

Aus:

VDI-Berichte Nr. 1745 (2003). Simulation und Simulatoren - Mobilität virtuell gestalten. Düsseldorf: VDI-Verlag
Original kann beim Verlag bestellt werden.

Die Fahrsimulation als Methode bei der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen

Driving Simulation as a method developing driver assistance systems

Dipl.-Psych. Dr. Susanne Buld¹,
Prof. Dr. Hans-Peter Krüger¹,
Dipl.-Psych. Sonja Hoffmann¹,
Dipl.-Psych. Ingo Totzke¹

¹Interdisziplinäres Zentrum für Verkehrswissenschaften
an der Universität Würzburg
Röntgenring 11
97070 Würzburg

Zuordnung zu einer Sektion:
Anwendungen

Zusammenfassung

Am Beispiel eines Spurhalte- (HC) und eines Längsführungsassistenten (ACC) wird gezeigt, wie die Fahrsimulation zur Parametrisierung solcher Systeme schon im Rahmen ihrer Entwicklung genutzt werden kann. Eine Stichprobe von n=18 Fahrern wurde mit der Funktionsweise der Systeme vertraut gemacht. Ziel war es herauszufinden, zu welchen Systemparametern die Fahrer überhaupt eine Beurteilung abgeben können bzw. bevorzugte Systemeinstellungen zu finden. Es resultierten verschiedene qualitative Auslegungen und quantitative Anpassungen der Parameter im Sinne eines Feintuning. Dieses Feintuning wurde in der Würzburger Fahrsimulation durchgeführt.

Summary

It is shown how driving simulation can be used for tuning parameters of driver assistance systems in the state of development. This is exemplified for Adaptive Cruise Control and a lane departure warning (Heading Control). 18 drivers had to get used to the systems and rate different configurations. The aim of the study was to find out, how sensitive the ordinary driver is to different system configurations is and which system parameters can be rated at all. Finally the test drivers had to determine their individually preferred system tuning. This procedure yielded on the one hand different qualitative configurations, on the other hand a quantitative tuning. The study was carried out in the Würzburg Driving Simulation.

1 Fragestellung

Die Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen unterliegt einem langwierigen Prozess, zu dem der Normalfahrer häufig erst am Ende hinzugezogen wird. Zum heutigen Standpunkt existieren kaum Möglichkeiten den späteren Käufer bereits zu Beginn des Entwicklungsprozesses mit einzubeziehen. Die Gründe liegen auf der Hand. Dem Fahrer fehlt das technische Know-How, sich in die Details eines Reglers hineinversetzen zu können. Es fehlen ihm die Begrifflichkeiten, die Auswirkungen auf das Fahren bzw. das Fahrgefühl zu beschreiben, zumal die Systeme zu Beginn nur im Computer existieren und nicht „erfahrbar“ sind. Dies ist bedauerlich, da der Ingenieur gerade zu Beginn noch keine eindeutigen Weichen für die Funktionsweise bzw. Charakteristik eines solchen Systems gestellt hat und weitgehend problemlos grundsätzliche Änderungen, die sich aus Sicherheitsuntersuchungen und Beurteilungen von Fahrern ergeben würden, umsetzen könnte.

Die Nutzung der Fahrsimulation könnte diesem Problem Abhilfe schaffen. Noch sich in der Entwicklung befindliche Systeme können implementiert und ohne Gefährdung unterschiedlichsten Fahrergruppen für eine Beurteilung zugänglich gemacht werden. Eine solche Form des Systemtunings stellt besondere Anforderungen an die Fahrsimulation. In zwei Experimenten, die im Rahmen des Projektes EMPHASIS (Förderkennzeichen 19S98127) [1] durchgeführt wurden, wurde geprüft, ob der sog. Normalfahrer tatsächlich in der Lage ist, in einer Fahrsimulation an der Parametrisierung von Fahrerassistenzsystemen teilzunehmen.

2 Die Würzburger Fahrsimulation

Der Schwerpunkt der Fahrsimulation des IZVW liegt im Bereich der Forschung, die sich mit allen Fragen der Verkehrssicherheit beschäftigt. Dazu gehören vor allem die Entwicklung und Überprüfung neuer Technologien. Es werden Auslegungsfragen bearbeitet, Parametrisierungen vorgenommen und Reglereigenschaften geprüft und verbessert. Ergänzend dazu stellt die Gestaltung von MMI's einen wichtigen Anteil dar. Darüber hinaus werden Schulungs- und Trainingsmaßnahmen für verschiedene Personengruppen entwickelt (Auszubildende im Kfz-Bereich, spezielle Einsatzfahrten, aber auch Trainingsprogramme für neurologische Patienten). Die hier vorgestellten Experimente wurden durchweg in der Würzburger Fahrsimulation (180°-Sicht, 3 Rückansichten, Bewegungssystem mit 6 Freiheitsgraden) durchgeführt.

Im Gegensatz zu „üblichen“ Fahrsimulatoren wurde die in diesem Simulator eingesetzte Software speziell auf Forschungsfragen hin entwickelt und unterliegt damit anderen Anforderungen als Simulatoren, die ausschließlich zu Trainingszwecken eingesetzt werden. Während in der Trainingsanwendung auf eine möglichst detailgetreue Umwelt geachtet werden muss, ist in der Forschung die Reproduzierbarkeit bestimmter Situationen sowie deren Aufzeichnung besonders wichtig. Die Ansprüche auf Hardwareseite sind Skalierbarkeit (das System soll in unterschiedlichen Ausbaustu-

fen einsetzbar sein; z.B. Fahrstand versus Simulation mit Bewegungssystem), Plattform-Unabhängigkeit (verschiedene Betriebssysteme, unterschiedliche Grafikmaschinen), flexible Erweiterbarkeit mit z.B. Fahrerassistenzsystemen und die Verwendung von käuflichen Standardkomponenten. Fragenorientiert betreffen diese besonderen Anforderungen die Aufzeichnung, von der eine hohe Transparenz erwünscht ist, besondere Gestaltungsmöglichkeiten der Szenerie sowie die Steuerung und Aufzeichnung des autonomen Verkehrs.

Alle Parameter der Fahrzeugbewegung und –bedienung können aufgezeichnet werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit zur Erfassung der physiologischen Parameter Puls, Lidschluss, EEG etc. Die Ausführung unterschiedlicher Nebenaufgaben ist ebenso möglich. Im Datensatz sind neben Informationen über das Messfahrzeug auch solche über den umgebenden Verkehr enthalten.

In der Würzburger Fahrsimulation ist es möglich für den Umgebungsverkehr einzelne Parameter wie Abstandsverhalten bzw. Beschleunigung, Verzögerung etc. anzupassen. Gerade bei Untersuchungen im Zusammenhang mit ACC hat sich dieses Konzept als sehr geeignet erwiesen. Fahrzeuge können außer in Kolonnen auch einzeln frei oder mit Bezug auf das EGO-Fahrzeug gesteuert werden. Der Versuchsleiter kann angeben, an welchem Streckenmeter ein bestimmtes Fahrzeug welches Verhalten zeigen soll, bzw. welches Verhalten ein bestimmtes Fahrzeug bezogen auf ein bestimmtes Verhalten des EGO-Fahrzeugs zeigen soll.

3 Auswahl für die Systemcharakteristik zentraler Parameter

In dem im folgenden dargestellten Versuch erhielten 11 junge Fahrer die Gelegenheit, einen Spurhalteassistenten (vgl. Heading Control HC [2]) kennen zu lernen. Das HC wurde in verschiedenen Auslegungen präsentiert, die auf zwei Dimensionen variierten. Ziele bzw. Fragestellungen des Versuchs sind dabei:

- Auswahl einer begrenzten Anzahl von HC-Auslegungen, aus denen Fahrer eine individuell optimale Einstellung wählen können.
- Ist die Variation beider Aspekte des HC-Systems (Eingriffsstärke und -abstand) notwendig oder gibt es eine gemeinsame Dimension?

Die Fahrer lernten zunächst, mit dem HC-System im Fahrsimulator mit Bewegungssystem umzugehen. Dann sollten sie nach 5-minütigen Probefahrten im Simulator aus neun möglichen HC-Auslegungen die drei besten Einstellungen auswählen. Diese fuhren sie über jeweils 3 x 10 Minuten und wählten dann die für sie optimale Einstellung aus.

3.1 Der Spurhalteassistent

Die wesentlichen Variationsmöglichkeiten beim vorliegenden Spurhalteassistenten sind der Eingriffsabstand (Ab welcher Abweichung von der Idealspur beginnt das System einzugreifen?) und die Eingriffsstärke (Wie stark ist das Lenkmoment, das durch das System eingebracht wird?). Die folgende Tabelle zeigt neun untersuchte Auslegungen des Spurhalteassistenten. Als zu verändernde Parameter wurde ein Formparameter und die Steifigkeit herangezogen. Dabei variiert in den Zeilen die Eingriffsstärke, in den Spalten der Eingriffsabstand.

Tabelle 3-1: Überblick über die 9 Einstellungen des Spurhalteassistenten. Variiert wurden die beiden Dimensionen „Eingriffsstärke“ und „Eingriffsabstand“. Die Nummerierung entspricht der Verwendung bei den Versuchen /

Survey of 9 configurations of the lane departure warning system. Varied are the dimensions 'magnitude of the HC steering torque' and 'lateral distance when the HC steering torque starts'. The numbering is according to the usage order in the study

	Eingriffsstärke		
Eingriffsabstand	Schwach	Mittel	Stark
Weit	7 Weit / Schwach	8 Weit / Mittel	9 Weit / Stark
Mittel	4 Mittel / Schwach	5 Mittel / Mittel	6 Mittel / Stark
Eng	1 Eng / Schwach	2 Eng / Mittel	3 Eng / Stark

Abbildung 3-1 zeigt die Charakteristika der System-Auslegungen grafisch. Dargestellt ist dort das Lenkmoment in Abhängigkeit von der Abweichung in einem Vorausschaupunkt.

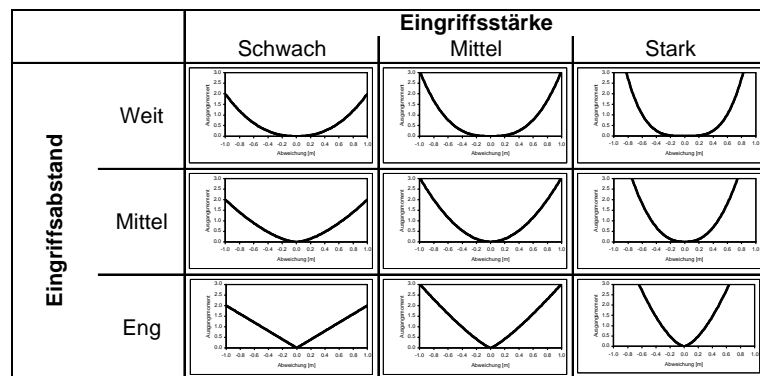


Abbildung 3-1: Grafischer Überblick über die Systemcharakteristik bei den 9 Einstellungen. Dargestellt ist das Lenkmoment in Abhängigkeit von der Abweichung im Vorausschaupunkt / Graphical survey of 9 configurations. Plotted is the steering torque dependent on the deviation in an aim point

3.2 Untersuchungsanordnung

Von den insgesamt 18 Fahrern nahmen an diesem ersten Experiment 11 Testfahrer (5 weiblich, 6 männlich) teil. Von jedem Fahrer wurden 3 Sitzungen absolviert. Die Fahrer sind zwischen 22 und 35 Jahren alt ($m = 25,09$; $sd = 4,04$); ihre Fahrpraxis beträgt zwischen 3 und 14 Jahren ($m = 6,82$; $sd = 3,57$). In den letzten 12 Monaten sind sie zwischen 600 und 30.000 km mit dem Auto unterwegs gewesen.

In der ersten Sitzung wurde das HC-System mit einer Standardeinstellung HC 5 (mittlerer Eingriffsabstand und mittlere Eingriffstärke) erklärt und kurz geübt (10 Minuten). Danach folgte eine Lernphase von 6 mal 10 Minuten, in denen jeweils dieses HC 5 gefahren wurde. Die zweite Sitzung begann mit weiteren drei Durchgängen mit dem Standard-HC 5. Dann wurden die vier extremen HC-Auslegungen vorgegeben und für jeweils fünf Minuten gefahren. Auf diese Weise wurden die Fahrer über die zu erwartende Variation der HC-Auslegungen orientiert. Im zweiten Teil der Sitzung 2 wurden schließlich die neun verschiedenen HC-Auslegungen in 3er-Blocks vorgegeben, für fünf Minuten gefahren und dann vom Fahrer beurteilt. Eine Gruppe von Fahrern ($n = 5$) erhielten bei einem festen Eingriffszeitpunkt die drei verschiedenen Eingriffsstärken zum Vergleich (zeilenweises Vorgehen in der Matrix der HC-Auslegungen, vgl. Tabelle 3-1), die zweite Gruppe ($n = 6$) bei einer festen Eingriffsstärke die drei Eingriffszeitpunkte (spaltenweises Vorgehen). In der dritten Sitzung wurden die so ausgewählten drei HC-Auslegungen erneut für jeweils 3 x 10 Minuten gefahren. Danach hatte der Fahrer seine bevorzugte HC-Auslegung zu wählen.

Die Gestaltung der Strecke musste entsprechend dem Untersuchungsziel möglichst häufig zu Eingriffen des HC führen. Dazu wurden verschiedene leicht kurvige Simulatorstrecken konstruiert, die aus folgenden Streckenabschnitten bestanden:

- Landstraße (Kurvenradien zwischen 500 und 700m): Fahrt im ungebundenen Verkehr
- Landstraße (Kurvenradien zwischen 500 und 700m): Fahrt im gebundenen Verkehr (Führungsfahrzeug variiert zwischen 95 und 110 km/h Eigengeschwindigkeit)
- Autobahn (Kurvenradien zwischen 2000 und 3000m): Fahrt im ungebundenen Verkehr

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Beurteilung von Eingriffsstärke und –abstand: Zwei unabhängige Dimensionen?

Im Lauf der zweiten Testsitzung hatte jeder Fahrer die HC-Auslegungen zu beurteilen nach: Subjektivem Eingriffsabstand: Der Zeitpunkt des HC-Eingriffs ist zu früh / zu spät (6stufige Skala, Dimension „Eingriffsabstand“) und subjektiver Eingriffsstärke: Die Stärke des HC-Eingriffs ist zu schwach / zu stark (6stufige Skala, Dimension „Eingriffsstärke“).

Anzumerken ist, dass der Begriff „Eingriffsabstand“ die Charakteristik des HC-Systems objektiv richtig beschreibt, da die Momentaufschaltung erst ab einer bestimmten Abweichung von der Idealspur erfolgt. Subjektiv war es nach Vorversuchen für die Probanden besser verständlich, nach dem Eingriffszeitpunkt zu fragen (das System greift zu früh oder zu spät ein). Über eine zweifaktorielle vollständig abhängige Varianzanalyse wurde geprüft, ob die experimentell variierten Faktoren „objektiver Abstand“ und „objektive Stärke“ der HC-Auslegung das Urteil beeinflussen. Für die Beurteilung des subjektiven Eingriffsabstands ergab sich eine signifikante Hauptwirkung des Faktors „objektiver Abstand“ ($F_{2,18} = 13.5$, $p = 0.000$), des Faktors „objektive Stärke“ ($F_{2,18} = 5.3$, $p = 0.016$) und eine Wechselwirkung ($F_{4,36} = 4.5$, $p = 0.005$). Abbildung 3-2 zeigt die Ergebnisse, links sortiert nach dem objektiven Eingriffsabstand, rechts nach der objektiven Eingriffsstärke.

Zum einen zeigt sich, dass der subjektive Eingriffsabstand einer HC-Auslegung erwartungsgemäß entsprechend dem variierten objektiven Eingriffsabstand beurteilt wird (Hauptwirkung „objektiver Eingriffsabstand“). Obwohl objektiv der Eingriffsabstand nichts mit der Eingriffsstärke zu tun hat, zeigte sich eine Hauptwirkung „objektive Eingriffsstärke“. Diese ist zu interpretieren als: je stärker das System eingreift, umso früher wird der Eingriff erlebt. Dies gilt allerdings nur für frühe und mittlere objektive Eingriffsabstände. Bei HC-Auslegungen mit objektiv spätem Eingriff führen die drei unterschiedlichen objektiven Eingriffsstärken nicht zu einer Veränderung des Urteils über den subjektiven Abstand (Wechselwirkung). Dies ist dadurch zu erklären, dass bei der Auslegung mit spätem HC-Eingriff die Eingriffe relativ selten sind und erst bei starken Abweichungen auftreten, so dass die Variation der Eingriffstärke kaum zu unterscheiden ist.

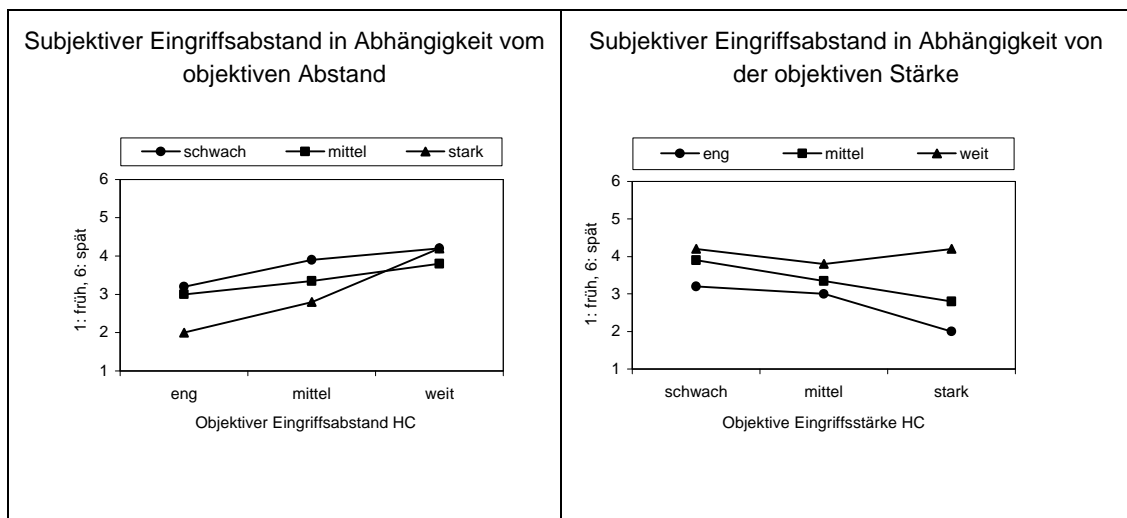


Abbildung 3-2: Mittelwert der Urteile über den Eingriffsabstand für die neun Stufen des HC. Links ist auf der Abszisse der Eingriffsabstand dargestellt, rechts die Eingriffsstärke / Average ratings for 'lateral distance when the steering torque starts' for the 9 different configurations of the HC. Abscissa left side: objective distance, Abscissa right side: objective magnitude, both ordinates: rating

Für die Beurteilung der subjektiven Eingriffsstärke ergab sich eine signifikante Hauptwirkung des Faktors „objektiver Eingriffsabstand“ ($F_{2,18} = 13.9, p = 0.000$), des Faktors „objektive Stärke“ ($F_{2,18} = 9.3, p = 0.002$) und keine Wechselwirkung ($F_{4,36} = 1.3, p = 0.295$). Abbildung 3-3 stellt die Ergebnisse, links geordnet nach dem objektiven Eingriffsabstand, rechts nach der objektiven Eingriffsstärke dar. Zum einen zeigt sich, dass die subjektive Eingriffsstärke einer HC-Auslegung erwartungsgemäß entsprechend der objektiven Eingriffsstärke beurteilt wird, d.h. je stärker das HC-System eingreift, desto stärker wird die Eingriffsstärke beurteilt. Zum anderen wird aber auch eine umso größere subjektive Eingriffsstärke angegeben, je früher der Eingriffsabstand objektiv ist.

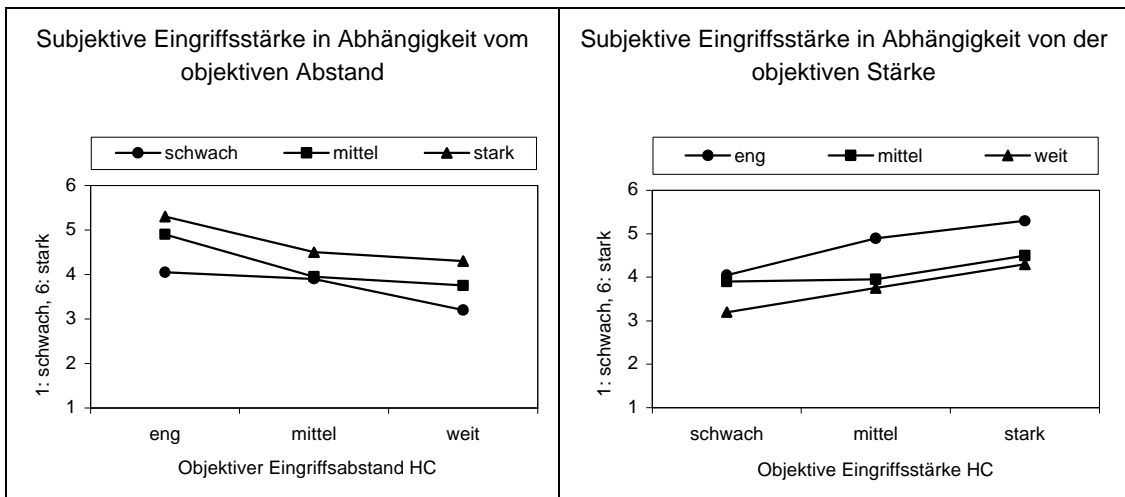


Abbildung 3-3: Mittelwert der Urteile über die Eingriffsstärke für die 9 Stufen des HC. Links ist auf der Abszisse der Eingriffsabstand dargestellt, rechts die Eingriffsstärke / Average ratings for ‚magnitude of the steering torque‘ for the 9 different configurations of the HC. Abscissa left side: objective distance, Abscissa right side: objective magnitude, both ordinates: rating

Diese Ergebnisse belegen, dass die beiden Dimensionen „Eingriffsabstand“ und „Eingriffsstärke“ zwar objektiv voneinander unabhängig sind, im Urteil der Fahrer zusammen wirken. Dies wird auch deutlich, wenn man die mittleren Urteile (Mittelwert über die Fahrer pro HC-Auslegung) über die neun HC-Auslegungen hinweg korreliert (s. Abbildung 3-4). Es ergibt sich $r = 0.82$. Das heißt, wenn bei einer Einstellung die subjektive Eingriffsstärke im Mittel als „stark“ beurteilt wird, dann wird der subjektive Eingriffsabstand auch im Mittel als „früh“ angegeben und umgekehrt.

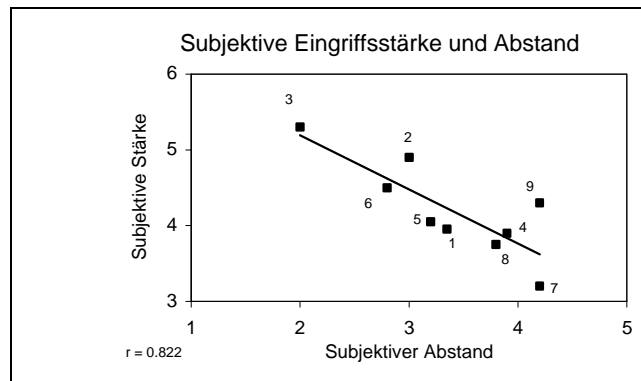


Abbildung 3-4: Zusammenhang zwischen der Beurteilung des Eingriffsabstandes (Abszisse) und der Eingriffsstärke (Ordinate). Dargestellt sind die Mittelwerte dieser beiden Beurteilungsdimensionen über die neun HC-Auslegungen hinweg. Die Zahlen geben die in Tabelle 3-1 dargestellten HC-Auslegungen wieder.

Correlation between the rating of distance (abscissa) and magnitude (ordinate). Plotted are the averages of the rating dimensions for the 9 HC configurations. The numbers are accordant to table 4.1

Die Beurteilung der Eingriffsstärke und des Eingriffsabstands macht es bei der Parametrisierung nicht notwendig, beide Dimensionen unabhängig zu variieren. Damit ist die Variation der Parameter auf einer gemeinsamen Dimension abzubilden, die als „Führungsintensität des HC-Systems“ bezeichnet werden kann und die in Abbildung 4-4 als Regressionsgerade eingezeichnet ist. Eine HC-Auslegung mit starker Führung reagiert früh und/oder stark, eine HC-Auslegung mit schwacher Führung reagiert spät und/oder schwach.

3.3.2 Auswahl von 5 HC-Auslegungen auf der Dimension „Führungsintensität von HC“

Für den Normalfahrer ist die Auswahl einer geeigneten Auslegung aus neun verschiedenen Möglichkeiten enorm schwierig. In einem nächsten Schritt sollten deswegen die Auswahlmöglichkeiten auf fünf Auslegungen reduziert werden, die das Kontinuum zwischen engem und weitem Eingriffsabstand bzw. schwachem und starkem Eingriff am besten abbilden. Formal bedeutet dies, dass Auslegungen gewählt werden sollten, die möglichst nahe an der Regressionsgeraden in Abbildung 3-5 liegen. Abbildung 3-5 zeigt erneut den Zusammenhang zwischen der subjektiven Eingriffsstärke und dem subjektiven Abstand in der Beurteilung, wobei hier die fünf Stufen der gemeinsamen Dimension als Ellipsen eingetragen sind. Außerdem sollten die gewählten Auslegungen von den Fahrern vergleichbar positiv beurteilt werden. Damit würden sich die Stufen nur von der Charakteristik, d.h. der Führungsintensität unterscheiden, nicht aber von der Gesamtbeurteilung der Güte.

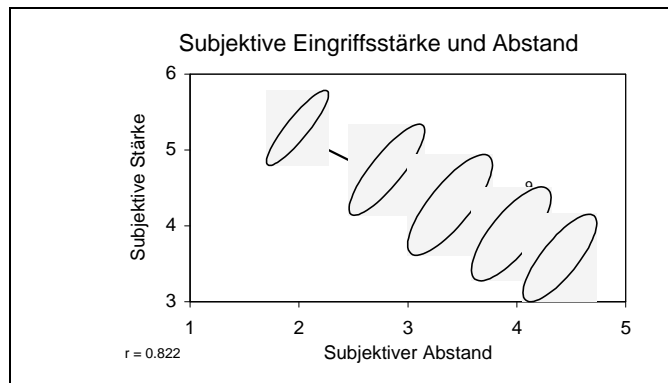


Abbildung 3-5: Abstufungen der HC-Auslegungen entsprechend der Eingriffsstärke und dem -abstand. Die 5 Ellipsen deuten die 5 Stufen des kombinierten Merkmals an. Dargestellt sind die Mittelwerte der Beurteilungen über die Fahrer hinweg.

Gradation of the HC Configurations according to magnitude and distance of the steering torque. The 5 ellipses stand for 5 grades of the combined feature 'HC intensity'. Plotted are the averages of the ratings of the drivers

Aus den so gewonnenen fünf Stufen wird im Folgenden jeweils eine repräsentative Einstellung gewählt.

- Sehr starke Führung: HC 3 (enger Abstand, starker Eingriff)
- Starke Führung: HC 6 (mittlerer Abstand, starker Eingriff)
- Mittlere Führung: HC 5 (mittlerer Abstand, mittelstarker Eingriff)
- Schwache Führung: HC 4 (mittlerer Abstand, schwacher Eingriff)
- Sehr schwache Führung: HC 7 (weiter Abstand, schwacher Eingriff)

Abbildung 3-6 zeigt die Kennlinien für diese 5 ausgewählten Auslegungen.

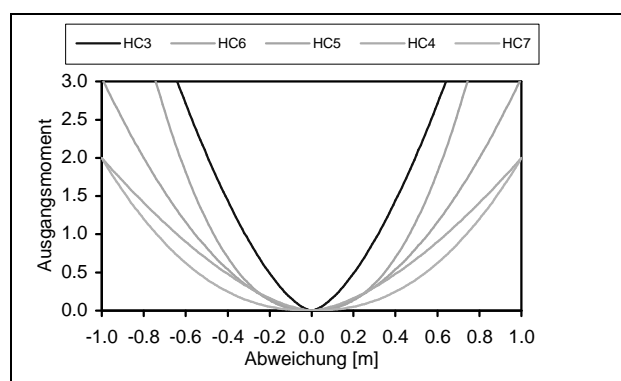


Abbildung 3-6: Übersicht über die Kennlinien der 5 ausgewählten HC-Auslegungen / Survey of the selected HC-characteristics

Abbildung 3-7 zeigt darüber hinaus die Beurteilung der Eingriffsstärke, des Eingriffsabstands und der Güte für die fünf ausgewählten HC-Auslegungen. Für Abstand und Stärke ergeben sich fast lineare Veränderungen von der sehr starken zur sehr

schwachen Führung. Bei der Beurteilung der Güte wird die sehr starke Führung schlecht beurteilt, die anderen Auslegungen vergleichbar gut. Damit liegen im Bereich starker bis sehr schwacher Führungsintensität gut akzeptierbare Einstellungen des HC vor, die sich in der Stärke der Führung deutlich unterscheiden. Für eine sehr starke Führung war keine gut bewertete Auslegung zu finden. Dieser Pol wird dennoch beibehalten, da in einer größeren Stichprobe u.U. auch diese Einstellung gewählt wird.

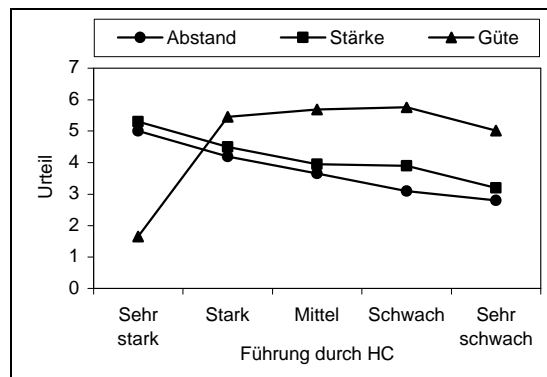


Abbildung 3-7: Beurteilung der fünf ausgewählten Auslegungen des HC hinsichtlich Eingriffsabstand und -stärke (1: spät bzw. schwach, 6: früh bzw. stark) und der Beurteilung der Güte der HC-Auslegung (0: sehr schlecht, 9: sehr gut). /

Ratings for the selected HC-configurations for distance and magnitude (1 late / weak – 6 early / strong) and the rating of quality (0 very bad – 9 very good)

Die Abbildung 3-8 zeigt darüber hinaus, welche HC-Einstellungen von den Fahrern letztendlich als bevorzugte Einstellung gewählt wurden. Stellt man diese Auswahl hinsichtlich der eindimensionalen Reihe von HC-Auslegungen dar, so wählt ein Fahrer die sehr schwache Auslegung, sechs Fahrer wählen die schwache Auslegung, drei Fahrer die mittlere Auslegung und ein Fahrer die starke Auslegung. Die sehr starke Auslegung wurde in dieser Stichprobe nicht gewählt.

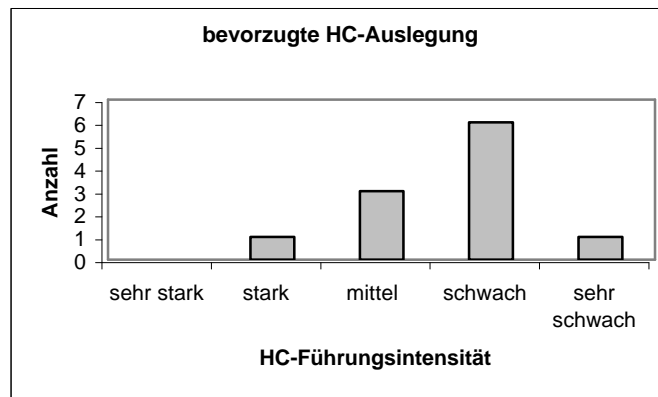


Abbildung 3-8: Von den Fahrern bevorzugte HC-Auslegungen / Preferred HC-configurations

3.4 Zusammenfassung

Die Untersuchung der Beurteilung von Eingriffsstärke und Eingriffsabstand der HC-Auslegungen zeigt auf, dass diese beiden Dimensionen nicht unabhängig sind, sondern die Variation einer Dimension auch die Beurteilung der anderen Dimension beeinflusst. Insgesamt spricht dieses Ergebnis dafür, dass es sinnvoll ist, die HC-Auslegungen nicht auf zwei Dimensionen zu variieren, sondern dass eine gemeinsame Dimension zu finden ist mit den Polen „enger und starker Eingriff“ bzw. „hohe Führungsintensität“ und „weiter und schwacher Eingriff“ bzw. „geringe Führungsintensität“. Im nächsten Schritt werden für diese Dimension anhand der vorliegenden Ergebnisse aus den 9 realisierten HC-Auslegungen geeignete HC-Auslegungen ausgewählt. Die Anzahl der möglichen Systemeinstellungen konnte so von 9 auf 5 reduziert werden. Außerdem konnte gezeigt werden, dass es den Fahrern problemlos möglich war, eine bevorzugte Einstellung für das „normale“ ungestörte Fahren auf Landstraße und Autobahn zu wählen. Die Mehrheit der Stichprobe entschied sich für das weiche, führende HC, während niemand das sehr starke HC aussuchte.

Durch die Implementierung des HCs in der Fahrsimulation und die Darstellung zum Test geeigneter standardisierter Strecken konnte dem Normalfahrer dieses System facettenreich zugänglich gemacht werden. Die einzelnen HC-Parameter wurden online verändert, so dass die Fahrer verschiedene Einstellungen im direkten Vergleich erleben konnten.

4 Tuning zentraler Systemparameter durch den Fahrer

In bislang vorliegenden Studien zum ACC wurde in der Regel der Sekundenabstand variiert, um eine individuelle Anpassung herzustellen [3]. Aktuell gebräuchliche ACC-Systeme erlauben es dem Fahrer nicht, die Charakteristik der Verzögerung zu verändern. Theoretisch wäre dies jedoch möglich. Für die hier dargestellte Studie wurde der Regler nach Weilkes¹ [4] in die Fahrsimulation implementiert.

Die verschiedenen Parameter dieses Reglers sind während der Simulation online zugänglich und veränderbar. In der Literatur werden zur Veränderung der Bremscharakteristik häufig maximale Verzögerung/Beschleunigung oder der Aufbau von Verzögerung und Beschleunigung herangezogen. Eine andere Möglichkeit den Bremsverlauf zu variieren, stellt der Parameter k_d dar. Mit diesem Faktor ist die Gewichtung zwischen dem Ausregeln des Abstandes und der Geschwindigkeitsdifferenz zu variieren. Diese Gewichtung bietet auf einfache Weise die Möglichkeit, für eine reine Geschwindigkeitsregelung eine geringere Reglerverstärkung und höhere Glättung einzuführen und damit gleichzeitig einen sanften Übergang von einer beschleunigten Fahrgeschwindigkeit in die Konstantfahrt mit Wunschgeschwindigkeit zu ermöglichen. Bei reiner Abstandsregelung findet der Übergang entsprechend später und damit auch härter statt.

Zur Einstellung eines präferierten Bremsverlaufs eignet sich der Parameter k_d besonders. Während zwischen einem sanften und einem harten Übergang von freier Fahrt in Fahrgeschwindigkeit deutlich unterschieden werden kann, ist es dem Normalfahrer schwer

¹ ACC-Regler nach M. Weilkes : Auslegung und Analyse von Fahrerassistenzsystemen mittels Simulation, Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen Aachen, Aachen, 2000:

$$a_{\text{target}} = k_v \cdot \left(k_d \cdot (d_{VF} - T_{\text{target}} \cdot v_{VF}) - (v - v_{VF}) \right)$$

mit:

k_v konstanter Umrechnungsfaktor (Einheit: $1/s$)

k_d konstanter Umrechnungsfaktor (Einheit: $1/s$)

d_{VF} Abstand zum vorausfahrenden Hindernis (Einheit: m)

T_{target} gewünschter Abstand zum vorausfahrenden Hindernis (in s)

v aktuelle Fahrzeuggeschwindigkeit (Einheit: m/s)

v_{VF} Geschwindigkeit des vorausfahrenden Hindernisses (Einheit: m/s)

a_{min} minimale Beschleunigung (max. Verzögerung) (Einheit: m/s^2)

a_{max} maximale Beschleunigung (Einheit: m/s^2)

Der Wertebereich von a_{target} wird auf $[a_{\text{min}}, a_{\text{max}}]$ beschränkt.

begreiflich zu machen, in welcher Weise sich die Veränderung der maximalen Verzögerung auf den gesamten Bremsverlauf bei unterschiedlichen Differenzgeschwindigkeiten zum Führungsfahrzeug auswirkt. Der Effekt einer solchen Variation der Bremscharakteristik ist einem Fahrer nicht „vorstellbar“, sondern nur „erfahr-bar“.

Über den Parameter k_d wurden deshalb zunächst drei verschiedene, deutlich voneinander abgrenzbare Bremsverläufe hergestellt. Neben dem Sekundenabstand konnte der Fahrer aus diesen Verzögerungsverläufen seinen bevorzugten Verlauf auswählen. In der folgenden Abbildung sind drei denkbare Verläufe idealisiert dargestellt.

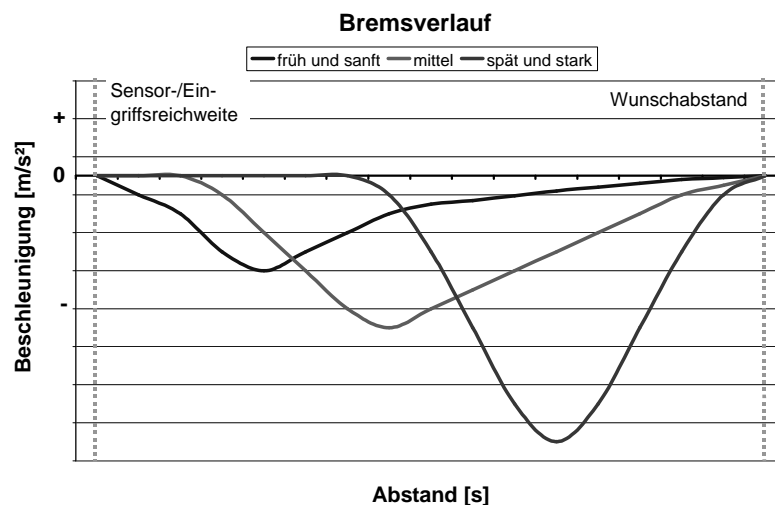


Abbildung 4-1: Mögliche, idealisierte Verzögerungsverläufe, die sich aus dem Parameter k_d ergeben / Possible idealised deceleration characteristics as a result of changing the parameter k_d

Wählt man eine stark gewichtete Geschwindigkeitsregelung, so greift der Regler relativ früh ein, um die eigene Geschwindigkeit an die des Vorausfahrenden anzupassen. Da er genügend Zeit zur Verfügung hat, kann dieser Eingriff insgesamt sehr sanft erfolgen und die Verzögerung baut sich dementsprechend langsam auf. Die maximal zugelassene Verzögerung wird nur bei extremen Differenzgeschwindigkeiten erreicht.

Dementsprechend greift der Regler bei höher gewichteter Abstandsregelung sehr spät ein, hat wenig Zeit zur Verfügung, muss die Verzögerung also schneller aufbauen, stärker bremsen und kommt häufiger an die maximale Verzögerung als die sanfteren Auslegungen.

In Vorversuchen am Simulator wurde mit dem Parameter k_d frei experimentiert, wobei sich herausgestellt hat, dass die Fahrer verschiedene k_d Werte deutlich unterscheiden und persönliche Vorlieben bezüglich bestimmter Werte benennen können.

Um die Testfahrer nicht mit einem allzu großen „Angebot“ zu überfordern, wurden die Möglichkeiten zunächst auf die oben skizzierten drei Auslegungen beschränkt. Für

das Experiment wurden die k_d -Werte 0.1 (sanfter Verlauf), 0.2 (mittlerer Verlauf) und 0.3 (starker Verlauf) ausgewählt.

4.1 Untersuchungsanordnung

Der Fahrer muss zunächst über das ACC, die grundsätzliche Funktionsweise dieses Systems und seine Systemgrenzen informiert werden. Auf einer einfachen Teststrecke wird er mit dem System auch praktisch vertraut gemacht. Erst wenn die Bedienung klar ist und das Prinzip des ACC „erfahren“ wurde, finden die Untersuchungen der individuellen Präferenzen statt. Der Fahrer darf dabei die ACC- Einstellungen immer wieder neu anpassen.

4.1.1 Aufbau der Untersuchung

Die Datenerhebung findet in drei Blöcken statt. Zunächst bekommt der Testfahrer eine theoretische Einführung über die Funktionsweise und die Bedienung des Systems. Außerdem wird er mit den frei wählbaren Parametern Bremsverlauf und Sekundenabstand vertraut gemacht.

Auf einer Teststrecke, auf der außer einem Führungsfahrzeug keine anderen Verkehrsteilnehmer vorzufinden sind, lernt der Fahrer das System mit einer mittleren Einstellung ($k_d=0,2$, $T_{\text{Target}}=1,5\text{s}$) kennen. Als Differenzgeschwindigkeit zum Führungsfahrzeug wird konstant 30km/h gewählt. Dies geschieht mittels eines Synchronisationsbefehls in der Simulation. An einem bestimmten Streckenmeter nimmt das Führungsfahrzeug abhängig von der Geschwindigkeit des EGO-Fahrzeugs die gewünschte Differenzgeschwindigkeit ein. Somit ist der Versuchsablauf auch gegenüber variierendem Verhalten zwischen einzelnen Testfahrern tolerant.

Wenn ins Folgefahren übergegangen wurde, wird der individuell bevorzugte Sekundenabstand bestimmt. Mit diesem frei gewählten Sekundenabstand werden die anderen Bremsverläufe vorgestellt und nach Wunsch des Fahrers immer wieder dargeboten, bis er sich für eine bevorzugte Einstellung entschieden hat. Als Basisgeschwindigkeiten werden 100km/h (vergleichbar Landstraße) und 150km/h (vergleichbar Autobahn) gewählt. Die Auswahl der bevorzugten Parameter erfolgt für beide Basisgeschwindigkeiten.

Hat der Fahrer seine individuellen Einstellungen gefunden, wird er auf eine Teststrecke geschickt, auf der er mit den Differenzgeschwindigkeiten 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70 und 80km/h in zufälliger Reihenfolge konfrontiert wird. Der Fahrer hat somit Gelegenheit die Systemgrenzen zu erfahren. D.h. bei den Differenzgeschwindigkeiten 60-80km/h ist immer ein manueller Eingriff nötig, alle anderen Situationen werden vom ACC problemlos bewältigt. Die entsprechenden Differenzgeschwindigkeiten werden erneut über den Synchronisationsbefehl erreicht. Nach dem Übergang ins Folgefahren biegt das jeweilige Führungsfahrzeug auf der Landstraße an der nächsten Kreuzung.

zung ab, so dass der Fahrer wieder die Ursprungsgeschwindigkeit einnehmen und sich auf eine neue Annäherung einstellen kann. Auf der Autobahn beschleunigen die Führungsfahrzeuge nach dem Übergang ins Folgefahren aus dem Sichtbereich des Fahrers weg und werden dort unbemerkt abgeschaltet. Auch hier kann der Fahrer wieder seine Ursprungsgeschwindigkeit einnehmen und sich auf eine neue Annäherung vorbereiten.

Jede Fahrt dauert 15 Minuten. Nach der Fahrt hat der Fahrer die Gelegenheit, seine ACC-Einstellungen zu verändern. Da die Fahrten sowohl auf der Landstraße als auch auf der Autobahn durchgeführt und je drei Mal wiederholt werden, hatte jeder Fahrer sechs Fahrten von je 15 Minuten zu absolvieren. Nach vier bis sechs Wochen wird der Fahrer erneut mit den Messfahrten für Autobahn und Landstraße konfrontiert. Wieder ist es seine Aufgabe, die bevorzugten Einstellungen zu wählen. Schließlich soll er die Einstellungen wählen, mit denen er den Wagen fahren würde, hätte er eine ängstliche Person im Fahrzeug, die nicht merken soll, dass mit einem Assistenzsystem gefahren wird (Komforteinstellung).

4.1.2 Stichprobe

Es haben 18 Testfahrer im Alter von 22 bis 57 Jahren an dem Versuch teilgenommen, davon 9 Frauen und 9 Männer. Die Testfahrer haben zwischen 4 und 39 Jahren Fahrpraxis ($m = 15,42$; $sd = 13,32$) und sind im letzten Jahr zwischen 7.500 und 40.000 km gefahren.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Individuelle Präferenzen

Welche Bremsverläufe mit welchen Sekundenabständen nach Abschluss der Trainingsphase endgültig gewählt wurden, ist in nachfolgender Abbildung zu entnehmen.

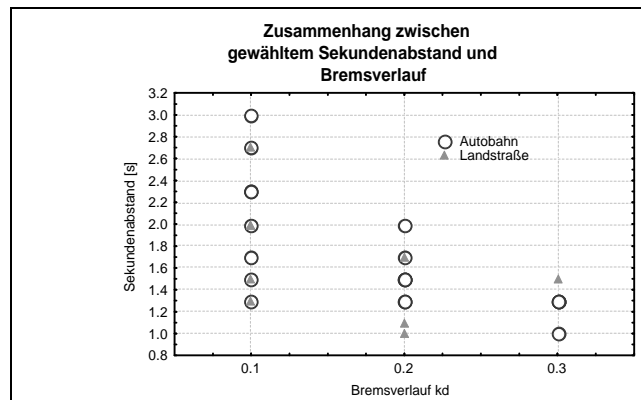


Abbildung 4-2: Zusammenhang von gewähltem Bremsverlauf (0,1= früh und sanft; 0,2= mittel; 0,3= spät und stark) und Sekundenabstand /

Correlation between preferred deceleration characteristics (early and smooth to late and powerful) and preferred target headway

Die Abbildung zeigt, dass ein Bremsverlauf von 0,3 (spät und stark) mit einem niedrigeren Sekundenabstand einhergeht (1,0s – 1,5s). Alle Personen, die einen sehr großen Sekundenabstand bevorzugen (2,3s – 3,0s) wählen auch den sanften Bremsverlauf. Im Bereich von 1,5s und 2,0s kann der bevorzugte Bremsverlauf nicht aus dem gewählten Sekundenabstand vorhergesagt werden. Hier sind alle Variationen denkbar. Bei der Auswahl der Einstellungen war auffällig, dass bei der Vorgabe zweier unterschiedlicher Bremsverläufe von allen Testfahrern in allen Fällen erkannt wird, was die beiden Bremsverläufe voneinander unterscheidet. Anders beim Sekundenabstand: hier können die Testfahrer Unterschiede in der Größenordnung von 0,3s – 0,4s nicht erkennen.

4.2.2 Streckentyp

Für die Auslegung von Systemen wie dem ACC ist es wichtig zu wissen, ob die Fahrer unterschiedliche Systemparametrisierung in Abhängigkeit von der Fahraufgabe wollen. Ein wesentlicher Unterschied ist durch den Straßentyp gegeben. Die folgenden Abbildungen zeigen das Ergebnis der ACC-Einstellungen in Abhängigkeit vom Streckentyp „Landstraße“ vs. „Autobahn“.

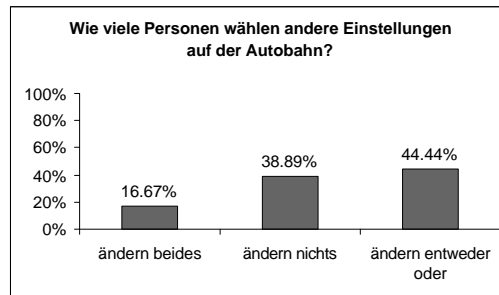


Abbildung 4-3: Prozent der Stichprobe, die auf der Autobahn andere ACC-Einstellungen wählt als auf der Landstraße /
Percentage of drivers, who change the preferred system characteristics when driving on highways versus driving on rural roads

40% der Stichprobe behält auf beiden Streckentypen dieselben Einstellungen bei. 17% (entspricht drei Personen von 18) ändern sowohl den Bremsverlauf als auch den Sekundenabstand. 45% der Stichprobe ändert entweder den Sekundenabstand oder den Bremsverlauf.

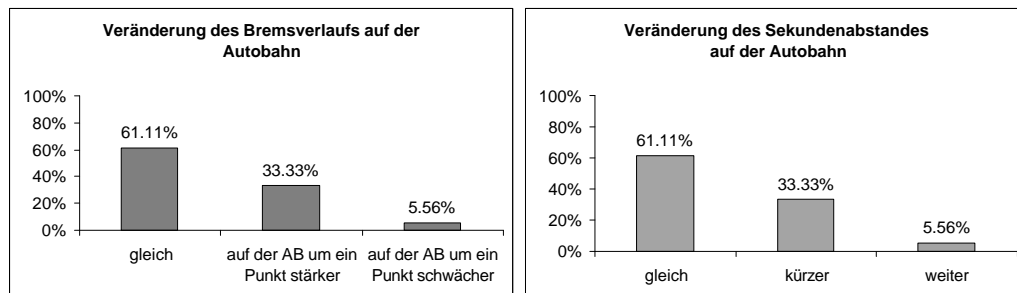


Abbildung 4-4: Unterschiedliche Wahl der Einstellung von Bremsverlaufs und Sekundenabstand bezogen auf den Streckentyp /
Percentage of drivers, who change the preferred deceleration characteristics or target headway when driving on highways versus driving on rural roads

Wenn ein anderer Bremsverlauf gewünscht ist, wird dieser im Vergleich zur Landstraße auf der Autobahn in der Regel (mit einer Ausnahme) stärker eingestellt. Der Sekundenabstand wird bei den Personen, die eine Unterscheidung vornehmen, meist auf der Autobahn kürzer gehalten. Dieses Ergebnis mag auf den ersten Blick befremdlich sein, da auf der Autobahn aufgrund der höheren Geschwindigkeiten ein größerer Abstand und ein vorausschauenderes Bremsverhalten für die Verkehrssicherheit mehr Sinn machen würde. Die Fahrer geben jedoch an, sich auf der Autobahn eher auf einen Überholvorgang einzustellen und deswegen am Führungsfahrzeug zügiger „dran bleiben“ zu wollen. Dagegen stellt man sich auf der Landstraße auf ein Folgefahren ein und wählt die „entspannteren“ Einstellungen.

4.2.3 Personenvariablen

Alter, Geschlecht und Fahrerfahrung hatten keinerlei Auswirkung auf die Präferenzen. Auffällig ist, dass die „extremen“ Einstellungen ($k_d=0,3$ mit einem Sekundenabstand $\leq 1,3s$) überwiegend in der Gruppe der Vielfahrer vorzufinden ist. Da in dieser Gruppe jedoch auch „gemäßigtere“ Einstellungen gewählt werden, ist eine eindeutige Zuordnung nicht möglich.

4.2.4 Reliabilität und Stabilität

Gibt man im ersten Termin die drei Bremsverläufe zweimal direkt hintereinander vor, wählen alle Testfahrer zweimal denselben Bremsverlauf. Bei zwei verschiedenen Bremsverläufen im Vergleich wird der Unterschied der beiden Bremsverläufe immer richtig zugeordnet. Beim Sekundenabstand liegt die Wiedererkennungsrates bei der Darbietung innerhalb eines kurzen Zeitabschnitts in einem Bereich zwischen $\pm 0,3s$. Die Schwelle, ab wann eine Veränderung des Sekundenabstands bemerkt wird, ist unter den Testfahrern verschieden. In der Regel gilt, dass im direkten Vergleich ein Unterschied frühestens ab $0,2s$ wahrgenommen wird. Eine exakte Schwellenbestimmung wurde jedoch nicht vorgenommen.

In der vorliegenden Studie wurde eine zusätzliche Wiederholungsmessung am Ende der gesamten Versuchsreihe vorgenommen. Diese Wiederholungsmessung kann allerdings nicht als reine Reliabilitätsmessung gelten, da nicht klar ist, ob ein anderer Unterstützungswunsch durch die in der Zwischenzeit gewonnene Erfahrung mit dem System herrührt oder ob der Testfahrer seine Wunscheinstellungen nicht wiedererkennt. Zwischen der ersten Auswahl der individuellen Einstellungen und dem zweiten Mal lagen in der Regel vier bis sechs Wochen. Die Ergebnisse der sind in den folgenden Abbildungen zu entnehmen.

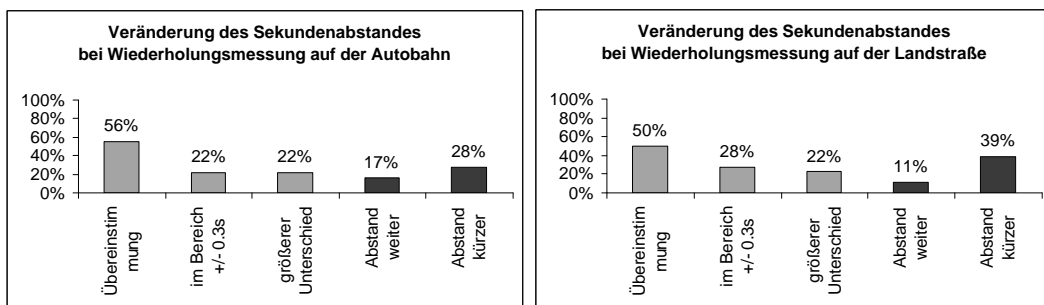


Abbildung 4-5: Veränderung des Wunsch-Sekundenabstands bei Wiederholungsmessung / Different preferred target-headways for repeated measurement

Bei der wiederholten Einstellung des Sekundenabstandes wählen immerhin 50% den selben Abstand wie in der ersten Auswahl. Nimmt man einen Bereich von $\pm 0,3s$ als „übereinstimmend“ an, so hat man eine Übereinstimmung zwischen erster und zweiter Messung von ca. 80% (sowohl auf Landstraße als auch auf der Autobahn). Inte-

ressanterweise wird der Abstand bei einer Veränderung in der zweiten Messung eher kürzer eingestellt. Die Kommentare der Testfahrer legen die Vermutung nahe, dass im Laufe der Untersuchung ein größeres Systemvertrauen entwickelt wurde und eine „Sicherheitsreserve“ nicht mehr als nötig empfunden wird.

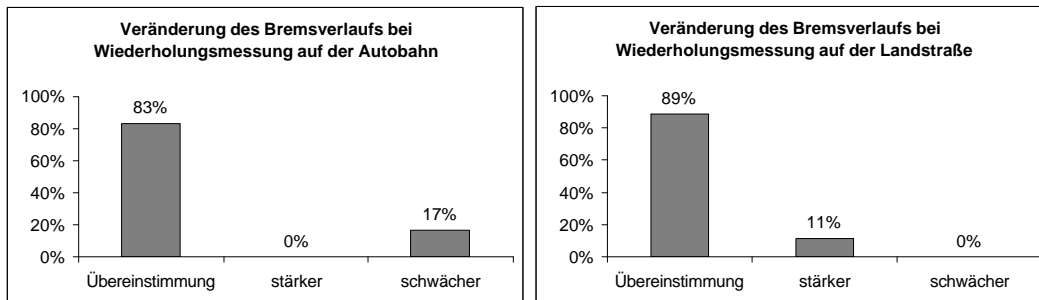


Abbildung 4-6: Veränderung des Wunsch-Bremsverlaufs bei Wiederholungsmessung /
Different preferred deceleration characteristics for repeated measurement

Bei der Wahl des Bremsverlaufs zeigte sich eine extrem hohe Übereinstimmung zwischen erster und zweiter Messung. 80-90% der Fahrer wählen in beiden Messungen denselben Bremsverlauf als den individuell präferierten aus. In Einzelfällen wird der bevorzugte Bremsverlauf variiert, dies betrifft allerdings auf der Autobahn lediglich drei, auf der Landstraße nur 2 Personen aus der Stichprobe.

4.2.5 Komfortfrage

Unter diesem Punkt wird die Frage gestellt, ob der Fahrer andere ACC-Einstellungen wählt, wenn eine andere Fahrintention vorliegt. In der Komfortfrage war die Instruktion, der Testfahrer solle sich vorstellen, auf dem Beifahrersitz eine Person zu transportieren, die krank oder besonders empfindlich reagiert. Er wolle diese Person schonen und solle dahingehend eine optimale Auslegung des ACC wählen.

Unter dieser Fragestellung wählen 100% der Fahrer den sanften Bremsverlauf. Auch im Sekundenabstand wird eine Veränderung vorgenommen. Aus Abbildung 4-7 ist zu lesen, dass bezogen auf eine Autobahnfahrt 67% der Stichprobe, bezogen auf eine Landstraßenfahrt 75% der Stichprobe unter Komfortgesichtspunkten ihren persönlich präferierten Sekundenabstand verändern.

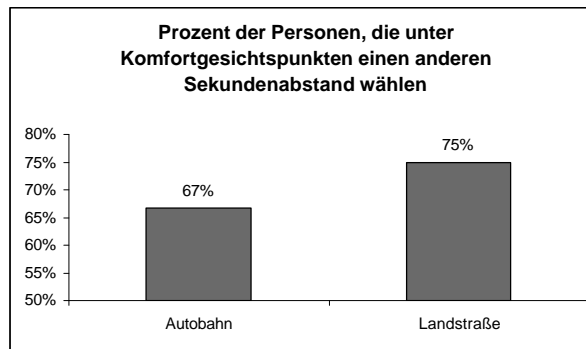


Abbildung 4-7: Anteil der Personen aus der Stichprobe, die unter Komfortgesichtspunkten einen anderen Sekundenabstand wählen / Percentage of drivers who change their preferred target-headway under comfort conditions

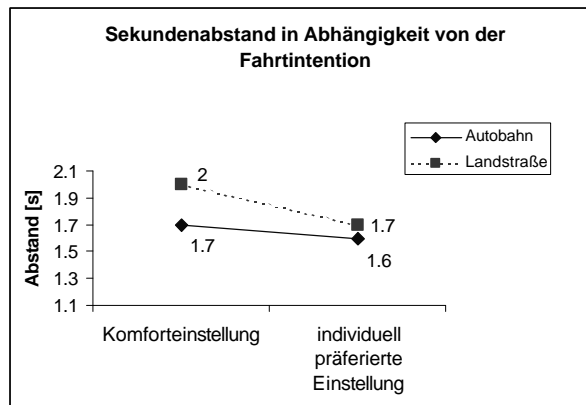


Abbildung 4-8: Unterschiedliche Wahl des Sekundenabstands bei komfortablem Fahren und individuell präferierte Einstellungen / Comparison of preferred target-headway and target-headway under comfort conditions

Wie Abbildung 4-8 zeigt, wird der Abstand sowohl auf der Autobahn als auch auf der Landstraße vergrößert. Dabei ist der Unterschied auf der Landstraße größer.

4.3 Zusammenfassung

Die in der Studie realisierten drei unterschiedlichen Bremsverläufe des ACC können von den Fahrern eindeutig differenziert werden. Die Ergebnisse legen sogar eine noch feinere Differenzierung der Bremsverläufe nahe. Die Fahrer betonen immer wieder, wie wichtig ihnen eine deutliche kinästhetische Rückmeldung über den Systemzustand ist. Für einen ausdrücklich fühlbaren Eingriff des Systems nähme man sogar einen weniger eleganten Bremsverlauf, als er momentan in den Systemen realisiert ist, in Kauf. Darüber hinaus sind für jeden Fahrer eindeutige individuelle Präferenzen in der Systemauslegung auszumachen. Es gibt verschiedene Faktoren wie z.B. Streckentyp oder Fahrtdintention, die diese Präferenzen beeinflussen. Alter und Geschlecht spielen dabei eine geringe Rolle.

Erneut war die Möglichkeit, die einzelnen Reglerparameter in der Simulation online zugänglich zu machen, Voraussetzung für diese Versuchsreihe. Darüber hinaus war die individuelle Auswahl der ACC-Parameter in der Simulation aber nur deshalb möglich, weil durch die spezielle Verkehrsdefinition die Auswirkungen der einzelnen Parametrisierungen erst systematisch „erfahrbar“ wurden.

5 Diskussion

In einer Untersuchungsreihe des Projektes EMPHASIS ist es gelungen, eine Parameterauswahl zur Gestaltung eines Längs- bzw. Querregelsystems zu finden. Dabei hat sich herausgestellt, dass ACC und HC grundsätzlich unterschiedlich zu bewerten sind, da ersteres vollständig handlungsersetzend, das andere lediglich unterstützend wirkt. Für beide Systeme konnten sich die Fahrer jedoch klar für bevorzugte Einstellungen entscheiden. Als besonders wichtig hat sich dabei der kinästhetische Eindruck des Fahrers heraus kristallisiert.

Die Würzburger Fahrsimulation kommt einem solchen Vorhaben durch Möglichkeiten in der modularen Implementierung von Assistenzsystemen bzw. der Streckengestaltung entgegen. Zunächst sind die Fahrerassistenzsysteme als eigenständige Software Module in die Simulation integrierbar. Somit stehen dem Versuchsleiter alle Parameter online während der Fahrt zur Veränderung zur freien Verfügung.

Am Beispiel des Spurhalteassistenten wurde gezeigt, wie der Versuchsleiter mit einem relativ geringen Versuchsaufwand aus dem breiten Spektrum von veränderbaren Parametern des Spurhalteassistenten gemeinsam mit dem Fahrer die für die Systemcharakteristik wesentlichen Parameter finden kann. Dazu nimmt der Normalfahrer Beurteilungen unterschiedlicher Systemvarianten vor und kann schließlich individuelle Wünsche zur Systemauslegung äußern. Diese Auswahl ist ausschließlich in einer modular aufgebauten Fahrsimulation möglich, da nur hier auf einzelne Reglerparameter online zugegriffen werden kann.

Im Beispiel ACC war der zu verändernde Parameter - die Verzögerungscharakteristik des Reglers in der Annäherungsphase - bereits aus Pilotstudien bekannt. Es stellte sich jedoch die Frage, ob der Fahrer unterschiedliche Bremsverläufe des ACC überhaupt unterscheiden und darüber hinaus eine Wunscheinstellung reliabel herstellen kann. An Hand einer besonderen Form der Verkehrsdefinition kann erreicht werden, dem Fahrer die verschiedenen Bremsverläufe in ihren Ausprägungen bezogen auf unterschiedliche Differenzgeschwindigkeiten kinästhetisch zugänglich zu machen. Es werden immer wiederkehrende Annäherungen dargeboten, die in definierten Differenzgeschwindigkeiten durch einen Synchronisationsbefehl bezogen auf den umgebenden Simulationsverkehr erreicht werden. An diesem Punkt bedarf es einer speziellen Verkehrsdefinition. Die simulierten Fahrzeuge dürfen sich nicht vollständig autonom bewegen, da ein systematisches Untersuchen der Fragestellung sonst nicht mehr möglich wäre. Dennoch soll das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmer für

den Testfahrer realistisch wirken. So wurde in der Würzburger Fahrsimulation die Möglichkeit gegeben, einerseits Kolonnen zu definieren, die ein teilautonomes Verhalten zeigen. Diese werden z.B. als Gegenverkehr eingesetzt. Darüber hinaus kann der Versuchsleiter aber auch für ein bestimmtes Fahrzeug angeben, an welchem Streckenmeter es welches Verhalten zeigen soll. Nur so ist es möglich, systematisch die Verzögerungen herzustellen, die es dem Fahrer ermöglichen, ein System wie z.B. ein ACC in seinen Ausprägungen zu „erfahren“. Die Fahrer konnten problemlos eine Wunscheinstellung aus drei angebotenen Bremsverläufen auswählen und auch bei Wiederholungsmessung sechs Wochen hoch reliabel wieder herstellen.

6 Literatur

[1] Buld S., Hoffmann S., Kaussner A., Tietze H., Totzke I., Krüger H.-P.: Wirkungen von Assistenz und Automation auf Fahrerzustand und Fahrsicherheit. Bonn: Abschlussbericht BMBF 19 S 9812 7, 2002.

[2] Naab, K.: Heading Control – Ein System zur Fahrerunterstützung bei der Spurhaltung, Veranstaltungsunterlagen Fahrerassistenzsysteme. Essen: Haus der Technik e.V. 1998.

[3] Fancher, P. S., & Ervin, R. D.: Adaptive Cruise Control Field Operation Test. The UMTRI research review, 29(4), 1-17, 1998.

[4] Weilkes, M.: Auslegung und Analyse von Fahrerassistenzsystemen mittels Simulation. Aachen: Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen 2000.