

# FAHRVERSUCHE MIT PROBANDEN ZUR FUNKTIONSBEWERTUNG VON AKTUELLEN UND ZUKÜNFTIGEN FAHRERASSISTENZSYSTEMEN

*H. Winner, T. Barthenheier, N. Fecher, S. Luh*

## 1 ZUSAMMENFASSUNG

Fahrversuche mit Probanden zur Untersuchung von Fahrerassistenzsystemen spielten schon in der Vergangenheit eine wichtige Rolle. Am Beispiel von Adaptive Cruise Control (ACC), die typisch für die Bahnführungsassistenz angesehen werden kann, werden die Ergebnisse wesentlicher Untersuchungen vorgestellt und eingeordnet. Insbesondere wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den realen Einsatz im Feld diskutiert.

Für zukünftige Fahrerassistenzsysteme werden der Bedarf für Fahrversuche und typische Untersuchungsschwerpunkte formuliert, wobei deutlich wird, dass eine Klärung dieser Fragen unter angemessenen ökonomischen Randbedingungen nur mit Einschränkungen hinsichtlich der Übertragbarkeit möglich sein kann.

Zukünftige X-by-Wire Systeme erlauben eine adaptive und individualisierte Gestaltung der Bedienung, insbesondere des Bedingefühls. Hier kommt den Fahrversuchen mit Probanden eine Schlüsselrolle für die Entwicklung der Betätigungseinheiten zu. Untersuchungen zum Lenkgefühl zeigen exemplarisch die interindividuelle Streuung des subjektiven Lenkempfindens. Erste Ansätze für eine Entwicklungsmethodik von zukünftigen freigestaltbaren Betätigungseinheiten werden vorgestellt und diskutiert.

Abschließend werden die offenen Punkte zu den Fahrversuchen Themen übergreifend zusammengestellt.

## **2      PROBANDENFAHRVERSUCHE ZU ADAPTIVE           CRUISE CONTROL**

Die Entwicklung von Adaptive Cruise Control (ACC) wurde von Beginn an von Probandenuntersuchungen begleitet. Die erste größere Untersuchung wurde Anfang der neunziger Jahre vom TÜV Rheinland (Becker 1993 [3]) durchgeführt und nahm sich den allgemeinen Fragen zum Umgang und zur Akzeptanz der noch in den Kinderschuhen steckenden Funktion an. Jahre später wurde vom UMTRI ein sehr aufwändiger Field Operational Test (Fancher 1998 [10]) durchgeführt, der erstmals auch Langzeitaussagen erlaubte, auch wenn die verwendete technische Basis bei weitem nicht dem heutigen Serienstand entspricht. Seriennahe Systeme wurden bei Abendroth [1], Filzek [11] und Weinberger [20] untersucht. Darüber hinaus sind in der Industrie weitere Probandenfahrversuche mit ACC durchgeführt worden, die aber nicht veröffentlicht wurden.

Insgesamt wurde eine Fülle an Ergebnissen zusammengetragen, aus der hier für einige ausgewählte Kategorien einzelne Ergebnisse vorgestellt werden.

### **2.1     Akzeptanz**

Eindeutig fallen die Urteile der Versuchspersonen in allen bislang durchgeführten Studien bezüglich der Akzeptanz aus.

Becker [3] beschreibt in der Pilotstudie, dass die Probanden die Fahrt mit ACC subjektiv als weniger belastend, sicherer und entspannender einschätzen als das

manuelle Fahren. Zu dieser Überzeugung kamen sie trotz des Prototypenstatus der Versuchsträger, die zum Teil erhebliche Sensorschwächen aufwiesen. Dennoch konnten die Erwartungen der Versuchsteilnehmer an das System voll erfüllt und zum Teil sogar noch übertroffen werden. Es wird somit deutlich, dass die Probandenurteile hinsichtlich Akzeptanz und Komfort gegenüber dem Reifezustand von ACC weitestgehend robust sind.

Selbst ohne Bremseneingriff äußern die Probanden in der UMTRI-Studie hohe Zufriedenheit, die Fancher [10] auf die Reduktion des „Throttle-Stress“ zurückführt.

Nirschl und Kopf [16] stellen durch Untersuchung der Bearbeitungsqualität von Nebenaufgaben eine geringere mentale Belastung bei den Fahrern fest. Diese geben in Subjektiväußerungen eine hohe Akzeptanz zu Protokoll und merken an, dass sie ACC eher als Komfort- denn als Sicherheitssystem sehen.

Neben der globalen Zufriedenheit und Akzeptanz der Fahrer analysiert Weinberger [20] den zeitlichen Verlauf in Langzeitfahrten. Sämtliche Items wie „Spaß am System“, „Selbstverständlichkeit der Nutzung“, „Vertrautheit der Bedienung“, „Wohlfühlen“ und „Angestrenztheit“ werden prinzipiell als gut bis sehr gut eingestuft. Über der Versuchsdauer stellt sich nach anfänglicher Euphorie eine Phase relativer Ernüchterung ein, um dann zum Versuchsende durchgehend zu besseren oder deutlich besseren Bewertungen zu gelangen als zu Beginn.

Grundsätzlich negative Beurteilungen sucht man in sämtlichen bislang durchgeführten Untersuchungen vergebens, wobei allerdings zu berücksichtigen ist, dass die freiwillige Teilnahme der Probanden auf eine gewisse Technikaffinität hinweisen könnte, die mit entsprechend

positiver Grundstimmung seitens der Versuchsteilnehmer einhergehen dürfte.

Andererseits zeigen Kundenbefragungen aus dem Feld (leider nicht allgemein zugänglich) das gleiche Bild, das sich jetzt auf die fertig entwickelte Funktion bezieht.

## 2.2 Zeitlücken

Gegenstand etlicher Untersuchungen ist das Zeitlückenverhalten von Fahrern im Vergleich zwischen manueller Fahrt und der Fahrt mit ACC. Bei reinen Folgefahrern finden sich bei Abendroth [1] sowohl beim Fahrer als auch beim System Mittelwerte der minimalen Zeitlücken von 1,1s. Im Gegensatz hierzu kommt Becker [3] zu dem Ergebnis, dass die Fahrer manuell bei großem Streuband eine Häufung von Zeitlücken um 1,7s realisieren. Als Grund hierfür kann die kurvigere Versuchsstreckenführung in [3] genannt werden. Im ACC-Betrieb findet sich eine Zeitlücke von durchschnittlich 1,5s, die in der Pilotstudie als Grundeinstellung des Systems vorgegeben war. Filzek [11] findet bei Wahlfreiheit der Probanden hinsichtlich der einstellbaren Stufen von 1,1, 1,5 und 1,9s durchschnittliche ACC-Zeitlücken von 1,4s.

Deutlich kürzere Zeitlücken von 0,8s bei manueller Fahrt werden von Fancher [10] erhoben. Dieser scheinbare Widerspruch gibt Hinweis auf die schwierige Übertragbarkeit zwischen Studien, die in unterschiedlichen Verkehrsnetzen, hier USA und Deutschland, durchgeführt wurden.

Quelle	$\tau_{\text{Fahrer}}$	$\tau_{\text{ACC-Stufen}}$	$\tau_{\text{ACC}}$	Bemerkungen

Abendroth 2001	1,1s	1,1/1,5/1,9s	1,1s	BAB, BMW-Fahrer, Kurzzeit, 26VPn
Becker 1993	-	1,5s	1,5s	BAB A3 K-F, Pilotstudie, Prototypen, Kurzzeit, 20 VPn
Becker 1994	Nebenaufgabe	1,5s	1,5- 1,6s	BAB A4 K-Ac, Prototyp, Kurzzeit, 10 VPn
Fancher 1998	0,8s	1,1/1,5/2,1s	1,5s	Langzeit 2/5 Wochen, USA-Highway, kein Bremsengriff, 108 VPn
Filzek 2002	1,0s	1,1/1,5/1,9s	1,4s	BAB, BMW-Fahrer, Kurzzeit, 29VPn

Deutlich wird in allen Untersuchungen, dass bezüglich der eingestellten ACC-Zeitlücke eine Polarisierung stattfindet. Während die Probanden zu Beginn mit den Stufen „spielen“, nimmt die Verstellhäufigkeit mit zunehmender Versuchsdauer ab. Je zu etwa der Hälfte wählen die Versuchspersonen dann entweder eher kleinere oder eher größere Stufen. Angesichts der häufig gewählten kurzen Zeitlücken erscheint eine Begrenzung auf mindestens 1,0s aus Sicherheitsgründen sinnvoll.

Tiefer untersucht wurde das Wahlverhalten von Fancher [10], der feststellt, dass die einstellbaren Stufen von 1,1, 1,5 und 2,1s analog zum Alter der Versuchspersonen gewählt werden, d.h. ältere Fahrer wählen entsprechend auch größere ACC-Zeitlücken.

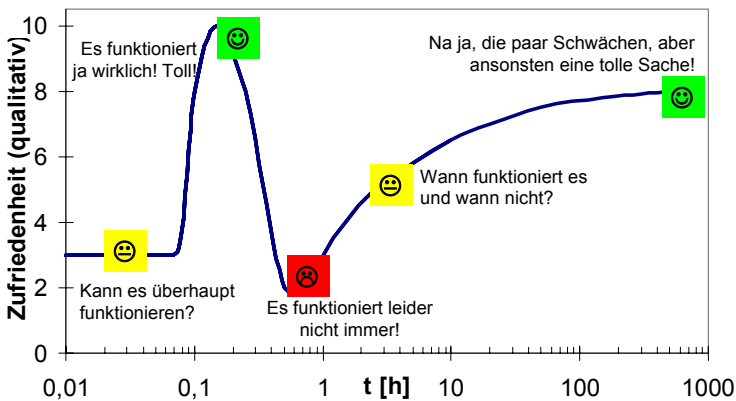
Sowohl Filzek [11] als auch Fancher beschreiben, dass sehr kleine Zeitlücken im Bereich unter 0,6s mit ACC deutlich (FANCHER: 6 mal) seltener gefahren werden.

### **2.3 Kompensation**

Becker [4] untersucht das Kompensationsverhalten von Fahrern durch Auswertung der Zeitlücken bei der Bearbeitung von komplexen Nebenaufgaben. Während die Probanden beim manuellen Fahren automatisch größere Zeitlücken einhalten, ändern sie die Wunschzeitlücke im ACC-Betrieb nicht. Eine Analyse der Blickabwendungen zeigt zudem deutlich längere Abwendungszeiten bei ACC-Fahrt, wobei maximal bis zu acht Sekunden genannt werden. Bemerkenswert ist, dass die Fahrer hierbei subjektiv ein geringeres Sicherheitsrisiko empfinden als ohne ACC. Becker kommt zu dem Schluss, dass wegen des kompensatorischen Fahrerverhaltens ein Sicherheitsgewinn durch automatische Abstandsregelung erst dann zu erwarten ist, wenn das technische System sicherheitskritische Situationen besser behandeln kann als der durchschnittliche Fahrer.

### **2.4 Habituationseffekte**

Schon früh zeigte sich bei ersten Probefahrten ein typisches Verhalten der testenden Personen, das in der Abb. 1 qualitativ illustriert ist. Beginnend mit einer oft von Skepsis geprägten Grundhaltung erfahren die Tester eine erste, fast euphorisch zu nennende Phase beim ersten Erleben dieser Assistenzfunktion. Bald aber sind erste Funktionsbegrenzungen zu erfahren und damit einher geht das Absinken der Zufriedenheit. Nach den positiven und negativen Aha-Erlebnissen schließt sich eine Lernphase an, in der der Fahrer sein mentales Modell des Systems verfeinert und Strategien für den richtigen Einsatz von ACC unter Berücksichtigung der Funktionsgrenzen entwickelt. Dabei stellt sich eine zunehmende Zufriedenheit ein.



Untersuchungen von Weinberger [19] mit Vielfahrern (>1000 km/Woche) zeigten, dass erst frühestens nach zwei Wochen ein stabiles Verhalten angenommen werden darf. Die für die Bestimmung der Lerndauer herangezogenen Merkmale waren die subjektive Beurteilung von Bedieneinfachheit und Transparenz der Übernahme-situationen sowie die Messung des Zeitpunktes (bezogen auf Time-to-collision TTC) des Fahrereingriffs in Übernahme-situationen per Datenrekorder. Hier wird deutlich, dass Fahrer unterschiedlichen Fahrstils auch unterschiedliche Lernstrategien offenbaren. Fahrer, die sich selbst als eher sportlich bezeichneten, neigten dazu, zu Beginn der Versuche später einzugreifen als gegen Ende (kleinere TTC), um die Grenzen des Systems festzustellen, wohingegen Fahrer, die sich als eher komfortbetont einstufen, ausgehend von einem frühen „misstrauischen“ Eingriff zu Beginn im Verlauf der Lernphase eher später eingriffen.

Zusammenfassend heißt dies, dass die oben genannten Merkmale erst nach dieser Lernphase für den eingeschwungenen Zustand repräsentativ sind. Aussagen einer Bewertung nach kürzerer Dauer können zumindest

für die obigen Merkmale nur mit erheblichen Einschränkungen auf den Hauptteil der Benutzungsdauer übertragen werden.

Ebenso bestätigen Nirschl und Kopf [16] ein mit dem sich über der Nutzungsdauer verfeinernden mentalen Modell einhergehenden Absinken der mentalen Beanspruchung des Fahrers.

## 2.5 Übernahmesituationen

Der prinzipiellen Einfachheit des mentalen Modells von ACC beim Fahrer ist laut Becker [4] auch zuzuschreiben, dass eine richtige Reaktion in Übernahmesituationen an Systemgrenzen bereits nach sehr kurzer Nutzung möglich ist. Fancher [10] beschreibt, dass die Probanden subjektiv sich zu 60% bereits nach einem Tag in der Lage sahen, Übernahmesituationen rechtzeitig und richtig zu erkennen. Nach einer Woche waren es dann 95% der Probanden

Weinberger [20] beschreibt, dass die Einschätzung von Übernahmesituationen subjektiv von den Probanden als unkritisch eingestuft wird, wobei diese den Fahrern mit zunehmender Nutzungsdauer eher leichter fällt. Ebenso äußern die Probanden, dass insbesondere solche Situationen leicht zu entscheiden sind, die von ACC prinzipiell nicht geleistet werden können (z.B. Einbremsen bei stehendem Fahrzeug). Es kann nachgewiesen werden, dass die mittlere Verzögerung des Fahrzeuges nach der Fahrerübernahme zu knapp 80% im Bereich bis  $2\text{m/s}^2$  liegt, der auch von ACC abgedeckt wird, woraus geschlossen werden darf, dass auch objektiv keine kritische Situation vorgelegen hat.



## 2.6 Fazit

Blickt man auf etwa 10 Jahre ACC-Probandenversuche zurück, so lässt sich in hohes Maß an Konvergenz der Ergebnisse feststellen. Dabei gäbe es genügend Gründe, die Ergebnisunterschiede gerechtfertigt hätten:

- Die Technik der untersuchten Systeme unterschied sich erheblich sowohl im Funktionsumfang als auch in der Reife.
- Die Verkehrsverhältnisse der USA sind nur bedingt mit denen von Europa vergleichbar.
- Es wurden einerseits Kurzzeitversuche und andererseits Langzeitversuche durchgeführt, wobei in Langzeitversuchen eindeutige Lerneffekte festgestellt werden konnten, die die Ergebnisse der Kurzzeitversuche in Zweifel ziehen lassen.

Offensichtlich scheint ACC zumindest in den Grundfragen robust gegen jede Art der Versuchsdurchführung zu sein. Die Grundfunktion wurde von den Fahrern von Beginn an verstanden und zwar unabhängig von den Einschränkungen der vorläufigen Systeme. Umgekehrt liefern diese Untersuchungen nur wenige Hinweise, welche Verbesserungen am wirkungsvollsten wären. Für eine Weiterentwicklung von zukünftigen ACC-Systemen, sei es mit der bekannten Grundfunktionalität oder mit einer für den Stau Einsatz erweiterten Funktion, werden sensitivere Tests benötigt.

### **3      UNTERSUCHUNGSSCHWERPUNKTE       AUSGEWÄHLTER ZUKÜNFTIGER       FAHRERASSISTENZSYSTEME**

Auch wenn zu ACC noch längst nicht alle Fragen geklärt sind, so stehen doch weitere Fahrerassistenzsysteme in den Startlöchern. Im Folgenden werden für vier Funktionen die Untersuchungsschwerpunkte für entwicklungsbegleitende HMI-Untersuchungen vorgestellt.

#### **3.1     LowSpeedFollowing**

LowSpeedFollowing (LSF) stellt die erste Generation von Stop&Go-Unterstützung dar. Der Haupteinsatzbereich ist der Stau auf Autobahnen und ähnlichen Straßen. Die Funktion beschränkt sich auf das Folgen eines Zielfahrzeugs. Eine Freifahrt mit der Möglichkeit, vor stehenden Hindernissen anzuhalten, wird nicht offeriert. Für die tatsächliche Ausgestaltung der Funktion gibt es noch viele Grundsatzfragen:

- In welchem Geschwindigkeitsbereich wird LSF angeboten (im diskutierten Bereich von 0 bis 30...60 km/h)?
- Wie ist der Übergang von und zur „normalen“ ACC-Funktion auszulegen (automatisch oder mit Betätigung eines Schalters)?
- Wie lang ist die erlaubte Anfahrpause, also welche Dauer vor einer automatische Weiterfahrt ist akzeptabel (diskutierter Wertebereich 1...100 s)?
- Ist eine Aktivierung bei betätigter Bremse sinnvoll, zumindest im Stillstand?

- Wie ist ein Zielwechsel zu gestalten (stehende Alternativziele, Abschalten nach Zielverlust)?
- Ist es notwendig, auch sehr nahe einscherende Fahrzeuge und Radfahrer zu erkennen?
- Welcher Funktionsumfang wird für enge Kurven erwartet?
- Wie und wo setzt der Fahrer diese Funktion ein?
- Welche Auswirkungen haben die unterschiedlichen Funktionen LSF und ACC auf das mentale Modell des Fahrers? Kann der Fahrer den Unterschied realisieren?

Die für neue Systeme oft gestellte Frage, ob die Funktion einen hinreichenden Kundennutzen bereitstellt, wird hier noch kaum gestellt, da schon aus ACC-Rückmeldungen erstrangig der Wunsch nach einer Staufähigkeit der ACC genannt wurde.

### **3.2 Lane Keeping Support**

Lane Keeping Support (LKS) unterstützt den Fahrer bei der Querführung, in dem eine Lenkradmomentüberlagerung ausführt wird, wenn das Fahrzeug die Fahrstreifenbegrenzung zu überqueren droht. Je nach Funktionsauslegung ist dies eine dauerhafte Führungsfunktion, die das Fahrzeug in der Fahrstreifenmitte hält, oder, im anderen Extremfall, eine haptische Spurverlassenswarnung (Lane Departure Warning). Obwohl seit etwa 15 Jahren an dieser Funktion geforscht wird, ist die Serien-einführung in Europa noch nicht greifbar. Als Hauptgrund wird die unzureichende Fahrstreifenerkennung und -interpretation genannt. Aber auch andere Fragen, z.B. inwieweit eine „Hands-on-Erkennung“ notwendig ist, und

wenn ja, wie sie zu lösen ist, sind noch nicht befriedigend geklärt.

Im Unterschied zu LowSpeedFollowing ist der Wert der Lane Keeping Support nicht gesichert. Dies gilt insbesondere deshalb, weil die Wünsche der Spurhaltung bei Baustellen und bei schlechter Sicht von den Systemen in absehbarer Zeit nicht erfüllt werden können und zudem der Wunsch nach einem ständigen Eingriff in die wichtigste Schnittstelle zwischen Fahrer und Fahrzeug seitens der Kunden fraglich ist.

### **3.3 (Semi-)Automatisches Einparken**

Seitlich und rückwärtig angebrachte Sensoren erkennen die Grenzen der Parklücke. Auf dieser Informationsbasis wird eine Solltrajektorie berechnet. Diese kann voll- oder teilautomatisch durch quer- und längsführende Fahrfunktionen umgesetzt werden. Die vollautomatische Funktion wird zurzeit noch zurückhaltend diskutiert, da die Verantwortungsschnittstelle nicht klar zu sein scheint. Das Mitagieren des Fahrers beim semiautomatischen Einparken sichert zwar eine eindeutigere Verantwortungszuweisung an den Fahrer, erschwert aber die regelungstechnische Aufgabe erheblich. Die Regelung muss gegen alle Fahrereinflüsse robust ausgelegt werden. Daraus ergeben sich folgende Fragen:

- Welche Streubreite an inter- und intraindividuellen Reaktionen ist zu erwarten?
- Mit welcher Strategie ist einem wenig kooperativen Fahrer zu „begegnen“? Ist das Verhalten auf eine bewusste Übersteuerung zurückzuführen oder ist der Fahrer nur ein „schlechter Akteur“? Wie kann das technische System diesen Unterschied erkennen oder tolerieren?

- Welche Information und welcher Informationskanal führen zum gewünschten Ergebnis?
- Inwieweit überprüft der Fahrer den Vorschlag? Ist die Verantwortung noch hinreichend stark beim Fahrer?

### **3.4 Nachtsichtsysteme**

Obwohl in Kleinserie schon auf dem Markt verfügbar, werden die Nachtsichtsysteme noch kontrovers diskutiert. Zum einen über die Frage, welche Technologie (nahes Infrarot mit IR-Scheinwerfern oder Wärmebild mit fernem IR) einzusetzen ist, und zum anderen, wie das Bild der Nachtsichtkamera zu präsentieren ist, damit wirklich ein Sicherheitsgewinn erzielt wird.

- Welche Anzeige ist zu wählen und wie ist sie bzgl. Position, Größe und Auflösung auszulegen?
- Wie kann dem Fahrer die Interpretation des Nachtsichtbildes erleichtert werden?
- Wie verändert sich das Zusammenwirken Fahrer/Nachtsichtsystem bei zunehmender Müdigkeit?
- Wie ändert sich die Fahrweise durch die gewonnene Nachtsicht-Fähigkeit?

## **4 ANFORDERUNGEN AN DIE METHODIK FÜR HMI-UNTERSUCHUNGEN ZU FAHRERASSISTENZ-SYSTEMEN**

### **4.1 Entwicklungsinstrument Fahrversuche mit Probanden**

Die Erfahrungen mit den Fahrversuchen bei der Entwicklung von ACC haben gezeigt, dass sie frühzeitig und, wie sich später im Vergleich mit Kundenrückmeldungen gezeigt hat, auch richtig den Wert einer neuen Funktion bestimmt haben. Andererseits haben die Untersuchungen die Funktionsentwickler nur wenig beeinflusst, da sie offensichtlich auch ohne systematische Untersuchung ein gutes „Gefühl“ für die Funktion und deren Wirkung hatten. Die Untersuchungsergebnisse haben immerhin erheblich zur Beruhigung des Managements beigetragen.

Die im vorherigen Abschnitt genannten neuen Assistenzfunktionen besitzen höhere Ansprüche an die Integration von Human Factors Engineering in den Entwicklungsprozess. Doch nur wenige der genannten Fragen können im Labor oder in Fahr simulatoren beantwortet werden. Also bleibt nur der Weg der Systemerprobung per Fahrversuche mit Probanden. Aber dabei stellt sich folgendes Dilemma:

Es stehen nur wenige Versuchsträger zur Verfügung – und die oft noch mit unausgereifter Technik. Vor einer Weiterentwicklung und Versuchsträgerreproduktion sollte aber die Technik in den Grundzügen definiert sein. Dazu bedarf es vorher einer Klärung von Grundsatzfragen mittels aussagekräftiger Probandentests. Die benötigten ihrerseits, damit die zu klärende Frage auch verlässlich beantwortet werden kann, eine breite Technikunterstützung mit einer für die zukünftige Funktion mög-

lichst repräsentativen Technik. Und genau die steht nicht zur Verfügung.

Bei den begrenzten Entwicklungsbudgets und dem Zeitfaktor (Time-to-Market) wird die Entwicklung daher wohl weiterhin von Entscheidungen „aus dem Bauch heraus“ geprägt sein, verbunden mit der Hoffnung, dass die Human-Factors-Untersuchungen ihnen in der Spätphase Recht geben werden.

## 4.2 Human-Factors-Untersuchungen für die Freigabe

Seit Beginn der 90er Jahre setzt sich die Ansicht durch, dass zur Sicherheit eines technischen Systems die Beherrschbarkeit der Technik durch den Nutzer gehört. Diese Anforderungen sind u.a. in der Response-Checkliste für „Advanced Driver Assistant Systems“ aufgeführt. Typische Fragestellungen sind:

- Do the system reactions correspond to the previous experiences and expectations derived from driving or using related systems (expectation conformity)?
- Can critical situations arise if the user (driver) wants to activate the system and the system is not available?
- Is it likely that the user (driver) of a car equipped with the system will misinterpret a system message?
- Are the limitations of correct operation comprehensible and predictable for the driver in different environments, weather and visibility conditions (e.g. fog, animals...)?
- Is the system function intuitively understandable (i.e. without user manual)?

Zur Beantwortung der Fragestellungen sind gezielte HMI-Analysen erforderlich. Zunächst werden bisherige Kenntnisse ähnlicher Systeme geprüft, ob diese auf das neue System übertragbar sind. Sofern dies nicht reicht, müssen zur Beantwortung Simulator- und/oder Probandenversuche herangezogen werden.

Dieses wurde für ACC vor Start der Markteinführung getan, auch wenn es dazu nur wenige Veröffentlichungen gibt ([1], [11] und [20]). Faktisch bedeutet dies, dass Probandenversuche zur Funktionsfreigabe von Fahrerassistenzsystemen zum Stand der Technik erhoben wurden. Daher wird es in Zukunft bzgl. Produktverantwortung und –haftung schwierig sein, nachfolgende Systeme ohne den Verweis auf vergleichbare Untersuchungen freizugeben.

Für die Art der Durchführung der Versuche fehlen aber allgemein gültige Qualitätskriterien. Dies liegt zum einen an der Neuheit dieser Freigabe-Methodik und den damit bedingten wenigen Vergleichsmöglichkeiten. Zum anderen liegt es an der Divergenz der Untersuchungsanforderungen, denn die Fragestellungen sind oft sehr auf das zu untersuchende System zugeschnitten. Trotzdem wäre es wünschenswert, eine „Recommended Practice“ aufzubauen, um einerseits eine Mindestqualität zu sichern und um andererseits eine bessere rechtliche Absicherung zu erreichen.

## **5 X-BY-WIRE-SYSTEME**

### **5.1 Fragestellung**

Bei der Entwicklung eines X-by-Wire-Systems beginnt das Human Factors Engineering noch eine Stufe früher. Bei den vorgenannten Fahrerassistenzsystemen sind die



HMI-Untersuchungen eher geeignet, die Kompatibilität der Systeme zum Menschen zu bewerten. Bei X-by-Wire-Systemen gilt es, die Charakteristik der Betätigungseinheiten mit der Hilfe von HMI-Untersuchungen zur Steigerung des Kundennutzens auf den Fahrer zuzuschneiden. Eine pragmatische, aber weniger elegante Methode für die Gestaltung des Bedingefühls ist die Kopie eines bestehenden Systems, dessen Charakteristik vermessen wurde. Deutlich ambitionierter ist hingegen das Ziel, ein nutzeroptimales Bedingefühl zu kreieren.

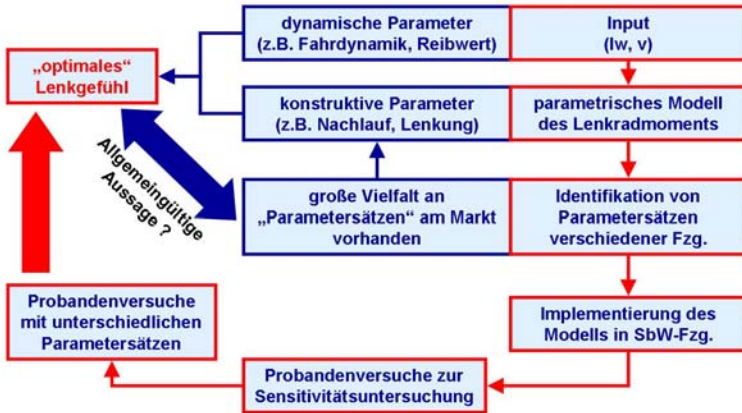
Die Optimierung zielt sowohl auf die Anpassung an den individuellen Fahrer als auch an die Fahrsituation. Doch fehlt zurzeit für die Optimierung der Bediencharakteristik das Optimierungskriterium, denn die Bewertung der Charakteristik ist subjektiv mit, wie sich später zeigen wird, erheblichen interindividuellen Streuungen.

Eine mögliche Forschungsmethodik zur Ermittlung einer bevorzugten Charakteristik soll nun anhand der Schnittstelle Lenkrad genauer vorgestellt werden. Die in einem von der Industrie geförderten Projekt entwickelte, im folgenden Abschnitt vorgestellte Forschungsmethodik ist grundsätzlich auch auf andere X-by-Wire-Betätigungseinheiten übertragbar, da deren Fragestellungen zur optimalen Nutzerrückmeldung vergleichbar sind.

## **5.2 Forschungsmethodik**

### *5.2.1 Vorgehen*

Das Vorgehen im Rahmen der Untersuchung entstand unter der Prämisse, eine übertragbare Aussage über bevorzugte haptische Rückmeldungen von Betätigungseinheiten zu finden.



**Bild 5–1:** Schematische Darstellung der angewandten Forschungsmethodik am Beispiel der Untersuchung des Lenkradmomentes

Ziel der Untersuchung ist eine fahrertyp- und fahrsituationsabhängige Optimierung des Lenkradmomentes, die auf subjektiven Beurteilungen von Probanden zu unterschiedlichen Lenkradmomentkonfigurationen aufbaut. Die zu erwartenden großen interindividuellen Streuungen sowie der große Gestaltungsraum der Schnittstellencharakteristiken machen es schwierig, diese Untersuchung mit noch annehmbarem Aufwand durchzuführen.

Zunächst stellt sich die Frage, wie die den Probanden zur Verfügung gestellten Konfigurationen gestaltet sein müssen, um mit hoher Wahrscheinlichkeit zu erreichen, dass nicht nur ein lokales Optimum im Bereich von untersuchten Varianten, sondern ein globales Optimum gefunden wird. Als Maßstab wurde daher zunächst die Streubreite der Lenkradmomentkennungen von heute üblichen Serien-Pkw-Lenkungen genommen. Dies erscheint unter zweierlei Gesichtspunkten als sinnvoll: Zum einen sind die derzeitigen Fahrzeugführer mit der entsprechenden auf dem mechanischen Lenksystem

begründeten Charakteristik vertraut, zum andern unterzog sich die Schnittstelle Lenkrad einer jahrzehntelangen Evolution.

Um die Streubreite der auf dem Markt befindlichen Lenkradmomentcharakteristiken zu quantifizieren, wurde eine so genannte „Adaptive Messtechnik“ (anpassungsfähig im Sinne der Befestigung unter verschiedensten Bau- raumgrößen und –formen) entwickelt (s. Bild 5.2), mit der es auf einfache Weise möglich wurde, unterschiedliche Fahrzeuge hinsichtlich ihrer Lenkradmoment- kennung zu vermessen.



**Bild 5–2:** Adaptive Messtechnik

Der Lenkradwinkel wird über ein Rädchen erfasst, das auf einem hinter dem Lenkrad montierten zweigeteilten Ring abrollt. Das Lenkradmoment wird durch die Messnabe eines zweiten bei dem Fachgebiet für Fahrzeug- technik (*fzd*) konstruierten Lenkrades erfasst, das mittels

eines Dreibeines auf das Originallenkrad montiert wird. Die Datenübertragung erfolgt per Telemetrie.

Parallel zu der Vermessung unterschiedlicher Fahrzeuge wurde ein parametrisches Modell zur Beschreibung des Lenkradmomentes im Normalfahrbereich ( $a_y < \sim 5 \text{ m/s}^2$ ) erstellt. Bei der Erstellung des Modells wurde von einem Fahrzeugmodell und einem Lenkungsmodell ausgegangen. Das Fahrzeugmodell liefert das Radrückstellmoment bzw. die entsprechende Spurstangenkraft. Das Lenkungsmodell liefert das Übertragungsverhalten (Übersetzung, Dämpfung, Reibung, Trägheit und Lenkkräftunterstützung).

Dieses Modell diente zum einen in einem entsprechenden Versuchsträger zur Erzeugung einer Lenkradmomentcharakteristik für die späteren Probandenversuche und wurde zum anderen zur Auswertung der Vergleichsuntersuchung herangezogen. Die Parameter dieses Modells nach Anpassung (Last Square Fit) an die Messdaten wurden für die einzelnen Fahrzeuge bestimmt.

Die Qualität des Modells lässt sich hierbei jedoch nicht allein anhand von quadratischen Fehlern oder Ähnlichem bewerten. Die Modellierung ist dann gelungen, wenn ein Normalfahrer keinen Unterschied zwischen einem realen und einem synthetischen Lenkradmoment wahrnimmt. Zur Validierung wurden daher Fahrversuche mit einem Versuchsträger durchgeführt, der ein Umschalten zwischen diesen beiden Modi (reales und synthetisches Lenkradmoment) erlaubt. Um auszuschließen, dass bereits ein durchschnittlicher Normalfahrer einen Unterschied wahrnimmt, wurden diese Validierungsfahrten mit erfahrenen Normalfahrern und einigen Experten durchgeführt.

Das so validierte Modell wurde nun zur Identifikation der unterschiedlichen Parametersätze für jedes vermessene

Fahrzeug genutzt. Das Ergebnis ist eine repräsentative Bandbreite der auf dem Markt befindlichen Ausprägungen der einzelnen Modellparameter.

Ein parametrisches Modell bietet in diesem Zusammenhang folgende Vorteile:

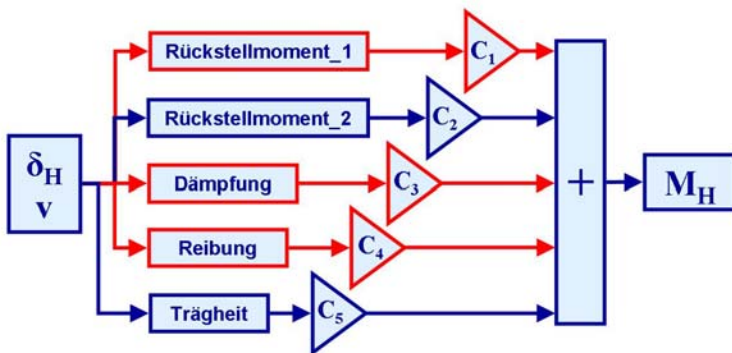
- Die identifizierten Lenkradmomentcharakteristiken der unterschiedlichen Fahrzeuge sind gut durch die Ausprägung der einzelnen Parameter miteinander vergleichbar.
- Wird ein solches Modell in einem entsprechenden Versuchsträger implementiert, so lassen sich auf einfache Weise die unterschiedlichen Charakteristiken nachbilden und im Fahrzeug auch leicht variieren.
- Weiterhin können auf diese Weise Parameter mit niedriger und hoher Priorität für ein Lenkgefühl in Vorversuchen identifiziert werden. Dies wiederum schränkt die Anzahl der zwingend zu variierenden Parameter in den Hauptversuchen ein.

Das hier verwendete Modell besteht aus fünf, additiv miteinander verbundenen Anteilen, die den Charakter des Lenkradmomentes beschreiben. Eingangsgrößen dieses Modells sind nur Lenkradwinkel und Fahrgeschwindigkeit. Die Gewichtung der einzelnen Anteile übernehmen statische Parameter. Diese sind:

- Rückstellmoment<sub>1</sub> ( $C_1$ ),
- Rückstellmoment<sub>2</sub> ( $C_2$ ),
- Dämpfung ( $C_3$ ),
- Reibung ( $C_4$ ) und
- Trägheit ( $C_5$ ).

Das Rückstellmoment wird durch zwei unterschiedliche Parameter beschrieben, da die Kennlinien von Reifen und Lenkkraftunterstützung nicht als linear angenommen werden können. Hierbei repräsentiert ein Anteil (Rückstellmoment\_1 ( $C_1$ )) den linearen und ein Anteil (Rückstellmoment\_2 ( $C_2$ )) den nichtlinearen Bereich bei stärker einsetzender Lenkkraftunterstützung. Es soll auch an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, dass der Gültigkeitsbereich des Modells auf den Normalfahrbereich ( $a_y < \sim 5\text{m/s}^2$ ) beschränkt ist.

Der schematische Aufbau des Modells ist **Bild 5–3** zu entnehmen.



**Bild 5–3:** Schematischer Aufbau des parametrischen Lenkradmomentmodells  
(rote Pfade: für die späteren Untersuchungen relevante Anteile – blaue Pfade: Anteile, die in den späteren Untersuchungen nicht variiert wurden, weil sie für ein Lenkgefühl im Normalfahrbereich wenig Einfluss haben)

In Vorversuchen wurde weiterhin abgesichert, dass sich innerhalb der durch Identifikation ermittelten Ausprägungsbreite eines jeden Parameters ein Optimum

der Bewertung der Lenkradmomente befindet. Ferner wurde beurteilt, ab welcher Größe einer Änderung an den einzelnen Parametern diese auch als Änderung erkannt wurde. Dadurch konnte auf die Parameter mit primärem ( $C_1$ ,  $C_3$  und  $C_4$ ) und sekundärem Einfluss auf ein Lenkgefühl geschlossen werden. Die letztendlich für die Probandenversuche ausgewählten Parameterausprägungen können Bild 5–4 entnommen werden.

### 5.2.2 Versuchskonzept

Im nächsten Schritt wurden nun verschiedene Parametersätze aus dem ermittelten „bevorzugten Bereich“ Probanden zur Subjektivbeurteilung zur Verfügung gestellt, um einen Kennwert zu ermitteln, der die Vorhersage eines Subjektivurteils ermöglicht. Hierzu müssten alle potenziell relevanten Eingangsgrößen für solch einen Kennwert (Lenkradmomentparameter, Fahrsituationen, Probandenkollektiv) unabhängig von einander variiert werden, was aber zu einem nicht mehr vertretbaren Aufwand führen würde. Daher wurde ein Kompromiss gesucht, der bei vertretbarem Aufwand die Untersuchung eines jeden Einflusses ermöglicht und die nachfolgend genannten Randbedingungen erfüllt:

1. Die drei als primär identifizierten Einflüsse des Lenkradmomentes müssen variiert werden.
2. Ein reproduzierbares Urteil von Normalfahrern zum Bediengefühl ist nur durch einen Paarvergleich zweier Konfigurationen erreichbar (in Vorversuchen untersucht).
3. Die Dauer der Untersuchung sollte eine Stunde nicht überschreiten, da sonst die Konzentration der Probanden und somit ein reproduzierbares Urteil nicht mehr gewährleistet sind (durch Vorversuche untersucht).

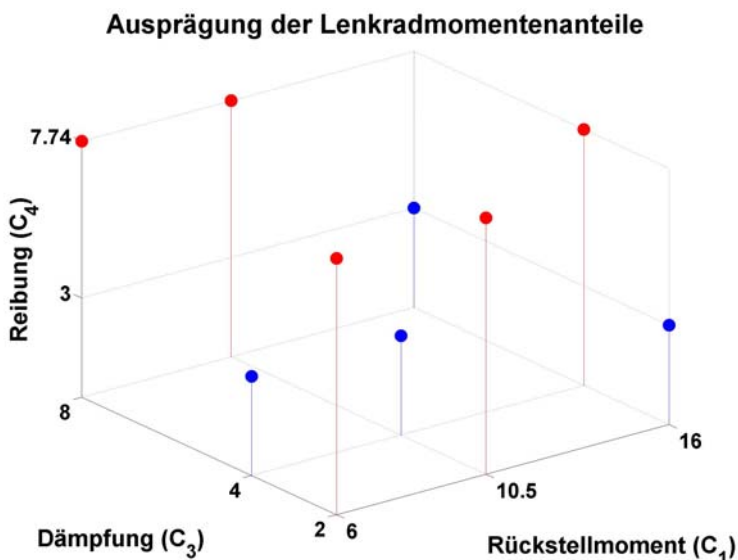
4. Möglichst geringe Zeitspanne zwischen zwei Varianten im Paarvergleich, damit die Erinnerung an die Empfindung der ersten Variante des Paarvergleichs noch präsent ist (durch Vorversuche untersucht); idealerweise durch Umschalten während der Fahrt.
5. Repräsentative Bandbreite von für den Normalfahrbereich relevanten Fahrsituationen.
6. Hinreichend große Probandenanzahl, um auch Teilkollektive statistisch untersuchen zu können, da interindividuelle Streuungen (z.B. im Alter bzw. der Fahrerfahrung und des Geschlechts) erwartet wurden.

Für eine einfache Untersuchung der drei relevanten Lenkradmomentanteile wären eine dreifache Ausprägung eines jeden Parameters sowie eine vollständige Permutation sinnvoll. Hierbei entstünden folglich 27 Varianten. Dies wiederum würde in 351 Paarvergleichen resultieren. Will man diese in einer Stunde beurteilen, so blieben lediglich 10s für einen Paarvergleich bzw. 5s für die Fahrt mit einer Variante. In dieser Zeit ist es jedoch nicht möglich eine sinnvolle Anzahl an Fahrmanövern durchzuführen, um sich einen Eindruck über die jeweilige Lenkvariante verschaffen zu können.

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



Es wurden die zwei in Vorversuchen für ein Lenkgefühl am wichtigsten definierten Anteile (Rückstellmoment und Dämpfung) in drei Ausprägungen und der dritte Parameter (Reibung) in zwei Ausprägungen nach einem teilhierarchischen Plan derart kombiniert, dass neun Varianten entstanden (Bild 5–4).



**Bild 5–4:** Ausprägung der drei Parameter ( $C_1$ ,  $C_3$ ,  $C_4$ ) für die unterschiedlichen 9 Varianten (rot: hohes Reibungsniveau, blau: niedriges Reibungsniveau)

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

sonen verdoppelt. Insgesamt wurden drei verschiedene Versuchsreihen durchgeführt, um die in der Realität vorhandene Bandbreite an Fahr Situationen im Normalfahrbereich möglichst gut abbilden zu können. In den Versuchsreihen für Stadt, Landstraße (Bild 5–5) und Autobahn nahmen daher insgesamt 180 Probanden teil. Die Parcours wurden so gestaltet bzw. ausgewählt, dass sie annähernd symmetrisch zu einem Umschaltunkt in der Mitte der Strecke waren. Somit konnte mit dem verwendeten Versuchsträger an diesem Umschaltunkt während der Fahrt ohne Stopp von einer Variante A auf eine zweite Variante B umgeschaltet werden.



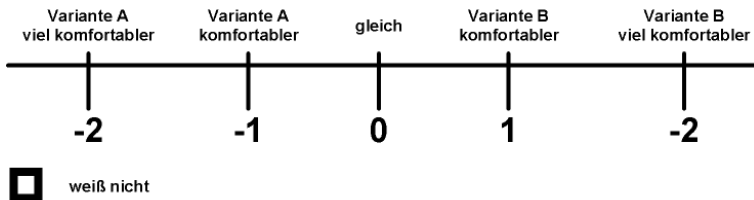
**Bild 5–5:** Exemplarische Darstellung des Verlaufs des Landstraßenparcours (Länge einer Runde ca. 3km)

Am Ende des Parcours wurde der Proband hinsichtlich der vier Kriterien

- empfunderer Komfort,

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

befragt. Hierbei hatte er die Möglichkeit auf einer fünf Stufen umfassenden Skala seine Antwort einzuordnen (Bild 5–6).



**Bild 5–6:** Bewertungsskala

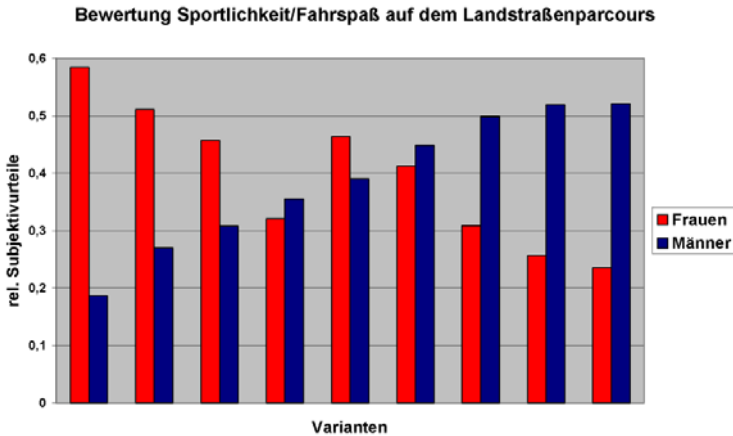
### Ergebnisse

Die Auswertung der Daten zeigt eine eindeutige Abhängigkeit der Beurteilung einer Lenkradmomentvariante von folgenden Faktoren:

- Geschlecht
- Alter/Fahrerfahrung
- Parcours
- Fahrstil

Die nachfolgende Grafik (Bild 5–7) zeigt die gegensätzliche Tendenz der Beurteilung der 9 Lenkradmomentvarianten in Abhängigkeit des Geschlechts. Während Frauen eher Varianten mit geringem Gesamtlenkradmoment-

niveau als sportlicher empfinden, empfinden Männer bei hohem Gesamtmomentniveau mehr Fahrspaß.



**Bild 5–7:** Gegenüberstellung der Beurteilung der empfundenen Sportlichkeit/Fahrspaß auf dem Landstraßenparcours von Frauen und Männern

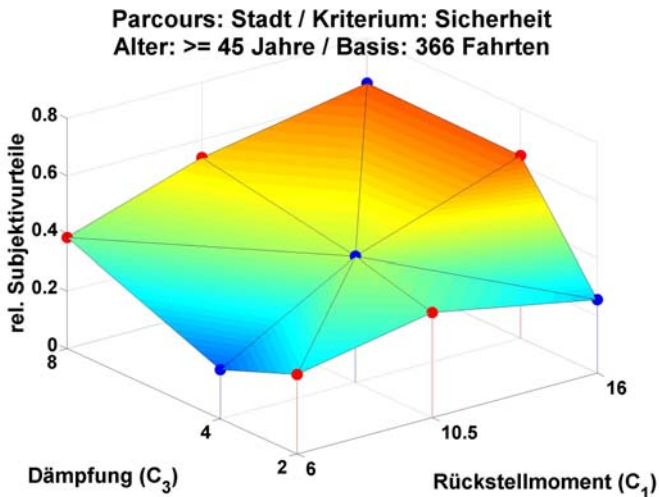
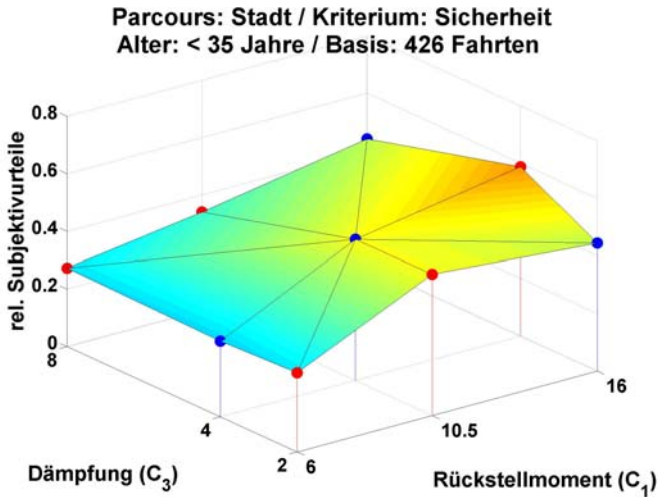
Nach den bisherigen Untersuchungen scheint diese stark unterschiedliche Beurteilung der Lenkradmomentkonfigurationen primär in einer unterschiedlichen Definition von Fahrspaß oder Sportlichkeit der beiden Geschlechter und weniger in der unterschiedlichen Fahrdynamik begründet zu sein. Derart ausgeprägte Unterschiede ließen sich bisher in keinem der untersuchten Fahrdynamikkennwerte für die beiden Geschlechter finden. Es kann vermutet werden, dass das Verständnis dieser Begriffe bei Frauen sich eher als Agilität widerspiegelt, wohingegen von den männlichen Probanden der Sport anscheinend mehr mit körperlicher Betätigung in Verbindung gebracht wird.

Unterteilt man das Gesamtkollektiv in drei Altersgruppen, zeigt sich ebenfalls eine stark gegenläufige Rangfolge in der Beurteilung der Lenkradmomentvarianten zwischen der Gruppe der jüngeren und der älteren Autofahrer (Bild 5–8). In den nachfolgenden Grafiken sind auf den beiden horizontalen Achsen die Ausprägungen des Rückstellmomentanteils ( $C_1$ ) und des Dämpfungsanteils ( $C_3$ ) aufgetragen. Auf der vertikalen Achse ist das relative Subjektivurteil pro Variante abzulesen. Die Bezeichnung „rel. Subjektivurteile“ bedeutet hier, dass die Summe der Subjektivurteile pro Variante auf die maximal mögliche Punktschme pro Variante bezogen wurde. Die Variation der Reibung ist durch blaue (niedrige Ausprägung von  $C_4$ ) und rote Punkte (hohe Ausprägung von  $C_4$ ) zu erkennen. Die Position der einzelnen Varianten in den folgenden Grafiken ist analog Bild 5–4. Die sich ergebende Fläche der relativen Subjektivurteile über den neun Varianten wurde entsprechend der Verteilung der Spektralfarben eingefärbt. Um eine gute Erkennbarkeit von Tendenzen in den Subjektivurteilen zu ermöglichen, wurden folgende Grenzen gewählt: blau = schlecht = 0 rel. Subjektivurteil, rot = gut = 0.8 rel. Subjektivurteil.

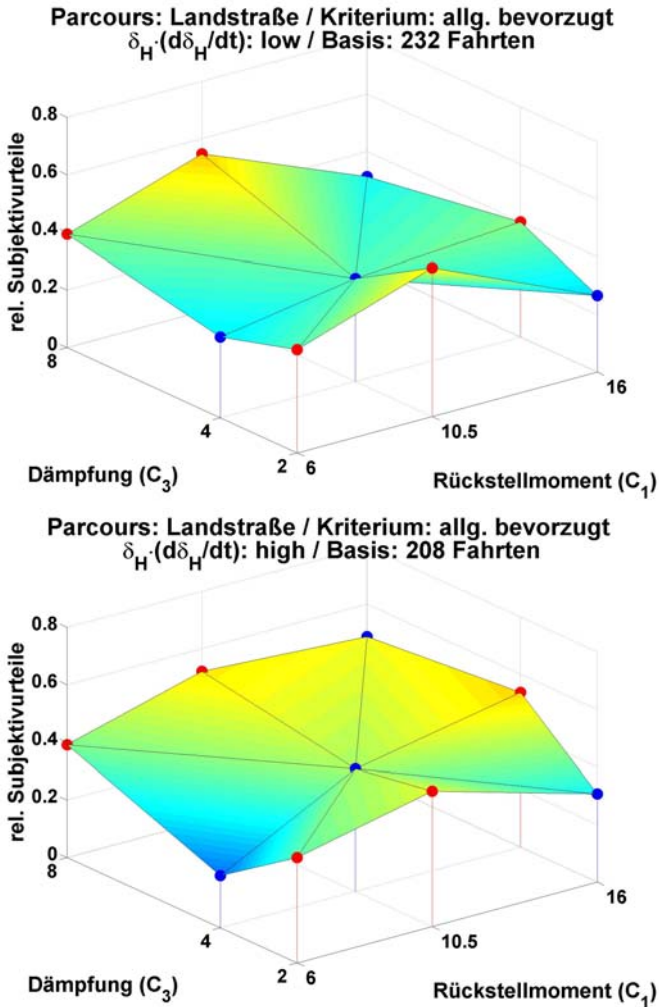
Zur Unterscheidung der Probanden hinsichtlich ihres Fahrstils erwies sich der Median des Lenkaufwands (LA)<sup>1</sup> als viel versprechender Kennwert (Bild 5–9). Auch hier wurde das Kollektiv in drei Unterkollektive (low, middle, high) unterteilt.

---

<sup>1</sup> Lenkaufwand (LA) =  $\delta_H \cdot \dot{\delta}_H$



**Bild 5–8:** Gegenüberstellung der Beurteilung der empfundenen Sicherheit auf dem Stadtparcours von jüngeren (< 35 Jahre) und älteren ( $\geq$  45 Jahre) Autofahrern



**Bild 5–9:** Gegenüberstellung der Beurteilung der allgemeinen Bevorzugung der Gruppen LA-low ( $\leq 135 \text{ rad}^2/\text{s}$ ) und LA-high ( $\geq 160 \text{ rad}^2/\text{s}$ ) auf dem Landstraßenparcours

Derzeitiges Ziel der Auswertung ist es, Kennwerte zu finden, die zur Vorhersage der Subjektivbeurteilung aus den unterschiedlichen Anteilen der Lenkradmomentvarianten dienen können. Hierbei ist es das Ziel, einen einheitlichen Kennwert für jeweils ein Teilkollektiv zu finden, der auf allen Parcours – also unabhängig von der Fahr-situation – gültig ist. Bei durch fahrdynamische Kennwerte charakterisierten Teilkollektiven ist auch ein für das Gesamtkollektiv gültiger Kennwert denkbar.

### 5.3 Fazit

Die aufgeführten Abhängigkeiten lassen den Schluss zu, dass mit einer einzigen statischen Lenkradmomentauslegung weder das individuelle noch das situative Optimum erreicht wird. Eine dynamische und individuelle Auslegung des Lenkradmomentes lässt jedoch ein gegenüber heute deutlich verbessertes Lenkgefühl erwarten.

Die angewandte Methodik lässt schließlich zu, gezielte Vorschläge für die Gestaltung der Lenkradmomente in Abhängigkeit der variierten Einflussfaktoren bei noch zu vertretendem Versuchsaufwand zu. Es ist anzunehmen, dass sich diese Methodik durch die vergleichbaren Fragestellungen zur Auslegung der übrigen Mensch-Maschine-Schnittstellen auch auf diese übertragen lässt. Somit ist es möglich, die bereits im Entwicklungsprozess notwendige Abklärung der Auslegung der MMS durchführen zu können.

Obwohl in der hier vorgestellten Versuchsreihe „nur“ die Lenkradmomentcharakteristik untersucht wurde, so war der Untersuchungsaufwand trotz intensiver Rationalisierung beträchtlich. Bei einem Steer-by-Wire-System stehen aber auch die Freiheitsgrade Lenkübersetzung und dynamische Zusatzwinkel zur Verfügung. Da auch hier



zu vermuten ist, dass die optimale Ausprägung dieser Charakteristiken interindividuell und situativ ist und bzgl. Untersuchungsaufwand noch schlimmer mit der Lenkradmomentenkennung gekoppelt ist, so ist mit einer nochmaligen erheblichen Aufwandsteigerung zu rechnen.

## 6 RESUMEE

Die steigende Bedeutung des Human Factors Engineering im Entwicklungsprozess von Fahrerassistenzsystemen verlangt eine Ausdehnung der Fahrversuche mit Probanden. Die Erfahrungen der zu ACC gemachten HMI-Untersuchungen zeigen, dass die bisherigen Versuche trotz großer Unterschiede in der Durchführung ein weitgehend durchgängiges Bild ergaben. Diese, an sich positive Robustheit hat aber den Nachteil, dass sich nur wenig für die konkrete Systemausgestaltung ableiten lässt. Für das Beispiel ACC waren die Untersuchungen mehr „Beruhigungsmittel“ als begleitendes Entwicklungsinstrument, wobei diese „Beruhigungsmittel“ mittlerweile als notwendig für eine Funktionsfreigabe anzusehen sind.

Die Entwickler zukünftiger Fahrerassistenzsysteme stehen vor dem Dilemma, dass für frühe Grundsatzentscheidungen fundierte Ergebnisse über die Art der Nutzung benötigt werden, sie diese aber erst mit fast fertig entwickelten Systemen erhalten können.

X-by-Wire-Systeme erlauben eine weitgehend freie Gestaltung der Bediencharakteristik unter Berücksichtigung der Nutzerindividualität und der aktuellen Situation. Die Untersuchungen zur optimalen Lenkradmomentencharakteristik zeigen aber auch, dass der Aufwand für eine systematische Optimierung schnell die Budget- und Zeitgrenzen sprengt.

Fahrversuche mit Probanden sind für die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen und für die X-by-Wire-Auslegung unverzichtbar. Aber es gibt eine Reihe von Problemen, die ein gutes Kosten/Nutzen-Verhältnis bedrohen:

- Habituationseffekte verlängern die Versuchsdurchführung erheblich oder lassen die Aussagekraft absinken.
- Mit Systemen, die nur eine vorläufige Funktion aufweisen, lassen sich nur grobe Aussagen ableiten.
- Ein Entwicklungsinstrument Fahrversuche zur Bewertung von Funktionsausprägungen benötigt im Allgemeinen Paarvergleiche mit einer daraus folgenden Vervielfachung der Versuchsdurchgänge.
- Die Konzentrationsdauer der Probanden ist begrenzt und reicht nicht für einen vollständigen Versuch aus. Dadurch werden Versuchswiederholungen oder mehr Probanden erforderlich, wodurch weitere statistische Unsicherheiten hinzugefügt werden, die nur durch gesteigerten Aufwand kompensiert werden können.
- Es ist oft schwierig oder sogar unmöglich, repräsentative Probanden zu bekommen.

Die aufgelisteten Punkte zeigen aus Sicht der Autoren die Anforderungen an die Methodikentwicklung für zukünftige Fahrversuche mit Probanden. Die Methodik muss effizienter werden, damit sie die gestiegenen Erwartungen bei gleicher Qualität erfüllen kann.

**LITERATUR**

- [1] Abendroth, B.; Gestaltungspotentiale für ein PKW-Abstandregelsystem unter Berücksichtigung verschiedener Fahrertypen, Berichte aus der Ergonomie, TU Darmstadt, Institut für Arbeitswissenschaft, Darmstadt 2001
- [2] Barthenheier, T.; Winner, H.: „Das persönliche Lenkgefühl“, FahrwerkTech, München 2003
- [3] Becker, S., Sonntag, Autonomous Intelligent Cruise Control – Pilotstudie der Daimler-Benz und Opel Demonstratoren, Prometheus CED 5, TÜV Rheinland, Köln, 1993
- [4] Becker, S., Sonntag, Krause; Zur Auswirkung eines Intelligenten Tempomaten auf die mentale Belastung eines Fahrers, seine Sicherheitsüberzeugungen und (kompensatorischen) Verhaltensweisen, Prometheus CED 5, TÜV Rheinland, Köln, 1994
- [5] Bertollini, G.-P.; Hogan, R. M.: “Applying Driving Simulation to Quantify Steering Effort Preference as a Function of Vehicle Speed”, SAE-Paper Nr. 1999-01-0394, 1999
- [6] Bielaczek, C.: “Untersuchungen zur Auswirkung einer aktiven Fahrerbeeinflussung auf die Fahricherheit beim Pkw-Fahren im realen Straßenverkehr“ VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 357, 1998

- [7] Bill, K.-H.; Semsch, M.; Breuer, B.: "A New Approach to Investigate the Vehicle Interface Driver/Brake Pedal under Real Road Conditions in View of oncoming Brake-by-Wire-Systems", SAE Future Transportation Technology Conference & Exposition, SAE-Paper Nr. 1999-01-2949, 1999
- [8] Deppermann, K. H.: "Geradeauslauf von Pkw – Fahrversuche und Berechnungen", In: Automobil-Industrie 3/89, S. 261-274, 1989
- [9] Dettki, F.: "Methoden zur Bewertung des Geradeauslaufs von Pkw", In: VDI-Berichte 1335, S. 385-405, 1997
- [10] Fancher, Ervin, Sayer, Hagan, Bogard, Bareket, Mefford, Haugen; Intelligent Cruise Control Field Operational Test, Final Report, University of Michigan Transportation Research Institute (UMTRI), Michigan, 1998
- [11] Filzek, B.; Abstandsverhalten auf Autobahnen – Fahrer und ACC im Vergleich, Dissertation Fachgebiet Fahrzeugtechnik, TU Darmstadt, Darmstadt 2002
- [12] Harnett, P.: "Objective Methods for the Assessment of Passenger Car Steering Quality", VDI Fortschritt-Berichte Reihe 12, Nr. 506, 2002
- [13] Hisaoka, Y.; Yamamoto, M.; Fujinami, H., "A Study Desirable Steering Response and Steering Torque for Driver's Feeling", In: AVEC'96, International Symposium on Advanced Vehicle Control, Aachen, 24.-28.6.1996, S.295-305, 1996

- [14] Koide, M.; Kawakami, S., "Analysis of 'Steering Feel' Evaluation in Vehicles with Power Steering", In: Japan SAE Review, Vol. 9 Nr. 3, July 1988, p. 36, 1988
- [15] Nirschl, G., Blum, Kopf, M.; Untersuchungen zur Benutzbarkeit und Akzeptanz eines ACC-Fahrerassistenzsystems, IITB Mitteilungen, Fraunhofer Institut für Informations- und Datenverarbeitung 2000
- [16] Nirschl, G., Kopf, M.; Untersuchung des Zusammenwirkens zwischen dem Fahrer und einem ACC-System in Grenzsituationen, VDI Bericht 1317, VDI-FVT, Tagung: "Der Mensch im Straßenverkehr", Berlin 1997
- [17] Norman, K.-D.: "Objective Evaluation of On-Center Handling Performance", SAE-Paper, Nr. 840069, 1984
- [18] Tomaske, W.: "Einfluß der Bewegungsinformation auf das Lenkregelverhalten des Fahrers sowie Folgerungen für die Auslegung von Fahrsimulatoren", Dissertation an der Hochschule der Bundeswehr Hamburg, 1983
- [19] Weinberger, M., Winner, H., Bubb, H.; Adaptive cruise control field operational test – the learning phase, JSAE Review 22 (2001) 487, Elsevier
- [20] Weinberger, M.; Der Einfluss von Adaptive Cruise Control Systemen auf das Fahrverhalten, Berichte aus der Ergonomie, TU München, Garching, 2001