit zugehöriger Querschleunigung) | 183 |
| Abbildung 130: Bildverschiebungslinien in der Fahrersicht für einen positiven Offset von +23° (extremes Übersteuern) | 184 |
| Abbildung 131: Veränderung der Grenzlinie zwischen statischer und dynamischer Wahrnehmungswelt beim Untersteuern (negativer Offset) des Fahrzeugs in der Draufsicht | 184 |
| Abbildung 132: Bildverschiebungslinien in der Fahrersicht für einen positiven Offset von -20° (extremes Untersteuern) | 185 |
| Abbildung 133: Auswirkung der Veränderung der Augpunkthöhe über der Fahrbahn in der Fahrer- und Draufsicht | 186 |
| Abbildung 134: Prinzipielle Darstellung von Objekten unterschiedlicher Höhe über der Fahrbahn zur Klärung der Bildverschiebungsauswirkung dieser Objekte | 187 |
| Abbildung 135: Relative dynamische Sehschärfe in Abhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit (Winkelgeschwindigkeit) eines Objekts (Schierz 2001, S. 23) | 188 |
| Abbildung 136: Prinzipielle Darstellung des Bereichs lokaler Unschärfe und der Grenzlinie der statischen und dynamischen Welt bei mittlerer und hoher Fahrgeschwindigkeit (Grenzlinienverlauf entstammt Softwaresimulation, Bereich lokaler Unschärfe geschätzt) | 189 |
| Abbildung 137: Gemessene Handposition auf einem Lenkrad mit vergleichsweise dünner Lenkradkranzdicke ($\varnothing = 28,6$ mm) | 194 |
| Abbildung 138: Verteilung der Berührfläche zwischen Hand und Lenkrad unterschiedlich großer Hände beim Lenkrad mit kleiner Lenkradkranzdicke ($\varnothing = 28,6$ mm) | 194 |
| Abbildung 139: Gemessene Handposition auf einem Lenkrad mit großer Lenkradkranzdicke ($\varnothing = 33,1$ mm) | 195 |
| Abbildung 140: Verteilung der Berührfläche zwischen Hand und Lenkrad unterschiedlich großer Hände beim Lenkrad mit großer Lenkradkranzdicke ($\varnothing = 33,1$ mm) | 195 |
| Abbildung 141: Typische Handhaltung der linken Hand bei Bedienung von Blinkerhebel mit Zusatzfunktion und Lenkradtasten | 196 |
| Abbildung 142: Versuchsablaufschema des Versuchs Nr. 4 – Realfahrversuch mit vier unterschiedlichen Lenkungscharakteristiken und Fahrzeugen | 198 |
| Abbildung 143: Versuchsstrecke der Transferfahrt ins Zielgebiet (östlich von München) genutzt für die freie verbale Lenkungsbeschreibung durch die Probanden | 199 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 144: Vier verschiedene Versuchsstreckenabschnitte im Versuchszielgebiet (östlich von München) | 200 |
| Abbildung 145: Altersverteilung des Probandenkollektivs zum Versuch Nr. 4 | 201 |
| Abbildung 146: Fahrleistung des Probandenkollektivs mit Geschlechterunterscheidung | 202 |
| Abbildung 147: Fahrerfahrung des Probandenkollektivs mit Geschlechterunterscheidung | 202 |
| Abbildung 148: Mittelwert und Standardabweichung der Rangreihenfolge einzelner Fahrzeuge und der Fragen 1 bis 7 | 205 |
| Abbildung 149: Mittelwert und Standardabweichung der Rangreihenfolge einzelner Fahrzeuge und der Fragen 8 bis 13 | 207 |
| Abbildung 150: Mittelwert und Standardabweichung der Rangreihenfolge einzelner Fahrzeuge und der Fragen 14 bis 19 | 208 |
| Abbildung 151: Hypothetische Darstellung des Lenkaufwands mit Beurteilungsgrenzen | 213 |
| Abbildung 152: Mögliche Zusammenhänge des Lenkgefühl auf Basis von definierten Kriterien und Kundensubjektivurteilen (nur für Fahrzeuge mit Hinterradantrieb gültig) | 218 |
| Abbildung 153: Kriterienwichtung der Probanden nach jedem Fahrzeug für die Kriterien „Parkieren“ und „Geradauslauf“ | 223 |
| Abbildung 154: Kriterienwichtung der Probanden nach jedem Fahrzeug für die Kriterien „Kurvenfahrt“ und „Kontakt Fahrer-Fahrbahn“ | 224 |
| Abbildung 155: Vorgehensweise beim Vergleich von Kunden- und Expertenurteil der untersuchten Fahrzeugen | 226 |
| Abbildung 156: Vergleich von Kundenaussagen zu bestimmten Kundenkriterien und Expertenkriterien (teilneutralisiert) | 228 |
| Abbildung 157: Häufigkeitsverteilung der angegebenen Lenkraddurchmesser aus den Einzeltests von Auto, Motor und Sport (2002, 2003, 2004, 2005 und 2006) | 231 |
| Abbildung 158: Lenkungsbeurteilung verschiedener Fahrzeugmodelle durch Auto, Motor und Sport (2002, 2003, 2004, 2005 und 2006) unter Berücksichtigung von Lenkraddurchmesser und Lenkübersetzung | 233 |
| Abbildung 159: Handlingsbeurteilung verschiedener Fahrzeugmodelle durch Auto, Motor und Sport (2002, 2003, 2004, 2005 und 2006) unter Berücksichtigung von Lenkraddurchmesser und Lenkübersetzung | 234 |
| Abbildung 160: Handlingsbeurteilung verschiedener Fahrzeugmodelle durch Auto, Motor und Sport (2002, 2003, 2004, 2005 und 2006) unter Berücksichtigung des Lenkweges für ein Grad Lenkwinkel und des durchfahrenen Kurvenradius bei 50 mm Lenkweg | 236 |
| Abbildung 161: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus | 238 |
| Abbildung 162: Sitzgestell mit Lenksäule eines Serienfahrzeugs | 238 |
| Abbildung 163: Sitzgestell mit Lenksäule eines Serienfahrzeugs und Ablesedisplay, sowie Lenkrad mit Markierungen für die drei verschiedenen Auflagehöhen | 239 |
| Abbildung 164: Drehwinkelsensor (optisch) und Drehmomentsensor (links im Bild) zur Messung von Lenkmoment und Lenkwinkel | 239 |
| Abbildung 165: Antriebsmotor (von unten angeflanscht) und zwei zusätzliche Getriebe, die eine sehr hohen Untersetzung der Motordrehzahl zum Lenkrad ermöglichen | 240 |
| Abbildung 166: Fußablage mit Fußtaster zur Signalisierung einer Wahrnehmung (Signalisierung erfolgt durch Abheben des Fußes) | 241 |
| Abbildung 167: Markierungen für drei unterschiedliche Handhaltungshöhen (oben, Mitte, unten) am Lenkrad bei denen die Wahrnehmungsschwellen gemessen werden (die Markierung bezieht sich auf die Handunterkante) | 242 |
| Abbildung 168: Probandenkollektiv nach Kilometerleistung im Jahr, Geschlecht (Sterne = weiblich, Rauten = männlich) und Alter (gestrichelte Linie entspricht Median) | 243 |
| Abbildung 169: Prozentuale Verteilung der Berufsbildung nach technischen und nicht-technischen Berufen und der Leser von Autozeitschriften im Probandenkollektiv | 243 |
| Abbildung 170: Prinzip einer fühlbare Lenkungsmittellage ohne Lenkradmomenttotzone | 256 |
| Abbildung 171: Kompensation der Kursabweichung eines Pkw bei Kurvendurchfahrt | 257 |
| Abbildung 172: Fahrstreifenwechsel eines Pkw mit hoher Geschwindigkeit (nach Sato et al. 1990) | 258 |
| Abbildung 173: Abbiegevorgang eines Pkw (nach Sato et al. 1990) | 259 |

Abbildung 174: Zusammenhang zwischen fahrwerkstechnischen und ergonomischen Parametern bezüglich des Lenkgefühls im „engeren“ Sinne.....266

Abbildung 175: Zusammenhang zwischen fahrwerkstechnischen und ergonomischen Parametern bezüglich des Lenkgefühls im „erweiterten“ Sinne267

Abbildung 176: Schematische und gesamthafte Darstellung des Lenkgefühls als Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis269

Abbildung 177: Kategorisierung von Einflussgrößen und Einflussfaktoren, die das Lenkgefühl bestimmen278

6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht (Auswahl) von Korrelationsuntersuchungen von 1965 bis 2007 zwischen objektiven Größen und subjektiver Beurteilung des Fahrverhaltens (basierend auf Huang 2004, S. 102).....39

Tabelle 2: Verstellauswirkung bestimmter Lenkungsparameter auf das Subjektivurteil des Fahrers (basierend auf Harnett 2002).....41

Tabelle 3: Chronologische Übersicht von Modellen für die Fahrzeugquerführung47

Tabelle 4: Chronologische Übersicht von Modellen für die Fahrzeugquerführung (Fortsetzung).....48

Tabelle 5: Chronologische Übersicht von Modellen für die Fahrzeugquerführung (Fortsetzung).....49

Tabelle 6: Informationsaufnahme einzelner Parameter beim Fahren (nach Eckstein 2001, S. 16)54

Tabelle 7: Zuordnung von Fahrinformationen und Sinneskanälen des Menschen (nach Schweigert 2003)55

Tabelle 8: Ermittelte Wahrnehmungsschwellwerte der Gierbeschleunigung (nach Guedry 1974).....60

Tabelle 9: Kinästhetische Wahrnehmungsschwellen nach Heißing et al. (2000, S. 13).....64

Tabelle 10: Wahrnehmungsschwellen für Linearbewegungen nach Benson et al. (1986).....65

Tabelle 11: Zahlencode der gegenübergestellten Fahrzeuggrößen für das Betrachten ihres zeitlichen Verhaltens für die nachfolgende Tabelle108

Tabelle 12: Zeitliche Betrachtung zweier gegenübergestellter Fahrzeuggrößen als Informationsträger an den Fahrer und ihre Änderung mit der Fahrgeschwindigkeit.....109

Tabelle 13: Drei-Ebenen-Modell der Fahraufgabe in Anlehnung an Bernotat (1970) und Heißing et al. (2000, S. 17-19)120

Tabelle 14: Zuordnung von Aufgabenebenen und dem Verarbeitungsniveau (nach Schweigert 2003 und in Anlehnung an Hale et al. 1990).....121

Tabelle 15: Basisregelstrategien für lineares Fahrzeugverhalten nach Ackermann basierend auf Fiala (1966) und Bubb (1993).....123

Tabelle 16: Verschiedene Aufgabestellungen bei der Querführung eines Fahrzeugs und zugehöriger Typ und zugehörige Ordnung der Regelstrecke (nach Eckstein 2001).....125

Tabelle 17: Vergleich der relevanten Regelstrecken der Fahrzeugquerführung unter verschiedenen Kriterien126

Tabelle 18: Notwendige Informationen für die Erfüllung der Fahr- und Lenkaufgabe.....133

Tabelle 19: Lenkungsparameter gängiger Personenkraftwagen (Auswahl) in Europa (basierend auf Auto, Motor und Sport 2002, 2003 und 2004).....158

Tabelle 20: Versuche im Rahmen der Erforschung des Lenkgefühls.....163

Tabelle 21: Versuche im Rahmen der Erforschung des Lenkgefühls (Fortsetzung)164

Tabelle 22: Versuche im Rahmen der Erforschung des Lenkgefühls (Fortsetzung)165

Tabelle 23: Einstellbare Parameter der Bildverschiebungssoftware175

Tabelle 24: Änderung im Bildverschiebungsvektorenfeld in Abhängigkeit unterschiedlicher Fahrzeugparameter.....189

Tabelle 25: Änderung im Bildverschiebungsvektorenfeld von bestimmten Fahrsituationen gegenüber einer Normalfahrt.....191

Tabelle 26: Hypothesen aus der Untersuchung der Bildverschiebung bei Kurvenfahrt mit einem Kraftfahrzeug192

Tabelle 27: Bildinformationsgrößen und ihr Informationsgehalt bezogen auf die Bewegung des Fahrzeugs und die Regeltätigkeit des Fahrers.....193

| | | |
|-------------|--|-----|
| Tabelle 28: | Witterungsverhältnisse an den sechs Versuchstagen | 200 |
| Tabelle 29: | Versuchsteile mit zugehöriger Auswertung und Tests zur statistischen Absicherung..... | 203 |
| Tabelle 30: | Übersicht der Ergebnisse zur Erwartungshaltung an die Fahrzeuglenkung anhand vorgelegter Abbildung der entsprechenden Fahrzeuge | 210 |
| Tabelle 31: | Fragen zu den einzelnen Kundenkriterien, die während des Fahrversuch an die Probanden gestellt wurden | 212 |
| Tabelle 32: | Ausgewählte Beurteilungskriterien für die Lenkung und die damit zusammenhängenden Fahrzeugparameter nach Heißing und Brandl (2002) | 215 |
| Tabelle 33: | Ausgewählte Beurteilungskriterien für die Lenkung und die damit zusammenhängenden Fahrzeugparameter nach Heißing und Brandl (2002) (Fortsetzung) | 216 |
| Tabelle 34: | Verwendetes Vokabular bei der verbalen Beschreibung der Lenkung und Vergleich mit in der Presse üblichen Sprachgebrauch | 220 |
| Tabelle 35: | Übersicht der mit den Beurteilungskriterien „Fahrzeughandling“ und „Fahrzeuglenkung“ betrachteten und kombinierten Parameter | 230 |
| Tabelle 36: | Versuchsvarianten des Versuchs zur Bestimmung der Verteilung der Wahrnehmungsschwelle der Lenkkraft..... | 240 |
| Tabelle 37: | Ergebnis der Absolutwahrnehmungsschwellen am Lenkrad für die Winkel 0°, 5° und 10° | 244 |
| Tabelle 38: | Ergebnis der Differenzwahrnehmungsschwellen bei 35° Lenkwinkel und zwei Ausgangsmomenten von 2 Nm und 4 Nm, sowie jeweils für eine Momentenerhöhung und eine Momentenverminderung..... | 245 |
| Tabelle 39: | Datentabelle für die Lenkungsauslegung bezogen auf die geometrischen und anthropometrischen Verhältnisse | 248 |
| Tabelle 40: | Datentabelle für die Lenkungsauslegung in bestimmten Fahrsituationen | 249 |
| Tabelle 41: | Datentabelle für die Lenkungsauslegung in bestimmten Fahrsituationen (Fortsetzung) | 250 |
| Tabelle 42: | Datentabelle für die Lenkungsauslegung in bestimmten Fahrsituationen (Fortsetzung) | 251 |
| Tabelle 43: | Datentabelle für die Lenkungsauslegung in bestimmten Fahrsituationen (Fortsetzung) | 252 |
| Tabelle 44: | Datentabelle für die Lenkungsauslegung in bestimmten Fahrsituationen (Fortsetzung) | 254 |
| Tabelle 45: | Datentabelle für die Lenkungsauslegung in bestimmten Fahrsituationen (Fortsetzung) | 254 |
| Tabelle 46: | Übersicht der Parameter des Lenkgefühls mit optimalen Wertebereichen | 270 |
| Tabelle 47: | Übersicht der Parameter des Lenkgefühls mit optimalen Wertebereichen (Fortsetzung)..... | 271 |
| Tabelle 48: | Übersicht der Parameter des Lenkgefühls mit optimalen Wertebereichen (Fortsetzung)..... | 272 |
| Tabelle 49: | Übersicht der Parameter des Lenkgefühls mit optimalen Wertebereichen (Fortsetzung)..... | 273 |
| Tabelle 50: | Übersicht der Parameter des Lenkgefühls mit optimalen Wertebereichen (Fortsetzung)..... | 274 |
| Tabelle 51: | Übersicht der Parameter des Lenkgefühls mit optimalen Wertebereichen (Fortsetzung)..... | 275 |
| Tabelle 52: | Übersicht der Parameter des Lenkgefühls mit optimalen Wertebereichen (Fortsetzung)..... | 276 |

6.4 Literaturverzeichnis

- Ackermann 1996* **Ackermann, J.:** *Driving Safety by Robust Steering Control*. AVEC 96, Proc., p. 377-394, 1996.
- Adams 1981* **Adams, F.J.:** *Automotive Power Steering Feel*. Proc. Inst. Mech. Engrs., Automobile Division, Vol. 195, p. 29-36, 1981.
- Adams 1983* **Adams, F.J.:** *Power Steering ,Road Feel'*. SAE Paper 830998, 1983.
- Akita et al. 2000* **Akita, T. et al.:** *Development of the Active Front Steering Control System*. FISITA Kongress 2000, Seoul, Paper 2000 G 341.
- Alexandridis et al. 1979* **Alexandridis, A. A.; Repa, B. S.; Wierwille, W. W.:** *The Influence of Vehicle Aerodynamic and Control Response Characteristics on Driver-Vehicle Performance*. SAE Paper 790385, 1979.
- Allen 1982* **Allen, W.:** *Stability and Performance Analysis of Automobile Driver Steering Control*. SAE Paper 820303, 1982.
- Allen et al. 1987* **Allen, R. W.; Rosenthal, T. J.; Szostak, H. L.:** *Steady State and Transient Analysis of Ground Vehicle Handling*. SAE Paper 870495, 1987.
- Allen et al. 2002* **Allen, R. W.; Chrstos, J. P.; Aponso, B. L.; Dongchan, L.:** *Driver / Vehicle Modeling and Simulation*. SAE Paper 2002-01-1568, 2002.
- Amberkar et al. 2004* **Amberkar, S.; Bolourchi, F.; Demerly, J.; Millsap, S.:** *A Control System Methodology for Steer by Wire Systems*. SAE Paper 2004-01-1106, 2004.
- Andonian et al. 2003* **Andonian, B.; Rauch, W.; Bhise, V.:** *Driver Steering Performance Using Joysticks vs. Steering Wheel Controls*. SAE Paper 2003-01-0118, 2003.
- Angermeir 1973* **Angermeir, A.:** *Mensch, Maschine, Modell*. Diplomarbeit, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeuge, TU München, 1973.
- Apel 1997* **Apel, A.:** *Modellierung des Fahrerhaltens bei der Längs- und Querführung von Pkw*. Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, 1997.
- Apel und Mitschke 1997* **Apel, A.; Mitschke, M.:** *Adjusting Vehicle Characteristics by Means of Driver Models*. International Journal of Vehicle Design, Vol. 18, No. 6, 1997.
- Arkenbosch et al. 1992* **Arkenbosch, M.; Mom, G.; Nieuwland, J.:** *Das Auto und sein Fahrwerk*. Band 1. Stuttgart: Motorbuch Verlag, 1992.
- Ashley und Gibson 1980* **Ashley, C.; Gibson, P.D.:** *A Summary Report on Steering Pad and Steer Frequency Response Test Carried out on 24 Cars*. FISITA Papers No. 80.2.5.7, XVII. International Congress, 1980.
- Aurell et al. 2000* **Aurell, J.; Fröjd, N.; Nordmark, S.:** *Correlation between Objective Handling Characteristics and Subjective Perception of Handling Quality of Heavy Vehicle*. Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC '00, p. 105-113, Ann Arbor, 2000.
- Auto, Motor und Sport 2002* Zeitschrift Auto, Motor und Sport. Jahrgang 2002.
- Auto, Motor und Sport 2003* Zeitschrift Auto, Motor und Sport. Jahrgang 2003.
- Auto, Motor und Sport 2004* Zeitschrift Auto, Motor und Sport. Jahrgang 2004.
- Auto, Motor und Sport 2005* Zeitschrift Auto, Motor und Sport. Jahrgang 2005.
- Auto, Motor und Sport 2006* Zeitschrift Auto, Motor und Sport. Jahrgang 2006.
- Bantle und Braess 1977* **Bantle, M.; Braess, H.-H.:** *Fahrwerksauslegung und Fahrverhalten des Porsche 928*. ATZ, 1977.

- Bäumler 1992* **Bäumler, M.:** *Einfluss der Fußbraumeinengung auf die Pedalanordnung.* Diplomarbeit, KU Eichstätt, 1992.
- Barthel 2004* **Barthel, R.:** *Ergonomische Betrachtung von Lenkassistentenfunktionen zur Fahrerunterstützung in kritischen Fahrsituationen.* Stuttgart: Ergonomia, 2004.
- Barthenheier 2004* **Barthenheier, T.:** *Potenzial einer fahrertyp- und situationsabhängigen Lenkradmomentengestaltung.* Fortschritts-Berichte VDI Nr. 584, Reihe 12. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2004.
- Barthenheier und Winner 2003* **Barthenheier, T.; Winner, H.:** *Das persönliche Lenkgefühl.* Tagung "Fahrwerk.tech 2003", Garching b. München, 11.-12. März, 2003.
- Baxter und Harrison 1979* **Baxter, J.; Harrison, J. Y.:** *A Nonlinear Model Describing Driver Behavior on Straight Roads.* Human Factors, Vol. 21, No. 1, 1979.
- Becker et al. 2002* **Becker, W.; Nasios, G.; Raab, S.; Reinhart, J.:** *Fusion of Vestibular and Podokinesthetic Information During self-turning towards instructed targets.* Exp Brain Res 144, 2002.
- Beiker und Mitschke 2001* **Beiker, S.; Mitschke, M.:** *Verbesserungsmöglichkeiten des Fahrverhaltens von Pkw durch zusammenwirkende Regelsysteme.* ATZ 2001. S. 38-43.
- Bellmann et al. 2002* **Bellmann, M. A.; Baumann, I.; Hildebrand, P.; Mellert, V.; Weber, R.:** *Wirkung von Sitz und Lenkradvibrationen auf den Komfort von Kraftfahrzeugen.* In: **Becker, K.** (Hrsg.): *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II – Korrelation zwischen objektiver Messung und subjektiver Beurteilung von Versuchsfahrzeugen und –komponenten.* Haus der Technik Fachbuch Band 12. Renningen: Expert Verlag, 2002.
- Benson et al. 1986* **Benson, A.J.; Spencer, M. B.; Stott, J. R. R.:** *Thresholds for the Detection of the Direction Whole-Body, Linear Movement in the Horizontal Plane.* Aviation, Space and Environmental Medicine, Vol. 57, 1986.
- Bergman 1969* **Bergman, W.:** *Considerations in Determining Vehicle Handling Requirements.* SAE Paper 690234, 1969.
- Bergman 1973* **Bergman, W.:** *Measurement and Subjective Evaluation of Vehicle Handling.* SAE Paper 730492, 1973.
- Bergman 1976* **Bergman, W.:** *Relationship of Certain Vehicle Handling Parameters to subjective Ratings of „Ease of Vehicle Control“.* FISITA, Band 6, 1976.
- Bergmann 1971* **Bergmann, W.:** *Der Einfluss von Elastizitäten auf die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen.* Automobil-Industrie, 2/71, 1971.
- Bernotat 1970* **Bernotat, R.:** *Anthropotechnik in der Fahrzeugführung.* Ergonomics, Vol. 13, No. 3, 1970.
- Bielaczek 1998* **Bielaczek, C.:** *Untersuchung zur Auswirkung einer aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahrsicherheit beim Pkw-Fahren im realen Straßenverkehr.* Fortschritts-Bericht VDI, Reihe 12, Nr. 35. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998.
- Biggs und Srinivasan 2002* **Biggs, J.; Srinivasan, M. A.:** *Haptic Interfaces.* Handbook of Virtual Environments; K. Stanney. London: Lawrence Earlbaum Inc., Chapter 5, pp. 93-116, 2002.
- Bisimis et al. 1977* **Bisimis, E.; Beckmann, H.-D.; Rönitz, R.; Zomotor, A.:** *Lenkwinkelsprung und Übergangsverhalten von Kraftfahrzeugen.* Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), 1977.
- Blaauw et al. 1984* **Blaauw, G. J.; Godthelp, H.; Milgram, P.:** *Optimal Control Model Application and Field Measurements with Respect to Car Driving.* Vehicle Dynamics, No. 13, 1984.

- Blume und Boelcke 1990* **Blume, H.-J.; Boelcke, R.:** *Mechanokutante Sprachvermittlung.* Fortschritts-Berichte VDI Nr. 137, Reihe 10 „Informatik / Kommunikationstechnik“. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990.
- Bösch 1991* **Bösch, P.:** *Der Fahrer als Regler.* Dissertation, TU Wien, 1991.
- Bolte 1991a* **Bolte, U.:** *Das Aktive Stellteil – ein ergonomisches Bedienkonzept.* Dissertation, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, 1991.
- Bolte 1991b* **Bolte, U.:** *Das Aktive Stellteil - ein ergonomisches Bedienkonzept.* Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 17 "Biotechnik". Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991.
- Bolte und Bubb 1990* **Bolte, U.; Bubb, H.:** *Regelungstechnische Simulation der Schnittstelle Mensch-Maschine.* Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 44, 1990.
- Bortz 1993* **Bortz, J.:** *Statistik für Sozialwissenschaftler.* 4. Auflage. Berlin: Springer, 1993.
- Bosch 1999* **N.N.:** *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch.* 23. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1999.
- Bränneby et al. 1991* **Bränneby, P. et al.:** *Improved Active and Passive Safety by Using Active Lateral Dynamic Control and an Unconventional Steering Unit.* 13th International Technical Conference on Experimental Safety Vehicles, Proc., Band 1, Paris, 4.-7. November, 1991.
- Braess 1968* **Braess, H.-H.:** *Beurteilung des Fahrverhaltens von Automobilen und deren Reaktionen auf Lenkeinschläge.* Automobil Revue, 53, 12.12.1968.
- Braess 1970a* **Braess, H.-H.:** *Theoretische Untersuchung des Lenkverhaltens von Kraftfahrzeugen.* International Automobile Safety Conference, XIIIth FISITA Congress, 1970, Brüssel, Paper 17.1.B.
- Braess 1970b* **Braess, H.-H.:** *Untersuchung des Seitenwindverhaltens des Systems Fahrzeug - Fahrer.* Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrssicherheit, H. 206, 1970.
- Braess 1976* **Braess, H.-H.:** *Anpassung des Fahrverhaltens von Kraftfahrzeugen an die Eigenschaften des Reglers „Mensch“.* Verkehrssicherheit durch Technik und Medizin, Köln, 1976.
- Braess 2001* **Braess, H.-H.:** *Lenkung und Lenkverhalten von Personenkraftwagen – Was haben die letzten 50 Jahre gebracht, was kann und muss noch getan werden?* VDI-Bericht Nr. 1632. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 13-55, 2001.
- Braess 2003a* **Braess, H.-H.:** *Persönliche Mitteilung.* 2003.
- Braess 2003b* **Braess, H.-H.:** *Persönliche Mitteilung,* 2003.
- Braess 2006* **Braess, H.-H.:** *Persönliche Mitteilung,* 2006.
- Braess und Donges 2006* **Braess, H.-H.; Donges, E.:** *Technologien zur aktiven Sicherheit von Personenkraftwagen – „Konsumierbare“ oder echte Verbesserungen?.* Tagung “Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz”, Garching b. München, 4.-5. April, 2006.
- Braess und Seiffert 2007* **Braess, H.-H.; Seiffert, U. (Hrsg.):** *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik.* 5. Auflage. Braunschweig: Vieweg, 2007.
- Breuer 1998* **Breuer, J. J.:** *Analysis of Driver-Vehicle-Interaction in an evasive Manoeuvr-Results of “Moose Test” Studies.* ESV-Konferenz 1998, Paper 98-S2-W-35, 1998.
- Bubb 1975* **Bubb, H.:** *Untersuchung über Anzeige des Bremsweges im Kraftfahrzeug.* Dissertation, TU München, 1975.
- Bubb 1977a* **Bubb, H.:** *Ergonomie des Mensch-Maschine-Systems.* Habilitationsschrift, TU München, 1977.
- Bubb 1977b* **Bubb, H.:** *Analyse der Geschwindigkeitswahrnehmung im Kraftfahrzeug.* Zeitschrift für Arbeitswissenschaft, 31, 1977.

- Bubb 1985* **Bubb, H.:** *Arbeitsplatz Fahrer - eine ergonomische Studie.* Automobilindustrie, 30, S. 265-275, 1985.
- Bubb 1992* **Bubb, H. (Hrsg.):** *Menschliche Zuverlässigkeit. Definition, Zusammenhänge, Bewertung.* Landsberg: Ecomed, 1992.
- Bubb 1993* **Bubb, H.:** *Systemergonomie. Teil 5.* In: **Schmidtke, H.** (Hrsg.): *Ergonomie.* 3. Auflage. München: Hanser Verlag, 1993.
- Bubb 2002a* **Bubb, H.:** *Produktergonomie.* Skriptum zur Vorlesung Produktergonomie, Sommersemester 2002, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, 2002.
- Bubb 2002b* **Bubb, H.:** *Umsetzung psychologischer Forschungsergebnisse in die ergonomische Gestaltung von Fahrerassistenzsystemen.* Z. f. Verkehrssicherheit 48, Nr. 1, 2002.
- Bubb 2003a* **Bubb, H.:** *Fahrerassistenz – primär ein Beitrag zur aktiven Sicherheit oder eher zum Komfort?* VDI-Berichte Nr. 1768. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003.
- Bubb 2003b* **Bubb, H.:** *Komfort und Diskomfort – Definition und Überblick.* Z. Ergonomie Aktuell, Ausgabe 4, 2003.
- Bubb 2004* **Bubb, H.:** *Unveröffentlichte Unterlage.* 2004.
- Bubb und Bolte 1987* **Bubb, H.; Bolte, U.:** *Einfluss der fahrdynamischen Kräfte auf die haptische Rückmeldung bei konventionellen Bedienelementen und bei Aktiven Bedienelementen.* Mitteilung Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, 1987.
- Bubb und Schmidtke 1999* **Bubb, H.; Schmidtke, H.:** *Physiologische und psychologische Grenzen menschlichen Leistungsvermögen.* Kapitel 52. In: **Masing, W.** (Hrsg.): *Handbuch Qualitätsmanagement.* 4. Auflage. München: Hanser, 1999.
- Bünte 1998* **Bünte, T.:** *Beiträge zur robusten Lenkregelung von Pkw.* Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 366. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998.
- Burdea 1996* **Burdea, G.:** *Force and Touch Feedback for Virtual Reality.* New York: John Wiley & Sons, 1996.
- Buschardt 2003* **Buschardt, B.:** *Synthetische Lenkmomente.* Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 22, Nr. 12. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003.
- Buström und Lundström 1994* **Buström, L.; Lündstrom, R.:** *Absorption of Vibration Energy in the Hand and Arm.* Ergonomics, Vol. 37, No. 5, 1994.
- Carson et al. 1978* **Carson, J. M.; Wierwille, W. W.; Eastman, C.:** *Development of a Strategy Model of the Driver in Lane Keeping.* Vehicle System Dynamics, Vol. 7, No. 4, 1978.
- Chai et al. 2004a* **Chai, Y. W.; Saitou, Y.; Kano, Y.; Abe, M.:** *A Study on Effects of Derivative Parameters in a SbW System for Active Interface Vehicle on Driver-Vehicle System Performance.* Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC '04, Arnhem, Niederlande, 23.-27. August, 2004.
- Chai et al. 2004b* **Chai, Y. W.; Saitou, Y.; Sakakibara, Y.; Kano, Y.; Abe, M.:** *A Study of Effect os Steering Gain and Steering Torque on Driver's Feeling for SBW Vehicle.* XVIII. International Congress FISITA, Barcelona, 23. – 27. Mai, 2004.
- Clark und Stewart 1969* **Clark, B.; Stewart, J. D.:** *Effects of Angular Acceleration on Man: Thresholds for the Perception of Rotation and the Oculogyral Illusion.* Aviation, Space and Environmental Medicine, Vol. 40, 1969.
- Clark et al. 1980* **Clark, B.; Stewart, J. D.; Phillips, N. H.:** *Thresholds for detection of constant rotary acceleration during vibratory rotary acceleration.* Aviation, Space and Environmental Medicine, Vol. 57, 1986.

- Crossman et al. 1968* **Crossman, E. R. F. W.; Szostak, H.:** *Man-Machine Models for Car Steering*. 4th NASA-University Conference on Manual Control, NASA SP-192, 1968.
- Dell'Amico et al. 2007* **Dell'Amico, M.; Marzani, S.; Minin, L. et al.:** *Design of an Adaptive Based Steering Wheel*. In: **Dainoff, M. J.** (Ed.): *Ergonomics and Health Aspects*. HCII 2007, LNCS 4566. Berlin: Springer, 2007.
- Deppermann 1989a* **Deppermann, K.-H.:** *Fahrversuche und Berechnungen zum Geradeauslauf von Personenkraftwagen*. VDI-Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 133. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989.
- Deppermann 1989b* **Deppermann, K.-H.:** *Geradeauslauf von Pkw*. Automobil-Industrie Nr. 3/89, 1989.
- Dettki 1997* **Dettki F.:** *Methoden zur Bewertung des Geradeauslaufs von Pkw*. VDI-Berichte Nr. 1133. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997.
- Dibbern 1992* **Dibbern, K.:** *Ermittlung eines Kennwertes für den ISO-Spurwechsel in Versuch und Simulation*. VDI-Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 164. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992.
- Doerrrer 2003* **Doerrrer, C.:** *Entwurf eines elektromechanischen Systems für flexibel konfigurierbare Eingabefelder mit haptischer Rückmeldung*. Dissertation, TU Darmstadt, 2003.
- Döhring 1961* **Döhring, E.:** *Über Wirkungsgrad und Elastizität von Automobilgetrieben*. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), S. 75-77, 1961.
- Dominke und Ruck 1999* **Dominke, P.; Ruck, G.:** *Electric Power Steering – The First Step on the Way of „Steer by Wire“*. SAE Paper 1999-01-0401, 1999.
- Donges 1977* **Donges, E.:** *Ein Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug*. Meckenheim: Gesellschaft für angewandte Naturwissenschaften, Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Bericht Nr. 27, 1977.
- Donges 1978* **Donges, E.:** *Ein regelungstechnisches Zwei-Ebenen-Modell des menschlichen Lenkverhaltens im Kraftfahrzeug*. Zeitschrift für Verkehrssicherheit Nr. 24, 1978.
- Donges 1980* **Donges, E.:** *Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren*. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben „Erstellung von Bewertungskriterien für das Fahrverhalten im Demonstrationsprojekt Forschungs-Pkw.“ Institut für Verkehrssicherheit, TÜV Rheinland, 1980.
- Donges 1982* **Donges E.:** *Aspekte der Aktiven Sicherheit bei der Führung von Personenkraftwagen*. In Automobil-Industrie (2/82), S. 183-190, 1982.
- Donges und Rompe 1982* **Donges, E.; Rompe, K.:** *Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen in sieben objektiven Testverfahren*. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben „Erstellung von Bewertungskriterien für das Fahrverhalten im Demonstrationsprojekt Forschungs-Pkw.“ Köln: TÜV-Rheinland, 1982.
- Donges und Vossen 1981* **Donges, E.; Vossen, W. H.:** *Fahrverhaltensprofile heutiger Personenkraftwagen*. 9. Statusseminar des Bundesministers für Forschung und Verkehr, Neu-Ulm, 1981.
- Dreßel und Kain 1986* **Dreßel; Kain:** *Unveröffentlichte Unterlage*, 1986.
- Eckstein 1997* **Eckstein, L.:** *Investigations of the Sidestick Control Concept at the Daimler-Benz Driving Simulator*. Proceedings of the 4th International Conference and Exhibition, Comfort in the Automotive Industry – Recent Developments and Achievements, Bologna, 6.-7. October, 1997.

- Eckstein 2000* **Eckstein, L.:** *Sidesticks im Kraftfahrzeug – ein alternatives Bedienkonzept oder Spielerei?* In: **Bubb, H.** (Hrsg.): *Ergonomie und Verkehrssicherheit*. Beiträge der Herbstkonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. München: Herbert Utz Verlag, S. 65-96, 2000.
- Eckstein 2001* **Eckstein, L.:** *Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeuges mit aktivem Sidestick*. VDI-Fortschritts-Berichte, Reihe 12, Nr. 471. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2001.
- Elser 2007* **Elser, J.:** *Entwicklungsmethoden zur Reduzierung des Zielkonfliktes Lenkraddreherschwingungen – moderne Fahrwerksauslegung für moderne Transporter*. Tagung “chassis.tech 2007”, Garching b. München, 1.-2. März, 2007.
- Emmelmann 1981* **Emmelmann, H.-J.:** *Fahrstabilität bei Seitenwind*. In: *Aerodynamik des Automobils*. Würzburg: Vogel Verlag, 1981.
- Engel 1998* **Engel, H.-G.:** *Systemansatz zur Untersuchung von Wahrnehmung, Übertragung und Anregung bremsereger Lenkruhe*. Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 357. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998.
- Engels 1994* **Engels, A.:** *Geradeauslaufkriterien für Pkw und deren Bewertung*. Dissertation, TU Braunschweig, 1994.
- Engels 1997* **Engels, A.:** *Geradeauslaufkriterien für Pkw und deren Bewertung*. Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Band 97, Nr. 6, 1997.
- Ervin et al. 1972* **Ervin, R. D.; Grote, P.; Fancher, P. S.; MacAdam, C. C.; Segel, L.:** *Vehicle Handling Performance*. Highway Research Institute, University of Michigan, Research Study, 1972.
- Erzi 1974* **Erzi, A.I.:** *Einfluss von Kraftfahrzeugdaten auf die stationäre Kreisfahrt und deren Beurteilung*. Dissertation, Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, 1974.
- Evans 1970* **Evans, L.:** *Speed Estimation from a Moving Automobile*. Ergonomics, Vol. 13, 1970.
- Färber und Färber 1987* **Färber, B.; Färber, B.:** *Sicherheitsorientierte Bewertung von Anzeige- und Bedienelementen in Kraftfahrzeugen*. Forschungsvereinigung Automobiltechnik FAT, 1987.
- Färber et al. 1991* **Färber, Br.; Färber, Be.; Hipp, E.:** *Die Bedeutung kinästhetischer Information für die Fahrzeugführung*. VDI-Bericht Nr. 948. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991.
- Farrer 1993* **Farrer, D.:** *An Objective Measurement Technique for the Quantification of On-Centre Handling Quality*. SAE Paper 930827, 1993.
- Fiala 1966* **Fiala, E.:** *Lenken von Fahrzeugen als kybernetische Aufgabe*. Automobiltechnische Zeitschrift 68, Nr. 5, 1966.
- Fjurukawa et al. 1990* **Fjurukawa, Y.; Takei, A.; Kobayaeshe, M.; Kawai, T.:** *Effects of Active Steering Control Performance*. FISITA, Torino, 1990.
- Fleck 2003* **Fleck, R.:** *Methodische Entwicklung mechatronischer Lenksysteme mit Steer-by-Wire Funktionalität*. Tagung “Fahrwerk.tech 2003”, Garching b. München, 11.-12. März, 2003.
- Fleck et al. 2001* **Fleck, R. et al.:** *Active Front Steering (AFS)*. HdT-Tagung “Pkw-Lenksysteme – Vorbereitung auf die Technik von morgen”. Essen 3.-4.04, 2001.
- Flegl et al. 2003* **Flegl, H.; Frére, P.; Singer, N.:** *Die heutigen Rennwagentechnik am Beispiel Formel 1*. In: **Braess, H.-H.; Seiffert, U.** (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 3. Auflage. Braunschweig: Vieweg, 2003.

- Focus* 2003 **Focus Online:** *Die Aktivlenkung denkt mit.* Internet <http://focus.msn.de/D/DL/DLN/dln.htm?snr=109476>, 2.4.2003.
- Förster* 1985 **Förster, H.-J.:** *Der Mensch als maßgebliche Größe in der Fahrzeugtechnik.* In: *Der Mensch als maßgebliche Größe für Entwurf und Betrieb der Straße, Verkehrssicherheit und Regelkreis.* Mitteilungen des Lehrstuhls und Instituts für Straßenwesen, Erd- und Tunnelbaus der RWTH Aachen, Nr. 15, 1985.
- Förster* 1986 **Förster, H.-J.:** *Automobiltechnik, Technik nach Maß.* VDI-Berichte Nr. 595. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986.
- Förster* 1988 **Förster, H.-J.:** *Das Automobil am Anfang seines zweiten Jahrhunderts, Teil 3.* Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), 1988.
- Förster* 1991 **Förster, H.-J.:** *Der Fahrzeugführer als Bindeglied zwischen Reifen, Fahrwerk und Fahrbahn.* VDI-Berichte Nr. 916. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991.
- Förster* 1992 **Förster, H.-J.:** *Der Fahrzeugführer, ein Homo Instrumentalis.* VDI-Berichte Nr. 916. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992.
- Forbes et al.* 1987 **Forbes, J. E.; Baird, S. M.; Weisgerber, T. W.:** *Electrohydraulic Power Steering – An Advanced System for Unique Applications.* SAE Paper 870574, 1987.
- Frederich und Schmidt* 1971 **Frederich, B.; Schmidt, R.F.:** *Motorisches System.* In: **Schmidt, R. F.** (Hrsg.): *Neurophysiologie.* Berlin: Springer, 1971.
- Friedrich et al.* 2001 **Friedrich, H.; Hoffmann, J.; Kreft, J.; Semmler, C.; Witte, B.:** *Auf dem Weg zum intelligenten Auto – Steer-by-Wire als Basis zukünftiger Assistenzfunktionen.* In: **VDI** (Hrsg.). *Der Fahrer im 21. Jahrhundert.* VDI-Berichte Nr. 1613. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 277-296, 2001.
- Fuchs* 1993 **Fuchs, J.:** *Beitrag zum Verhalten von Fahrer und Fahrzeug bei Kurvenfahrt.* Dissertation, TU München, 1993.
- Fuhrmann* 1983 **Fuhrmann, K.-H.:** *Neue Methode zur Beurteilung der Seitenwindempfindlichkeit von Fahrzeugen.* VW Information, 1983.
- Fukui* 1994 **Fukui, K.:** *A Method for Evaluating Driver's Steering Ability during Continuous Driving.* Japan SAE Review, No. 12, Vol. 48, 1994.
- Fukui* 2004 **Fukui, F. W.; Takahashi, T.; Amano, Y.; Sugawara, T.; Tsuchiya, Y.; Koibuchi, K.:** *Experimental Study on the Performance of Driver-Vehicle System for the Change of Steering Characteristics.* Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC '04, Arnhem, Niederlande, 23.-27. August, 2004.
- Fujinami et al.* 1995 **Fujinami, H.; Yamamoto, M.; Hisaoka, Y.:** *Vehicle Response and Drivers' Feeling.* Toyota Technical Review, Vol. 45, No. 1, 1995.
- Gengenbach* 1969 **Gengenbach, W.:** *Experimentelle Untersuchung von Reifen auf nasser Fahrbahn.* Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Band 70, Nr. 8 und 9, 1969.
- Gescheider* 1997 **Gescheider, A. G.:** *Psychophysics: The Fundamentals.* 3rd Edition. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1997.
- Giacomin et al.* 2004 **Giacomin, J.; Shayaa, M. S.; Dormegnien, E.; Richard, L.:** *Frequency weighting for the evaluation of steering wheel rotational vibration.* International Journal of Industrial Ergonomics 33, pp. 527-541, 2004.
- Gibson* 1933 **Gibson, J. J.:** *Adaptation, After-Effect and Contrast in the Perception of Curved Lines.* J. exp. Psych., 16., 1933.
- Gibson* 1950 **Gibson, J. J.:** *The perception of the visual world.* Boston. Houghton Mifflin, 1950. Deutsch: *Die Wahrnehmung der visuellen Welt.* Weinheim: Beltz, 1973.

- Gibson 1979* **Gibson, J. J.:** *The ecological approach to visual perception.* Boston: Houghton Mifflin, 1979. Deutsch: *Wahrnehmung und Umwelt. Der ökologische Ansatz in der visuellen Wahrnehmung.* München: Urban und Schwarzenberg, 1979.
- Gies und Marusic 1998* **Gies, S.; Marusic, Z.:** *Das Lenkgefühl – Merkmale der subjektiven und objektiven Beschreibung.* Tagung „Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen“, Haus der Technik, Essen, 30. November – 1. Dezember, 1998.
- Gillet 1999* **Gillet, G.:** *Ergonomische Optimierung eines Aktiven Stellteils.* München: Herbert Utz Verlag, 1999.
- Gintsburg 1983* **Gintsburg, L. L.:** *Die Lenkbarkeit des Automobils beim Vorliegen abweichender Kräfte, hervorgerufen durch Unebenheiten der Straße.* In: NAMI (Hrsg.): *Die Vervollkommnung der technisch-ökonomischen Messwerte der Automobiltechnik.* Moskau, 1983. (auf Russisch).
- Goble et al. 1996* **Goble, A. K.; Collins, A. A.; Cholewiak, R. W.:** *Vibrotactile Threshold in Young and Old Observers – The Effects of Spatial Summation and the Presence of a Rigid Surround.* Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 99, Iss. 4, 1996.
- Godthelp et al. 1984* **Godthelp, J.; Milgram, P.; Blaauw, J.:** *The Development of a Time-Related Measure to Describe Driving Strategy.* Human Factors, Vol. 26, No. 3, 1984.
- Godthelp 1985* **Godthelp, J.:** *Precognition Control: Open- an Closed-Loop Steering in a Lane-Change manoeuvre.* Ergonomics, Vol. 28, No. 2, 1985.
- Godthelp 1986* **Godthelp, H.:** *Vehicle Control During Curve Driving.* Human Factors, Vol. 28, No. 2, 1986.
- Goldberg und Fernandez 1971* **Goldberg, J. M.; Fernandez, C.:** *Physiology of Periphal Neurons Innervating Semicircular Canals of the Squirrel Monkey.* I-III Journal of Neurophysiology, 34, 1971.
- Goldstein 2002* **Goldstein, E. B.:** *Wahrnehmungspsychologie.* 2. deutsche Auflage. Heidelberg: Spektrum, 2002.
- Good 1979* **Good, M. C.:** *Effects of Free-Control Variables on Automobile Handling.* Vehicle System Dynamics, Vol. 8, 1979.
- Gordon 1966* **Gordon, D.A.:** *Perceptual Basis of Vehicular Guidance.* In: Public Roads, Vol. 34, No. 3, S. 53-68, 1966.
- Gough 1962* **Gough, V. E.:** *Reibung von Gummi.* Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 19, 1962.
- Gradenegger et al. 2005* **Gradenegger, B.; Schmidt, G.; Neukum, A.; Scholz, S.; Krüger, H.-P.:** *Haptische Warnsignale im Fahrzeug – Vermittlung von Information durch diskrete Lenkmomente, Realisierung und Akzeptanz von eingreifenden Querführungssystemen.* Unveröffentlichter Bericht. Würzburg: WIVW, 2005.
- Groen et al. 1999* **Groen, E.; Howard, I.; Cheung, B.:** *Influence of body roll and visually induced sensations of self-tilt and rotation.* Perception, Vol. 28, p. 287-297, 1999.
- Groen et al. 2000* **Groen, E.; Valenti Clari, M.; Hosman, R.:** *Psychophysical Thresholds Associated with Simulation of Linear Acceleration.* AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Denver, Co. August 14-17, 2000. AIAA 2000-4294.
- Groen et al. 2001* **Groen, E.; Valenti Clari, M.; Hosman, R.:** *Evaluation of Perceived Motion During a Simulated Takeoff Run.* Journal of Aircraft, Vol. 38, No.4, pp 600-606, 2001.
- von Groll 2006* **von Groll, M.:** *Modifizierung von Nutz- und Störinformationen am Lenkrad durch elektromechanische Lenksysteme.* Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2006.

- Grunow et al. 1996* **Grunow, D.; Heuser, G.; Krüger, H.-J.; Zangemeister, C.:** *Sicherheitsbewertung von Personenkraftwagen.* Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft F17, Bergisch Gladbach, 1996.
- Guedry 1974* **Guedry, F.E.:** *Psychophysics of Vestibular Sensations.* In: **Benson, A.J.:** *Handbook of Sensory Physiology.* Volume VI/2. Vestibular System Part 2: Psychophysics, Applied Aspects and General Interpretations. Berlin: Springer, 1974.
- Guldner 2002* **Guldner J.:** *Steer-By-Wire Dokumentation.* In: **Geib, W. (Hrsg.):** *Technologieträger Z22 – Gesamtdokumentation.* BMW-interne Dokumentation, München, 2002.
- Gundry 1978a* **Gundry, A. J.:** *Experiments on the Detection of Roll Motion.* Aviation, Space and Environmental Medicine, Vol. 57, No. 5 1978.
- Gundry 1978b* **Gundry, A. J.:** *Threshold of Perception for Periodic Linear Motion.* Aviation, Space and Environmental Medicine, Vol. 49, No. 5, 1978.
- Guo und Guan 1993* **Guo, K.; Guan, H.:** *Modelling of Driver / Vehicle Directional Control System.* Vehicle Dynamics, No. 22, 1993.
- Hackenberg und Heißing 1982* **Hackenberg, U.; Heißing, B.:** *Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr.* Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Band 84, Nr. 7/8, 1982.
- Haffner et al. 2008* **Haffner, L.; Kozek, M.; Shi, J.:** *Comparison of two Methods for the Estimation of the Maximum Coefficient of Friction in a Cornering Maneuver of a Passenger Vehicle.* Paper 20080416, AVEC, 2008.
- Hajos 1993* **Hajos, A.:** *Sinnesleistung und Wahrnehmung.* In: **Schmidtke, H. (Hrsg.):** *Ergonomie.* München: Hanser Verlag, 1993.
- Hale et al. 1990* **Hale, A. R.; Stoop, J.; Hommels, J.:** *Human Error Models as Predictor of Accident Scenarios for Designer in Road Transport Systems.* Ergonomics, Vol. 33, 1990.
- Handwerker 2004* **Handwerker, H.:** *Somatosensorisches System.* Material zur Vorlesung „Grundlagen der Anatomie und Physiologie fr Nicht-Mediziner“, WS 04/05, Universität Erlangen, 2004.
- Harnett 2002* **Harnett, P.:** *Objective Methods for Assessment of Passenger Car Steering Quality.* Dissertation, School of Engineering, Cranfield University, 2002.
- Harrer 2006* **Harrer, M.:** *Steering System Development in Premium Car Segment.* SAE 2006-01-0935, 2006.
- Harrer 2007* **Harrer, M.:** *Characterisation of Steering Feel.* PhD-Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Bath, 2007.
- Harrer et al. 2005* **Harrer, M.; Stickel, T.; Pfeffer, P. E.:** *Automatisierung fahrdynamischer Messungen.* VDI-Bericht Nr. 1919. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2005.
- Harrer et al. 2006* **Harrer, M.; Pfeffer, P.; Johnston, D. N.:** *Steering Feel – Objective Assessment of Passenger Cars Analysis of Steering Feel and Vehicle Handling.* 31. International Congress FISITA, Yokohama, 22. – 27. Oktober, 2006.
- Harter et al. 2000* **Harter, W.; Pfeiffer, W.; Dominke, P.; Ruck, G.; Blessing, P.:** *Future Electrical Steering Systems: Realizations with Safety Requirements.* SAE Paper 2000-01-0822, 2000.
- Hartwich 1971* **Hartwich, E.:** *Längsdynamik und Folgebewegung des Straenfahrzeugs und ihr Einfluss auf das Verhalten der Fahrzeugschlange.* Dissertation, TH Darmstadt, 1971.
- Hayhoe 1979* **Hayhoe, G. E.:** *A Driver Model Based on the Cerebellar Modell Articulation Controller.* Vehicle System Dynamics, No. 8, 1979.

- Heathershaw 2000* **Heathershaw, A.:** *Optimizing Variable Ratio Steering für Improved On-Centre Sensitivity and Cornering Control.* SAE Paper 2000-01-0821, 2000.
- Heathershaw 2006* **Heathershaw, A.:** *Developments in On-Centre Steering Evaluation and Testing.* SAE Paper 2006-01-0796, 2006.
- Heißing et al. 2000* **Heißing, B.; Kudritzki, D.; Schindlmaister, R.; Mauter, G.:** *Menschgerechte Auslegung des dynamischen Verhaltens von Pkw.* In: **Bubb, H.** (Hrsg.): *Ergonomie und Verkehrssicherheit.* Beiträge der Herbstkonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. München: Herbert Utz Verlag, S. 1-31, 2000.
- Heißing und Brandl 2002* **Heißing, B.; Brandl, J.:** *Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens.* Würzburg: Vogel, 2002.
- Helm 1978* **Helm, H.-J.:** *Zur Untersuchung von Fahrer und Kraftfahrzeug bei Straßenfahrt.* Dissertation, TU Braunschweig, 1978.
- Helm et al. 1971* **Helm, H.-J.; Niemann, K.; Strackerjahn, B.; Wallentowitz, H.:** *Untersuchung der ESV-Kurshaltungsvorschriften.* IFF-Bericht Nr. 320, Institut für Kraftfahrzeugtechnik, TU Braunschweig, 1971.
- Henatsch 1976* **Henatsch, H.-D.:** *Bauplan der Peripheren Kontrolle.* In: **Haase, J. et al.:** *Sensomotorik.* Band 14: *Physiologie des Menschen.* München: Urban und Schwarzenberg, 1976.
- Hennecke et al. 2003* **Hennecke, D. et al.:** *Fahrwerksauslegung.* In: **Braess, H.-H.; Seiffert, U.** (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik.* 3. Auflage. Braunschweig: Vieweg, 2003, S. 538-595.
- Henze und Küçükay 1999* **Henze, R.; Küçükay, F.:** *Messung und Bewertung des Fahrverhaltens an der Seitenwindanlage.* IFF-Bericht Nr. 12, Institut für Kraftfahrzeugtechnik, TU Braunschweig, 1999.
- Henze 2004* **Henze, R.:** *Beurteilung von Fahrzeugen mit Hilfe von Fahrermodellen.* Schriftenreihe des Instituts für Fahrzeugtechnik, Nr. 7, TU Braunschweig, 2004.
- Herzberg 1958* **Herzberg, H. T. E.:** *Seat comfort.* In: **Hansen, R.** (Hrsg.): *Annotated Bibliography of Applied Physical Anthropology in Human Engineering.* Wright Air Development Center, Dayton, Ohio, p. 297-300, 1958.
- Hess und Modjtahedzadeh 1990* **Hess, R. A.; Modjtahedzadeh, A.:** *A Control Theoretic Model of Driver Steering Behavior.* IEEE Control Systems Magazine, 1990.
- Hieronimus und Chenchanna 1980* **Hieronimus, K.; Chenchanna, P.:** *Zur rechnerischen Analyse der dynamischen Eigenschaften von Fahrzeugsystemen.* FISITA Papers No. 80.2.1.7, XVII. International Congress, 1980.
- Higuchi et al. 1996* **Higuchi, M. et al.:** *Handling Analysis and Prediction During Cornering.* Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC '96, 24.-28. Juni, Aachen, p. 1027-1036, 1996.
- Higuchi und Sakai 2001* **Higuchi, A., Sakai, H.:** *Objective Evaluation of On-Center Handling Characteristics.* SAE Paper 2001-01-0481, 2001.
- Hirao et al. 1974* **Hirao, O. et al.:** *Manoeuvring Performances of Anthro-Mobile in Lane Change Action and Stepwise Side Force Disturbance.* Bulletin of JSAE (6), S. 47-55, 1974.
- Hironmichi 2006* **Hironmichi, N.:** *Relation Between Driver Gaze Change and Vehicle Behavior at Critical Cornering.* 31. International Congress FISITA, Yokohama, 22. – 27. Oktober, 2006.
- Hisaoka et al. 1996* **Hisaoka, Y.; Yamamoto, M.; Fujinami, H.:** *A Study on Desirable Steering Response and Steering Torque for Driver's Feeling.* Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC '96, 24.-18. Juni, Aachen, 1996.

- Hisaoka et al. 1997* **Hisaoka, Y.; Yamamoto, M.; Fujinami, H.:** *A Research on Desirable Steering Response and Steering Torque for Driver's Feeling.* Japan SAE Review, No. 4, Vol. 28, 1997.
- Hoffmann et al. 2000* **Hoffmann, J.; Kreft, J.; Semmler, C.:** „Drive by wire“ – Potenziale aus heutiger Sicht. In: **Bubb, H.** (Hrsg.): *Ergonomie und Verkehrssicherheit.* Beiträge der Herbstkonferenz der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft. München: Herbert Utz Verlag. S. 97-105, 2000.
- Holle und Hoffmann 2000* **Holle, M.; Hoffmann, C.:** *Lenkstrategien für aktive Vorderachslenksysteme.* Aachener Kolloquium, 2000.
- Holst 1957* **Holst, v. E.:** *Aktive Leistungen der menschlichen Gesichtswahrnehmung.* Studium Generale, 10, 4, 1957.
- Horiuchi und Yuhara 1996* **Horiuchi, S.; Yuhara, N.:** *An Analytical Approach to the Prediction Vehicle Handling Qualities Using Multi-Input Driver Model.* Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC '96, 24.-28. Juni, Aachen, Aachen, 1996.
- Horn 1986* **Horn, A.:** *Fahrer-Fahrzeug-Kurvenfahrt auf trockener Straße.* Dissertation, Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, 1986
- Houk und Rymer 1981* **Houk, J. C.; Rymer, W. Z.:** *Neutral Control of Muscle Length and Tension.* Bethesda, MD, USA, American Physiological Society, 1981.
- Howe et al. 1997* **Howe, G. J. et al.:** *Improving Steering Feel for the National Advanced Driving Simulator.* SAE Paper 970567, 1997.
- Huang 2002a* **Huang, P.:** *Objektive Messgröße und subjektive Bewertung in ausgewählten Fahrmanövern bei konventionellen Bedienelementen.* Bericht 1 zur Dissertation, München, 2002.
- Huang 2002b* **Huang, P.:** *Fahrvorgabe und Rückmeldung bei unkonventionellen Bedienkonzepten.* Bericht 2 zur Dissertation, München, 2002.
- Huang 2002c* **Huang, P.:** *Bedienelemente und Systemdynamik.* Bericht 3 zur Dissertation, München, 2002.
- Huang 2002d* **Huang, P.:** *Fahrer-Fahrzeug-Regelkreis.* Bericht 4 zur Dissertation, München, 2002.
- Huang 2004* **Huang, P.:** *Regelkonzepte zur Fahrzeugführung unter Einbeziehung der Bedienelementeigenschaften.* Dissertation, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, 2004.
- Isermann 2003* **Isermann, R.:** *Fehlertolerante Komponenten für Drive-By-Wire Systeme.* Kooperationsforum Mechatronik im Automobilbau, Nürnberg, 20. Mai, 2003.
- ISO 3888-1* **Norm ISO 3888-1:** *Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 1: Double lane-change.* First edition 1999-10-01, 1999.
- ISO 8855* **Norm ISO 8855 / DIN 70000:** *Straßenfahrzeuge – Fahrdynamik und Fahrverhalten.* Modifiziert, Ausgabe 1991.
- Isomura et al. 1996* **Isomura, A.; Hara, T.; Kamiya, K.:** *Human Factors in Driver's Steering Operation.* Japan SAE Review, No. 1, Vol. 27, 1996.
- Jaksch 1979* **Jaksch, F.O.:** *Driver-Vehicle Interaction with Respect to Steering Controllability.* SAE Paper 790740, 1979.
- Jaksch 1980* **Jaksch, F.O.:** *The Steering Characteristics of the Volvo Concept Car VIII.* ESV-Conference, Wolfsburg, Oktober 1980.
- Jaksch 1983* **Jaksch, F.O.:** *Vehicle Parameter Influence on Steering Control Characteristics.* International Journal of Vehicle Design, 1983.
- Jaksch et al. 1974* **Jaksch, F.; Gustafason, R.; Solberg, L.:** *Volvo's Safety System Integration in Production Automobiles: Crash Avoidance Engineering.* XV^c Congrès International FISITA, Paris, 13.-17. Mai, 1974.

- Jürgens 1999* **Jürgens, H. W.:** *Körpermaße*. In: **Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung** (Hrsg.): *Handbuch der Ergonomie*. Band Nr. 3. Koblenz: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, 1999.
- Jürgensohn 1997* **Jürgensohn, T.:** *Hybride Fahrermodelle*. Dissertation, TU Berlin, ZMMS Spektrum, Band 4. Würzburg: Pro Universitate Verlag, 1997.
- Jürgensohn und Timpe 2001* **Jürgensohn, T.; Timpe, K.-P.:** *Kraftfahrzeugführung*. Berlin: Springer, 2001.
- Jürgensohn 2000* **Jürgensohn, T.:** *Bedienermodellierung*. In: **Timpe, K.-P.; Jürgensohn, T.; Kolrep, H.** (Hrsg.): *Mensch-Maschine-Systemtechnik (63-104)*. Düsseldorf: Gabler, 2000.
- Jürgensohn et al. 2002* **Jürgensohn, T.; Niessen, C.; Leuchter, S.:** *Bedienermodellierung: Beispiele*. In: **Timpe, K.-P.; Jürgensohn, T.; Kolrep, H.** (Hrsg.): *Mensch-Maschine-Systemtechnik – Konzepte, Modellierung, Gestaltung, Evaluation*. Düsseldorf: Symposion, 2002.
- Junker 1990* **Junker, H.:** *Moderne Lenkungstechnologie – Von den Anforderungen zur technischen Realisierung*. Automobil-Industrie, Nr. 4-90, 1990.
- Käppler 1993* **Käppler, W.-D.:** *Beitrag zur Vorhersage von Einschätzungen des Fahrverhaltens*. VDI-Fortschritts-Berichte, Reihe 12, Nr. 198. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993.
- Käppler und Godthelp 1986* **Käppler, W.-D.; Godthelp, H.:** *Design an Us of the Two-Level Sequential Judgment Scale in Identification of Vehicle Handling Criteria*. Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Report FAT 79, 1986.
- Kodaira et al. 2007* **Kodaira, T.; Yamamoto, Y.; Sakai, H.; Muragishi, Y.; Fukui, K.; Ono, E.:** *Improvement of vehicle Dynamics Based on Human Sensitivity. (Second Report) – A Study of Cornering Feel*. SAE Paper 2007-01-0447, 2007.
- Kohno et al. 1969* **Kohno, T.; Tsuchiya, S.; Komoda, N.; Maki, K.:** *On the Vehicle Dynamic Response to the Steering Control (Part 1)*. Japan SAE Review, No. 4, Vol. 23, 1969.
- Koide und Kawakami 1988* **Koide, M.; Kawakami, S.:** *Analysis of "Steering Feel" Evaluation in Vehicles with Power Steering*. Japan SAE Review. No. 3, Vol. 9, 1988.
- Kokotovic et al. 1999* **Kokotovic, V. V.; Grabowski, J.; Amin, V.; Lee, J.:** *Electro Hydraulic Power Steering System*. SAE Paper 1999-01-0404, 1999.
- Kolev et al. 1996* **Kolev, O.; Mergner, T.; Kimmig, H.; Becker, W.:** *Detection Threshold for Object Motion and Self-Motion During Vestibular and Visio-Oculomotor Stimulation*. Brain Research Bulletin, Vol. 40, Nos. 5/6, 1996.
- Kolling 1998* **Kolling, J.:** *Validierung und Weiterentwicklung eines CAD-Menschmodells für die Fahrzeuggestaltung*. Dissertation, TU München, Lehrstuhl für Ergonomie, 1998.
- Kondo 1953* **Kondo, M.:** *Richtungsstabilität (wenn Steuerbewegungen hinzukommen)*. Journal of the Society of Automotive Engineers of Japan, Vol. 7, No. 5, 6, 1953. (auf Japanisch)
- Kondo 1958* **Kondo, M.:** *Zusammenhang zwischen Lenkung und Fahrzeugdynamik*. Japan SAE Review, No. 5, 1958. (frei aus dem Japanischen übersetzt)
- Kopf 1994* **Kopf, M.:** *Ein Beitrag zur modellbasierten, adaptiven Fahrerunterstützung für das Fahren auf deutschen Autobahnen*. VDI-Fortschritts-Berichte, Reihe 12, Nr. 203. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.
- Kraiss 1970* **Kraiss, K.-F.:** *Zum Einfluss des Bewegungswiderstandes auf der Güte manueller Regelung*. Dissertation, TU Berlin, 1970.
- Kramer 1986* **Kramer, U.:** *Analyse mobiler Systeme – Ein Beitrag zur Theorie der Fahrzeugführung*. VDI-Fortschritts-Berichte, Reihe 12, Nr. 77. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986.

- Kreil und Schweizer* 1968 **Kreil, W.; Schweizer, G.:** *Der Mensch als Regler – Ein Beitrag zur dynamischen Übertragung.* Regelungstechnik 16, Nr. 2, 1968.
- Krist* 1993 **Krist, R.:** *Modellierung des Sitzkomforts – Eine experimentelle Studie.* Dissertation, KU Eichstätt, 1993.
- Krämer* 1997 **Krämer, W.:** *Improved Driving Safety by Electronic Steering Assistance.* EAEC-Conf., Proc., p. 845-852, 1997.
- Krüger* 1989 **Krüger, M.:** *Regelungstechnische Analyse des aktiven Bedienelements im Kraftfahrzeug.* Diplomarbeit, TU München, Lehrstuhl für Ergonomie, 1989.
- Krüger und Neukum* 2001 **Krüger, H.-P.; Neukum, A.:** *Bewertung von Handlingeigenschaften – Zur methodischen und inhaltlichen Kritik des korrelativen Forschungsansatzes.* In: **Jürgensohn, T.; Timpe, K.-P.** (Hrsg.): *Kraftfahrzeugführung.* Berlin: Springer, 2001.
- Krüger et al.* 2000 **Krüger, H.-P.; Neukum, A.; Schuller, J.:** *A Workload-Approach to the Evaluation of Vehicle Handling Characteristics.* SAE Paper 2000-01-0170, 2000.
- Kubota et al.* 1995 **Kubota, M.; Ushijima, T.; Brown, J.:** *Correlation of Driver Confidence and Dynamic Measurements and the Effect of 4WD.* SAE Paper 950972, 1995.
- Kudritzki* 1989 **Kudritzki, D.:** *Zum Einfluss querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens.* VDI-Fortschritts-Berichte, Reihe 12, Nr. 132. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989.
- Kudritzki* 1992 **Kudritzki, D.:** *Lenkstrategie eines Fahrzeugführers bei vorgegebener Fahraufgabe.* Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Nr. 7/8, 1992.
- Kudritzki* 2002 **Kudritzki, D.:** *Neue Erkenntnisse über das zeitabhängige Beurteilungsverhalten des Fahrers.* In: *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen II – Haus der Technik, Essen, 3.12.2002-4.12.2002.* Renningen: expert, 2002.
- Kurachi et al.* 1983 **Kurachi, H.; Okamoto, K.; Saito, I.; Chikuma, I.:** *Improvements in Rack and Pinion Steering Gears.* SAE Paper 830996, 1983.
- Kurek* 2004 **Kurek, R.:** *Erfolgsstrategien für die Automobilzulieferer.* Berlin: Springer, 2004.
- Kurishige et al.* 2000 **Kurishige, M. et al.:** *A New EPS Control Strategy to Improve Steering Wheel Returnability.* SAE Paper 2000-01-0815, 2000.
- Kurishige et al.* 2002 **Kurishige, M. et al.:** *An EPS Control Strategy to Improve Steering Maneuverability on Slippery Roads.* SAE Paper 2002-01-0618, 2002.
- Kusaka und Higuchi* 1998 **Kusaka, K.; Higuchi, M.:** *Handling Analysis and Prediction during Cornering.* Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC '98, Nagoya, 1998.
- Kushiro und Yamamoto* 2006 **Kushiro, I.; Yamamoto, M.:** *Vehicle Behavior Under the Influence of Steering Dynamics by Means of Low Frequency Torque Input.* SAE Paper 2006-01-0557, 2006.
- Kushiro et al.* 2008 **Kushiro, I. et al.:** *A New Approach in the Study On-Center-Handling.* Paper 20080432, AVEC, 2008.
- Lange* 1991 **Lange, W.:** *Kleine Ergonomische Datensammlung.* 6. Auflage. Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1991.
- Land und Lee* 1994 **Land, M. F.; Lee, D. N.:** *Where we look when we steer.* Zeitschrift Nature No. 369, 1994.
- Lappe et al.* **Lappe, M.; Grigo, A.; Bremmer, F.; Frenz, H.; Bertin, R. J. V.; Israel, I.:** *Perception of Heading and Driving Distance From Optic Flow.* Ruhr-Universität Bochum, College de France.

- Lee 1974* **Lee, D. N.:** *Visual information during locomotion.* In: **MacLeod, R. B.; Pick, H. L. Jr.** (Hrsg.): *Perception essays in honor of J. J. Gibson.* Ithaca: Cornell University Press, 1974.
- Lefebvre et al. 2003* **Lefebvre, N.; Millemann, S.; Lengellé, R.; Nikiforov, I.:** *A New Approach for Steering Wheel Angle Prediction.* SAE Paper 2003-01-0122, 2003.
- Lincke et al. 1973* **Lincke, W. et al.:** *Simulation and Measurement of Driver Vehicle Handling.* Volume I, Summary Report, National Technical Information Service, Springfield, 1973.
- Lindsay und Norman 1972* **Lindsay, P. H.; Norman, D. H.:** *Human Information Processing An Introduction to Psychology.* New York: Academic Press, 1972.
- Liu und Guo 1994* **Liu, M. H.; Guo, K. H.:** *Modelling of Driver-Vehicle Closed-Loop System and Stability Analysis of a Vehicle Passing Through Sidewind.* SAE Paper 945074, 1994.
- Loth 1996* **Loth, S.:** *Fahrdynamische Einflussgrößen beim Geradeauslauf von Pkw.* Dissertation, Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, 1996.
- Lozia und Zardecki 2002* **Lozia, Z.; Zardecki, D.:** *Vehicle Dynamics Simulation with Inclusion of Freeplay and Dry Friction in Steering System.* SAE Paper 2002-01-0619, 2002.
- Lunze 2001* **Lunze, J.:** *Regelungstechnik 1: Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen.* 3. Auflage. Berlin: Springer, 2001.
- Lunze 2002* **Lunze, J.:** *Regelungstechnik 2: Mehrgrößensysteme, digitale Regelung.* 2. Auflage. Berlin: Springer, 2002.
- Lutzenberger 2001* **Lutzenberger, C.:** *Dynamik des menschlichen Ganges.* Dissertation, TU München, Lehrstuhl B für Mechanik, 2001.
- MacAdam 1981* **MacAdam, C. C.:** *Application of an Optimal Preview Control for Simulation of Closed-Loop Automobile Driving.* IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-11, No 6, 1981.
- Mann und Popken 2004* **Mann, M.; Popken, M.:** *Auslegung einer fahreroptimierten Mensch-Maschine-Schnittstelle am Beispiel eines Querführungsassistenten.* 5. Braunschweiger Symposium "Automatisierungs- und Assistenzsysteme für Transportmittel", Braunschweig 17.-18. März, 2004.
- Maretzke und Richter 1984* **Maretzke, J.; Richter, B.:** *Einfluss von Spoilern auf die Spurhaltung bei Geradeausfahrt.* In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik.* Nr. 3, 1984, S. 85-90.
- Mars 2006* **Mars, F.:** *Driving in curves with constrained gaze orientation in the vicinity of the tangent point.* XI. Congress Vision in Vehicles, Dublin, 27. – 29. July, 2006.
- Marstaller und Bubb 2001* **Marstaller, R.; Bubb, H.:** *Fahrerverhaltensänderungen bei der fahrerassistierenden Kfz-Steuerung mit aktiven Bedienelementen gegenüber dem traditionellen Bedienkonzept.* VDI-Bericht Nr. 1603, Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 297-313, 2001.
- Maslow 1978* **Maslow, A. H.:** *Motivation und Persönlichkeit.* Freiburg i. Br.: Walter Verlag, 1978.
- Matsushita et al. 1980* **Matsushita, A.; Takanami, K.; Takeda, N.; Takahashi, M.:** *Subjective Evaluation and Vehicle Behaviour in Lane-Change Manoeuvres.* SAE Paper 800845, 1980.
- Mayer 1986* **Mayer, A.:** *Untersuchung über den Einfluss eines aktiven Bedienelements auf die menschliche Regelleistung.* Dissertation, TU München, Lehrstuhl für Ergonomie, 1986.

- McCann 2000* **McCann, R.:** *Variable Effort Steering for Vehicle Stability Enhancement Using an Electric Power Steering System.* SAE Paper 2000-01-0817, 2000.
- McFadden et al. 2000* **McFadden, M.; Powers, J.; Brown, W.; Walker, M.:** *Vehicle and Driver Attributes Affecting Distance from the Steering Wheel in Motor Vehicles.* Human Factors, Vol. 42, No. 4, p. 676-682, 2000.
- McRuer et al. 1975* **McRuer, D. T. et al.:** *Automobile Controllability. Driver / Vehicle Response for Steering Control.* Volume I, Summary Report, National Technical Information Service, Springfield, 1975.
- McRuer und Klein 1976* **McRuer, D. T.; Klein, R.:** *Effects of Automobile Steering Characteristics on Driver/Vehicle Performance for Regulation Tasks.* SAE Paper 760778, 1976.
- McRuer et al. 1977* **McRuer, D. T.; Allen, R. W.; Weir, D. H.; Klein, R. H.:** *New Results in Driver Steering Control Models.* Human Factors, Vol. 19, No. 4, 1977.
- Meier-Dörnberg und Strackerjahn 1977* **Meier-Dörnberg, K.; Strackerjahn, B.:** *Prüfstandsversuche und Bericht zur Querdynamik von Luftreifen.* Automobil-Industrie Nr. 4, 1977.
- Meyer-Gramcko 1990* **Meyer-Gramcko, F.:** *Gehörsinn, Gleichgewichtssinn, und andere Sinnesleistungen im Straßenverkehr.* Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 3, 1990.
- Mies 1987* **Mies, K.-H.:** *Experimentelle Bestimmung der Kopfhüllkurve im Fahrzeug mit einer photogrammetrischen Methode.* Diplomarbeit, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, 1987.
- Millsap und Law 1996* **Millsap, S.; Law, E. H.:** *Handling Enhancement Due to an Automotive Variable Ratio Electric Power Steering System Using Model Reference Robust Tracking Control.* SAE Paper 960931, 1996.
- Mimuro et al. 1990* **Mimuro, T.; Ohsaki, M.; Yasunaga, H.; Satoh, K.:** *Four Parameter Evaluation Method of Lateral Transient Response.* SAE Paper 901734, 1990.
- Mitschke 1977* **Mitschke, M.:** *Kraftfahrzeug-Fahrer-Aktive Sicherheit.* Automobil-Industrie, Nr. 3, 1977.
- Mitschke 1978* **Mitschke, M.:** *Wichtige Daten zur Kurshaltung von Kraftfahrzeugen.* Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Band 80, Nr. 6, 1978.
- Mitschke 1984* **Mitschke, M.:** *Beurteilung des Geradeauslaufverhaltens und des Center Point Feelings.* Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, IFF-Bericht Nr. 631, 1984.
- Mitschke 1990* **Mitschke, M.:** *Dynamik der Kraftfahrzeuge. Band C: Fahrverhalten.* 2. Auflage. Berlin: Springer, 1990.
- Mitschke und Apel 1996* **Mitschke, M.; Apel, A.:** *Verifikation des Fahrermodells für kritische Fahrsituationen, Ergebnisse für Längs- und Querregelung (Abschlussbericht).* Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, IFF-Bericht Nr. 746, 1996.
- Mitschke und Engels 1993* **Mitschke, M.; Engels, E.:** *Experimentelle Bestimmung des Geradeauslaufverhaltens von Pkw und dessen Bewertung.* Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, IFF-Bericht Nr. 720, 1993.
- Mitschke und Loth 1995* **Mitschke, M.; Loth, S.:** *Geradeauslaufverhalten.* Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, IFF-Bericht Nr. 721, 1995.
- Mitschke und Niemann 1972* **Mitschke, M.; Niemann, K.:** *Die Regeltätigkeit des Autofahrers bei Kursabweichung.* Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik Nr. 221, 1972.
- Mitschke und Wallentowitz 2004* **Mitschke, M.; Wallentowitz, H.:** *Dynamik der Kraftfahrzeuge.* 4. Auflage. Berlin: Springer, 2004.

- Mitschke et al. 1991* **Mitschke, M.; Wallentowitz, H.; Schwartz, E.:** *Vermeiden querdynamisch kritischer Fahrzustände durch Fahrzustandsüberwachung.* VDI-Bericht Nr. 916. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 509-529, 1991.
- Miwa 1967* **Miwa, T.:** *Evaluation Methods for Vibration Effects. Part 3: Measurements of Threshold and Equal Sensation Contours on Hand for Vertical and Horizontal Sinusoidal Vibrations.* Industrial Health, 5, 1967.
- Mortimer und Olson 1973* **Mortimer, R. G.; Olson, P. L.:** *Some Factors Limiting Driver-Vehicle Performance.* SAE Paper 730017, 1973.
- Mouri et al. 1994* **Mouri, H.; Yanai, T.; Sugasawa, F.; Kishi, N.; Furusho, H.:** *An Investigation of Driver's Stress Induced by Vehicle Handling Characteristics.* Japan SAE Review, No. 12, Vol. 48, 1994.
- Mouri et al. 2006* **Mouri, H.; Kubota, M.; Nagae, N.:** *Effect of Transient Steering Assist Characteristics on Vehicle Dynamics.* Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC '06, Taipei, Taiwan, 20.-24. August, 2006.
- Müller-Limmroth 1993* **Müller-Limmroth, M.:** *Sinnesorgane. Teil 1.* In: **Schmidtke, H.** (Hrsg.): *Ergonomie.* München: Hanser Verlag, 1993.
- Muragushi et al. 2006* **Muragushi, Y.; Fukui, K.; Asaga, Y.; Ono, E.:** *Development of Human Sensitivity Evaluation System for Vehicle Dynamics.* 31. International Congress FISITA, Yokohama, 22. – 27. Oktober, 2006.
- Muragushi et al. 2007* **Muragushi, Y.; Fukui, K.; Asaga, Y.; Ono, E.; Kodaira, T.; Yamamoto, Y.; Sakai, H.:** *Improvement of Vehicle Dynamics Based on Human Sensitivity. (First Report) – Development of Human Sensitivity Evaluation System.* SAE Paper 2007-01-0448, 2007.
- Naab 2000* **Naab, K.:** *Automatisierung bei der Fahrzeugführung im Straßenverkehr.* Automatisierungstechnik 5/2000, 2000.
- Nagai 1983* **Nagai, M.:** *Adaptive Behaviours of Driver-Car Systems in Critical Situations.* Proc. of the International AMSE Summer Conference "Modelling and Simulation", Nizza, Frankreich, 1983.
- Nagai und Mitschke 1984* **Nagai, M.; Mitschke, M.:** *Adaptive Behaviours of Driver-Car Systems in Critical Situations.* Proc. of the IFAC 9th Triennial World Congress, Budapest, Ungarn, 1984.
- Nagai und Mitschke 1987* **Nagai, M.; Mitschke, M.:** *An Adaptive Control Model of a Driver-Car and Computer Simulation of the Closed-Loop System.* In: **Apertaur, M.** (Hrsg.): *The Dynamics of Vehicles on Road and on Tracks.* 1987.
- Nagai et al. 1987* **Nagai, M.; Kojima, Y.; Sato, H.:** *Driver's Decision and Control Process During Right-Turning at Intersections (Application of Fuzzy Linguistic Model for Accident Analysis).* SAE Paper 871250, 1987.
- Neculau 1992* **Neculau, M.:** *Modellierung des Fahrerhaltens: Regel-Steuerstrategien.* VDI-Bericht Nr. 948. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992.
- Neukum und Reinelt 2005* **Neculau, M.:** *Bewertung der Funktionssicherheit aktiver Lenksysteme: ein Human Factors Ansatz.* VDI-Bericht Nr. 1919. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2005.
- Neureder 2001* **Neureder, U.:** *Modellierung und Simulation des Lenkstranges für die Untersuchung der Lenkungsunruhe.* Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Band 103, Nr. 3, 2001.
- Newberry et al. 2006* **Newberry, A. C.; Griffin, M. J.; Dowson, M.:** *Perception of stiffness: Linear Steering Feel.* Eurohaptics, 2006, S. 297-300.
- Newberry et al. 2007* **Newberry, A. C.; Griffin, M. J.; Dowson, M.:** *Driver perception of steering feel.* Proc. of IMechE, Vol. 221, Part D: J. Automobile Engineering, 2007.

- Niemann 1972* **Niemann, K.:** *Messungen und Berechnungen über das Regelverhalten von Autofahrern.* Dissertation TU Braunschweig, Institut für Fahrzeugtechnik, 1972.
- Niemann et al. 1980* **Niemann, K. et al.:** *Entwicklungsmöglichkeiten an Lenksystemen für Kraftfahrzeuge und ihr Einfluss auf die Kurshaltung.* Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Band 82, Nr. 10, 1980.
- Nisonger und Fancher 1981* **Nisonger, R. L.; Fancher, P. S.:** *Experimental Examination of Transient Directional Response Tests.* SAE Paper 810808, 1981.
- Noh et al. 2007* **Noh, K.; Jung, D.; Choi, H.; Yi, K.; Yoon, Y.:** *Development of Ergonomic Driver Model Considering Human Factors.* SAE Paper 2007-01-3584, 2007.
- Nordeen 1965* **Nordeen, D.L.:** *Vehicle Handling. Its Dependence upon Vehicle Parameters.* GM Report, No. 423, 1965.
- Norman 1984* **Norman, K. D.:** *Objective Evaluation of On-Center Handling Performance.* SAE Paper 840069, 1984.
- Ohno 1966* **Ohno, T.:** *Steering Control on a Curved Course.* Japan SAE Review, Vol. 20, No. 5, 1966.
- Pauwelussen und Pauwelussen 2004* **Pauwelussen, J. P.; Pauwelussen, J. J. A.:** *Exploration of Steering Wheel Angle Based Workload Measures in Relationship to Steering Feel Evaluation.* Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC '04, Arnhem, Niederlande, 23.-27. August, 2004.
- Penka 2001* **Penka, A.:** *Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen.* Dissertation, TU München, Lehrstuhl für Ergonomie, 2001.
- Perret 1964* **Perret, W.:** *Lenkkräfte und Lenkwege am Lenkrad von Kraftfahrzeugen und ihr Einfluss auf die Lenksicherheit.* Dissertation TH Braunschweig, 1964.
- Peruzetto 1988* **Peruzetto, P.:** *Assessing the Relative Importance of Hand Arm Vibration with Respect to Whole-Body Vibration.* The United Kingdom and French Joint Meeting on Human Responses to Vibration, I.N.R.S., Vandoeuvre, France, 26.-September 1988.
- Plöchl und Lugner 1994* **Plöchl, M.; Lugner, P.:** *Theoretical Investigation of the Interaction Driver – Feedback-Controlled Automobile.* SAE Paper 9438006, 1994.
- Pöppel 2000* **Pöppel, E.:** *Grenzen des Bewusstseins – Wie kommen wir zur Zeit, und wie entsteht Wirklichkeit?* 1. Auflage. Frankfurt / Main: Insel Verlag, 2000.
- Pohl und Ekmark 2003* **Pohl, J.; Ekmark, J.:** *Development of a Haptic Intervention System for Unintended Lane Departure.* SAE Paper 2003-01-0282, 2003.
- Pottinger et al. 1986* **Pottinger, M. G.; Marshall, K. D.; Lawther, J. M.; Thrasher, D. B.:** A Review of Tire / Pavement Interaction Induced Noise and Vibration. In: **Pottinger, M. G.; Yager, T. J.** (Eds.): *ASTM STP 929 The Tire Pavement Interface.* ASTM, Philadelphia, 1986.
- Poulton 1974* **Poulton, E. C.:** *Tracking Skill and Manual Control.* New York, 1974.
- Rasmussen 1987* **Rasmussen, J.:** *The Definition of Human Error and a Taxonomy for Technical System Design.* In: **Rasmussen, J. et al.** (Hrsg.): *New Technology and Human Error.* New York: Wiley and Sons Ltd, 1987.
- Reichelt 1990* **Reichelt, W.:** *Ein adaptives Fahrermodell zur Bewertung der Fahrdynamik von Pkw in kritischen Situationen.* Dissertation, TU Braunschweig, 1990.

- Reichelt 1991* **Reichelt, W.:** *Correlation Analysis of Open/Closed Loop Data for Objective Assessment of Handling Characteristics of Cars.* SAE Paper 910238, 1991.
- Reichelt und Strackerjahn 1992* **Reichelt, W.; Strackerjahn, B.:** *Bewertung der Fahrdynamik von Pkw im geschlossenen Regelkreis mit Hilfe von Fahr simulatoren und Fahrermodellen.* VDI-Bericht Nr. 948. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1992.
- Reid et al. 1981* **Reid, L. D.; Solowka, E. N.; Billing, A. M.:** A Systematic Study of Driver Steering Behavior. *Ergonomics*, Vol. 24, No. 6, 1981.
- Reimpell und Betzler 2000* **Reimpell, J.; Betzler, J.:** *Fahrwerktechnik: Grundlagen.* Würzburg: Vogel-Verlag, 2000.
- Reimpell und Sponagel 1998* **Reimpell, J.; Sponagel, P.:** *Reifen und Räder.* Würzburg: Vogel Buchverlag, 2. Auflage, 1998.
- Reynolds und Soedel 1972* **Reynolds, D. D.; Soedel, W.:** *Dynamic Response of Hand-Arm System to Sinusoidal Input.* *Journal of Sound and Vibration* 21 (3), 1972.
- Reynolds und Angevine 1977* **Reynolds, D. D.; Angevine, E. N.:** *Hand-Arm Vibration Part 2: Vibration Transmission Characteristics of the Hand and Arm.* *Journal of Sound and Vibration* 51 (2), 1977.
- Reynolds und Keith 1977* **Reynolds, D. D.; Keith, R. H.:** *Hand-Arm Vibration Part 1: Analytical Model of the Vibration Response Characteristics of the Hand.* *Journal of Sound and Vibration* 51 (2), 1977.
- Reynolds et al. 1977* **Reynolds, D. D.; Standlee, K. G.; Angevine, E. N.:** *Hand-Arm Vibration Part 3: Subjective Response Characteristics of Individuals to Hand Induced Vibration.* *Journal of Sound and Vibration* 51 (2), 1977.
- Reynolds 1998* **Reynolds, K.:** *Why does the BMW's M3 steer so well?* *Road & Track*, S. 136-140, October, 1998.
- Riedel und Gnadler 1996* **Riedel, A.; Gnadler, R.:** *Subjektive und objektive Fahrverhaltensänderung von Pkw.* *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ) Sonderausgabe „25 Jahre FAT“*, 1996.
- Richter 1969* **Richter, B.:** *Unterschiedliches Lenkverhalten verschiedener Versuchspersonen.* *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*, Band 8, 1969.
- Riedel und Arbinger 1997* **Riedel, A., Arbinger, R.:** *Subjektive und objektive Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw.* *FAT-Schriftenreihe*, Nr. 139. Frankfurt a.M.: FAT, 1997.
- Riedel und Arbinger 2000* **Riedel, A., Arbinger, R.:** *Ergänzende Auswertungen zur subjektiven und objektiven Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw.* *FAT-Schriftenreihe*, Nr. 161, Frankfurt a.M.: FAT, 2000.
- Risse 1991* **Risse, H. J.:** *Das Fahrverhalten bei normaler Fahrzeugführung* VDI-Fortschritts-Berichte, Reihe 12, Nr. 160. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991.
- Rockwell 1971* **Rockwell, T.H.:** *Eye Movement Analysis of Visual Information Acquisition in Driving: An Overview.* North Carolina State University, Raleigh, 1971.
- Rönitz et al. 1977* **Rönitz, R.; Braess, H.-H., Zomotor, A.:** *Verfahren und Kriterien zur Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw – Stand und Problematik.* *Automobilindustrie*, Heft 1, 1977.
- Rönitz et al. 1997 und 1998* **Rönitz, R.; Braess, H.-H., Zomotor, A.:** *Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Pkw – Ein Rückblick auf die letzten 20 Jahre- Teil I+II.* *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* Band 99, Nr. 12, 1997 und *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)* Band 100, Nr. 3, 1998.
- Rompe und Donges 1984* **Rompe, K.; Donges, E.:** *Variationsbreite der Fahreigenschaften heutiger Personenkraftwagen.* *Automobil-Industrie*, Heft 2, 1984
- Rompe und Heißing 1984* **Rompe, K.; Heißing, B.:** *Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen – Quer- und Längsdynamik.* Köln: Verlag TÜV Rheinland, 1984.

- Rothbauer 1978** **Rothbauer, G.:** *Zum Einfluss der Weg-Widerstands-Charakteristik des Bedienelements auf den Vollzug einfacher und komplexer Stellbewegungen des Armes.* Dissertation, Forschungsinstitut für Anthropotechnik, Meckenheim / Bonn, 1978.
- Rühmann 1978** **Rühmann, H.:** *Untersuchung über den Einfluss der mechanischen Eigenschaften von Bedienelementen auf die Steuerleistung des Menschen bei stochastischen Rollschwingungen.* Forschungsbericht aus der Wehrtechnik. BMVg-FBWT 87-11, S. 1-190, 1978.
- Rühmann 1984** **Rühmann, H.:** *Die Schwingungsbelastung in Mensch-Maschine-Systemen – Experimentelle Untersuchung zur Bewegungsgenauigkeit bei stochastischer Roll- und Nickbelastung.* In: **VDI** (Hrsg.): Fortschrittsberichte der VDI Zeitschriften. Reihe 17, Nr. 22. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1984.
- Rühmann 1993a** **Rühmann, H.:** *Schnittstellen in Mensch-Maschine-Systemen.* In: **Schmidtke, H.** (Hrsg.): *Ergonomie.* München: Hanser Verlag, 1993.
- Rühmann 1993b** **Rühmann, H.:** *Stellteilgestaltung.* In: **Schmidtke, H.** (Hrsg.): *Ergonomie.* München: Hanser Verlag, 1993.
- SAE 2003** **SAE International:** *Branding Vehicle Dynamics.* Zeitschrift Automotive Engineer International. Vol. 111, No. 7, p. 53-60, 2003.
- Sagan 2003** **Sagan, E.:** *Zur Beurteilung von Fahreigenschaften in fahrdynamischen Testverfahren.* In: **VDI** (Hrsg.): *Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn.* VDI-Bericht Nr. 1791. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003.
- Sagan und Unterstraßer 2003** **Sagan, E.; Unterstraßer, T.:** *Beurteilungskriterien.* In: **Braess, H.-H.; Seiffert, U.** (Hrsg.): *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik.* 3. Auflage. Braunschweig: Vieweg, 2003, S. 595-602.
- Sakashita und Okada 1964** **Sakashita, K.; Okada, T.:** *Effects of Dynamical Features of Steering System on Automobile Stability and Control, Predicted by Linearized Theory.* Japan SAE Review, No. 4, Vol. 18, 1964.
- Salaani et al. 2001** **Salaani, M. K.; Heydinger, G. J.; Grygier, P. A.:** *Parameter Determination and Vehicle Dynamics Modelling for the NADS of the 1998 Chevrolet Malibu.* SAE Paper 2001-01-0140, 2001.
- Sato et al. 1990** **Sato, H.; Haraguchi, J.; Osawa, I.:** *Experimental Analysis of Steering Response Characteristics and Steering Feeling.* Japan SAE Review, Vol. 44, No. 3, 1990.
- Sato et al. 1991** **Sato, H.; Osawa, I.; Haraguchi, J.:** *The Quantitative Analysis of Steering Feel.* Japan SAE Review, No. 2, Vol. 12, 1991.
- Sawada et al. 1990** **Sawada, T.; Oguchi, Y.; Satoh, C.:** *Basic Study on Influence of Aging on Steering Control.* SAE Paper 905099, 1990.
- Schaible 1998** **Schaible, S.:** *Fahrzeugseitenwindempfindlichkeit unter natürlichen Bedingungen.* Dissertation, TH Aachen, 1998.
- Schedel 2003** **Schedel, R.:** *Active Steering.* Auto Technology, Vol., No. 3, February 2003, S. 54/55.
- Schierz 2001** **Schierz, C.:** *Sehen und Bildschirm.* Vorlesungsskript, Institut für Hygiene und Arbeitsphysiologie, ETH Zürich, 2001.
- Schimmelpfennig und Nackenhorst 1985** **Schimmelpfennig, K.-H.; Nackenhorst, U.:** *Bedeutung der Querbeschleunigung in der Verkehrsunfallrekonstruktion – Sicherheitsgrenze des Normalfahrers.* Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik Nr. 4, 1985.
- Schmidt 1979** **Schmidt, R. F.:** *Grundriss der Neurophysiologie.* Berlin: Springer, 1979.
- Schmidt und Thews 1995** **Schmidt, R. F.; Thews, G.:** *Physiologie des Menschen.* 26. Auflage. Berlin: Springer, 1995.

- Schmidt 2007* **Schmidt, G.:** Wann spürt der Fahrer überhaupt? - Der Einfluss des Fahrmanövers auf die Wahrnehmung von Zusatzlenkmomenten als haptische Signale im Fahrzeug. In: **VDI** (Hrsg.). *Der Fahrer im 21. Jahrhundert*. VDI-Berichte Nr. 2015. Düsseldorf: VDI-Verlag, S. 15-28, 2007.
- Schmidt et al. 2007* **Schmidt, G.; Kiss, M.; Switkes, J. P.; Gerdes, J. C.:** *Auswirkungen haptischer Signale in der Lenkung auf das Fahrer-Fahrzeug-System*. 8. Braunschweiger Symposium AAET, 26.-28. Februar 2007.
- Schmidtke 1961* **Schmidtke, H.:** *Untersuchung über die Abhängigkeit der Bewegungsgenauigkeit im Raum von der Körperstellung*. Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 941, 1961.
- Schmidtke und Schober 1967* **Schmidtke, H.; Schober, H.:** *Sehanforderungen bei der Arbeit*. Stuttgart: A.W. Gentner Verlag, 1967.
- Schulze 1981* **Schulze, B. G.:** *Application of Ergonomic Principles in Driving Control Design*. In: **Oborne, D. J.; Jervis, J. A.** (Hrsg.): *Human Factors in Transport Research*. Vol. 1 and 2, 1981.
- Schumann 1994* **Schumann, J.:** *On the use of discrete proprioceptive tactile warning signals during manual control: the steering wheel as an active control device*. Dissertation, Hochschule der Bundeswehr Hamburg, 1994
- Schweigert 2003* **Schweigert, M.:** *Fahrerblickverhalten und Nebenaufgabe*. Dissertation, TU München, Lehrstuhl für Ergonomie, 2003.
- Schweizer 1975* **Schweizer, G.:** *Das Systemglied „Mensch“ in der Simulation*. In: **Schöne, A.** (Hrsg.): *Simulation stetiger Systeme*. München, 1975.
- Segawa et al. 2000* **Segawa, M.; Nischizaki, K.; Nakano, S.:** *A Study of Vehicle Stability Control by Steer by Wire System*. Proc. of AVEC 2000, Ann Arbor, 2000.
- Segel 1964* **Segel, L.:** *An Investigation of Automobile Handling as Implemented by a Variable-Steering Automobile*. Human Factors, Vol. 6, No. 4, 1964.
- Segel 1965* **Segel, L.:** *The Variable Stability Automobile Concept and Design*. SAE Paper 275, 1965.
- Senders 1964* **Senders, J.W.:** *The Human Operator*. Bioastronautics Data Book, Section 18, NASA SP-3006, Washington D.C., 1964.
- Sheirko 1972* **Sheirko, F.:** *Experimentelle Untersuchung des Geradeauslaufs von Straßenfahrzeugen unter dem Einfluss von Seitenwind und Straßenunebenheiten*. Automobil-Industrie, Nr. 1, 1972.
- Shimizu et al. 1999* **Shimizu, Y.; Kawai, T.; Yuzuriha, J.:** *Improvement in Driver-Vehicle System Performance by Varying Steering Gain with Vehicle Speed and Steering Angle: VGS (Variable Gear-Ratio Steering System)*. SAE Paper 1999-01-0395, 1999.
- Shimakage et al. 2001* **Shimakage, M. et al.:** *Design of Lane-Keeping Control With Steering Torque Input for Lane-Keeping Support System*. SAE Paper 2001-01-0480, 2001.
- Shoenberger 1984* **Shoenberger, R. W.:** *Subjective Effects of Combined-Axis Vibration: II. Comparison of Y-Axis and Y-Plus-Roll Vibrations*. Aviation, Space and Environmental Medicine, Vol. 55, 1984.
- Shoenberger 1985* **Shoenberger, R. W.:** *Subjective Effects of Combined-Axis Vibration: II. Comparison of X-Axis and X-Plus-Pitch Vibrations*. Aviation, Space and Environmental Medicine, Vol. 56, 1985.
- Shoenberger 1986* **Shoenberger, R. W.:** *Subjective Effects of Combined-Axis Vibration: III. Comparison of Y-Axis and Y-Plus-Yaw Vibrations*. Aviation, Space and Environmental Medicine, Vol. 57, 1986.
- Song und Yoon 1993* **Song, J.; Yoon, Y.:** *Design of Two Wheel Steer Vehicle Using Optimal Control Algorithm of Four Wheel Steer*. SAE Paper 931914, 1993.

- Spiegel 2003* **Spiegel Online:** *Schleudern mit Hilfe.* Internet <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/0,1518,243187,00.html>, 2.4.2003.
- Stamer 1997* **Stamer, N.:** *Ermittlung optimaler Pkw-Querdynamik und ihre Realisierung durch Allradlenkung.* Fortschrittsbericht VDI Nr. 302, Reihe 12. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1997.
- Steward 1971* **Steward, J.D.:** *Human Perception of Angular Accerlation and Implications on Motion Simulator.* Volume 8, Mo. 4, Journal Aircrft, 1971.
- Stockmar 1978* **Stockmar, J.:** *Fahrwerk und Abstimmung des neuen Audi 80.* Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Band 80, Nr. 10, 1978.
- Strackerjahn 1973* **Strackerjahn, B.:** *Fahrversuche und Berechnung zur Kurshaltung von Personenkraftwagen.* Dissertation, Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig, 1973.
- Stier 1969* **Stier, F.:** *Über den Informationsgehalt manueller Zielbewegungen.* Kybernetik, Band 5, 1969.
- Stoll 1992* **Stoll, H.:** *Fahrwerktechnik: Lenkanlagen und Hilfskraftlenkung.* Würzburg: Vogel, 1992.
- Suggs 1963* **Suggs, C.W.:** *The Effect of Load in Muscle Output.* Human Factors, 11, 1963.
- Suzuki et al. 1994* **Suzuki, H.; Harara, M.; Kumakura, H.:** *Study on Suitable Steering Feeling for Various Driving Conditions – By Controlling Power Steering Assist Characteristics.* AVEC 1994.
- Sweatman und Joubert 1974* **Sweatman, P.; Joubert, N. J.:** *Detection of Changes in Automobile Steering Sensivity.* Human Factors, Vol. 16, No. 1, 1974.
- Tan et al. 1994* **Tan, H. Z.; Srinivasan, M. A.; Ebermann, B.; Cheng, B.:** *Human Factors fort he Design of Force-Reflecting Haptic Interfaces.* Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting: Dynamic Systems and Control, DSC-Vol. 55-1, 1994.
- Tajima et al. 1999* **Tajima, J.; Yuhara, N.; Sano, S.; Takimoto, S.:** *Effects of Steering System Characteristics on Control Performance from the Viewpoint of Steer-by-Wire System Design.* SAE Paper 1999-01-0821, 1999.
- Theis 2002* **Theis, I.:** *Das Steer-by-Wire System im Kraftfahrzeug - Analyse der menschlichen Zuverlässigkeit.* Dissertation, TU München, Lehrstuhl für Ergonomie, 2002.
- Todosiev 1963* **Todosiev, E. P.:** *The action-point model of the driver-vehicle system.* Dissertation, Ohio State University, 1963.
- Tomaske 1983* **Tomaske, W.:** *Einfluss der Bewegungsinformation auf das Lenkregelverhalten des Fahrers sowie Folgerungen für die Auslegung von Fahrsimulatoren.* Dissertation, Hochschule der Bundeswehr Hamburg, 1983.
- Uchida und Miyoshi 1989* **Uchida, K.; Miyoshi, M.:** *Development of Variable-Valve-Gain Rotary Valve for Speed Proportional Power Steering.* SAE Paper 891979, 1989.
- Uffelmann 1986* **Uffelmann, F.:** *Das Seitenwindverhalten von Personenkraftwagen.* Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Nr. 12, 1986.
- Uno und Hiramatsu 1999* **Uno, H.; Hiramatsu, K.:** *Relationship Between Time Margin and Driver's Steering Avoidance in an Emergent Situation.* Japanese Journal of Ergonomics, Vol. 35, No. 4, 1999. (In japanischer Originalsprache).
- Vaas 2005* **Vaas, R.:** *Zeit und Gehirn.* Online-Lexikon der Neurowissenschaft. Internet: <http://www.wissenschaft-online.de/abo/lexikon/neuro/14651>, 27.06.2005.
- Verma und Shepard 1981* **Verma, M. K.; Shepard, W. L.:** *Comparison of Transient Response Test Procedures for Motor Vehicle.* SAE Paper 810807, 1981.

- Wagner 2003* **Wagner, A.:** *Ein Verfahren zur Vorhersage und Bewertung der Fahrerreaktion bei Seitenwind.* Stuttgart: Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Band 23, 2003.
- Waldmann 1971* **Waldmann, D.:** *Untersuchung zum Lenkverhalten von Kraftfahrzeugen.* Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik Heft Nr. 218, 1971.
- Waldmann 1974a* **Waldmann, D.:** *Korrelation Fahrer-Lenkung-Fahrzeug.* 15. Congress International FISITA, Paris, Paper C-1-16, 1974.
- Waldmann 1974b* **Waldmann, D.:** *Beitrag zum Verhalten des Systems Fahrer-Fahrzeug unter besonderer Berücksichtigung von Lenkübersetzung und Lenkmoment.* Dissertation, TU München, 1974.
- Waldmann 1975* **Waldmann, D.:** *Untersuchungen zum Einfluss der Eigenschaften des Lenksystems auf das Verhalten des Regelkreises Fahrer-Fahrzeug.* Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik, Heft 247. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1975.
- Wallentowitz 1979* **Wallentowitz, H.:** *Fahrer – Fahrzeug – Seitenwind.* Dissertation, TU Braunschweig, 1979.
- Wallentowitz 1980* **Wallentowitz, H.:** *Zusammenwirken von Fahrer und Fahrzeug bei normaler Straßenfahrt unter natürlichem Seitenwind.* XVIII. International Congress FISITA, Hamburg, 5. – 8. Mai, 1980.
- Wallentowitz 1981* **Wallentowitz, H.:** *Fahren bei Seitenwind.* Automobil-Industrie, Nr. 2/81, 1981.
- Wallentowitz 2002* **Wallentowitz, H.:** *Fahrerreaktion auf Störungen der Kurshaltung.* Tagung „Tag des Fahrwerks“, Aachen, 7. Oktober 2002.
- Wallentowitz et al. 1992* **Wallentowitz, H.; Donges, E.; Wimberger, J.:** *Die Aktive Hinterachskinematik (AHK) des BMW 850 Ci, 850 CSi.* Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Band 94, Nr. 12, 1992.
- Wallner 1972* **Wallner, F.:** *Über den Einfluss unkonventioneller Lenksystem auf die Lenkarbeit des Fahrzeugs.* Dissertation, TU Berlin, 1972.
- Wargo 1967* **Wargo, J.:** *Human Operators Response Speed, Frequency, and Flexibility: A Review and Analysis.* Human Factors, Volume 9, p. 221-238, 1967.
- Warren 1995* **Warren, W. H.:** *Self-motion: Visual perception and visual control.* In: **Epstein, W.; Rogers, S.** (Hrsg.): *Handbook of perception and cognition: Perception of space an motion.* New York: Academic Press, 1995.
- Webhofer 1991* **Webhofer, G.:** *Implementation und Inbetriebnahme einer Regelung für ein Aktives Lenksystem.* Diplomarbeit, TU München, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeuge, 1991.
- Wegscheider und Prokop 2005* **Wegscheider, M.; Prokop, G.:** *Modellbasierte Komfortbewertung von Fahrerassistenzsystemen.* VDI-Bericht Nr. 1900. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2005.
- Weir und DiMarco 1978* **Weir, D. H.; DiMarco, R. J.:** *Correlation and Evaluation of Driver / Vehicle Directional Handling Data.* SAE Paper 780010, 1978.
- Weir und McRuer 1968* **Weir, D. H.; McRuer, D. T.:** *A Theory for Driver Steering Control of Motor Vehicles.* Highway Research Record, 247, 1968.
- Wilkie 1970* **Wilkie.** In: **Keidel, W. D.** (Hrsg.): *Lehrbuch der Physiologie.* 2. Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1970.
- Willumeit und Jürgensohn 1997* **Willumeit, H.-P.; Jürgensohn, T.:** *Fahrermodelle – ein kritischer Überblick – Teil I und Teil II.* Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Band 99, Nr. 9, 1997.

- Willumeit et al. 1991* **Willumeit, H.-P.; Matheis, A.; Müller, K.:** *Korrelation von Untersuchungsergebnissen zur Seitenwindempfindlichkeit eines Personenwagen im Fahrsimulator und Prüffeld.* Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Band 93, Nr. 1, 1991.
- Witte 1995* **Witte, B.:** *Stabilisierung der Gierbewegung eines Kraftfahrzeuges in kritischen Fahrsituationen.* VDI-Verlag, Reihe 12, Nr. 254, 1995.
- Wohl 1961* **Wohl, J. G.:** *Man-Machine Steering Dynamics.* Human Factors 3, 1961.
- Wohnhaas 1994* **Wohnhaas, A.:** *Simulation von Kraftfahrzeug-Lenkungen unter besonderer Berücksichtigung von Reibung und Spiel.* Dissertation, Universität Stuttgart, 1994.
- Wolf 2007a* **Wolf, H.:** *Steering Feel of Passenger Cars.* Proc. of the 2nd Annual Conference on Advanced Steering Systems, 21.-23. Mai 2007, Frankfurt/Main.
- Wolf 2007b* **Wolf, H.:** *Bedeutung optischer Informationen und des Zeitverhaltens einzelner Fahrzeugbewegungsgrößen für das Lenkgefühl.* Seminarreihe am Lehrstuhl für Ergonomie SS06, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, 2007.
- Wolf 2008* **Wolf, H.:** *Lenkkraftwahrnehmungsschwellen und visuelle Fahrerinformationen im Rahmen der Querführung eines Fahrzeugs.* Tagung steering.tech, 31. März – 1. April 2008, Garching b. M.
- Wolf und Bubb 2005* **Wolf, H.; Bubb, H.:** *Ergonomie in der Fahrwerksentwicklung – Wo und wie kann sie dort hilfreich sein?* Tagung “Fahrwerk.tech 2005”, Garching b. München, 4.-5. April, 2005.
- Wolf et al. 2005* **Wolf, H.; Zöllner, R.; Bubb, H.:** *Ergonomische Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion bei gleichzeitig agierenden Fahrerassistenzsystemen.* Zeitschrift für Verkehrssicherheit (ZVS), Nr. 3, 2005, S. 119-124.
- Xi und Qun 1994* **Xi, G.; Qun, Y.:** *Driver-Vehicle-Environment Closed-Loop Simulation of Handling and Stability using Fuzzy Control Theory.* The Dynamics of Vehicles on Roads and on Tracks, Proc. of 13th IAVSD-Symposium, 1994.
- Yamada und Hada 2007* **Yamada, D.; Hada, M.:** *An Estimation Method of Muscle Force by Using Variable Moment Arm Vector .* SAE Paper 2007-01-2468, 2007.
- Yamaguchi et al. 1985* **Yamaguchi, H.; Takahashi, S.; Miyoshi, M.; Fukino, M.:** *Development of an Electronically-Controlled Power Steering System.* SAE Paper 841198, 1985.
- Yamazaki und Kamata 1998* **Yamazaki, I.; Kamata, M.:** *A Study of Driving by the Control Stick.* JSAE, Vol. 29, No.3, (in japanischer Originalsprache), 1998.
- Yoshimoto 1981* **Yoshimoto, K.:** *A Self-Paced Preview Tracking Control Model of an Automobile Driver.* Proc. of the 8th IFAC Triennial World Congress, Kyoto, Japan, 1981.
- Yoshimoto et al. 2000* **Yoshimoto, K.; Katoh, M.; Inoue, K.:** *A Vision-based Speed Control Algorithm for Autonomous Driving.* Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC2000, Ann Arbor, 2000.
- Yu et al. 2004* **Yu, J.; Aston, J.; Gilsinger, C.; Shutway, J.; Tokunaga, H.:** *Vehicle Dynamic Feeling Study with a Focus on the On-Center Steering Feeling of North American Highway Driving.* Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC '04, Arnhem, Niederlande, 23.-27. August, 2004.
- Yuhara et al. 1992* **Yuhara, N.; Horiuchi, S.; Asanuma, N.; Nishi, Y.; Kohata, T.:** *Improvement of Vehicle Handling Quality Through Active Control of Steering Reaction Torque.* Proc. of the International Symposium on Advanced Vehicle Control AVEC '92, Yokohama, Japan, 14.-19. September, 1992, Paper 923073, 1992.

- Yuhara et al. 1997* **Yuhara, N. et al.:** *An Advanced Steering System with Active Kinesthetic Feedback for Handling Qualities Improvement.* Vehicle System Dynamics, Vol. 27, 1997.
- Yuhara et al. 1999* **Yuhara, N. et al.:** *Steer-By-Wire-Oriented Steering System Design – Concept and Examination.* Vehicle System Dynamics Supplement 33, 1999.
- Zeilinger 2005* **Zeilinger, S.:** *Aktive haptische Bedienelemente zur Interaktion mit Fahrerinformationssystemen.* Dissertation, Universität der Bundeswehr, 2005.
- Zimbardo 1995* **Zimbardo, P. G.:** *Psychologie.* 6. Auflage Berlin: Springer, 1995.
- Zimmermann 1986* **Zimmermann, M.:** *Grundlagen der Regelprozesse. Kapitel IV: Neuronale und hormonelle Steuerungs- und Regelprozesse.* In: **Schmidt, R.F.; Thews, G.** (Hrsg.): *Physiologie des Menschen.* 23. Auflage. Berlin: Springer, 1986.
- Zomotor 1976* **Zomotor, A.:** *Testmethoden zur Untersuchung der Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen im instationären Bereich.* Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ), Band 76, Nr. 4, 1976.
- Zomotor 1987* **Zomotor, A.:** *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten.* Würzburg: Vogel, 1987.
- Zomotor 1991* **Zomotor, A.:** *Fahrwerktechnik: Fahrverhalten.* 2. Auflage. Würzburg: Vogel, 1991.

Betreute Semester- und Diplomarbeiten im Rahmen der Dissertation

- Blumrich 2006* **Blumrich, S.:** *Vier verschiedene Lenksysteme im Feldversuch: Durchführung und Auswertung von Überlandfahrten.* Semesterarbeit, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, 2006.
- Mayr 2006* **Mayr, H.:** *Subjektive Beurteilung des Lenkverhaltens anhand praktischer Fahrversuche.* Semesterarbeit, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, 2006.
- Wegener 2007* **Wegener, R.:** *Lenkverhalten von Straßenfahrzeugen.* Semesterarbeit, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, 2007.
- Reitmeier 2007* **Reitmeier, C.:** *Aufbau eines Prüfstandes zur Messung von Wahrnehmungsschwellen bei Lenkradkräften* Semesterarbeit, Lehrstuhl für Ergonomie, TU München, 2007.