

Aus:

VDI-Berichte Nr. 1613 (2001). Der Fahrer im 21. Jahrhundert. Düsseldorf: VDI-Verlag
Original kann beim Verlag bestellt werden.

Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften?

The Driver as a Measuring Instrument for Vehicle Dynamic Reactions?

Dipl.-Psych. A. Neukum, Würzburg

Prof. Dr. H.-P. Krüger, Würzburg

Dr. J. Schuller, München

Zusammenfassung

Eine Erhöhung der Fahrsicherheit wird zukünftig vor allem durch Verbesserungen der aktiven Sicherheit zu erreichen sein. Einen entscheidenden Beitrag hierzu leisten Fortschritte auf dem Gebiet der Fahrwerksentwicklung. Systembewertung und Anpassung technischer Komponenten müssen sich dabei orientieren an der Leistungsfähigkeit bzw. den Fertigkeiten normal geübter Fahrer. Aus dieser Forderung ergibt sich die Notwendigkeit, Kriterien zu gewinnen, die auf der Basis der Fahrerhandlung eine Bewertung des Fahrzeugverhaltens erlauben. Im vorliegenden Beitrag wird eine handlungsorientierte Untersuchungs- und Bewertungsmethodik vorgestellt, die in Fahrtests mit normal geübten Fahrern entwickelt wurde. Der Ansatz wird kontrastiert zu Urteilsansätzen, die herkömmlich zur Objektivierung subjektiver Fahreindrücke eingesetzt werden.

Summary

Future improvement of driving safety will be obtained particularly through enhancement of active safety. Major contributions to this come from advancements in the field of chassis design. To optimize vehicle handling qualities evaluation and adjustment of technical components have to align with the abilities resp. the skills of average drivers. To meet these demands criteria must be generated that allow the evaluation of vehicle directional response properties on the basis of driver input. This contribution presents an action-orientated approach to the evaluation of vehicle handling qualities resulting from driving maneuvers with average drivers. The methodological concept contrasts correlational approaches which are traditionally used to quantify the subjective evaluation of vehicle handling.

1 Einleitung

Der Bereich der aktiven Sicherheit bietet erhebliches Potential für Verbesserungen durch fahrerunterstützende Systeme. Die Möglichkeiten eines Fahrers, kritische Situationen zu vermeiden oder zu beherrschen, sind dabei ganz wesentlich bestimmt durch die Fahrdynamik eines Fahrzeugs. Die Frage der Wahrnehmung und Bewertung von Fahrverhaltenseigenschaften sowie die Anpassung technischer Komponenten an die Fertigkeiten der Fahrer hat deshalb einen wichtigen Stellenwert im Bereich der Fahrwerksentwicklung /2/.

Zur Beurteilung fahrdynamischer Merkmale von Pkw existiert eine Vielzahl von Testverfahren, aus denen physikalische Kenngrößen gewonnen werden. Für eine Reihe dieser Verfahren liegen mittlerweile internationale Normen vor /16/. Standardisiert wurden bislang jedoch ausschließlich sog. „open-loop“-Methoden, in denen fahrphysikalische Messungen ohne Fahrereinfluss vorgenommen werden. In bezug auf Bewertungskriterien und -methoden für das Fahrverhalten im geschlossenen Regelkreis kam es bisher nicht zu einer Einigung.

In der Praxis hat die subjektive Beurteilung von Handlungseigenschaften trotz der Fortschritte im Bereich der Fahrzeugsimulation und der Anwendung messtechnischer Verfahren bis heute einen dominanten Stellenwert und erfolgt nahezu ausschließlich durch hochqualifizierte Testfahrer. Eine Vielzahl von Forschungsarbeiten widmete sich darum der Zielsetzung, die subjektiven Fahreindrücke und Bewertungen der Fahrer zu objektivieren und damit in fahrphysikalischen Kennwerten auszudrücken.

Da nicht notwendigerweise davon auszugehen ist, dass die Bewertungsmaßstäbe und Fahrfertigkeiten professioneller Fahrer mit denen der späteren Nutzer der Fahrzeuge übereinstimmen, wird weiterhin gefordert, auch den normal geübten Fahrer mit einzubeziehen: Testverfahren im geschlossenen Regelkreis sollen „den Fahrer bzw. die Fähigkeiten des Menschen als Regler berücksichtigen“ /1, S. 515/. Mit der Frage der Bewertung durch den Normalfahrer sind eine Vielzahl weiterer Fragen verknüpft, wie z.B.

- Was erlebt der Fahrer an Fahrdynamik? (Frage der Qualitäten des Fahr- und Fahrzeug-Erlebens)
- Welche konstruktiv bedingten fahrdynamischen Unterschiede werden vom Fahrer überhaupt wahrgenommen? (Frage der Differenzierungsfähigkeit und Sensibilität des Normalfahrers in dem von ihm genutzten fahrdynamischen Bereich)

- Welche Zusammenhänge bestehen zwischen fahrphysikalischen Parametern und der Beurteilung? (Thematik „subjektive vs. objektive Bewertungsmethodik“)
- Welche Auswirkungen haben unterschiedliche Auslegungen auf das Sicherheitsgefühl des Fahrers und das Fahrerverhalten ? (Frage der Sicherheitsrelevanz technischer Fahrhilfen)

Neben einigen wenigen Studien, die sich dem Fahrerverhalten in Notsituationen widmeten, z.B. /15/, hat sich auf diesem Forschungsgebiet ein Untersuchungs- und Auswertungsansatz etabliert, der über Korrelations- und Regressionsanalysen eine direkte Verknüpfung zwischen objektiven, fahrzeugbezogenen Kennwerten und subjektiven Kriterien sucht. Herangezogen werden dazu definierte Fahrmanöver oder Fahrten im realen Verkehr, bei denen Fahrzeuge bzw. Fahrzeugvarianten zu beurteilen sind /z.B. 10, 13, 14/.

Trotz zahlreicher Forschungsbemühungen erbrachte der traditionelle Korrelationsansatz bislang keine allgemein anerkannten Bewertungsmethoden und -kriterien für das Fahrverhalten im geschlossenen Regelkreis. Insbesondere im Hinblick auf Untersuchungen an Normalfahrern waren die Urteilsansätze häufig wenig erfolgreich.

Als kritisch werden insbesondere die folgenden Punkte betrachtet:

- Die Ergebnisse der fahrphysikalischen Messungen sind extrem fahrerabhängig.
- Häufig weisen die Urteile der Fahrer nur geringe Übereinstimmungen auf, d.h. Varianten werden nicht einheitlich beurteilt (Problem der Validität).
- Die Urteile der Fahrer sind nicht zuverlässig reproduzierbar (Problem der Reliabilität).

Diese Mängel wurden in verschiedenen Untersuchungen im wesentlichen als ein Problem der angemessenen Befragungsmethodik aufgefasst /z.B. 13/.

Im folgenden wird ein Untersuchungsansatz vorgestellt, der sich nicht auf die Skalierungsproblematik und den Normalfahrer in der Rolle als Beurteiler spezifischer konstruktiver Eigenschaften konzentriert, sondern die Fahrerhandlung und die Fahrer-Fahrzeug-Interaktion in den Vordergrund der Betrachtungen rückt.

2 „Varianzquelle Fahrer“

Im Bereich der Fahrzeugführung ist generell von einer Personengruppe mit sehr heterogenen Fahrfertigkeiten auszugehen. So hat sich der Einfluss des Fahrers auf die Leistung des Gesamtsystems Fahrer-Fahrzeug nicht nur in vielen Studien als wesentlicher Faktor herausgestellt, sondern dominiert auch als Ursache in der Unfallstatistik.

Unter dem Gesichtspunkt der Bewertung von Handlungseigenschaften wird dagegen der Fahrereinfluss nicht selten als „Störfaktor“ und Varianzquelle betrachtet, der eine eindeutige Interpretation der Ergebnisse verhindert. Als Konsequenz für den Fahrversuch resultiert daraus häufig die Forderung nach einer Selektion der Probanden. Eine Beschränkung auf homogene Fahrergruppen oder gar ausschließlich professionelle Fahrer ist jedoch unter dem für Fragen der Systemgestaltung wichtigen Gesichtspunkt der Fahrsicherheit kontraindiziert.

Der im Hinblick auf Anliegen der Objektivierung des Fahrerurteils immer wieder bemängelte starke Einfluss des Fahrers auf das Ergebnis der Messung war für uns der Grund, die „Varianzquelle Fahrer“ in den Mittelpunkt der Betrachtungen zu rücken.

2.1 Genutzte fahrdynamische Leistungsbereiche

Die Anforderungen an das Gesamtsystem Fahrer-Fahrzeug sind im wesentlichen definiert durch eine gegebene Fahrsituation. In der überwiegenden Mehrzahl der Fälle begeben sich Fahrer im Alltag nicht in fahrdynamisch kritische Situationen, sondern verbleiben möglichst in einem Erfahrungsbereich, der mit einem geringen Grad an erlebter Schwierigkeit verknüpft ist. Für die Querdynamik bilden nach /4/, Beschleunigungswerte von ca. 4 m/s^2 die obere Grenze des aus dem Alltag vertrauten Erfahrungsbereichs, in dem die Fahrer die Fahraufgabe mit Hilfe fertigkeitbasierter Verhaltensweisen bewältigen können.

Ein Beispiel aus einer Befragung von Fahrern zur Tempowahl auf Autobahnen – interviewt wurden hier Besitzer von Fahrzeugen der Mittelklasse ($n=20$) – zeigt die Abbildung 1. Dargestellt sind Antwortverteilungen zur Frage nach der Schwierigkeit des Fahrens bei unterschiedlichem Tempo. Wie zu sehen ist, steigt ab etwa Tempo 150 km/h die Schwierigkeit steil an. Befragt man die Fahrer zusätzlich nach der üblicherweise bevorzugten Geschwindigkeit ergibt sich der in der Abbildung grau unterlegte Bereich. Die Fahrweise wird also in der Regel so angepasst, dass eine geringe Aufgabenschwierigkeit für den Fahrer resultiert. Aus den Verteilungen ist jedoch auch zu ersehen, dass die genutzten fahrdynamischen Bereiche eine hohe Streuung aufweisen, d.h. es liegen große Unterschiede zwischen den Fahrern vor.

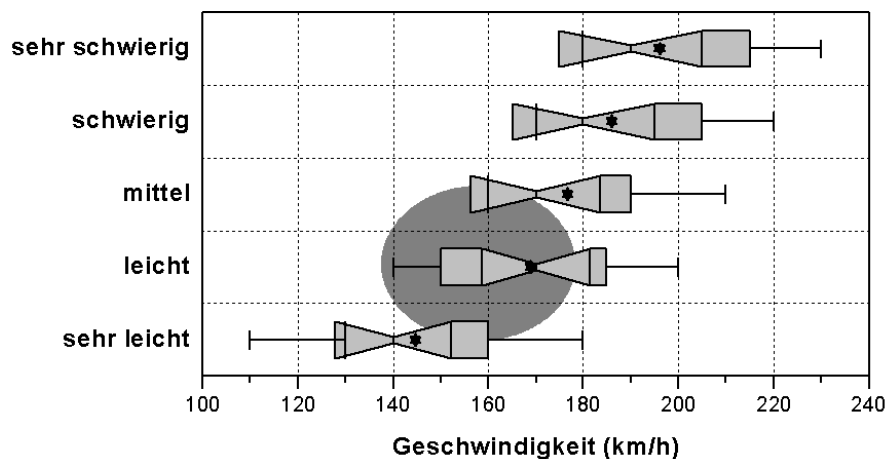


Abbildung 1: Verteilungen der Urteile zur Frage nach der Schwierigkeit bzw. erlebten Anstrengung des Fahrens bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf Autobahnen.

Figure 1: Distribution of judgments concerning the difficulty resp. effort in driving at different speed-levels on highways.

Es ist davon auszugehen, dass gegebene Fahrsituationen unterschiedliche Anforderungen an verschiedene Fahrer stellen, wobei Erfahrung und Fahrfertigkeiten hierbei eine wesentliche Rolle spielen. Genutzte fahrdynamische Bereiche sind damit nicht allein fahrzeug-, sondern insbesondere auch fahrerabhängig.

Fahrversuche mit Normalfahrern sind in der Regel auf einen Bereich beschränkt, der die Fertigkeiten der Probanden nicht überschreiten soll. In unseren Fahrversuchen beginnen wir aus diesem Grund die „Vermessung“ der einzelnen Probanden mit der Betrachtung **individuell nutzbarer Leistungsbereiche**. Diese werden aufgefasst als in einem definierten Manöver fahrbare Geschwindigkeiten, die individuell mit geringer bis hoher erlebter Schwierigkeit einhergehen und damit durch subjektive Kriterien definiert sind /vgl. auch 8, 9/.

2.1.1 Methodik: Manöver, Fahrer und Fahrzeuge

Als Fahrmanöver wurde der Doppelte Fahrspurwechsel nach ISO/TR 3888 /6/ ausgewählt, der als wichtiger closed-loop-Vergleichstest zur Prüfung des Übergangsverhaltens von Pkw allgemein Anwendung findet. Darüber hinaus liegen für dieses Testverfahren wohl die meisten Arbeiten zur Frage der Objektivierung des subjektiven Fahrempfindens vor, in denen auch Normalfahrer als Testpersonen eingesetzt wurden.

An der Versuchsreihe nahmen zwei professionelle Testfahrer sowie eine nicht selektierte Gruppe von zehn normal geübten Fahrern (vier weibliche und sechs männliche) im Alter von 24-59 Jahren und einer Jahresfahrleistung von mindestens 10.000 km teil. Die Untersuchun-

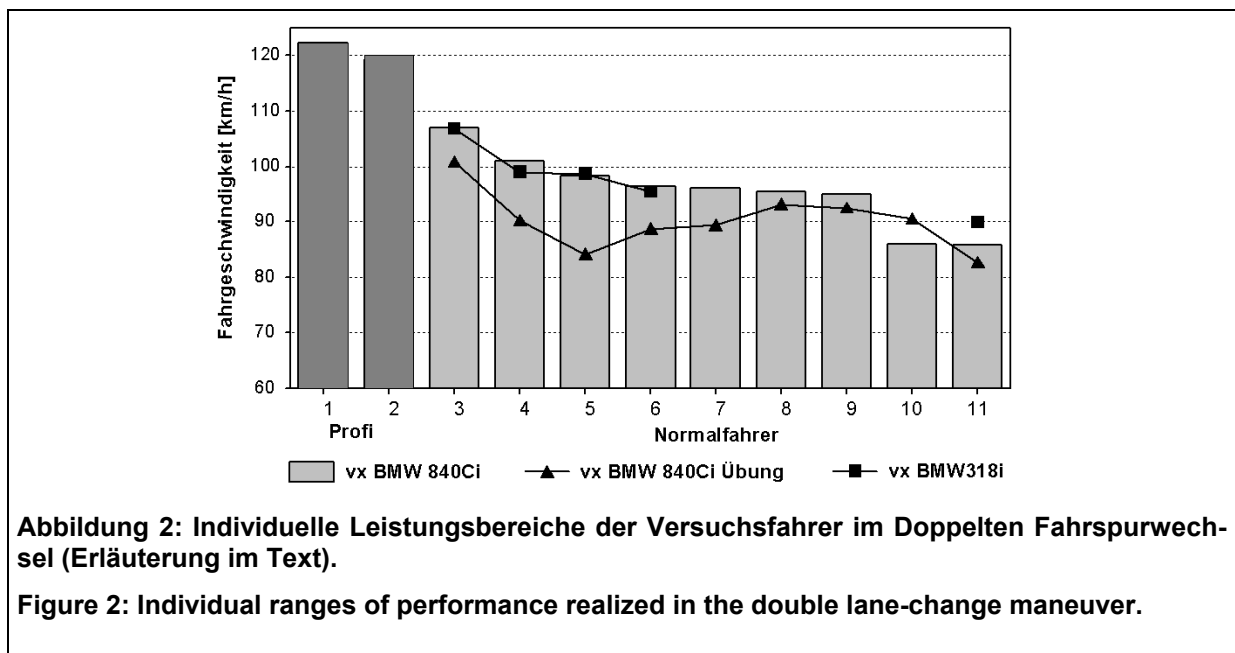
gen fanden auf dem BMW-Gelände München-Aschheim sowie auf dem Gelände der Bundeswehr-Universität München-Neubiberg statt. Absolviert wurden insgesamt mehr als 1200 Testfahrten.

In der Studie wurden zwei Fahrzeuge eingesetzt. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich in der Hauptsache auf Versuchsfahrten in einem BMW 840Ci. Dieses Experimentierfahrzeug wurde uns von der BMW-AG zur Verfügung gestellt und erlaubt Modifikationen der fahrdynamischen Eigenschaften. Im Blindversuch variiert wurden die Fahrwerkseinstellungen Aktive Hinterachs-Kinematik vs. konventionelle Hinterachse. Die Aktive Hinterachs-Kinematik (AHK) zeichnet sich gegenüber der konventionellen Auslegung durch eine Verkürzung der Phasenverschiebung zwischen Lenkradwinkel und Querbeschleunigung sowie eine Minimierung der Schwimmwinkelamplituden aus. Weiterhin besteht mit zunehmendem Mitlenkfaktor ein höherer Lenkwinkelbedarf, um gleiche Spitzenwerte der Giergeschwindigkeit und Querbeschleunigung zu erreichen (hierzu z.B. /3/). Als zweites Testfahrzeug, das hauptsächlich zur Prüfung der Auswirkungen von Variationen der Fahraufgabe eingesetzt wurde, diente ein BMW 318i. Die Ergebnisse dieser Tests sollen hier nicht detailliert dargestellt werden. An einigen Stellen werden wir jedoch auch auf diese Untersuchungsfahrten verweisen, da sie wichtige Hinweise bezüglich des Fahrerverhaltens in unterschiedlichen Fahrzeugen liefern. Beide Fahrzeuge waren ausgestattet mit Sensorik zur Messung von Bedieneingaben des Fahrers (insbesondere Lenkradwinkel und Lenkmoment) sowie von Fahrzeugbewegungsgrößen (Beschleunigungen im fahrzeugfesten Koordinatensystem, Giergeschwindigkeiten, Wankwinkel und Schwimmwinkel).

2.1.2 Leistungsbereiche im Doppelten Fahrspurwechsel

Zur Bestimmung der individuellen Leistungsbereiche wurden die Fahrer anders als beim herkömmlichen Vorgehen nicht mit einem vorgegebenen Tempo konfrontiert, sondern absolvierten den Spurwechsel, der für Normalfahrer kein aus dem Alltag vertrautes Manöver darstellt, bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Bei per Tempomat konstant gehaltener Längsdynamik wurde die Fahrgeschwindigkeit beginnend bei 60km/h jeweils in 5- bzw. 10km/h-Schritten gesteigert. Pro Stufe wurden 6-12 Fahrten in den unterschiedlichen Varianten bzw. Fahrzeugen absolviert. Die Testreihe wurden beendet, wenn der Fahrer angab, unsicher zu sein oder das Fahren subjektiv zu schwierig wurde. Den eigentlichen Testfahrten ging eine Übungsphase voraus, wobei zu betonen ist, dass die Fahrer hier nicht in der Bewältigung der Aufgabe trainiert wurden, sondern sich mit dem ungewohnten Manöver und dem Fahrzeug vertraut machten.

Das Ergebnis dieser **fahreradaptiven Variation der Anforderungen** – hier für die Fahrten im BMW 840Ci – ist in Abbildung 2 dargestellt. Wie zu erwarten, werden Geschwindigkeiten über 110 km/h ausschließlich von den beiden Profifahrern realisiert. Innerhalb der Gruppe der Normalfahrer finden wir ein sehr heterogenes Bild, wobei die Variationsbreite der Maximalgeschwindigkeiten hier von 85 bis 105 km/h reicht.



Bemerkenswert ist der Vergleich der realisierten Geschwindigkeiten in Eingewöhnungs- und anschließender Testphase (in der Abbildung sind diese für die Normalfahrer als Dreiecke eingetragen). Die Ergebnisse zeigen, dass der in den Testfahrten realisierte Bereich bereits weitgehend während der vorausgehenden Übungsfahrten abgedeckt wurde. Die Leistungsfähigkeit der einzelnen Fahrer, operationalisiert als fahrdynamisch nutzbarer Geschwindigkeitsbereich, bleibt weitgehend stabil und ist auch durch umfangreiche Erfahrungen mit der Fahraufgabe – jeder der Normalfahrer absolvierte pro Testtag mindestens 60 Spurwechsel – nicht wesentlich zu steigern.

Dieser Befund wird weiterhin gestützt durch den Vergleich des Fahrens mit unterschiedlichen Testfahrzeugen. Fünf der hier gezeigten Fahrer absolvierten an einem weiteren Versuchstag Fahrten im BMW 318i (quadratische Marker), bei denen die Maximalgeschwindigkeiten nur unwesentlich von denen abwichen, die sie im BMW 840Ci erreichten.

2.2 Fahrercharakteristische „Handschrift“ des Lenkens

Unterschiede zwischen den Fahrern bei gleichzeitig hoher intraindividuellem Stabilität finden wir nicht nur im Hinblick auf die realisierten Geschwindigkeitsbereiche, sondern auch hinsichtlich der Bedieneingaben, die in diesem Manöver auf Eingaben am Lenkrad beschränkt waren. Jeder Fahrer lässt sich charakterisieren durch ein individuell stabiles Lenkmuster, das angesichts seiner hohen Reproduzierbarkeit den Vergleich mit einer persönlichen „Handschrift“ nahe legt (vgl. z.B. /7/). Die Abbildung 3 zeigt hierzu beispielhaft die Lenkgeschwindigkeitsverläufe zweier Fahrer bei drei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten (60, 80 und 100 km/h). Deutlich zu sehen ist zum einen, dass zwischen den Lenkmustern der Fahrer – operationalisierbar als Amplituden- und Zeitverhältnisse der einzelnen Bewegungssequenzen – extreme Unterschiede bestehen und weiterhin, dass die fahrertypische Komponente über verschiedene Geschwindigkeitsbereiche erhalten bleibt.

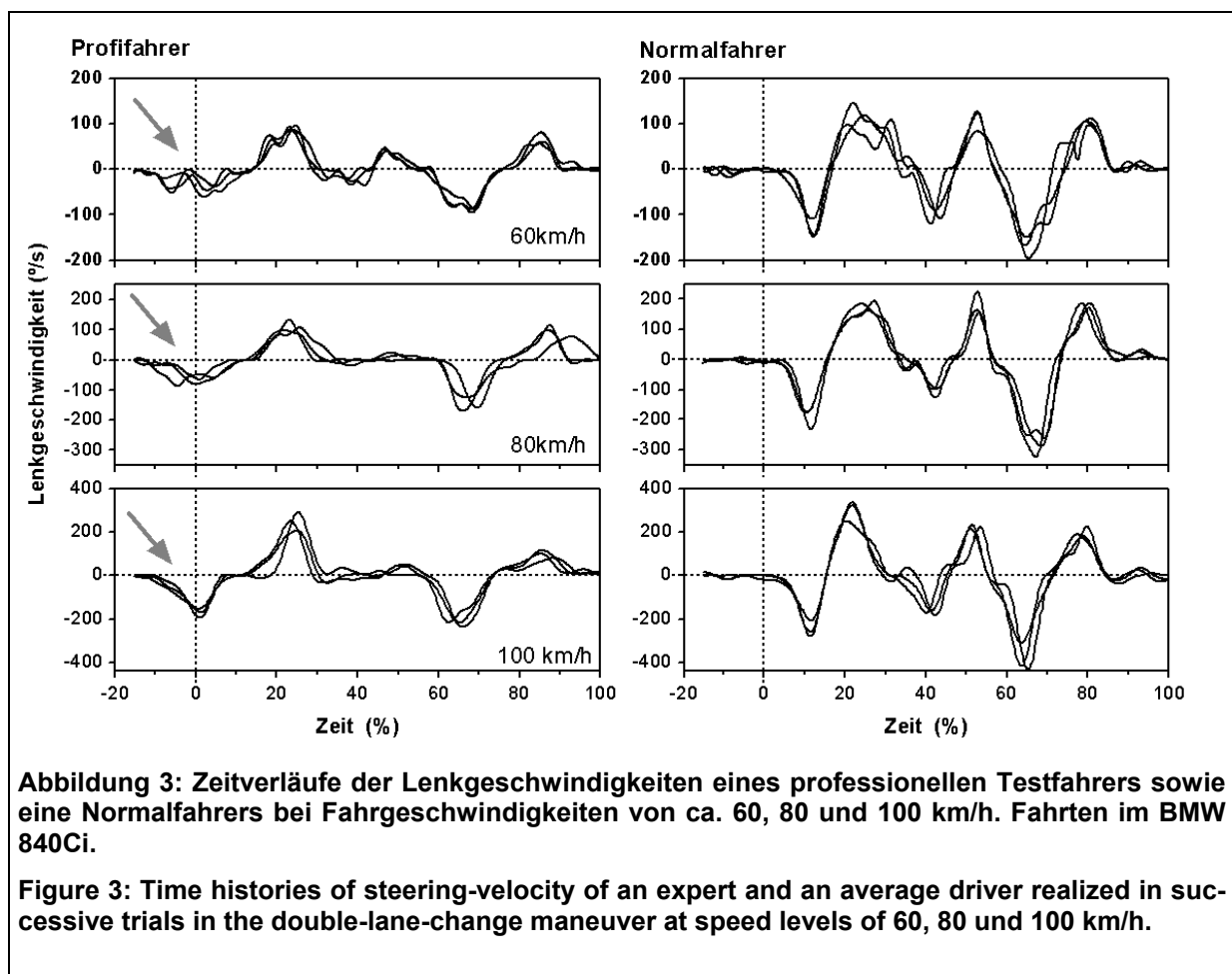


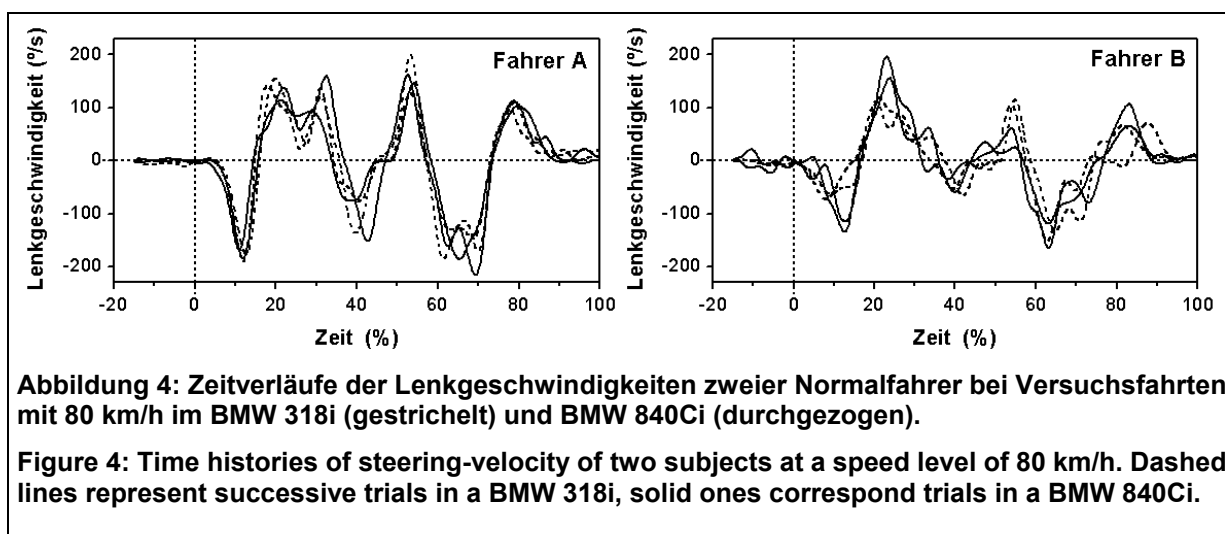
Abbildung 3: Zeitverläufe der Lenkgeschwindigkeiten eines professionellen Testfahrers sowie eine Normalfahrers bei Fahrgeschwindigkeiten von ca. 60, 80 und 100 km/h. Fahrten im BMW 840Ci.

Figure 3: Time histories of steering-velocity of an expert and an average driver realized in successive trials in the double-lane-change maneuver at speed levels of 60, 80 and 100 km/h.

Diese unterschiedlichen Fahrstrategien begründen, dass bislang ausschließlich die Streckenabmessung, nicht aber die Durchführung des Manövers genormt wurde /1/. Die derzeiti-

ge Normierung enthält jedoch weiterhin noch sehr viele Freiheitsgrade, was anhand des Lenkverhaltens des in Abbildung 3 gezeigten Profifahrers demonstriert werden kann. Der Anlenkvorgang dieses Fahrers beginnt nicht erst innerhalb der Messstrecke, sondern bereits vor dem eigentlichen Spurwechsel (Pfeile in der Abbildung). Das Lenkgeschwindigkeitsmaximum findet sich insbesondere bei höheren Fahrgeschwindigkeiten beim bzw. vor dem Eintritt des Fahrzeugs in die erste Gasse (gestrichelte Linie). Notwendige Voraussetzung für ein solches Lenkverhalten ist eine genaue Bewegungsplanung vor der eigentlichen Aufgabenausführung. Diese umfasst die Antizipation der Bewegungseffekte bzw. der aus den Fahrer-eingaben resultierenden querdynamischen Reaktionen des Fahrzeugs. Der trainierte Fahrer weist spezielle motorische Bewegungsprogramme auf, die dem normal geübten Fahrer in der Regel nicht zur Verfügung stehen.

Wie stabil oder sogar „starr“ diese individuellen sensumotorischen Programme sind, zeigt der Vergleich von Fahrten in verschiedenen Fahrzeugen. Um dies zu verdeutlichen, sind in Abbildung 4 die Lenkgeschwindigkeiten zweier Normalfahrer dargestellt, die bei Testfahrten mit 80km/h in den beiden unterschiedlichen Versuchsfahrzeugen gemessen wurden. Auch hier bleibt die fahrercharakteristische „Handschrift“ erhalten.

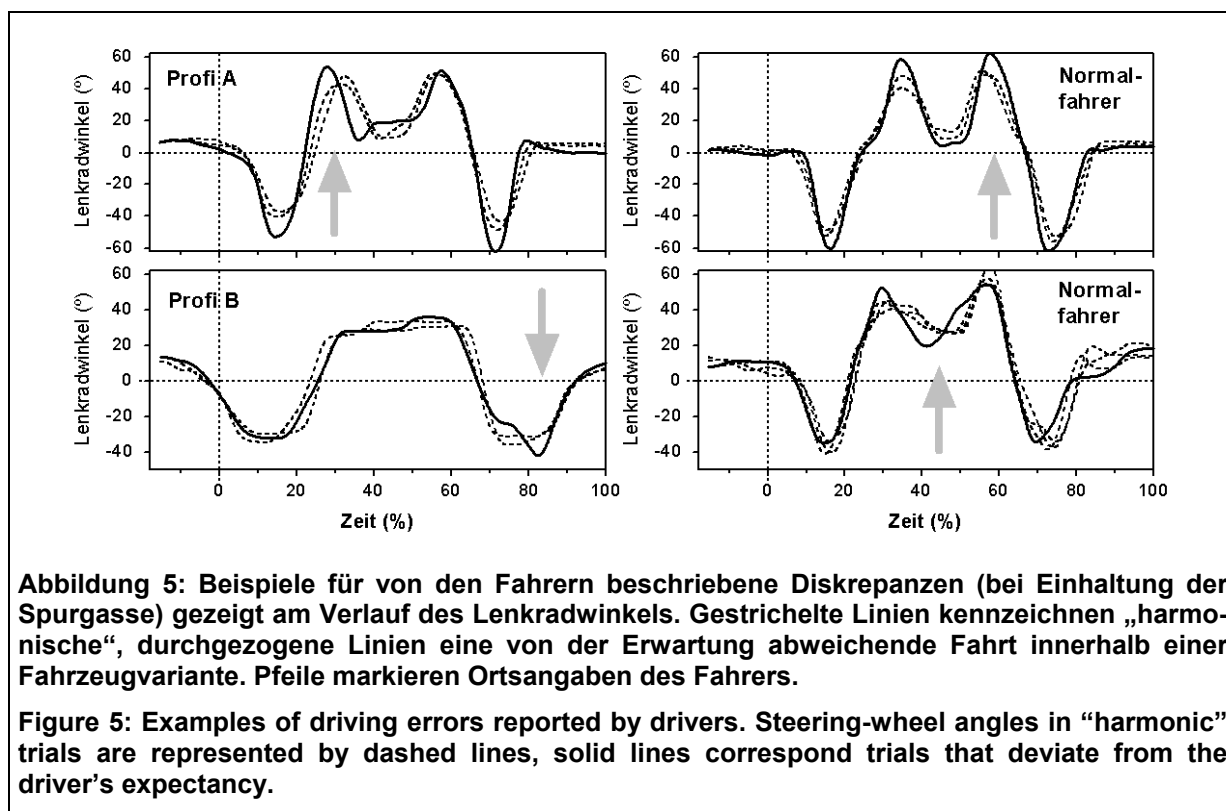


2.3 Handlungsfehler: Diskrepanzen zur „Handschrift“

Die hohe Wiederholungsgenauigkeit des individuellen Lenkmusters, wie sie beispielhaft in den Abbildungen 3 und 4 dargestellt ist, ist bei allen Fahrern die Regel. Dennoch treten in einzelnen Durchgängen teilweise deutliche Abweichungen vom individuellen Muster auf. Genau bei diesen Fahrten berichteten die Fahrer dann von „Fahrfehlern“, die den glatten Verlauf der Fahrt gestört haben. Offensichtlich geht mit dem vor der eigentlichen Bewe-

gungsausführung vorhandenen motorischen Programm eine Erwartung bezüglich des Bewegungsergebnisses einher, wobei diese Antizipation die fahrdynamischen Reaktionen des Fahrzeugs mit einschließt. Im Falle einer negativen Diskrepanz zur Erwartung des Fahrers sind kompensatorische Eingaben unterschiedlicher Stärke erforderlich, um den beabsichtigten Sollzustand wieder herzustellen.

Einige Beispiele aus unseren Versuchen zeigen, dass sich der Fahrer als sehr sensibles Messinstrument bezüglich solcher auftretenden Diskrepanzen erweist. Offensichtlich ist er in der Lage, auch kleine Veränderungen im „harmonischen“ Verlauf des Fahrens wahrzunehmen und diese zeitlich und räumlich zu lokalisieren. Die vom Fahrer berichteten – und insbesondere auch bei Einhaltung der Spurgasse auftretenden – Abweichungen lassen sich in den Bedieneingaben als Zeit- oder Amplitudendifferenzen zum intraindividuell stabilen „normalen“ Lenkmuster des Fahrers objektivieren (Abbildung 5).



Im Verlauf einer Fahrt können auftretende Diskrepanzen oder „Handlungsfehler“ (z.B. /5, 11/) durch unterschiedliche Ursachen bedingt sein. Neben äußeren Störungen (Bodenebenheiten, Seitenwind, etc.), die in unseren Untersuchungen nicht thematisiert waren, kommen sowohl der Fahrer selbst (z.B. zu früh/zu spät gelenkt) als auch die dynamischen

Eigenschaften eines Fahrzeugs, als z.B. für den Fahrer nicht erwartete oder vorhersagbare Fahrzeugreaktionen /2/, als Auslöser in Frage.

Wie unsere Untersuchungen zeigen, ist von einer sehr hohen Sensitivität der Fahrer gegenüber auftretenden Diskrepanzen auszugehen. Dagegen können jedoch – und dies mag insbesondere auch durch die hohe Komplexität des Manövers bedingt sein – sichere Angaben zur Fehlerursache, d.h. Urteilsattributionen des Fehlers als fahrer- bzw. fahrzeugbedingt, fast ausschließlich von den professionellen Fahrern, nicht aber von den normal geübten Fahrern geleistet werden.

3 Analyse der Fahrer-Fahrzeug-Interaktion

In Fahrversuchen im geschlossenen Regelkreis – und dies gilt nicht nur bei Fahrten im realen Verkehr, sondern selbst für definierte und hinsichtlich der Durchführung kontrollierbare Fahrmanöver – ist also offensichtlich von einer extremen Fahrer-Heterogenität hinsichtlich der Bedieneingaben und Fahrstrategien auszugehen. Aus dieser interindividuellen Varianz resultieren notwendig auch unterschiedliche fahrdynamische Reaktionen. Welche Variationsbreite dabei in den Fahrversuchen im BMW 840Ci realisiert wurde, sei im folgenden am Beispiel der Messgröße Querbeschleunigung demonstriert.

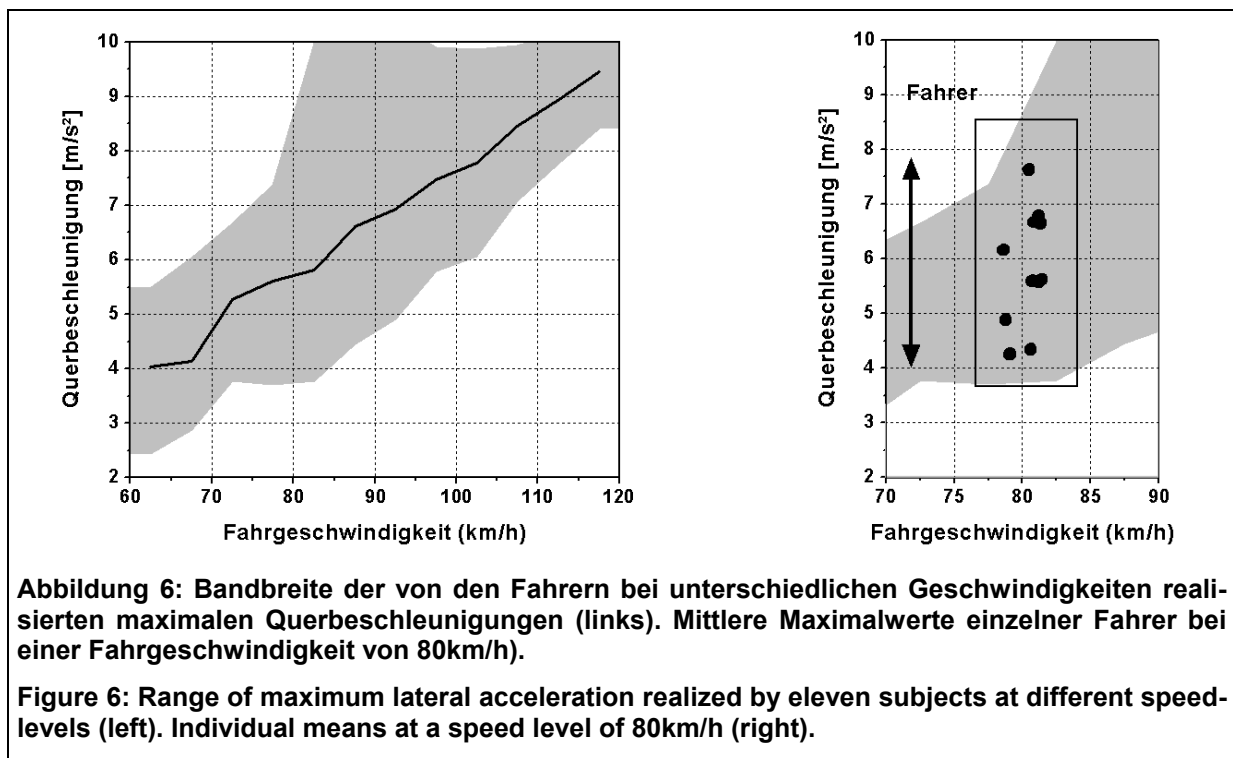


Abbildung 6: Bandbreite der von den Fahrern bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten realisierten maximalen Querbeschleunigungen (links). Mittlere Maximalwerte einzelner Fahrer bei einer Fahrgeschwindigkeit von $80 km/h$.

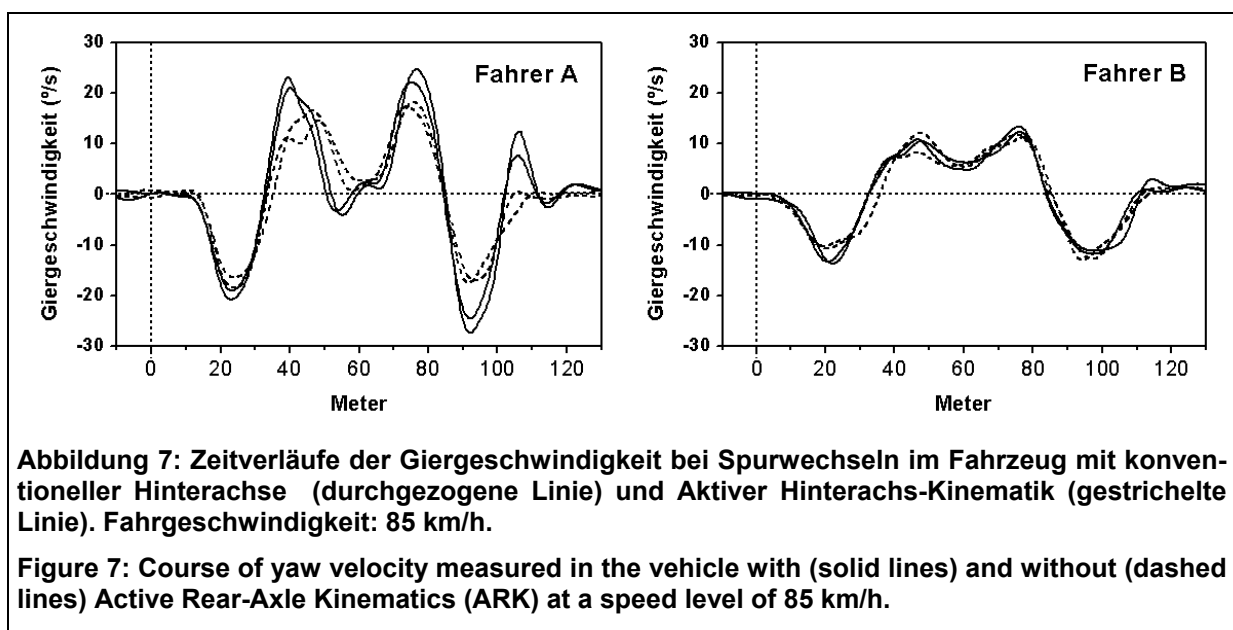
Figure 6: Range of maximum lateral acceleration realized by eleven subjects at different speed-levels (left). Individual means at a speed level of $80 km/h$ (right).

Abbildung 6 (links) zeigt hierzu die Bandbreite der gemessenen Beschleunigungsmaximalwerte in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit. Vergleicht man z.B. die von elf Fahrern absolvierten Fahrten bei der Untersuchungsbedingung von 80 km/h – ein Tempo, das sich in verschiedenen Untersuchungen mit Normalfahrern als Vorgabe findet (z.B. /13/) – lassen sich Variationen der Messwerte zwischen 4m/s^2 und 9m/s^2 verzeichnen. Diese Bandbreite querdynamischer Reaktionen resultiert im wesentlichen aus der durch unterschiedliche Fahrer eingebrachten Varianz, wie der Abbildung rechts zu entnehmen ist. Diese zeigt die über beide Fahrwerksvarianten berechneten mittleren Maximalwerte der einzelnen Fahrer.

3.1 Funktionale Individualanalyse

Die Heterogenität der Bedieneingaben unterschiedlicher Fahrer hat direkte Konsequenzen für den eigentlich interessierenden Untersuchungsgegenstand im Fahrversuch, nämlich die Frage der Unterscheidbarkeit der Varianten bzw. der Auswirkung der verschiedenen Fahrwerksauslegungen auf die subjektive Bewertung.

Den Ausgangspunkt der Überlegungen bilden dabei die aus Simulation und open-loop-Messung bekannten Fahrzeugcharakteristiken: aufgrund der Definition des Hinterradlenkwinkels der Aktiven Hinterachs-Kinematik über ein geschwindigkeits- und lenkwinkelabhängiges Kennfeld werden die fahrdynamischen Unterschiede zwischen den beiden Varianten mit steigender Geschwindigkeit und insbesondere mit der Stärke der Bedieneingaben des Fahrers deutlicher.



Mit Blick auf die Frage der Variantenbeurteilung durch einzelne Fahrer heißt dies, dass die Fahrer bei identischer Längsdynamik fahrdynamische Zustände erzeugen, in denen Differenzen zwischen den untersuchten Fahrwerksvarianten – Aktive Hinterachs-Kinematik vs. konventionelle Auslegung – unterschiedlich stark spürbar sind.

Wie verschieden die fahrdynamischen Reaktionen bei einzelnen Fahrern ausfallen können, zeigen beispielhaft die Zeitverläufe der bei Fahrten zweier Testpersonen aufgezeichneten Giergeschwindigkeiten (Abbildung 7). Beide Normalfahrer absolvierten den Spurwechsel bei einer per Tempomat konstant gehaltenen Geschwindigkeit von 80 km/h jeweils mehrfach in beiden Fahrwerksvarianten. Während in den Fahrten der Testperson B moderate Giergeschwindigkeiten gemessen werden, bei denen weiterhin keine deutlichen Unterschiede zwischen den Varianten feststellbar sind, erzeugt Fahrer A aufgrund seiner Lenkstrategie fahrdynamische Zustände, in denen die stabilisierende Wirkung der Aktiven Hinterachs-Kinematik gegenüber der konventionellen Auslegung deutlich zum Tragen kommt.

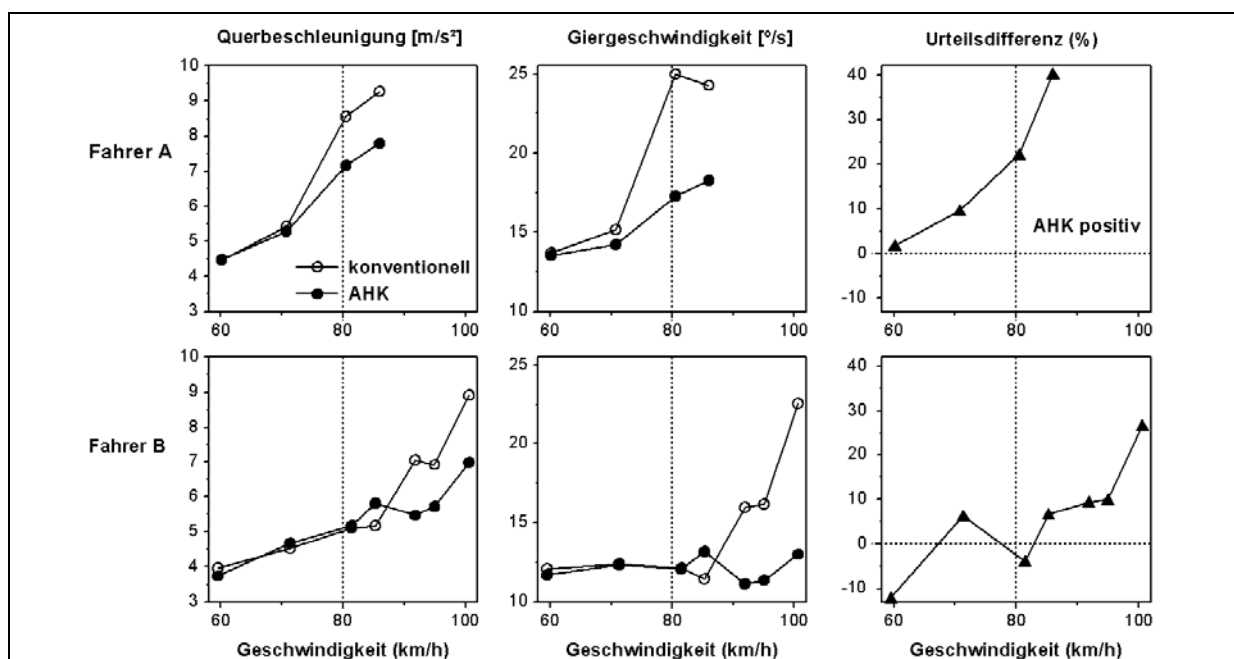


Abbildung 8: Mittlere Maximalwerte der Querschleunigung (links) und Giergeschwindigkeit (Mitte) bei Fahrten in beiden Fahrwerkseinstellungen und unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Rechts: Prozentuale Bewertungsdifferenzen (AHK – konventionelle Auslegung). Daten zweier Normalfahrer.

Figure 8: Means of maximum lateral accelerations (left) and yaw velocities (middle) at trials in the vehicle with and without ARK. Right: Percental differences in subjective evaluation (with ARK – without ARK). Individual judgments of two average drivers.

Die zwischen den Fahrwerksvarianten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten bestehenden fahrphysikalischen Unterschiede finden ihren validen Ausdruck in den Bewertungen der

Fahrer. Dies ist am Beispiel der Giergeschwindigkeiten und Querbeschleunigungen veranschaulicht in Abbildung 8. Aufgetragen sind die mittleren Maximalwerte, die beim zweiten Gassenübergang bei Fahrten in den beiden Fahrwerksauslegungen gemessen wurden.

Deutlich positivere Bewertungen erhält das Fahrzeug mit AHK im Falle des Fahrers A (oben) ab Geschwindigkeiten von 80 km/h. Dieser Fahrer erzeugt aufgrund extremer Lenkeingaben bei an sich moderaten Geschwindigkeiten bereits fahrdynamische Reaktionen im physikalischen Grenzbereich. Signifikante Urteilsunterschiede zwischen den Varianten finden sich im Fall des Fahrers B erst bei höheren Geschwindigkeiten – auch hier wird die konventionelle Auslegung deutlich schlechter beurteilt.

3.2 Aggregation der Individualdaten: Normierung individueller Leistungsbereiche

Diese Ergebnisse weisen weiterhin darauf hin, dass dem Normalfahrer im querdynamisch anspruchsvollen Bereich eine Adaptation an Fahrzeugeigenschaften nicht möglich ist. Das starre Bedienmuster, von RASMUSSEN /11/ als „regelbasiertes“ Verhalten bezeichnet, wird weitgehend beibehalten. Die fahrercharakteristische „Handschrift“ beschränkt damit auch wesentlich den bewältigbaren Geschwindigkeitsbereich.

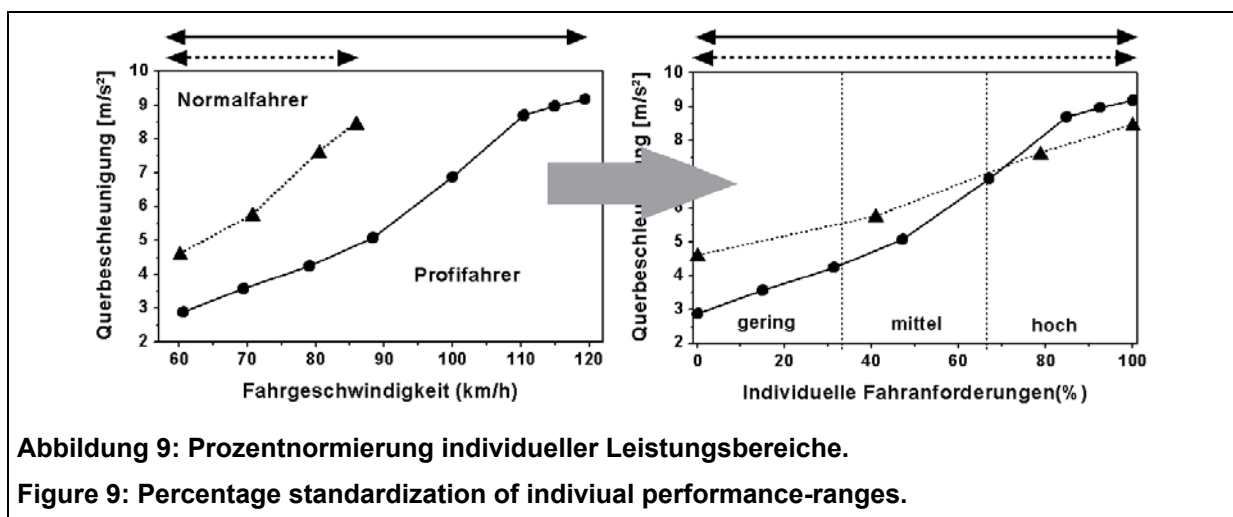


Abbildung 9: Prozentnormierung individueller Leistungsbereiche.

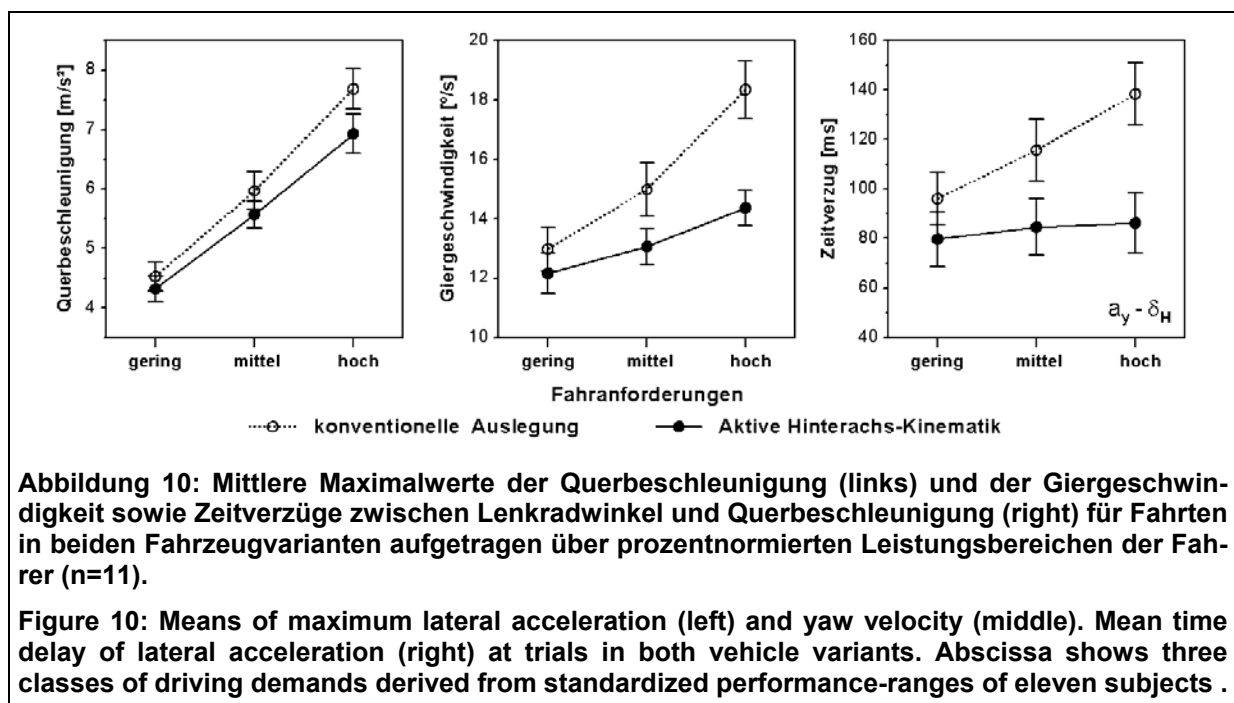
Figure 9: Percentage standardization of individual performance-ranges.

Mit objektiven, durch Vorgabe von Geschwindigkeiten definierten Aufgabenschwierigkeiten gehen somit interindividuell unterschiedliche Anforderungen einher. Unter psychologischer Betrachtungsweise kann eine Vergleichbarkeit der Fahrer über die Normierung der individuell unterschiedlichen Leistungsbereiche vorgenommen werden. Die realisierbaren Maximalleistungen der Fahrer – ausgedrückt in Geschwindigkeiten – werden dazu gleichgesetzt auf

einen Wert von 100% (Abbildung 9). Damit wird erreicht, dass die gleiche objektive Geschwindigkeit je nach individuellem Leistungsbereich in unterschiedlichen Anforderungsklassen auftreten kann. So fällt die Geschwindigkeit 80km/h des Profifahrers in die Anforderungsklasse „gering“, während die gleiche Geschwindigkeit des Normalfahrers in der Klasse „hohe“ Anforderung enthalten ist.

Die über alle Fahrer berechnete Analyse der aufgetretenen Fahrzeugreaktionen in Abhängigkeit von diesen prozenttransformierten Teil-Leistungsbereichen (Abbildung 10, links) zeigt, dass geringe Anforderungen mit Maximalwerten der Quereschleunigung von 4-5m/s² einhergehen. Hohe Fahranforderungen finden wir im querdynamischen Bereich ab 7m/s².

Mit steigenden Fahranforderungen geht eine Zunahme der Unterschiede zwischen den beiden Fahrzeugvarianten einher (Abbildung 10): Die Ansprechzeiten der Quereschleunigung auf Lenkwinkeländerungen, die aus den Kreuzkorrelationsfunktionen ermittelt wurden (rechte Abbildung), bleiben im Fahrzeug mit AHK über den gesamten Fahrbereich stabil, während bei konventioneller Auslegung eine zunehmende Phasenverschiebung vorliegt. Die Giergeschwindigkeiten und Quereschleunigungen weisen bei Fahrten mit Aktiver Hinterachs-Kinematik deutlich geringere Werte als in der konventionellen Variante.

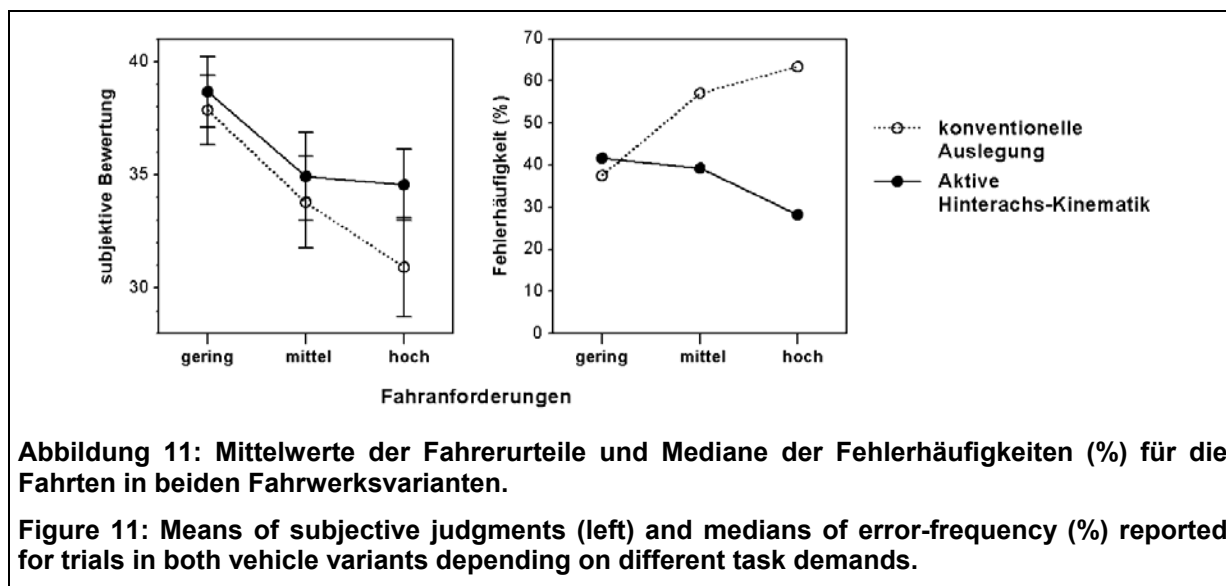


Diesen Differenzen auf Seiten der Fahrdynamik stehen klare Urteilsunterschiede im Bereich mittlerer und hoher Fahranforderungen gegenüber: das Absolvieren des Spurwechsels im Fahrzeug mit Aktiver Hinterachs-Kinematik wird hier übereinstimmend besser beurteilt. Wei-

terhin liefern die Auswertungen zur Häufigkeit des Auftretens von „Fahrfehlern“ klare Belege für die Unterschiede zwischen den beiden Fahrzeugvarianten (Abbildung 11 rechts): die Aktive Hinterachs-Kinematik führt gegenüber der konventionellen Auslegung zu einer deutlichen Unterstützung des Fahrers. Abweichungen zur Fahrer-Erwartung treten im Fahrzeug mit AHK in Bereichen mittlerer und hoher Anforderungen deutlich seltener auf.

Von den Fahrern werden, wie diese Ergebnisse zeigen, valide Differenzierungen zwischen den beiden Fahrwerksvarianten vorgenommen. In welchen Geschwindigkeitsbereichen fahrdynamische Unterschiede zwischen den beiden Auslegungen auftreten, die dann auch die Grundlage des subjektiven Berichts darstellen, ist jedoch weitgehend durch die Bedieneingaben der Fahrer bedingt. Die Frage der Validität der Fahrerurteile – im Sinne berichtbarer Unterschiede zwischen Fahrzeugvarianten, ist eine **psychophysikalische Frage der Wahrnehmbarkeit** gegebener **fahrdynamischer Unterschiede**.

Im Gegensatz zur punktuellen Messung, die Urteile verschiedener Fahrer bei einer gegebenen Geschwindigkeit vergleicht, ist mit Hilfe der funktionalen Individualanalyse aufzuzeigen, ab wann Unterschiede zwischen Fahrzeugvarianten eintreten und ob sich diese bei weiterer Steigerung ebenfalls vergrößern, woraus Hinweise auf die Stetigkeit von Erlebnisgrößen abzuleiten sind.



4 Diskussion und Ausblick

Der Ausgangspunkt war die Frage, welche Zusammenhänge fahrdynamische Eigenschaften und subjektive Beurteilungen aufweisen. Der bisherige Erkenntnisstand dazu war aus verschiedenen Gründen wenig befriedigend, wobei die Ursachen dafür vor allem im mangelndem Urteilsvermögen des Normalfahrers gesehen wurden. Verbesserungen wurden vor allem in einer mehr „laienhaft“ orientierten Befragungsmethodik gesucht. Die Ergebnisse unserer Untersuchungen zeigen jedoch auf, dass das Problem am wenigsten in der Befragungsmethodik, sehr viel stärker aber in der Untersuchungsmethodik und Gestaltung der Fahrversuche, vor allem aber in der genauen Analyse des Urteilsgegenstandes liegt.

Alle Auswertungen belegen, dass ein Fahrzeug nicht fahrdynamische Eigenschaften „an sich“ hat. Der Urteilsgegenstand entsteht erst im Fahren. Fahren ist eine Interaktion zwischen Fahrzeug und Fahrer, mithin entsteht für jeden einzelnen Fahrer der Urteilsgegenstand „Fahrdynamik“ erst im aktuellen Vollzug des Fahrens und ist damit notwendigerweise individuell. Vor allem die Analyse der Bedienmuster zeigte auf, wie interindividuell verschieden diese „Handschriften“ sind. Diese Varianz des Umgangs mit einem Fahrzeug in einer Fahrsituation trifft auf die person-unabhängigen Eigenschaften eines Fahrzeugs und schafft im aktuellen Vollzug des Fahrens bei objektiv gleicher Fahrsituation und objektiv gleicher Geschwindigkeit eine individuelle Fahrdynamik. Jede Analyse, die einen Zusammenhang zwischen fahrdynamischer Eigenschaft und Beurteilung bei objektiv gleichen Bedingungen sucht, muss daher in Schwierigkeiten geraten. Trotz objektiver Gleichheit ist der jeweils individuelle Urteilsgegenstand ein anderer. Damit aber ist der Zusammenhang zwischen fahrdynamischer Eigenschaft und Beurteilung mit der üblichen Methodik nicht bestimmbar.

Die Lösung des Problems ist methodisch über zwei Techniken zu erreichen. Da zum einen nicht vorab bestimmbar ist, bei welchen Ausprägungen eines Fahrmanövers (hier: bei welcher Geschwindigkeit) ein einzelner Fahrer welche Fahrdynamik erzeugt, ist bereits in der Untersuchungsanlage dafür zu sorgen, dass der gesamte fahrdynamisch relevante Bereich abgedeckt wird. Dies wird durch die Einführung der Methodik der Steigerungsreihe geleistet. Mit ihr eröffnet sich die Möglichkeit einer funktionalen Analyse, die quantitativ bestimmen kann, wie sich die Fahrzeugeigenschaften beim einzelnen Fahrer entwickeln.

Die zweite Konsequenz aus dieser neuen Gegenstandsbestimmung ist, dass nicht Fahrzeugeigenschaften, sondern Anforderungen aus dem Fahren beurteilt werden. Das individuelle Handling eines Fahrzeugs in einer gegebenen Situation führt dazu, dass jeder Fahrer zusammen mit dem Fahrzeug die Anforderungen bewältigen muss, die er sich in wesentli-

chen Teilen selbst geschaffen hat. Daraus resultiert aber, dass eine Untersuchung der Beurteilung innerhalb des individuellen Anforderungsbereiches zu geschehen hat. Dies wird durch die Normierung der individuellen Steigerungsreihe innerhalb der Person erreicht.

Der Einsatz beider Techniken zeigte den engen Zusammenhang zwischen Fahrdynamik und Bewertung auf. Vor allem die Analyse der subjektiven Fahrfehler demonstriert die hohe Sensibilität des Normalfahrers für Abweichungen vom „Normalen“, wobei dieses „Normale“ exakt das Fahrergebnis ist, dass er durch sein Bedienmuster zusammen mit dem Fahrzeug regelmäßig erzeugt. Daraus folgt unmittelbar, dass er auch Variantenunterschiede nur als Abweichungen von seinem „Normalen“ erfahren kann.

Die vorgelegten Ergebnisse machen auch verständlich, warum Autoren aus den Ergebnissen bisheriger Untersuchungen zu dem Schluss kommen, dass „die bisherigen Versuche über fahrdynamische Kennwerte die subjektive Bewertung zu objektivieren, [...] daher eher als gescheitert zu bezeichnen“ sind /7/. Das bisherige Verfahren, zur Bestimmung eines Variantenunterschieds die Urteile eines Fahrerkollektivs den entsprechenden fahrdynamischen Kennwerten korrelativ gegenüber zu stellen, muss im Licht unserer Ergebnisse scheitern. Betrachtet man die Bandbreite möglicher Querschleunigungen bei einer gegebenen Geschwindigkeit, erweist sich die Fahrervarianz als so groß, dass jede Hoffnung aufgegeben werden muss, innerhalb dieser Varianz noch einen Unterschied zwischen verschiedenen Fahrzeugvarianten finden zu können. Ebenso wird bei dieser Sachlage die Bestimmung von Kennwerten bei gegebenen objektiven Bedingungen zumindest für den Normalfahrer obsolet.

Ein Großteil der Problematik des bisherigen korrelationsstatistischen Ansatzes erscheint mit dieser neuen Gegenstandsbestimmung und Untersuchungsmethodologie beseitigbar. Die nächsten Schritte, die der neue Ansatz zu gehen hat, sind ebenfalls vorgezeichnet. Es gilt, Standardmanöver so umzusetzen, dass individuelle Steigerungsreihen möglich werden. Im nächsten Schritt ist genau zu analysieren, durch welche Bedienhandlungen der Fahrer „seine“ fahrdynamischen Reaktionen erzeugt und welche Auslegung diese Reaktionen optimieren kann. Hieraus ergibt sich die Forderung nach einem handlungsorientierten Ansatz, der diesen Interaktionsprozess in den Vordergrund stellt.

Analysegegenstand muss die Struktur sowie die Dynamik des Fahrer-Fahrzeug-Systems in Hinblick auf Aufnahme, Verarbeitung und Umsetzung von durch das Fahrzeug vermittelten Informationsgrößen sein. Hiermit verbunden ist die Frage der Handlungsrelevanz und damit im Sinne RASMUSSENS des Signalcharakters verschiedener Fahrzeugbewegungsgrößen /11/. Zu thematisieren sind vor allem die Auswirkungen des mit dem Aufbau fahrphysikali-

scher Größen einhergehenden propriozeptiven Feedbacks auf die Lenkeingaben des Fahrers.

Weiter wird die Betrachtung von Fahrfehlern eine entscheidende Rolle spielen. Die Analyse von Handlungsfehlern stellt ein wichtiges Methodikum der Psychologie und Ergonomie in der Systemgestaltung dar und muss künftig auch in der Frage der fahrdynamischen Systemauslegung stärker einbezogen werden (vgl. /12/).

Eindrucksvoll ist die hohe Variabilität zwischen den Normalfahrern, aber mindestens ebenso eindrucksvoll ist die hohe Stabilität der individuellen Bedienmuster. Während sich der professionelle Fahrer durch eine hohe Plastizität der Bedienung auszeichnet, die dieser fahrzeug- und variantenspezifisch einsetzen kann, um die jeweiligen Unterschiede „herauszufahren“, wendet der Normalfahrer stets die gleichen Bedienmuster an. Aus dieser Tatsache eröffnen sich für die Fahrzeugkonstruktion ganz neue Perspektiven in Richtung auf fahrerspezifische Adaptivität. Wenn es gelingt, die Auslösebedingungen für die individuellen Bedieneingaben zu bestimmen, muss es möglich sein, ein fahrerspezifisches Kennfeld zu generieren, das eine Bewertung seiner Eingaben erlaubt. Die Bedeutung eines solchen Kennfelds etwa für die fahrerspezifische Anpassung von neuen Lenksystemen ist unmittelbar evident. Über das Kennfeld wäre es möglich, die fahrerische Eingabe zu bewerten und in Richtung auf Fahrtsicherheit zu modifizieren. Entsprechende Überlegungen sind auch für den Bereich der Längsdynamik anzustellen.

Eine notwendige Voraussetzung dazu ist aber die „Vermessung“ des Normalfahrers, die sich zum Ziel setzen muss, den individuellen Zusammenhang zwischen fahrdynamischem Ausgangszustand und Bedienhandlung zu bestimmen. Der korrelative Beurteilungsansatz geht damit über in einen Ansatz der Fahrhandlung, der in seiner quantitativen und funktionalen Betrachtungsweise eine psychologisch und ergonomisch fundierte Basis für konstruktive Entscheidungen bieten kann.

5 Literatur

- /1/ BRAESS, H.-H. & SEIFFERT, U. (2000). Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik. Braunschweig: Vieweg.
- /2/ DONGES, E. (1993). Das Prinzip Vorhersehbarkeit als Auslegungskonzept für Maßnahmen zur Aktiven Sicherheit im Straßenverkehrssystem. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 9 und 10.

- /3/ DONGES, E., AUFFHAMMER, R. & FEHRER, P. (1989). Aktive Hinterachskinematik (AHK) - Neue Entwicklungsmöglichkeiten in der Fahrzeugquerdynamik. VDI-Bericht 778, 265-283. Düsseldorf: VDI.
- /4/ HACKENBERG, U. & HEISSING, B. (1982). Die fahrdynamischen Leistungen des Fahrer-Fahrzeug-Systems im Straßenverkehr. Automobiltechnische Zeitschrift, 84, S. 341-345.
- /5/ HACKER, W. (1998). Allgemeine Arbeitspsychologie. Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten. Bern: Huber.
- /6/ ISO Road Vehicles - Test Procedure for a Severe Lane-Change Manoeuvre. International Organization for Standardization, Technical Report 3888 (1975).
- /7/ JÜRGENSOHN, T. (1997). Hybride Fahrermodelle. Sinzheim: Pro Universitate Verlag.
- /8/ KRÜGER, H.-P., NEUKUM, A. & SCHULLER, J. (1999). Bewertung von Fahrzeugeigenschaften – vom Fahrgefühl zum Fahrergefühl. In H.-P. WILLUMEIT & H.KOLREP (Hrsg.). Bewertung von Mensch-Maschine-Systemen. 3. Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme, 6.-8. Oktober 1999, Berlin. Sinzheim: Pro Universitate Verlag.
- /9/ KRÜGER, H.-P., NEUKUM, A. & SCHULLER, J. (2000). A Workload-Approach to the Evaluation of Vehicle Handling Characteristics. SAE, 2000-01-0170.
- /10/ KUDRITZKI, D. (1989). Zum Einfluss querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens. VDI-Fortschritt-Bericht 132.
- /11/ RASMUSSEN, J. (1986). Information processing and human-machine interaction. An approach to cognitive engineering. New York: North-Holland.
- /12/ REICHART, G. (2000). Menschliche Zuverlässigkeit beim Führen von Kraftfahrzeugen. Dissertation. Lehrstuhl für Ergonomie, TU München.
- /13/ RIEDEL, A. & ARBINGER, R. (1997). Subjektive und objektive Beurteilung des Fahrverhaltens von Pkw. FAT Schriftenreihe, Nr. 139.
- /14/ RIEDEL, GNADLER & DIBBERN (1992). Bewertungskriterien zur Fahrverhaltensbeurteilung in Versuch und Simulation (Ermittlung neuer Kennwerte für den ISO-Spurwechsel). VDI-Bericht 1007. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- /15/ ZOMOTOR, A. (1979). Verhalten eines Fahrerkollektivs in Notsituationen. Der Verkehrsunfall, S. 246-250.
- /16/ 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.