

Neukum, A. & Krüger, H.-P. (2003). Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen – Untersuchungsmethoden und Bewertungskriterien. VDI-Berichte, 1791, S. 297-318.

## **Fahrerreaktionen bei Lenksystemstörungen – Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien**

### **Driver Reactions to Steering System Failures – Methodology and Criteria for Evaluation**

Dipl.-Psych. A. Neukum

Prof. Dr. H.-P. Krüger

Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften an der Universität Würzburg (IZVW)

#### **Zusammenfassung**

Aktive Lenksysteme müssen hohen Sicherheitsanforderungen genügen. Neben sicherheitstechnischen Spezifikationen müssen auch die Auswirkungen einer Systemabschaltung oder Lenksystemstörung auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion betrachtet werden. Der Beitrag gibt einen Überblick über die von der BMW AG und der ZF Lenksysteme GmbH in Auftrag gegebene Sicherheitsuntersuchung der Fail-Safe-Eigenschaften der Aktivlenkung. Dargestellt werden Methodologie und Kriterien, die zur Bewertung der Sicherheitsrelevanz herangezogen wurden. Die Ergebnisse umfangreicher Probandenuntersuchungen zeigen, dass (a) eine ausfallinduzierte Veränderung der Lenkübersetzung keine Beeinträchtigungen der Fahrsicherheit bewirkt und dass (b) für den Fall von Lenkwinkel Fehlern begründete Grenzen anzugeben sind, innerhalb derer keine sicherheitsrelevanten Störungen auftreten. Diese Grenzen werden im Fall der Aktivlenkung eingehalten.

#### **Summary**

Active steering systems have to meet high safety demands. Besides technical specifications the consequences of system failures also have to be regarded with respect to driver-vehicle interaction. This contribution gives an overview of a study commissioned by BMW AG and ZF Lenksysteme GmbH concentrating on the fail-safe-properties of active steering. Methodology and criteria for evaluation of safety relevant aspects are presented. The results of this extensive study show that (a) changes in steering ratio do not impair driving safety and that (b) in case of steering angle faults well justified boundaries are specified within which no safety relevant disturbances occur. These boundaries are complied with in the case of active steering.

## 1 Einleitung

Fahrdynamische Regelsysteme und insbesondere kontinuierlich unterstützende aktive Lenksysteme sollen dem Fahrer die Bewältigung der Fahraufgabe erleichtern und einen Beitrag zur aktiven Sicherheit leisten. Neben den aufgrund der Funktionalität gegebenen Verbesserungen der Fahrsicherheit und des Komforts muss jedoch auch das potentielle Risiko in Folge eines Systemausfalls als wesentliches Kriterium der Systembewertung berücksichtigt werden. Insbesondere die Lenkung als wichtigste Schnittstelle im Fahrer-Fahrzeug-System muss dabei hohen technischen Sicherheitsanforderungen genügen [3/5/19]. Beim Auftreten eines Fehlers oder Komponentenausfällen muss die Lenkbarkeit aufrechterhalten bleiben und das Fahrzeug vom Fahrer sicher beherrscht werden können.

Zur Validierung des Sicherheitskonzepts der von BMW AG und ZF Lenksysteme entwickelten Aktivlenkung [2/8/12/13] wurde von den Entwicklungspartnern eine Studie in Auftrag gegeben, deren zentrale Fragestellung die Abschätzung der Konsequenzen möglicher Fehler und Ausfälle des fail-silent ausgelegten Lenkungssystems auf die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion war.

Die in Kooperation von ika und IZVW durchgeführte Sicherheitsstudie integriert unterschiedliche methodische Instrumentarien. Im Mittelpunkt standen umfangreiche Probandenuntersuchungen im Realfahrzeug. Ergänzt wurden diese durch eine Fahrsimulatorstudie sowie Rechnersimulationen. Der vorliegende Text gibt einen Überblick über die Ergebnisse der im Rahmen der Sicherheitsstudie vom IZVW durchgeführten Realfahrzeuguntersuchungen.

## 2 Ausfallverhalten von Lenksystemen: Bewertungskriterien für den Closed Loop

Zur Beurteilung der Effekte von Fehlfunktionen und Ausfällen aktiver Lenksysteme sind Methoden und Kriterien notwendig, die es erlauben, die Einhaltung von Sicherheitsanforderungen zu verifizieren. Während für technische Aspekte einschlägige Standards festgeschrieben wurden, liegen für den Aspekt der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im Störfall keine definierten Kriterien und Prüfmethoden vor. Gemeinsame Standards der Hersteller und Zulieferer wurden in Bezug auf diese Fragestellungen bislang nicht definiert. Generell lassen sich in Hinblick auf den Closed Loop zwei Zugänge zur Validierung einer technischen Sicherheitskonzeption unterscheiden:

- a) Die **interne Validierung** bezieht sich auf den Nachweis, dass aus Systemausfällen keine sicherheitskritischen Situationen entstehen und das Fahrzeug mit vertretbarem Aufwand auch im Fehlerfall kontrolliert werden kann (Erfüllung der Fail-Safe-Anforderungen). Der empirische Beleg

innerhalb eines gegebenen Systems wird in kontrollierten Probandenuntersuchungen erbracht. In der Literatur finden sich zu dieser Frage bislang nur vereinzelte Veröffentlichungen.

- b) Zur **externen Validierung** wird der Bezug zu bekannten Kurshaltungsstörungen (wie Seitenwind etc.) hergestellt, die im Fahralltag auftreten und von denen angenommen wird, dass der normal geübte Fahrer diese Störungen toleriert und sicher bewältigt. Eine knappe Übersicht findet sich in /20/. Eine externe Validierung setzt voraus, dass eine direkte Vergleichbarkeit der zur Bewertung herangezogenen Größen gegeben ist, wovon beim gegenwärtigen Stand der Literatur nicht auszugehen ist.

Vor dem Hintergrund einer empirisch noch unzureichend abgesicherten Basis von externen Kriterien (vgl. auch /18/ zur Diskussion normativer Modelle für unterschiedliche Fahrsituationen) ist der internen Validierung ein besonderer Stellenwert beizumessen. Dabei ist der Nachweis zu erbringen, dass aufgrund ausfallbedingter Zustände und Zustandsübergänge keine kritischen Fahrsituationen auftreten und die Kontrollierbarkeit des Fahrzeugs auch im Fehlerfall erhalten bleibt. Diese „kritischen Fahrsituationen“ können nach /1/ allgemein definiert werden als „Fahrsituationen, bei denen die Abweichungen zwischen Führungs- und Regelgrößen örtlich und zeitlich veränderliche und/oder subjektiv vorgegebene Toleranzgrenzen überschreiten“<sup>1</sup> (vgl. /23/). Zur Definition dieser Toleranzgrenzen ist – dem allgemeinen Konsens in der Fahrverhaltensbewertung folgend (im Überblick hierzu z.B. /4//24/) – ein mehrdimensionaler Indikatorensatz heranzuziehen<sup>2</sup>.

Wesentliche Bedeutung kommt dabei dem Fahrerurteil zu, das sich in einer Vielzahl von Untersuchungen als sensitives Kriterium erwiesen hat. In der Literatur finden sich jedoch bislang keine Instrumentarien, die sich speziell auf die Frage der Beherrschbarkeit des Fahrzeugs im Fehlerfall beziehen oder die zur Erfassung und Bewertung des Ausmaßes von Kurshaltungsstörungen entwickelt wurden. Üblicherweise werden Skalierungsverfahren eingesetzt, die die Fahrerbeanspruchung erheben oder eine (in der Regel relative) Bewertung von Fahrzeugeigenschaften verlangen. Eine Definition von absoluten Toleranzgrenzen, wie sie zur Sicherheitsbewertung nötig ist, ist auf der Basis vorhandener Verfahren kaum vorzunehmen (vgl. hierzu Abschnitt 3.2).

Notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für den Schluss, dass eine gegebene Störgröße sicherheitsunbedenklich ist, ist die Erfüllung einer gegebenen Fahraufgabe. Als einfach zu erhebendes Leistungsmaß dient in Realfahrzeuguntersuchungen die Häufigkeit von Spurverletzungen (Anzahl umgefahrener Pylonen oder fehlerfreier Fahrten). In /9/ wird das Kriterium der Randüber-

---

<sup>1</sup> Hierbei kann es nicht darum gehen, extreme Ausnahmeszenarien zu definieren, bei denen die geringste Abweichung bereits zu massiven Folgen führt. Diese lassen sich im Bereich der Fahrsicherheit immer konstruieren.

<sup>2</sup> Ausgeklammert werden hier psychophysiologische Messungen (etwa der Herzfrequenz), da sich aus diesen für die gegebene Fragestellung keine Bewertungskriterien ableiten lassen.

schreitung (20 bzw. 40cm) auch in einer Fahrsimulatoruntersuchung verwendet und dient dort als alleiniges Maß zur Bewertung von Lenksystemstörungen. Da dabei entgegen den Forderungen in der einschlägigen Literatur (im Überblick hierzu /4/) die Querposition des Fahrzeugs zum Fehlerzeitpunkt unberücksichtigt bleibt, ist die Aussagekraft des Kriteriums nicht zu beurteilen.

In Realfahrzeuguntersuchungen ist die Bestimmung des Spurverlaufs und der Querposition mit einem erheblichen messtechnischen Aufwand verbunden, der bei den derzeit verfügbaren Methoden kaum zu leisten ist. Werden die Daten durch Integration fahrphysikalischer Größen ermittelt, kann die Objektivität der Aussagen durch „Unschärfen bei der Messwerterfassung“ /20/ und die vom Untersucher eingesetzten Berechnungsverfahren deutlich eingeschränkt sein.

Grundsätzlicher Nachteil von Maßen der Spurhaltungsgüte ist, dass diese abhängig von den Toleranzgrenzen und Regelstrategien unterschiedlicher Fahrer sehr verschieden ausfallen können (z.B. /6//7/). Besteht für den Fahrer kein unmittelbarer Handlungsbedarf zur sofortigen Kompensation eines auftretenden Fehlers, können die ermittelten Maße die Auswirkung der Störung deutlich verfälschen. Weitere verkehrssituationsbezogene Einflussgrößen auf die von Fahrern tolerierten Spurbweichungen bzw. Querpositionen sind dargestellt in /18/.

Zusammenfassend und ausgehend vom gegenwärtigen Stand der Literatur sind geeignete Kriterien zur Beurteilung von Lenksystemstörungen vor allem aus Fahrzeugbewegungsgrößen und Kennwerten des Fahreraufwands zu generieren. In Bezug auf Letzteren sind vor allem Maß der Lenkaktivität (Variabilitäts- und Geschwindigkeitsmaße) heranzuziehen, da Niveauparameter der Lenkarbeit (erhöhter Lenkradwinkel oder veränderter Kraftaufwand) meist Kennzeichen des Störungsbilds darstellen und damit als Bewertungskriterien nicht in Frage kommen.

### **3 Untersuchungsmethodik der Sicherheitsstudie**

#### **3.1 Relevante Fehlerbilder und abgeleitete Untersuchungsfragen**

Aufbauend auf umfangreichen, von BMW AG und ZF Lenksysteme durchgeführten sicherheitstechnischen Analysen wurden für die Studie unterschiedliche Fehlerbilder als untersuchungsrelevant spezifiziert. Im Wesentlichen ergaben sich hieraus zwei Gruppen von Fehlerszenarien, aus denen unterschiedliche Anforderungen an den Fahrer resultierten.

**Adaptation an eine plötzlich veränderte Lenkübersetzung:** Im einwandfreien Betrieb der Aktivlenkung wird die Lenkübersetzung durch Überlagerung von zusätzlichen Lenkwinkeln geschwindigkeitsabhängig variiert. Beim Auftreten von Fehlfunktionen soll der sichere Zustand allein durch Abschaltung des Stellmotors gewährleistet werden, da der unabhängig von der Funktion der Aktivlenkung permanent gegebene mechanische Durchgriff als Rückfallebene erhalten bleibt /12/. Auf

Grund dieses Abschaltkonzepts ergeben sich im Fehlerfall in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit unterschiedliche Lenkübersetzungssprünge, die vom Fahrer beherrscht werden müssen.

Wie eine Vielzahl von Untersuchungen belegen, kann für den Fall eines vorbereiteten Fahrers – dies gilt auch für die rechtzeitige Warnanzeige der Funktionseinschränkung – davon ausgegangen werden, dass der Fahrer sich schnell an ein verändertes Lenkverhalten anpasst. Die kritische Frage ist, ob und wie schnell eine Anpassung im unvorbereiteten Fehlerfall möglich ist und ob sich aus dem Übergang Beeinträchtigungen der Fahrleistung ergeben, die als sicherheitskritisch zu bewerten sind. In der Untersuchung thematisiert wurde der für den unteren und mittleren Geschwindigkeitsbereich relevante Fall des Übergangs zu einer indirekteren Lenkübersetzung.

**Kompensation von Stellfehlern:** Aufgrund von Fehlern im Lenksystem können Stellwinkel an den Vorderrädern auftreten, die in Betrag und Richtung nicht der Drehbewegung am Lenkrad entsprechen. Unterschieden werden zwei mögliche Fehlertypen, die im Folgenden als irreversible bzw. reversible Stellfehler bezeichnet werden. Im Fall der Stellfehler kommt es aufgrund der fehlerhaften Aktivität des Stellmotors zu einer kurzzeitigen Erhöhung des Lenkmoments, die von einer querdynamischen Fahrzeugreaktion und daraus resultierend einer Spurabweichung gefolgt ist. Nach Arretieren des Stellmotors durch die Sicherheitsfunktion ist in Folge des irreversiblen Stellfehlers die konstante Lenkübersetzung der mechanischen Rückfallebene gegeben. Aufgrund der Eigenschaften des Lenkstrangs /10/ kann aus diesem Fehler ein Lenkradschiefstand resultieren. Im Fall der reversiblen Stellfehler kommt es ebenfalls zu einem fehlerhaft erhöhten Stellmotorwinkelverlauf, der durch die Sicherheitsfunktion angehalten wird. Durch Rückführung des Stellmotorwinkels auf den Sollwert der funktionsfähigen Lenkung innerhalb einer definierten Latenzzeit bleibt die Funktionalität der Aktivlenkung erhalten. In beiden Fällen ist die auftretende querdynamische Reaktion abhängig von der Fahrsituation und der zum Zeitpunkt des Fehlers gegebenen Haltekraft am Lenkrad. Je höher die Haltekraft ist, desto größer sind die Auswirkungen des Stellfehlers auf den Radlenkwinkel. Für den Fahrer entsteht in Folge eines fehlerhaft auftretenden Stellwinkels ein kompensatorischer Aufwand zur Fahrzeugstabilisierung und zum Ausgleich auftretender Kursabweichungen.

### 3.2 Skala zur Störungsbewertung (SSB)

Zur Definition von Toleranzbereichen kommt der subjektiven Beurteilung der Störungsauswirkung ein zentraler Stellenwert zu. An ein geeignetes Beurteilungsinstrumentarium sind dabei mehrere Anforderungen zu stellen. Zum einen muss es die Skala erlauben, Klassifikationen einer Störung vorzunehmen, zum anderen sollte sie eine differenzierte Abbildung unterschiedlicher Störungsausprägungen ermöglichen, um Zusammenhänge zu objektiven Daten herzustellen. Das Verfahren muss einfach zu handhaben und für Normalfahrer verständlich sein.

In der Literatur finden sich keine geeigneten Beurteilungsinstrumentarien, die diesen Anforderungen gerecht werden. Verwendet werden z.B. reine Klassifikationen von Störungsauswirkungen /20/, die funktionale Analysen zwischen Beurteilung und objektiven Größen der Fahrzeugbedienung bzw. der Fahrzeugreaktion nur sehr eingeschränkt zulassen. Ungeeignet zur Bewertung der Sicherheitsrelevanz und zur Definition von Grenzwerten sind weiterhin die zur Fahrzeugbewertung häufig eingesetzten Verfahren, die eine Relativbewertung gegenüber einem Standard verlangen. Angaben zur Sicherheit, wie sie in /9/ erfasst werden, sind wie eigene Untersuchungen belegen, zu einem hohen Grad durch die Schwierigkeit der Fahraufgabe und durch die Einschätzung des eigenen Fahrkönnens beeinflusst.

Deshalb wurde aufbauend auf ausgedehnten Voruntersuchungen zur subjektiven Beurteilung der Störungsauswirkungen ein Skalierungsverfahren entwickelt (Abbildung 1) /17/, das sich an etablierte, im fliegerischen Bereich eingesetzte Verfahren anlehnt /21/. Dabei werden in einem ersten Schritt fünf Bereiche der Störungsauswirkung unterschieden: „nichts bemerkt“, „die Störung wurde bemerkt“, „das Fahren wurde gestört“, „die Störung war gefährlich“, „das Fahrzeug war nicht mehr beherrschbar“. Während die untere und obere Randkategorie nicht weiter zu differenzieren ist, werden die drei mittleren Kategorien weiter in je drei Stufen feiner aufgeteilt. Insgesamt resultiert daraus eine 11-stufige Skala, die von 0 (= nichts bemerkt) bis 10 (= nicht mehr beherrschbar) reicht. Dabei werden die Fahrer zu einem zweistufigen Urteilen aufgefordert: zuerst wird die Verbalkategorie benannt und in einem zweiten Schritt dann eine Feindifferenzierung vorgenommen. Die Verbalkategorien werden dabei wie folgt erläutert: In die Kategorie „Spürbarkeit“ (Urteile 1-3) fallen Störungen, die vom Fahrer bemerkt werden, die jedoch keine oder nur leichte Auswirkungen auf die Fahraufgabe haben. Verletzt sind im Wesentlichen Komfortanforderungen und kompensatorisches Handeln ist nicht oder nur in geringem Maße erforderlich. Die Kategorie „Störung des Fahrens“ (Urteile 4-6) betrifft Fehler, die wegen auftretender Spurabweichungen und Fahrzeugreaktionen einen deutlichen, aber vom Fahrer als vertretbar eingeschätzten kompensatorischen Aufwand erfordern. Der Fehler wird als „gefährlich“ (Urteile 7-9) eingestuft, wenn der Aufwand zur Kompensation des Fehlers sehr hoch und nicht mehr tolerierbar ist. Aus der Störung resultieren sicherheitskritische Situationen.

Um ein einheitliches Aufgabenverständnis zu erzielen, wurden die Probanden zu Beginn der Untersuchung ausführlich mit dem Beurteilungsinstrument vertraut gemacht und aufgefordert, eine kritische Haltung einzunehmen. Die Fehlerauswirkungen sollten dabei immer mit Bezug auf reale Verkehrssituationen beurteilt werden. Wie die Ergebnisse der Befragungen der Normal- als auch der Profifahrer zeigen, wurde die Skala von der Mehrzahl der Probanden als gut bis sehr gut geeignet bewertet und erreicht damit eine hohe Skalenakzeptanz.

Fahrzeug nicht mehr kontrollierbar	10
Gefährlichkeit	9
	8
Störung des Fahrens	7
	6
	5
Spürbarkeit	4
	3
nichts bemerkt	2
	1
	0

Abbildung 1: Skala zur Bewertung der Auswirkung von Störungen.

Figure 1: Judgement scale for the assessment of the experienced degree of disturbance.

Die Skala zur Störungsbewertung wurde manöverspezifisch durch weitere Beurteilungsskalen ergänzt: Zur Bewertung der Adaptation an ein verändertes Fahrzeugverhalten wurde nach der Fahrerbeanspruchung, der erlebten Fahrsicherheit sowie der Bewertung der Fahrt (Güte der Aufgabenbewältigung vgl. /16/) gefragt. Diese Skalen bestanden jeweils aus fünf je zweifach unterteilten Grobkategorien (vgl. Abbildung 2). Im Fall der Stellfehler sollte die Stärke des Fehlers im Lenkrad, in den Fahrzeugreaktionen und das Ausmaß der resultierenden Spurabweichung angegeben werden. Hierfür standen jeweils vier Kategorien zur Verfügung (0=keine, 1=gering, 2=mittel, 3=stark). Auf die Ergebnisse der erweiterten Befragungen wird im Folgenden nicht vertieft eingegangen.

sehr gering		gering		mittel		hoch		sehr hoch	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Abbildung 2: 5x2-stufige Kategorienunterteilungsskala für die erlebte Beanspruchung.

Figure 2: 5x2-category partition scale for the assessment of subjective driver workload.

### 3.3 Übersicht über den Untersuchungsplan der Sicherheitsstudie

Zur Bewertung sicherheitsrelevanter Aspekte der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im Fehlerfall wurden in Voruntersuchungen störungssensitive Manöver spezifiziert. Zur Bewertung der Adaptation an eine veränderte Lenkübersetzung wird der Geschwindigkeitsbereich von 15-80km/h durch die Manöver Abbiegen und Wenden (U-Turn), den ISO-Spurwechsel /14/ und Slalomfahrten abgedeckt. Die Stellfehleraufschaltung erfolgte bei Geradeausfahrt mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten (50-150 km/h) sowie bei Kurvenfahrt (100km/h,  $a_y \sim 2\text{m/s}^2$ ).

Ausgehend von dem vielfach bestätigten Befund, dass selbst in standardisierten Fahrmanövern von einer extremen Fahrer-Heterogenität hinsichtlich der Bedieneingaben und Fahrstrategien auszugehen ist /15//16/, wurde grundsätzlich eine abhängige Versuchsplanung („Within-design“, Messwiederholung) verwendet. Die Systemausfälle bzw. -fehler waren jeweils eingebettet in eine Folge von Fahrten mit intaktem System und erfolgten in randomisierter Abfolge im Blindversuch. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden detaillierte Angaben zu den einzelnen Prüfmanövern der Darstellung in den Ergebniskapiteln vorangestellt. Insgesamt wurden in den Probandenversuchen über 4000 Testfahrten durchgeführt.

### **3.4 Stichprobe, Teststrecke und Versuchsfahrzeug**

An der Studie nahmen  $n=30$  normal geübte Fahrer (gleichmäßig verteilt über die Altersgruppen 25-60 Jahre, je 15 Frauen und Männer) teil. Alle Fahrer wiesen mindestens eine jährliche Fahrleistung von 10000km auf. Für die Untersuchung wurde das Prüfgelände Boxberg genutzt. Alle Fahrer hatten durch eine Anfahrtstrecke von 70km bis zum Testgelände ausreichend Gelegenheit, sich mit dem neuen Lenksystem in unterschiedlichen Fahrsituationen (Stadtverkehr, Landstraße, Autobahn) vertraut zu machen. Ergänzt wurde die Stichprobe durch  $n=5$  professionelle Versuchsfahrer der BMW AG. Die Testfahrten der Profifahrer fanden auf der BMW-Teststrecke in Aschheim statt. Für die Untersuchung stand ein instrumentiertes Fahrzeug (E39) mit skalierbarer Fehleraufschaltung zur Verfügung. Lenkradwinkel und querdynamische Reaktionen wurden jeweils redundant aufgezeichnet (Messlenkrad, CAN-Daten, Kreiselpattform).

## **4 Adaptation an ein verändertes Lenkverhalten in instationären Manövern**

### **4.1 Abbiegen / Wenden**

Die Manöver 90°-Abbiegen (Radius 12m, Fahrstreifenbreite 3m, Pylonenabstände jeweils 5m) und 180°-Wenden (Fahrstreifenbreite 3m, Radius im Kurvenscheitel 4m, vgl. die Angaben für Wendefahrbahnen nach RAS-K) decken den Niedriggeschwindigkeitsbereich ab, in dem vom Fahrer vergleichsweise große Lenkradwinkel aufzubringen sind. Durch Abschaltung des Systems zu unterschiedlichen Zeitpunkten ergaben sich verschiedene Fehlerszenarien: der Systemausfall erfolgte zum einen vor der Kurveneinfahrt und damit vom Fahrer zunächst unbemerkt, zum anderen wurde im Scheitelpunkt der Kurve abgeschaltet, woraus zusätzlich ein Lenkradschiefstand resultierte. Absolviert wurden die Manöver von  $n=14$  (Abbiegen) bzw.  $n=15$  Normalfahrern (Wenden). Die von den Fahrern selbst bestimmte Fahrgeschwindigkeit variierte zwischen 15 und 30km/h.



Die Ergebnisse dieser beiden Fahrmanöver, in denen aufgrund der niedrigen Fahrgeschwindigkeiten die größten Veränderungen in den Übersetzungsverhältnissen vorlagen, lassen sich recht kurz zusammenfassen: Beide Situationen erwiesen sich für die Fahrer als unproblematisch. Der erhöhte Lenkradwinkelbedarf und auch der bei Abschaltung im Kurvenscheitel resultierende Lenkradschiefstand fielen darüber hinaus bei der in den Prüfmanövern gegebenen hohen Aufgabengebundenheit des Fahrers zunächst nicht auf, sondern wurden erst bei der anschließenden Geradeausfahrt bemerkt. Der Systemausfall wurde in keinem Fall als beeinträchtigende Störung oder gar als sicherheitskritisch eingestuft. Alle Urteile bewegten sich im Bereich zwischen 0 (= nichts bemerkt) bis maximal 3 (= bemerkt). Spurverletzungen traten bei keiner der Prüffahrten auf.

## 4.2 ISO-Spurwechsel

Im doppelten Fahrspurwechsel /14/ wurde ein Geschwindigkeitsbereich von 30-80km/h und damit der für Lenkübersetzungsänderungen im Fehlerfall relevante Bereich abgedeckt.

Um zu vermeiden, dass das Manöver mit „angestelltem Fahrzeug“ durchfahren wird, wurde die Anfahrtsgasse abweichend von den Vorgaben nach ISO um 10m verlängert. Weiterhin wurden die Pylonenabstände aller Gassen auf 5m verkürzt. Die wesentlichen Merkmale des Manövers – nämlich seitlicher Versatz, Abstände der Spurgassen und fahrzeugabhängige Gassenbreite – entsprachen den ISO-Vorgaben. Die Geschwindigkeiten wurden in Schritten von 30, 40, 50, 60 und 80 km/h abgestuft und in aufsteigender Reihenfolge gefahren (Gruppe A: 30, 50, 80 km/h, n=14 Normalfahrer; Gruppe B: 40, 60, 80 km/h, n=15 Normalfahrer, n=5 Profifahrer). Die Fahrgeschwindigkeit wurde mittels Tempomat konstant gehalten. Die Abschaltung des Systems erfolgte im Blindversuch entweder bei Geradeausfahrt vor dem Manöver (Abbildung 3 links) oder in der zweiten Spurgasse.

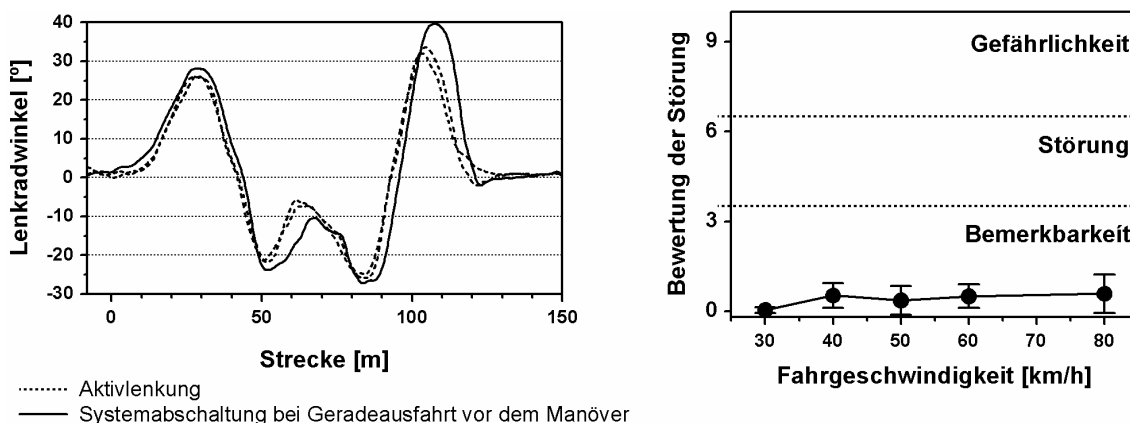


Abbildung 3: Zeitverlauf des Lenkradwinkels bei intaktem System und im Störfall bei 60km/h (links). Mittelwerte und Standardfehler der Störungsbewertungen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (rechts).

Figure 3: Course of the steering wheel angle at trials with the active steering system and in case of a system failure at a driving speed of 60km/h (left). Means and standard errors of the driver judgments on the disturbance rating scale at different driving speed (right).

Die Ergebnisse der subjektiven Beurteilungen (Abbildung 3 rechts) zeigen, dass die Veränderung der Lenkübersetzung von den Fahrern zwar bemerkt wird, der erhöhte Lenkradwinkelbedarf aber weder als Beeinträchtigung oder gar als sicherheitskritisch beurteilt wird.

Diese Bewertung deckt sich mit den Auswertungen der objektiven Größen. Weder führten die Systemausfälle zu einer Zunahme von Spurverletzungen, noch ergaben sich verstärkte querdynamische Fahrzeugreaktionen, was sich an den Effektivwerten der Giergeschwindigkeit (hier berechnet über das gesamte Manöver, Abbildung 4) belegen lässt. Vergleichbare Ergebnisse erhielten wir für weitere Kennwerte wie z.B. die Extrema der querdynamischen Bewegungsgrößen.

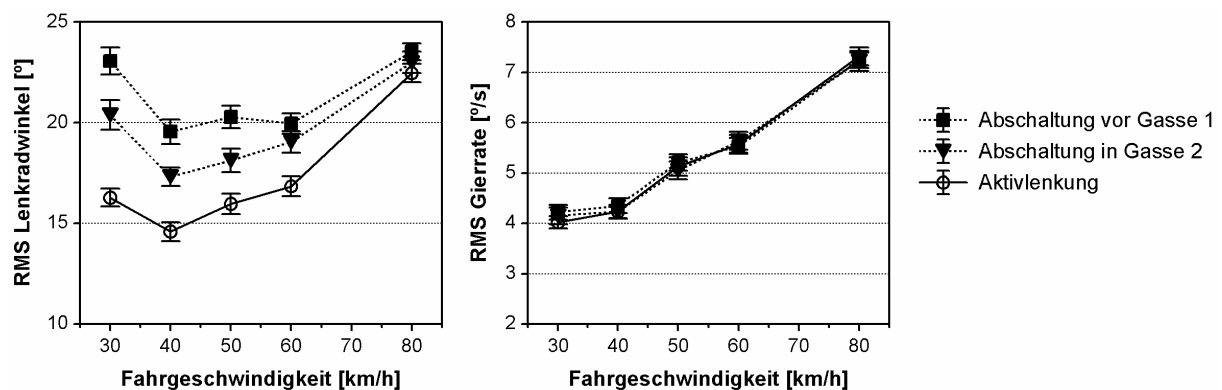


Abbildung 4: Arithmetische Mittelwerte und Standardfehler der Effektivwerte des Lenkradwinkels und der Giergeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit.

Figure 4: Mean RMS-values of steering wheel angle and yaw rate as a function of driving speed.

### 4.3 10x18m-Slalom

Slalomfahrten werden häufig zur Bewertung von Lenkungseigenschaften eingesetzt. Für die Beurteilung der Fahreradaptivität an ein verändertes Lenkverhalten ist das Manöver vor allem deshalb interessant, weil die Anpassung an die veränderte Lenkübersetzung bei hohen Lenkgeschwindigkeiten geprüft wird. Grundvoraussetzung für die Aussagekraft der aus diesem Manöver gewonnenen Ergebnisse ist, dass die Lenkaufgabe unter der Bedingung eines intakten Systems fehlerfrei erfüllt werden kann.

In Voruntersuchungen wurden als Prüfbedingungen für den 10x18m-Slalom Geschwindigkeiten von 30 und 40km/h festgelegt, die in aufsteigender Reihenfolge gefahren wurden. Höhere Geschwindigkeiten, wie sie von /9/ zur Beurteilung von Lenksystemausfällen angegeben werden, erwiesen sich als für normal geübte Fahrer kaum geeignet. Dennoch wurde das von den Autoren angegebene Tempo von 50 km/h aus Gründen der Vergleichbarkeit in die Anordnung des Probandenversuchs aufgenommen. Gefahren wurde mit konstanter Geschwindigkeit (Tempomat). Die Abschaltung des Systems erfolgte unter Blindbedingungen und randomisiert nach 4, 5 oder 6 Pylonen.

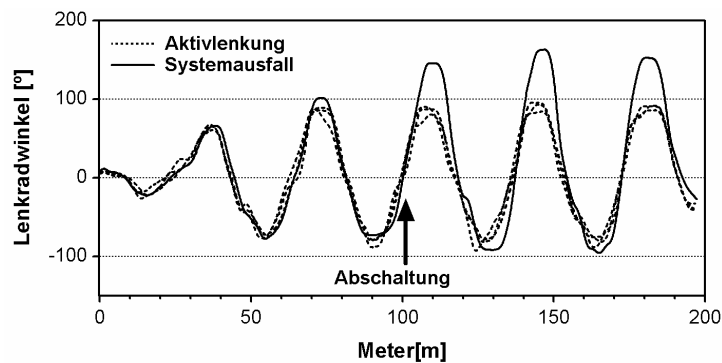


Abbildung 5: Zeitverlauf des Lenkradwinkels bei Fahrten mit Aktivlenkung und einer Fahrt mit Systemausfall bei einer Fahrgeschwindigkeit von 40 km/h.

Figure 5: Course of the steering wheel angle for trials with active steering and in case of system failure at a driving speed of 40km/h.

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen ließen sich in der Hauptuntersuchung bestätigen, in der n=25 Normalfahrer und n=4 Profifahrer die Fahraufgabe antraten. Die Mehrzahl der Normalfahrer war bis dahin nicht mit derart extremen querdynamischen Situationen und anspruchsvollen Lenkaufgaben konfrontiert. Die hohen Anforderungen spiegeln sich wider in den Urteilen zur Fahrerbeanspruchung (Abbildung 6, links). Im Vergleich zu den Profifahrern wird die Beanspruchung bereits bei Fahrten mit intaktem System als hoch eingestuft. Da drei der Normalfahrer das Manöver bei 50km/h aufgrund des überhöhten Schwierigkeitsgrads nicht absolvierten, unterschätzen die angegebenen Mittelwerte den wahren Wert.

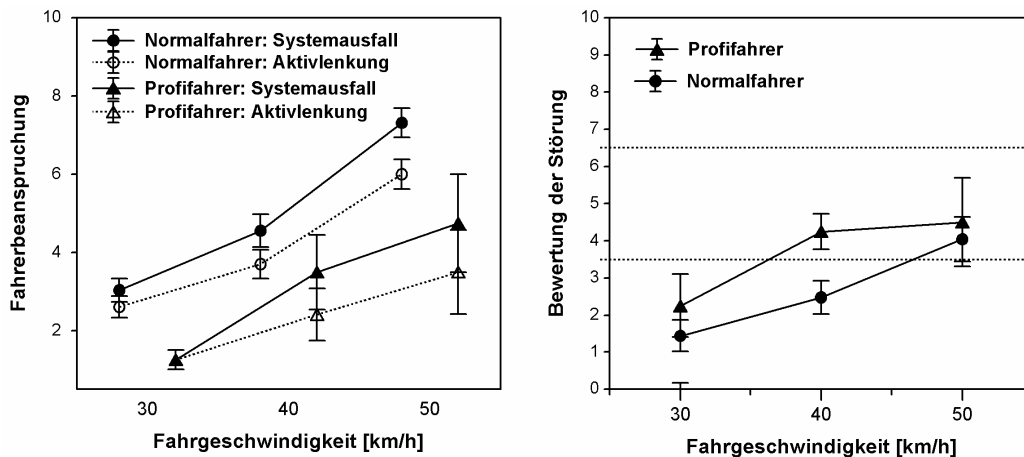


Abbildung 6: Mittelwerte und Standardfehler der Fahrerbeanspruchung und Störungsbewertung.

Figure 6: Means and standard errors of subjective judgements: driver workload and disturbance rating.

Zur Bewältigung des Manövers bei 50 km/h ist eine sehr präzise Lenktechnik erforderlich, die bei normal geübten Fahrern nicht vorausgesetzt werden kann. Dies wird sehr deutlich an der Tatsache, dass 46% der Fahrer selbst bei intaktem System nicht in der Lage waren, das Manöver fehlerfrei zu absolvieren. Individuell unterschiedliche Lenkstrategien führen dazu, dass bei 50km/h Spitzenwerte

der Querschleunigung von  $8\text{m/s}^2$  und mehr erreicht werden. In diesen Fällen, die sowohl bei intaktem System als auch im Fall des Systemausfalls auftraten, wird das Fahrzeug bereits durch Bremsingriffe (DSC) stabilisiert. Insgesamt erweist sich damit das Manöver bei Geschwindigkeiten von  $50\text{km/h}$  als wenig geeignet zur Beurteilung der Sicherheitsrelevanz der Systemausfälle. In diesen querdynamisch kritischen Situationen kommt es dann auch im Fall einer Lenksystemstörung zu einer Zunahme von Fahrabbrüchen.

In den Prüfbedingungen  $30$  und  $40\text{ km/h}$ , die bei intaktem System von den normal geübten Fahrern absolviert werden können, wird der infolge der Systemabschaltung erhöhte Lenkradwinkelbedarf deutlich bemerkt, kann aber nach Angaben der Fahrer leicht kompensiert werden. Strengere Beurteilungen werden abgegeben von den professionellen Fahrern (Abbildung 6, rechts). Eine ausfallbedingte Zunahme der Spurverletzungen (Überfahren oder Auslassen eines Pylons) lässt sich für diese Geschwindigkeiten nicht nachweisen. Der Vergleich der Extrema der Giergeschwindigkeiten und Querschleunigungen bei Fahrten mit intaktem System und im Störfall, zeigt auf, dass es bei einigen Fahrern, aber nicht durchgängig, zu einer leichten Erhöhung der querdynamischen Reaktionen kommt, die jedoch nicht zu sicherheitskritischen Situationen führt.

## 5 Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei Kurshaltungsstörungen infolge von Stellfehlern

Ausgehend von der Zielsetzung, Grenzwerte für tolerierbare Amplituden von Lenkwinkelfehlern zu definieren, waren sowohl subjektive als auch objektive Funktionen der Störungsstärke zu generieren. Diese Funktionen wurden erstellt für irreversible und reversible Stellfehler und vier unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten ( $50$ ,  $80$ ,  $100$  und  $150\text{ km/h}$ ) bei Geradeausfahrt.

Ein Untersuchungsblock umfasste Fehleraufschaltungen bei einer definierten Geschwindigkeit. Die  $n=30$  Normalfahrer wurden parallelisiert nach Geschlecht und Alter zwei Versuchsgruppen (Gruppe  $50/100\text{km/h}$  und  $80/150\text{ km/h}$ ) und unterschiedlichen Startgeschwindigkeiten zugewiesen. Die Profifahrer absolvierten Testfahrten bei jeweils drei Prüfgeschwindigkeiten ( $50$ ,  $100$  und  $150\text{km/h}$ ). Die Stärke der realisierten Fehleramplituden wurde geschwindigkeitsabhängig variiert. Um pro Fahrer den relevanten Bereich der Bemerkbarkeit bis zur Gefährlichkeitsgrenze abzudecken, war prinzipiell eine fahreradaptive Modifikation der in Voruntersuchungen definierten Bandbreiten der Stellfehler vorgesehen, von der jedoch nur in Ausnahmefällen Gebrauch gemacht wurde.

In den Untersuchungsbedingungen  $50$  und  $80\text{km/h}$  wurden die Stellfehler in einer verengten Pylonengasse aufgeschaltet, die sich mit einer Fahrbahnbreite von  $2.50\text{m}$  an die straßenbaulichen Richtlinien zur Sicherung von Arbeitsstellen (RSA) anlehnt. Bei einer Fahrzeugbreite von  $1.80\text{m}$  standen damit im Idealfall einer exakt in der Mitte zentrierten Spurhaltung jeweils  $30\text{cm}$  bis zur Fahrbahnbegrenzung zur Verfügung.

Die Konfrontation mit dem ersten Stellfehler erfolgte ungewarnt, d.h. noch vor der Information über den eigentlichen Untersuchungsgegenstand der Studie. Im weiteren Verlauf erfolgte die Fehleraufschaltung unter Blindversuchsbedingungen. Hierbei wurden zur Vermeidung ei-

ner Reaktionsvorbereitung unterschiedliche Fehlerarten (irreversibel, reversibel, Referenzfahrten ohne Fehler), Fehleramplituden und Fehlerrichtungen permutiert dargeboten. Die Erstfehler wurden zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt aufgeschaltet. Die Retest-Analyse ergab keine systematischen Unterschiede in den Urteilen und Reaktionsmustern, so dass davon ausgegangen werden kann, dass sich die Fahrerreaktionen auch nach einer Vielzahl von Versuchsdurchgängen nicht ändern (vgl. hierzu auch /22/) für die Untersuchung von Seitenwindstörungen).

## 5.1 Analyse der Störungsbewertungen

Bei der Definition von Toleranzgrenzen stellt das Fahrerurteil ein wesentliches Kriterium dar. Bevor in Abschnitt 5.2 auf die den Fahreraussagen zugrunde liegenden objektiven Gegebenheiten eingegangen wird, werden zunächst zentrale Ergebnisse der Störungsbewertungen dargestellt. Abbildung 7 zeigt dazu die Urteilsfunktionen in Abhängigkeit von nominellen Radlenkwinkelamplituden.

Zuallererst ist den Urteilsfunktionen beider Fehlerarten zu entnehmen, dass in der Untersuchung ein valider Ausschnitt der Störungsstärken abgedeckt wurde, der den Bereich der Bemerkbarkeit bis zur Grenze der Gefährlichkeit umfasst. Die Fahrer nehmen anhand der Störungsbewertungsskala deutliche Differenzierungen zwischen den Stellfehleramplituden vor. Generell werden Fehler von  $0.057^\circ$  Radlenkwinkel nur von wenigen Fahrern wahrgenommen, die Auswirkungen bleiben in der Mehrzahl der Fälle unterschwellig. Fehler von  $0.17^\circ$  werden in der Regel deutlich bemerkt, erfordern jedoch – und dies gilt für beide Fehlerarten – keinen nennenswerten kompensatorischen Aufwand. Ebenfalls im Bereich der Bemerkbarkeit bleibt ein Stellfehler von  $0.3^\circ$ , der nur einen geringen kompensatorischen Aufwand erfordert. Der Bereich der „Störung des Fahrens“ wird mit der nächst höheren Amplitude erreicht.

Während sich für den Fehler von  $0.17^\circ$  keine Abhängigkeit zur Geschwindigkeit zeigt, werden ab Amplituden von  $0.3^\circ$  die Auswirkungen der irreversiblen Fehler mit zunehmender Geschwindigkeit kritischer beurteilt. Dies ist auch der Grund, warum die hohen Fehleramplituden im Fall der irreversiblen Fehler nur noch bei einer Geschwindigkeit von 50km/h überprüft werden konnten. Generell wird die wahrgenommene Fehlerauswirkung deutlich gemindert, wenn der Stellfehler innerhalb einer Latenz von 50ms zurückgenommen wird. Diese schnelle Fehlerrücknahme innerhalb von 50ms führt auch dazu, dass die Auswirkungen der reversiblen Fehler im unteren Amplitudenbereich nicht mehr geschwindigkeitsabhängig sind. Aus der Verteilung der Fahrerantworten lässt sich hier eine kritische Grenze von  $0.57^\circ$  Vorderradlenkwinkel ableiten. Oberhalb dieses Werts sind starke Beeinträchtigungen der Fahraufgabe nicht mehr auszuschließen<sup>3</sup>.

---

<sup>3</sup> In der Untersuchung wurden für unterschiedliche Fehleramplituden Latenzzeiten bis zu 300 ms untersucht. Auf die Ergebnisse (vgl. hierzu /17/) soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden.

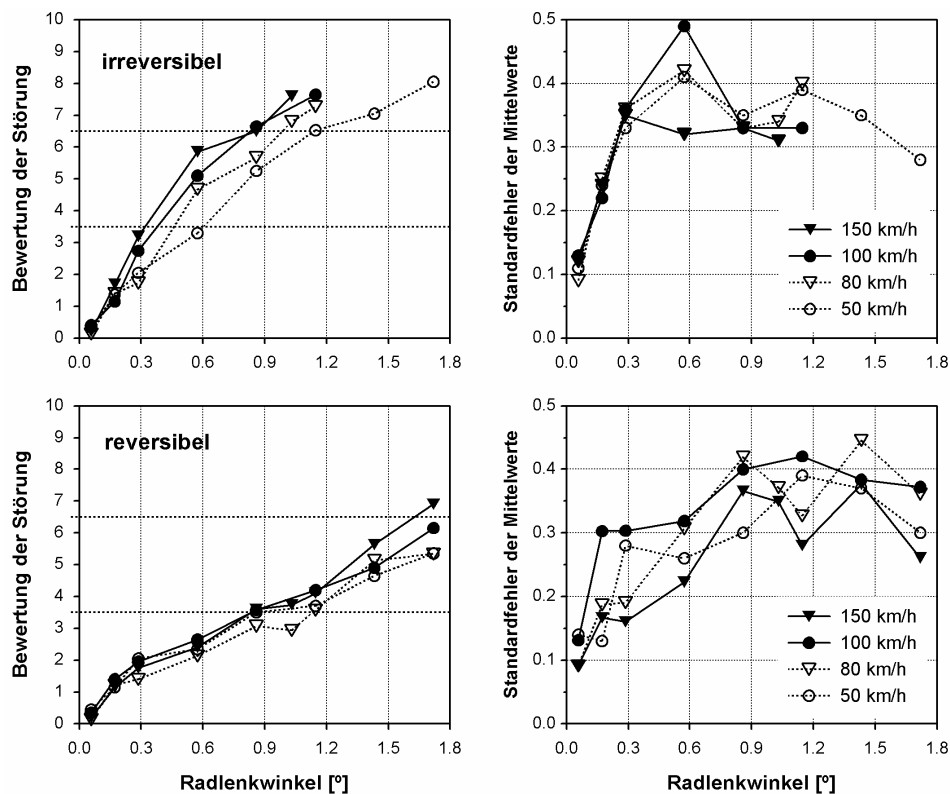


Abbildung 7: Mittelwerte (links) und Standardfehler (rechts) der Bewertungen der Störungsauswirkungen bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten.

Figure 7: Arithmetic means (left) and standard errors (right) of the driver judgement of steering angle faults at different driving speeds.

Wichtig für die Beurteilung der Ergebnisse sind neben den Mittelwerten der Urteile deren Streuung, die jeweils rechts in Abbildung 7 als Standardfehler aufgetragen ist. Mit zunehmender Fehleramplitude wird die Varianz zwischen den Fahrern größer. Allerdings verbleibt der Standardfehler im Bereich zwischen 0.1 und 0.5 Skalenteilen, ist also im Höchstfall eine halbe Skaleneinheit groß. Dies weist auf eine insgesamt und insbesondere im Bereich kleiner Fehler sehr hohe Übereinstimmung hin.

In den bisherigen Darstellungen wurden alle  $n=35$  untersuchten Fahrer berücksichtigt. Unterschiede zwischen den Alters- und Geschlechtsgruppen innerhalb der Normalfahrerstichprobe lassen sich nicht nachweisen. Deutliche Differenzen ergeben sich hingegen im Vergleich der Gruppe der Normal- und Profifahrer. Abbildung 8 zeigt dies auf für die irreversiblen Stellfehler: Die Störungsauswirkungen werden von den professionellen Fahrern durchgängig kritischer beurteilt als von den Normalfahrern. Die Form der Urteilsfunktion weist jedoch eine identische Systematik auf. Weiterhin werden die Unterschiede zwischen den beiden Fahrergruppen mit zunehmender Geschwindigkeit kleiner. Vergleichbare Ergebnisse finden sich in Bezug auf die reversiblen Stellfehler.

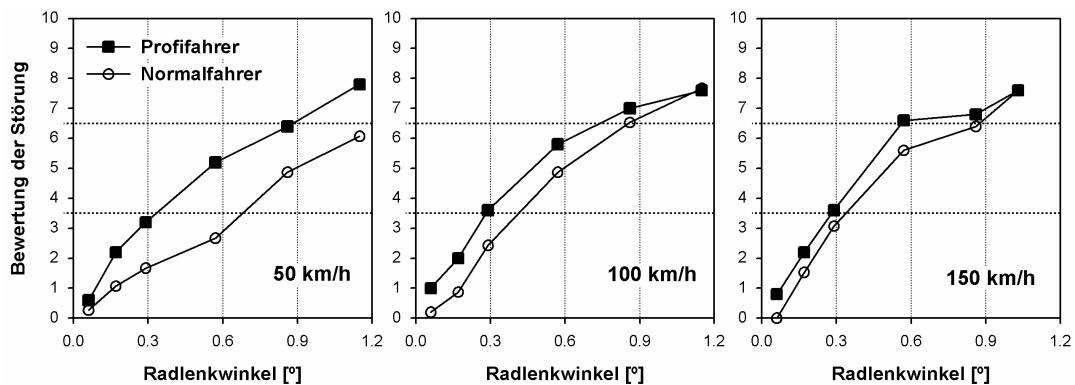


Abbildung 8: Beurteilung der irreversiblen Stellfehler durch Normal- und Profifahrer bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten.

Figure 8: Judgements given by average skilled drivers and professional drivers at different driving speeds.

Die Resultate der subjektiven Beurteilungen werden gestützt durch die Ergebnisse der Randüberschreitungen in der verengten Pylonengasse (Breite 2.50m) bei 50 und 80 km/h: bei den irreversiblen Stellfehlern wurde bis zu Radlenkwinkelamplituden von 0.3° die Fahrbahn in allen untersuchten Fällen eingehalten. Bei Amplituden von 0.57° kam es in einem einzigen Fall bei insgesamt 37 Fahrten zu einer Überschreitung der Fahrbahnbegrenzung ( $v=80\text{km/h}$ ).

Der Vergleich der Urteile mit Maßen der Spurverletzung zeigt, dass die Fahrerurteile sehr viel sensitivere Kriterien darstellen: im Fall der reversiblen Fehler kam es bis zu Fehleramplituden von 2° nicht zu Randüberschreitungen in der verengten Pylonengasse. Die dabei auftretenden starken querdynamischen Reaktionen werden von Fahrern jedoch nicht mehr toleriert.

## 5.2 Zur Systematik des Fahrereingriffs

Aussagen über die Systematik der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion im Fehlerfall setzen eine detaillierte Analyse der Zeitfunktionen der Bedieneingaben und der daraus resultierenden fahrdynamischen Reaktionen voraus. Im Fall der kritischer bewerteten irreversiblen Stellfehler lassen sich auf der Basis dieser Analysen zwei Phasen unterscheiden:

- 1) die Phase der **Erstreaktion**: das Zeitintervall bis zum Ende des ersten durch die Störung ausgelösten Fahrereingriffs
- 2) die Phase der **Fehlerkompensation**, in der die auftretende Querdynamik und die daraus resultierenden Spurbabweichungen ausgeregelt werden bzw. das Fahrzeug stabilisiert wird.

Zur Erläuterung dieser Phasen zeigt die Abbildung 9 drei unterschiedliche Typen von Reaktionsmustern. Aufgetragen sind die Zeitfunktionen des Lenkradwinkels und der Gierrate für einen Zeitausschnitt von 1.5 Sekunden, wobei der Stellfehler zum Zeitpunkt  $t=0$  ausgelöst wird.

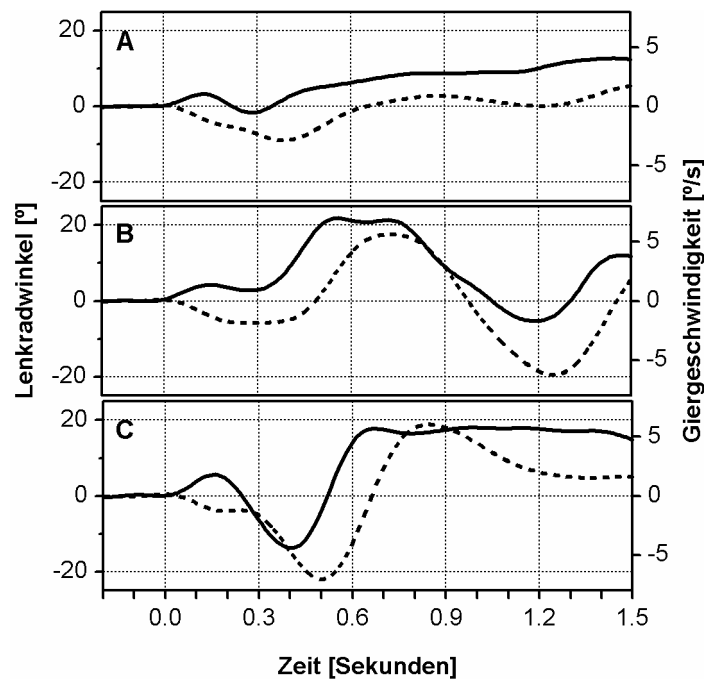


Abbildung 9: Zeitfunktionen der Lenkradwinkel (durchgezogene Linie) und Giergeschwindigkeiten (gestrichelt) dreier Fahrer bei gleicher Stellfehleramplitude (0.57 Grad,  $v=150\text{km/h}$ , Geradeausfahrt).

Figure 9: Driver reaction patterns due to steering angle faults ( $0.57^\circ$ ): steering wheel angles (solid line) and yaw rates (dotted line) measured in trials of three different drivers (straight lane driving,  $v=150\text{km/h}$ ).

Fahrer A zeigt ein Verhalten, das bei der Mehrzahl der Fahrer zu finden ist: der fehlerbedingt auftretende Lenkradwinkel wird nach 150 ms zurückgenommen. Diese erste Gegenreaktion ist nach ca. 250 ms abgeschlossen, die Fehlerkompensation wird eingeleitet. Nach ca. 600ms treten keine nennenswerten Gierraten mehr auf und der Fahrer fährt (mit einem zum Radlenkwinkel asynchronen Lenkradwinkel) stabil geradeaus.

Der im Lenkradwinkel nachweisbare Eingriffszeitpunkt bei ca. 150 ms findet sich bei allen Fahrern. Fahrer B zeigt jedoch eine sehr starke kompensatorische Lenkeingabe, die in der Folge zu einer gegenüber der Erstamplitude erhöhten Fahrzeugreaktion führt. Ein kritisches Verhalten zeigt auch Fahrer C: er beantwortet den durch den Fehler bedingten Anstieg des Lenkradwinkels mit einer sehr schnellen Gegenreaktion, die dazu führt, dass die störungsbedingt auftretenden querdynamischen Reaktionen und damit auch die Spurabweichungen verstärkt werden. Die Kompensation wird eingeleitet nach 400 ms. Auch diese Eingabe erfolgt mit hoher Lenkgeschwindigkeit und erzeugt wiederum eine hohe Gierrate in die Gegenrichtung.

Eine strikte Trennung in eine ausschließlich fahrzeugbezogene „Primärreaktion“ und eine durch den Fahrer verursachte „Sekundärreaktion“, wie sie von /20/ im Rahmen EPS-spezifischer Fehler



vorgenommen wird<sup>4</sup>, lässt sich auf die im Fall der Aktivlenkung zu beobachtenden Reaktionsmuster nicht übertragen. Unsere Analysen weisen auf, dass im Extremfall bereits die erste querdynamische Reaktion des Fahrzeugs durch den Fahrereingriff verstärkt werden kann. Die von den Autoren beschriebene lange Latenz von 0.8-1 Sekunde bis zum Einsetzen der Fahrerreaktion ließ sich in den Untersuchungsfahrten nicht nachweisen.

Aufgrund der sehr kurzen Reaktionszeiten, die die Gegenreaktion des Fahrers auf den fehlerhaft auftretenden Lenkradwinkel kennzeichnen, ist plausibel anzunehmen, dass die Erstreaktion des Fahrers eine haptisch getriggerte Reflexreaktion darstellt, die durch den im Fehlerfall auftretenden steilen Lenkmomentenanstieg ausgelöst wird.

Vergleichbar zu anderen Studien kann auch hier belegt werden, dass der Fehlerkompensation durch den Fahrer eine sehr kritische Rolle zukommt. Durch ein sehr schnelles Ausregeln einer wahrgenommenen Abweichung kann sich das Gesamtsystem Fahrer-Fahrzeug instabil verhalten. Bei der Formulierung von Kriterien zur Beurteilung der Lenksystemstörungen ist daher nicht nur die Erstreaktion, sondern gleichzeitig auch die kompensatorische Phase mit einzubeziehen. Nicht tolerierbar sind Störungsstärken, die beim Fahrer sicherheitskritische Fehlhandlungen (Verreißen des Lenkrad, etc.) auslösen.

Zur Operationalisierung dieses Kriteriums werden die in der Erst- und Zweireaktionsphase auftretenden Maximalamplituden der Gierrate herangezogen. Abbildung 10 zeigt diese für die kritischeren irreversiblen Fehler bei einer Fahrgeschwindigkeit von 150km/h. Zugrunde gelegt wird ein 2-Sekunden-Intervall nach Auftreten der Erstreaktion (in der Regel sind die Maximalwerte der Zweitreaktion innerhalb der ersten Sekunde erreicht).

Die Verteilung der durch die Kompensation ausgelösten Gierraten liegt bis zu einer Fehleramplitude von  $0.3^\circ$  Vorderradlenkwinkel deutlich unterhalb der Verteilung der durch den Fehler selbst ausgelösten Gierraten.

---

<sup>4</sup> Die Begriffe der Primär- und Sekundärreaktion werden hier nicht verwendet, da sie bereits bei /11/ mit einer anderen Bedeutung belegt sind, der sich auch in der Sicherheitsforschung durchgesetzt hat (vgl. /23/): Im Rahmen von Untersuchungen zur Fahrerreaktionszeit in kritischen Fahrsituationen umfasst die Primärreaktionszeit Prozesse der Informationsverarbeitung (Wahrnehmung, Erkennung, Entscheidung), an die sich die sekundäre Reaktion (motorische Prozesse, Umsetz- und Anlegezeiten, z.B. beim Bremsen) anschließt.

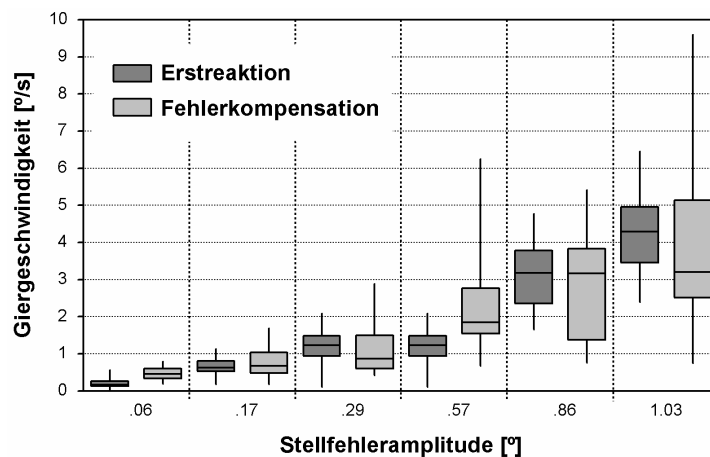


Abbildung 10: Box-Plot-Verteilungen der Absolutwerte der Maximalamplituden der Giergeschwindigkeiten für die Erstreaktion und die durch den Fahrer erzeugte Kompensation im Fall der irreversiblen Fehler ( $v=150\text{km/h}$ ).

Figure 10: Box-plot-distributions of the absolute values of the maximum yaw rates for the first and compensatory reactions (irreversible steering angle faults, driving speed:  $150\text{km/h}$ ).

Bis zur der aus den Fahrerurteilen abgeleiteten Toleranzgrenze von  $0.3^\circ$  werden durch den Fahrer eingriff keine kritischeren querdynamischen Zustände erzeugt. In der Mehrzahl der Fälle verbleiben die Gierreaktionen unter  $1^\circ/\text{s}$  und liegen damit niedriger als die störungsbedingte Erstamplitude. Nur in wenigen Fällen wird diese überschritten, erreicht aber auch dann keine sicherheitskritischen Ausmaße. Bei größeren Stellfehlern lassen sich starke, destabilisierende Fahrerreaktionen nicht mehr ausschließen. Dies wird deutlich an der hohen Varianz der Gierraten bei hohen Stellfehlern.

Eine für die Fahrsicherheit ebenso wichtige Größe wie das dargestellte Amplitudenmaß ist die Dauer der gesamten Störungsepisode. Ausgangspunkt der Überlegungen ist dabei, dass durch die Störung – sei sie fehler- oder fahrerbedingt – eine Ist-Soll-Diskrepanz entsteht, die vom Fahrer wieder ausgeglichen werden muss. Die Betrachtung des Regelaufwands bei ungestörter Geradeausfahrt zeigt, dass sich die Fahrer hierin stark unterscheiden (vgl. z.B. /6//7/). In diesem Regelaufwand schlagen sich interindividuell unterschiedliche Toleranzkriterien nieder. Die Größe eines Fehlers lässt sich beschreiben als erhöhter Regelaufwand durch die Fehlerwirkung, der dann abgeschlossen ist, wenn der individuelle Normbereich der Regelung bei ungestörter Fahrt wieder erreicht ist. Als Messgröße, in der sich der vom Fahrer wahrgenommene Regelungsbedarf abbildet, wird die Lenkradwinkelgeschwindigkeit herangezogen. Für jeden Fahrer wird bestimmt, welche maximalen Lenkgeschwindigkeiten bei ungestörter Geradeausfahrt auftreten. Dieser Wert dient als Referenzwert für den Regelbedarf im Fehlerfall. Die Dauer der Störungsepisode ergibt sich aus der Differenz des Zeitpunkts des Erreichens des individuellen Referenzwerts zum Zeitpunkt der Fehleraufschaltung.

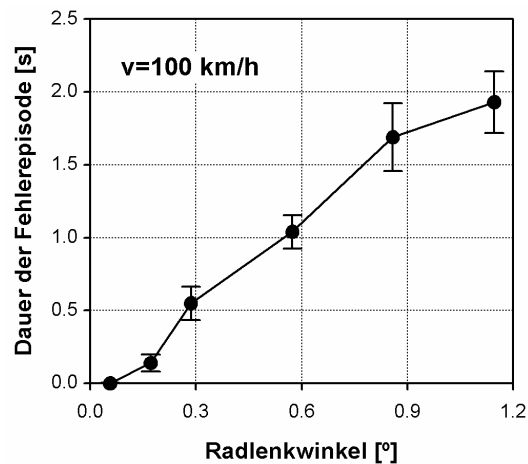


Abbildung 11: Mittelwerte und Standardfehler der Dauer der Störungsepisode im Fall irreversibler Fehler ( $v=100$  km/h).

Figure 11: Means and standard errors of the fault event durations in case of irreversible steering angle faults (driving speed: 100km/h).

In Abbildung 11 sind die aus diesem Kriterium ermittelten Zeitdauern in Abhängigkeit von der Radlenkwinkelamplitude beispielhaft für eine Fahrgeschwindigkeit von 100 km/h aufgetragen. Zu sehen ist, dass die Störungsdauer bei den als Fehlergrenzen definierten nominellen Stellfehleramplituden von  $0.3^\circ$  Radlenkwinkel im Mittel 0.6 Sekunden (Standardfehler 0.11s, Range 0-1.7s) nicht überschreitet. Die Störung kann also sehr schnell vom Fahrer ausgeglichen werden.

## 6 Zusammenfassung und Diskussion

Zur Bewertung der Sicherheitsrelevanz potentieller Lenksystemstörungen der von BMW und ZF Lenksysteme entwickelten Aktivlenkung wurde eine umfangreiche Sicherheitsstudie durchgeführt. Zwei Fehlerklassen wurden untersucht: der durch Systemabschaltung verursachte Sprung in der Lenkwinkelübersetzung und die Aufsaltung von Stellfehlern unterschiedlicher Amplitude, wobei hier noch weiter in irreversible und reversible Stellfehler unterschieden wurde. Auf Grund umfangreicher Voruntersuchungen wurde ein breites Band von Stellfehlern in störungssensitiven Fahrmanövern untersucht. Als Bewertungskriterien wurden (a) subjektive Beurteilungen anhand einer neu entwickelten Störungsskala und (b) Kennwerte aus Fahrzeugbedienung und Fahrzeugreaktionen herangezogen. Beide Kriteriensätze konvergierten zu folgenden Ergebnissen:

1. Ein aus der Systemabschaltung resultierender Sprung zu einer indirekteren Lenkübersetzung ist von Fahrern mit durchschnittlichen Fahrfertigkeiten auch bei anspruchsvolleren Lenkmanövern leicht beherrschbar. Die Fahrer zeigen durchgängig eine sehr schnelle Adaptation an das veränderte Übertragungsverhalten. Aufgrund eines plötzlich erhöhten Lenkradwinkelbedarfs ergeben sich keine Beeinträchtigungen der Fahrleistung oder gar sicherheitskritische Situationen.

2. Erwartungsgemäß und in Übereinstimmung mit anderen Studien, die den Vergleich unterschiedlicher Fahrwerkseigenschaften zum Gegenstand haben, können Systemausfälle mit Übersetzungssprüngen in Extremmanövern im fahrdynamischen Grenzbereich von normal geübten Fahrern nicht mehr ausgeglichen werden. Dies bedeutet keine Verschlechterung der fahrerischen Leistung, da dies nur in Situationen auftritt (Slalom), die auch ohne Systemausfall nicht bewältigt werden können. In diesen Situationen ist die Fahrzeugstabilisierung durch Bremsengriffe zu gewährleisten
3. Für die Stellfehler zeigt sich, dass bis zu einer nominellen Stellfehleramplitude von  $0.3^\circ$  Vorderadwinkel in allen Bewertungskriterien keine sicherheitsrelevanten Auswirkungen zu finden waren. Lenkwinkelfehler in diesem Bereich können von den Fahrern leicht kompensiert und sicher beherrscht werden.

Auf der Basis des Sicherheits- und Abschaltkonzepts der Aktivlenkung sind durch Einhaltung dieser Fehlergrenzen keine sicherheitsrelevanten Beeinträchtigungen zu erwarten /10/. Der Vergleich mit anderen Kurshaltungsstörungen /20/ weist auf, dass sich die Fehlerauswirkungen im Bereich akzeptierter Größenordnungen bewegen. Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass sich die genannten Ergebnisse nicht ungeprüft als generalisierbare Aussagen über Grenzwerte interpretieren lassen. Zu dieser Frage existiert weiterhin Forschungsbedarf.

Methodisch hat sich gezeigt, dass zur Beurteilung der Sicherheitsrelevanz eine Kombination aus subjektiven und objektiven Kriterien herangezogen werden muss. Insbesondere die im Rahmen der Sicherheitsuntersuchung entwickelte Skala zur Störungsbewertung erweist sich als sensitives Instrumentarium, das es erlaubt, differenzierte Aussagen zur wahrgenommenen Störungsstärke zu erfassen und Toleranzgrenzen zu definieren. Für eine externe Validierung, d.h. den Vergleich mit anderen Kurshaltungsstörungen (Seitenwind, Fahrbahnunebenheiten, etc.) wären Vergleichsuntersuchungen mit diesem Instrumentarium wünschenswert.

Zukünftige Forschungsbemühungen müssen sich auf die Standardisierung von Fahrmanövern konzentrieren, die eine fahrzeugunabhängige Definition sicherheitsrelevanter Kriterien erlauben. Die „alte“ Frage der Gewinnung objektiver Kriterien aus der Fahrerhandlung (Closed Loop) und die Systematik der Beziehungen zwischen Open Loop und Closed Loop gewinnen damit erneut an Aktualität (vgl. hierzu auch /15//24/). Die hier vorgestellte Analyse der Fahrerreaktion zeigt einen möglichen Weg zu diesem Ziel auf, indem sie die Fahrerreaktionen in ihrer Abhängigkeit zur Störung beschreibt. Aus der Mikroanalyse des Lenkens ergab sich:

1. Starke sprunghafte Erhöhungen des Lenkmoments können beim Fahrer reflexartige Gegenreaktionen erzeugen, die die störungsinduzierte Erstreaktion des Fahrzeugs beeinflus-

sen. Kompensatorische Reaktionen werden nach Latenzzeiten von ca. 150-200 ms initiiert. Spätestens ab hier ist der Fahrer „im Loop“.<sup>5</sup>

2. Daraus folgt, dass die Fehlerstärke nur so groß sein darf, dass sie keine kompensatorischen Gegenreaktionen erzeugt, die das Fahrzeug destabilisieren. Die kompensatorischen Reaktionen dürfen nicht größer sein als die Erstreaktionen.
3. Schließlich muss gewährleistet sein, dass die Ausregelung des Fehlers innerhalb kurzer Zeit beendet sein muss. Fahrer bewerten Störungen dann als kritisch, wenn diese Zeiten größer sind als 1-1.5 Sekunden.

In weiteren Studien ist zu überprüfen, inwieweit solche psychomotorischen Kriterien zur Definition von Grenzwerten herangezogen werden können.

## 7 Literatur

- /1/ Autorengemeinschaft (1979). Fahrer-Fahrzeug-Verhalten in kritischen Situationen. Projektgruppe der Bundesanstalt für Straßenwesen. Bereich Unfallforschung. (zitiert nach /23/)
- /2/ Baumgarten, G. (2001). Active Front Steering (AFS) - Fahrdynamische Regelung und Integration des Bremsengriffs. IIR-Fachkonferenz „Neue Trends und Entwicklungen für Fahrwerksysteme und Reifen“, Stuttgart, 24.4.2002.
- /3/ Brenner, P. (2000). Die Ausfallsicherheitsanforderungen bei elektrischen Lenksystemen. Haus der Technik.
- /4/ Buschardt, B. (2003). Synthetische Lenkmomente. VDI-Fortschrittberichte VDI, Reihe 22, Nr. 12. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- /5/ Eckrich, M., Pischinger, M., Krenn, M., Bartz, R. & Munnix, P. (2002). Die Aktivlenkung – Anforderungen an Sicherheitstechnik und Entwicklungsprozess. 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik.
- /6/ Ehlich, Heissing & Dödlbacher (1985). Messtechnische Untersuchung zum Geradeauslauf von Personenwagen. Automobiltechnische Zeitschrift, 87 (12), 675-681.
- /7/ Engels, A. (1994). Geradeauslaufkriterien für Pkw und deren Bewertung. Dissertation, TU Braunschweig.
- /8/ Fleck, R. (2003). „Aktivlenkung“ – ein wichtiger erster Schritt zum Steer-by-Wire. Tagung Haus der Technik.
- /9/ Freitag, R., Moser, M., Hartl, M., Koepernik, J. & Eckstein, L. (2001). Anforderungen an das Sicherheitskonzept von Lenksystemen mit Steer-by-Wire-Funktionalität.

---

<sup>5</sup> Diese Zeiten liegen deutlich unter denen, die sonst für Fahrerreaktionen angegeben werden. Wenn z.B. in /20/ Reaktionszeiten von 0.8-1s angegeben werden, kann sich dies nur auf Entscheidungszeiten in kritischen Verkehrssituationen (z.B. die Reaktion auf ein plötzliches auftretendes Hindernis) beziehen, nicht aber auf Reaktionen auf Störungen der Querdynamik.

- /10/Klier, W. & Reinelt, W. (2004, paper accepted for presentation). Active Front Steering: Mathematical Modeling and Parameter Estimation. SAE World Congress, Detroit, MI, USA, March 2004.
- /11/Klebensberg, D. (1982). Verkehrspsychologie. Berlin: Springer.
- /12/Köhn, P., Baumgarten, G., Richter, T., Schuster, M. & Fleck, R. (2002). Die Aktivlenkung – das neue fahrdynamische Lenksystem von BMW. 11. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik. Aachen, 08.-09.10.2002.
- /13/Köhn, P., Wachinger, M., Fleck, R., Brenner, P. & Reimann, G. (2003). Aufbau und Funktion der Aktivlenkung von BMW. Tagung Fahrwerktechnik, 02.-04.06.2003. München: Haus der Technik.
- /14/International Organisation for Standardisation (1999). Passenger cars –Test track for severe lane change manoeuvre – Part I: Double lane change, International Standard ISO 3888-1. Switzerland.
- /15/Neukum, A. (2001). Bewertung des Fahrverhaltens im Closed Loop – Zur Brauchbarkeit des korrelativen Ansatzes. In: K. Becker (Hrsg.). Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen. Korrelation zwischen objektiver Messung und subjektiver Beurteilung von Versuchsfahrzeugen und Komponenten. Haus der Technik Fachbuch, Band 12, S. 1-20. Renningen: expert.
- /16/Neukum, A., Krüger, H.-P. & Schuller, J. (2001). Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften? Tagung „Der Fahrer im 21. Jahrhundert“, Berlin 03./04. Mai 2001. VDI-Berichte, 1613, S. 13-32. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- /17/Neukum, A. & Krüger, H.-P. (2003). Fahrer-Fahrzeug-Interaktion bei Lenksystemstörungen. Unveröffentlichter Teilbericht II zum Projekt „Sicherheitsuntersuchung des Fail-Safe-Verhaltens des aktiven Vorderradlenksystems AFS (Active Front Steering)“. Forschungsstudie im Auftrag von BMW AG und ZF Lenksysteme GmbH. Würzburg: IZVV.
- /18/Reichart, G. (2001). Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen. VDI-Fortschrittberichte, Reihe22, Nr. 7. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- /19/Reinelt, W., Klier, W., Reimann, G., Schuster, W. & Großheim, R. (2004, paper accepted for presentation). Active Front Steering for Passenger Cars: Safety and Functionality. SAE World Congress, Steering & Suspension Technology Symposium. Detroit, MI, USA, March 2004.
- /20/Wallentowitz, H., Brand, W., Holle, M. & Schrüllkamp, T. (2002). Fahrerreaktionen auf Störungen der Kurshaltung. Tag des Fahrwerks. Aachen
- /21/Wierwille, W.W. & Casali, J.G. (1983). A validated rating scale for global mental workload measurement applications. Proceedings of the Human Factors Society 27<sup>th</sup> Annual Meeting. Norfolk, Virginia. Santa Monica, CA: The Human Factors Society.
- /22/Wierwille, W.W., Casali, J.G. & Repa, B.S. (1983). Driver steering reaction time to abrupt-onset crosswinds, as measured in a moving-base driving simulator. Human Factors, 25 (1), 103-116.
- /23/Zomotor, A. (1991). Fahrwerktechnik: Fahrverhalten. Würzburg: Vogel.
- /24/Zomotor, A., Braess, H.-H. & Rönitz, R. (1997). Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen. Ein Rückblick auf die letzten 20 Jahre. Teil 1 und 2. Automobiltechnische Zeitschrift 99 (12) , S. 780-786; 100 (3), S. 236-243.