

Human-Machine-Interface Design für einen Längsführungsassistenten

Ute Niederée, Mark Vollrath

Ingenieur- und Verkehrspsychologie, TU Braunschweig

Zusammenfassung

Als primärer Unfallverursacher wird der Autofahrer verstärkt durch Fahrerassistenzsysteme (FAS) ersetzt. Die Unterstützung reicht dabei von Information und Warnung bis hin zur Übernahme der kompletten Fahraufgabe auf Längs- und/oder Querführungsebene. Dadurch wird der aktiv Fahrende zunehmend zum Systemüberwacher, bleibt aber beim Versagen des Systems weiterhin rechtlich in der Verantwortung. Eine Vielzahl von Studien aus der Luftfahrt und anderen Bereichen weist nach, dass Menschen insbesondere bei hochautomatisierten und hoch zuverlässigen Systemen keine optimalen Systemüberwacher sind. Es werden häufig negative Automationseffekte beobachtet, wie hohe Complacency, geringe Situation Awareness sowie das Out-of-the-Loop Problem, wodurch es zu verzögerten oder Fehlreaktionen und in letzter Konsequenz zu schweren Unfällen kommt. Im Gegensatz zum Flugzeugcockpit sind die Konsequenzen von Systemfehlern bei hochautomatisierten Assistenzsystemen im Fahrzeugcockpit trotz des zunehmenden Einsatzes der FAS nur unzureichend untersucht.

Daher wurden zwei umfangreiche Fahrsimulatorstudien sowie eine User Studie konzipiert und durchgeführt. Untersucht wurden die Auswirkungen nicht rückgemeldeter Systemfehler und verschiedener Level of Automation (LOA) eines Längsführungsassistenten auf Fahrperformanz und Systemakzeptanz. Im Anschluss wurde ein Konzept für ein Human-Machine-Interface (HMI) zur Verbesserung der Fahrereingriffe bei Systemfehlern entwickelt.

1 Theorie

Primäres Ziel von FAS sind die Vermeidung von Fahrfehlern und Unfällen, ein erhöhter Komfort für den Fahrer sowie die Entlastung der Umwelt durch einen gleichmäßigeren Verkehrsfluss. Zum Teil werden diese Ziele auch erreicht, jedoch stehen den positiven Effekten von FAS negative Aspekte der zunehmenden Automatisierung entgegen.

Je stärker ein FAS die Fahrzeugführung übernimmt, umso mehr verschiebt sich die aktive Tätigkeit des Fahrers hin zu einer passiven Systemüberwachung. Diese Aufgabenverschiebung wäre unproblematisch, wenn die Automatisierung vollständig und das System 100%ig

zuverlässig wäre. Nicht nur aus der Luftfahrt ist hinreichend bekannt, dass Menschen nicht optimal für die Systemüberwachung geeignet sind (Bainbridge, 1983; Endsley & Kiris, 1995; Endsley, 1996).

Vor allem bei der Überwachung hoch zuverlässiger Systeme, über einen längeren Zeitraum hinweg, sind eine Reihe negativer Automationseffekte bekannt. Bei hochautomatisierten und hochzuverlässigen Systemen hat der Anwender eine geringe Situation Awareness (SA) und gerät daher leicht aus dem Geschehen heraus. In der Fachliteratur wird dies als "Out-of-the-Loop" Phänomen bezeichnet (Endsley, 1996). Eine weitere Problematik hoher Systemzuverlässigkeit ist blindes Vertrauen in das System und eine damit verbundene Vernachlässigung der Überwachung (Complacency) (z.B. Endsley, 1996, Parasuraman & Riley, 1997). Gemeinsam ist diesen Phänomenen, dass der Systemanwender bei Systemfehlern oder -ausfällen schlechter als der aktiv Fahrende reagiert und erst sehr spät oder gar nicht eingreift (Parasuraman & Riley, 1997; Parasuraman et al., 2008).

Im Gegensatz zur Luftfahrt und anderen komplexen Systemen gibt es im Automobilbereich noch sehr wenige Studien, die sich mit den Zusammenhängen zwischen Automationsgrad, Systemzuverlässigkeit und Nutzererwartungen beschäftigen.

2 Studien

Aufgrund des zuvor beschriebenen Mangels an Untersuchungen und der zunehmenden praktischen Bedeutung von FAS wurden zwei Studien durchgeführt.

In der ersten Fahrsimulatorstudie wurden die Auswirkungen unterschiedlicher LOA (übernehmende vs. informierende Assistenz) und unterschiedlicher Level der Systemzuverlässigkeit (Systemfehler in 5% vs. 30% der Situationen) auf die Fahrereingriffe bei nicht rückgemeldeten Systemfehlern untersucht.

Aufbauend auf den Ergebnissen der ersten Studie lag das Ziel der zweiten Studie in der Konzeption und anschließenden Evaluation eines HMI für einen Längsführungsassistenten. Dieses HMI sollte den Fahrer im Loop halten, seine SA erhalten und ein möglichst optimales Eingreifen bei nicht rückgemeldeten, seltenen Systemfehlern ermöglichen.

2.1 Durchführung

Beide Untersuchungen wurden im feststehenden Fahrsimulator der Ingenieur- und Verkehrspsychologie der TU Braunschweig durchgeführt. Das Fahrzeugmodell basiert auf einem 5er BMW mit Heckantrieb und Automatikgetriebe. Die Streckenprogrammierung erfolgte mit SILAB 2.1 und 2.5. und die Simulation über drei Leinwände mit einem Sichtfeld von ca. 180°.

2.1.1 Strecke und System

Die Strecke bestand aus einer einspurigen 86 km/144km (Studien 1/2) langen Landstraße mit alternierend Kurven und Geraden. Die Kurvenlänge variierte bei Kurvenradien zwischen 150 und 300 m. Rechts- und Linkskurven wurden randomisiert auf die Strecke verteilt. Der Gegenverkehr hatte eine mittlere Verkehrsdichte. Die Geschwindigkeitsbegrenzung auf den Geraden betrug 100 km/h, in den Kurven musste auf Geschwindigkeiten zwischen 50 und 80km/h heruntergebremst werden. Während der gesamten Fahrt befand sich kein vorausfahrendes Fahrzeug vor dem Ego-Car.

Jeder Proband (Pb) absolvierte die Strecke einmal ohne und einmal mit System, wobei die Reihenfolge variiert wurde. Um Simulator Sickness zu vermeiden und die Fahrer zugleich an das Fahren im Simulator zu gewöhnen, absolvierten alle Fahrer vor den Fahrten ein speziell auf den jeweiligen Versuch abgestimmtes Training.

Für die Automatisierung wurde der Bereich der Längsführung gewählt, einerseits wegen der starken Marktdurchdringung der in diesem Bereich genutzten Systeme wie z.B. Adaptive Cruise Control (ACC), andererseits wegen der Bedeutung der Geschwindigkeitsregulierung für die Unfallvermeidung.

2.1.2 Aufgabe der Probanden

In dem dargestellten Setting hatten die Pbn. die Aufgabe, die Landstraße analog zum realen Verkehr zu befahren und die Geschwindigkeit an die jeweilige Höchstgeschwindigkeit anzupassen. Sie wurden darauf hingewiesen, dass es sich bei dem genutzten System um einen nicht 100%ig zuverlässigen Prototypen handelte und die Verantwortung für die Fahrsicherheit deshalb ausdrücklich bei ihnen läge.

Vor und nach der Fahrt mit dem FAS füllten die Pbn. Fragebogen zur Systemakzeptanz aus. Hierbei wurde das Kategorienunterteilungsverfahren von Heller (1982) verwendet. Insgesamt stand eine 15-Punkte-Skala zur Verfügung. Die Gesamtversuchsdauer betrug an zwei Terminen 3½ bzw. 6 Stunden (Studie 1/2).

2.1.3 Methode

Die beiden Faktoren LOA (hoch versus niedrig) und Systemzuverlässigkeit (70% versus 95%) wurden mit vier unabhängigen Gruppen untersucht. Das höher automatisierte System (Intelligent Speed Adaptation/ISA) übernahm die Aufgabe der Geschwindigkeitsregulation. Es erkannte die aktuelle Geschwindigkeitsbegrenzung und bremste bzw. beschleunigte das Fahrzeug entsprechend. Der Fahrer musste lenken und bei Systemfehlern Geschwindigkeitsregulierend eingreifen. Das niedriger automatisierte System (Speed-Decision/SD) gab dem Fahrer per Head-Up-Display eine Rückmeldung über die Abweichung der aktuellen Geschwindigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit. Die Realisierung erfolgte in Ampelanalogie (Umsetzung der Systeme siehe Abb. 1).



Abbildung 1: Simulator Screenshots. Links höhere Automation (ISA) mit HUD Darstellung, rechts niedrigere Automation (SD).

An der Untersuchung nahmen insgesamt 35 Probanden (66% ♀, 34% ♂) im Alter von 19-48 Jahren ($M = 25.3$; $SD = 6.8$) teil. Die Pbn. waren im Mittel seit 7 Jahren im Besitz eines Führerscheins ($SD = 5.8$) und legten bis zu 20.000 km im Jahr zurück (86.1%).

Folgende Fahrparameter für die Kurven mit Systemfehler wurden ausgewertet: Reaktionszeit (RZ), mittlere und maximale gemittelte Geschwindigkeit sowie das Abkommen von der Fahrspur (mehr als 30cm in die Gegenfahrspur).

2.1.4 Ergebnisse

Automationseffekt Fahrt ohne System/Systemfahrt

Eine Auswertung der RZ für die Kurve des ersten gemeinsamen Systemfehlers für 95% und 70% Zuverlässigkeit (1/5 Systemfehler) mittels MANOVA weist signifikante Unterschiede für die Fahrten ohne versus mit Unterstützung nach (HE System: $F_{1,22} = 13.6$, $p = .001$). Die Fahrer reagierten bei der Fahrt ohne System im Mittel 5.02 Sekunden (Sek.) vor, bei Systemfahrten im Mittel 1.04 Sek. nach dem Schild mit der Geschwindigkeitsbeschränkung. Demzufolge ergibt auch die Auswertung der Geschwindigkeit einen signifikanten HE des Systems ($F_{3,34} = 5.8$, $p = .003$). Univariat wurde die mittlere Geschwindigkeit signifikant ($F_{1,34} = 7.1$, $p = .012$). Die Fahrer fuhren mit Unterstützung des Systems in der Kurve mit Systemfehler im Mittel 6km/h schneller als ohne Unterstützung.

Systemeffekte LOA und Zuverlässigkeit

Werden ausschließlich die Daten für die Systemfahrt des 1. und 2. gemeinsamen Systemfehlers für 95% und 70% Zuverlässigkeit mit einer MANOVA analysiert, ergibt sich eine signifikante Interaktion zwischen LOA und Systemzuverlässigkeit ($F_{6,26} = 4.3$, $p = .004$). Während die Systemzuverlässigkeit bei einem geringen LOA kaum Auswirkungen auf die Fahrperformanz während der Systemfehler hat, ändert sich diese bei hohem LOA in Abhängigkeit von der Systemzuverlässigkeit. Die Pbn. fuhren besonders schnell mit dem System mit hohem LOA und hoher Zuverlässigkeit (Siehe Abb. 2 für den 1. gemeinsamen Systemfehler).

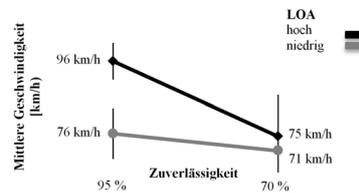


Abbildung 2: Mittlere Geschwindigkeit während des 1. gemeinsamen Systemfehlers (95/70% Systemzuverlässigkeit).

Bezüglich der RZ des 1. und 2. gemeinsamen Systemfehlers für 95% und 70% Zuverlässigkeit ergibt sich ein signifikanter HE des LOA ($F_{2,30} = 9.0$, $p = .001$). Univariat werden die RZn. bei beiden Fehlern signifikant (1. Fehler: $F_{1,31} = 5.1$, $p = .032$ und 2. Fehler $F_{1,31} = 18.0$, $p = .000$). Bei beiden Fehlern reagierten die Fahrer mit höherem LOA im Mittel später als die mit niedrigerem LOA. Allerdings ist auch hier die Fahrperformanz vor allem mit hohem LOA und hoher Zuverlässigkeit beeinträchtigt (siehe Tabelle 1).

LOA	Zuverlässigkeit	RZ/1. gemeinsamer Systemfehler	RZ/2. gemeinsamer Systemfehler
Hoch (ISA)	Hoch (95%)	7.2 Sek. (nach Schild)	0.8 Sek. (nach Schild)
Hoch (ISA)	Niedrig (70%)	0.1 Sek. (nach Schild)	-1.9 Sek. (vor Schild)
Niedrig (SD)	Hoch (95%)	-1.9 Sek. (vor Schild)	-7.4 Sek. (vor Schild)
Niedrig (SD)	Niedrig (70%)	-2.2 Sek. (vor Schild)	-8.3 Sek. (vor Schild)

Tabelle 1: Reaktionszeiten bei erstem und zweitem gemeinsamen Systemfehler (95/70% Zuverlässigkeit).

Abweichungen von der Fahrspur

Aufgrund nicht vorliegender Normalverteilung der Daten werden die Parameter für das Abkommen von der Fahrspur deskriptiv dargestellt. Wird die Kurve mit der geringsten zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h (Zweiter gemeinsamer Systemfehler für 95/70% Systemzuverlässigkeit) betrachtet, wird ersichtlich, dass auch hier ausschließlich das Fahrverhalten mit dem höheren LOA problematisch war. Mit Unterstützung des informierenden/warnenden Systems (SD) geriet kein Fahrer von der Fahrspur ab. Dagegen gerieten von 17 durch das höher automatisierte System (ISA) unterstützten Pbn. 9 in den Gegenverkehr.

2.1.5 Diskussion

Die ausgewerteten Fahrdaten weisen auf die besondere Problematik der adäquaten Systemübernahme bei Fahrten mit einem FAS mit hohem LOA und hoher Systemzuverlässigkeit hin. Vor allem bei den ersten beiden Systemfehlern des hoch automatisierten FAS zeigten sich deutlich verlängerte Reaktionszeiten bei manueller Übernahme und eine dadurch bedingte überhöhte Geschwindigkeit sowie vor allem für die Kurve mit 50 km/h Höchstgeschwindigkeit verstärktes Abkommen von der Fahrspur in den Gegenverkehr. In Übereinstimmung mit Untersuchungen aus anderen Bereichen zeigt sich, dass der Autofahrer als Systemüberwacher umso eher versagt, je passiver seine Rolle und je zuverlässiger das System ist. Bezüglich der Systemakzeptanz wurde das FAS mit hohem LOA als weniger nütz-

lich und kontrollierbar als das mit niedrigem LOA bewertet. Abweichend zu den Fahrdaten wurde die höhere Systemzuverlässigkeit eher akzeptiert als die niedrigere.

2.2 Studie 2

2.2.1 Methode

Das vorliegende HMI-Konzept mit drei unterschiedlichen Interfaces und einer Interaktionsstrategie (Interaktionsmodus ja/nein) wurde in einer vorangehenden User Studie mit insgesamt 20 Probanden entwickelt. Die Interfaces meldeten Veränderungen der zulässigen Höchstgeschwindigkeit an den Fahrer zurück, während die Geschwindigkeit automatisch darauf einregelt wurde. Bei Fahrten mit Interaktionsmodus mussten die Fahrer die angezeigte Geschwindigkeitsänderung bestätigen, bevor sie vom System umgesetzt wurde (Abb. 3).

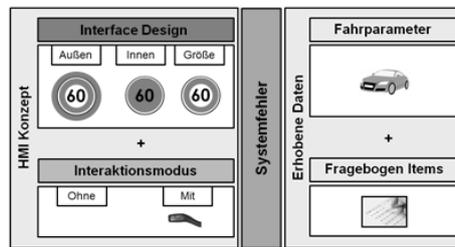


Abbildung. 3: Versuchsplan Studie 2.

Für die Überprüfung der Effektivität des HMI Konzeptes durchführen die Probanden die 144 km lange Strecke einmal ohne und einmal mit Unterstützung des Längsführungsassistenten mit jeweils einem der 6 Interfaces (3 Interfaces x Interaktionsmodus ja/nein). Diese wurden über ein Head-Up-Display (HUD) dargeboten. Das System funktionierte bis zu der 49. Kurveneinfahrt 100%ig zuverlässig. In der 50. Kurve erfolgte ein Systemfehler, bei dem das System die Geschwindigkeitsbegrenzung nicht erkannte und ungebremst mit 100 km/h in eine 60 km/h Kurve fuhr.

An der Untersuchung nahmen 67 Probanden (46% ♀, 54% ♂) zwischen 18 und 69 Jahren teil. Sie besaßen ihren Führerschein zwischen 1-41 Jahren ($M = 13.6$, $SD = 12.3$). 94% der Fahrer hatten eine jährliche Fahrleistung von 20.000 km.

Geprüft wurde, wie schnell und adäquat die Fahrer bei den unterschiedlichen Systemvarianten reagierten. Dafür wurden mittlere und minimale Geschwindigkeit in der Kurve mit Systemfehler analysiert. Weiterhin die Bremsreaktion (wurde gebremst ja/nein) sowie die Abweichung von der Fahrspur (definiert wie in Studie 1). Weiterhin wurde die Systemakzeptanz analysiert.

2.2.2 Ergebnisse

Automationseffekt Fahrt ohne System/Systemfahrt

Auch in dieser Studie zeigte sich ein Effekt der Automation auf die Fahrperformanz. Die Fahrer reagierten ohne Systemunterstützung im Mittel 1.1 Sekunden vor, bei Systemfahrten im Mittel 7.7 Sek. nach dem Schild mit der Geschwindigkeitsbeschränkung. Eine Auswertung mittels MANOVA mit Messwiederholung weist signifikante Unterschiede für die Fahrten ohne versus mit Unterstützung nach (HE System: $F_{3,61} = 45.3$, $p = .000$). Univariat wurden sowohl mittlere ($F_{1,63} = 72.7$, $p = .000$), minimale ($F_{1,63} = 16.8$, $p = .000$) als auch maximale Geschwindigkeit ($F_{1,63} = 19.1$, $p = .000$) signifikant. Die Fahrer hielten im Mittel mit Unterstützung des Systems eine Geschwindigkeit von 91km/h (SD = 12.5km/h) in der 60km/h Kurve, verglichen mit 68km/h (SD = 16.9km/h) ohne Systemunterstützung.

Systemeffekte Interaktionsmodus und Interfacedesign

Bei Analyse der Systemfahrtdaten mittels MANOVA ergibt sich ein signifikanter Haupteffekt des Interaktionsmodus ($F_{3,59} = 3.0$, $p = .037$). Univariat wird die minimale Geschwindigkeit signifikant ($F_{2,61} = 15.9$, $p = .022$). Die Fahrer ohne Interaktionsmodus Unterstützung erreichen in der Kurve eine minimale Geschwindigkeit von 82 km/h (SD = km/h), während die durch Interaktionsmodus unterstützten Pbn. eine minimale Geschwindigkeit von 66km/h erreichen (SD = km/h) (siehe Abb. 4). Die stark überhöhten Geschwindigkeiten in der Kurve mit Systemfehler gehen folglich primär auf die Fahrten zurück, bei denen die Fahrer nicht durch den Interaktionsmodus unterstützt wurden.

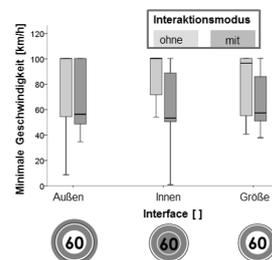


Abbildung 4: Minimale Geschwindigkeit in der Kurve mit Systemfehler für die Fahrten ohne versus mit Interaktionsmodus

Abweichungen von der Fahrspur

Eine binär logistische Regression der Daten für das Abkommen von der Fahrspur in der Kurve mit Systemfehler ergibt wiederum ausschließlich einen signifikanten HE des Interaktionsmodus (Regressionskoeffizient = -1.3, $p = .030$). Während ohne Interaktionsmodus 42% der Fahrer von ihrer Fahrspur abkamen und in den Gegenverkehr gerieten, waren es aus der Gruppe der Fahrer mit Interaktionsmodus nur 19%. Im Vergleich dazu geriet kein Fahrer von der Fahrspur ab, wenn er ohne Systemunterstützung fuhr.

2.2.3 Diskussion

Werden die Daten für die Fahrten mit und ohne Systemunterstützung für die 60 km/h Kurve in der der Systemfehler auftrat analysiert, zeigte sich auch in dieser Studie ein negativer Effekt der Automation. Die Daten bei Systemfahrten weisen eine verzögerte Reaktion mit stark erhöhter mittlerer und minimaler Geschwindigkeit auf.

Der Interaktionsmodus war effektiv. Die Fahrer verzögerten während des Systemfehlers früher und fuhren mit einer geringeren mittleren Geschwindigkeit in der Kurve. Zudem kamen weniger Fahrer in die Gegenfahrspur ab. In Übereinstimmung damit wurden die Interfacevarianten mit Interaktionsmodus als nützlicher und entlastender eingeschätzt. Allerdings bleibt zu erwähnen, dass die Fahrperformanz bei Systemfehler auch mit Interaktionsmodus nicht annähernd so gut war wie bei Fahrten ohne Systemunterstützung. Die unterschiedlichen Interfacevarianten hingegen hatten weder auf die Fahrperformanz noch auf die Systembewertung einen signifikanten Effekt.

3 Fazit und Ausblick

Solange es eine 100%ige Zuverlässigkeit hochautomatisierter Systeme nicht gibt, ist es unerlässlich, den Fahrer durch das HMI stärker in das Fahrgeschehen einzubinden und ihn durch aktive Interaktion im Loop zu halten. Allerdings gewährleistet selbst eine aktive Einbindung des Fahrers keine optimalen Eingriffe bei Systemfehlern. Folglich erscheint hochautomatisiertes Fahren mit dem Ziel der Unfallvermeidung nur unter der Prämisse sinnvoll, dass das FAS sicherer als der Fahrer fährt und 100%ig zuverlässig ist.

Trotz der bestehenden Schwierigkeiten wird die automobiler Zukunft hochautomatisiert und vernetzt sein. Vehicle-to-X und kombinierte Längs- und Querführungsassistenten werden die Rolle des Menschen zunehmend übernehmen. Entsprechende Studien im realen Verkehr und mit weiteren Systemen erscheinen dringend notwendig.

Literaturverzeichnis

- Bainbridge, L. (1983). Ironies of Automation. *Automatica* 19(6), 775-779.
- Endsley, M. R. & Kiris, E. O. (1995). The Out-of-the-Loop Performance Problem and Level of Control in Automation. *Human Factors* 37(2), 381-393.
- Endsley, M. R. (1996). Automation and Situation Awareness. In R. Parasuraman, & M. Mouloua, *Automation and Human Performance* (S. 163-181). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Heller, O. (1982). Theorie und Praxis des Verfahrens der Kategorienunterteilung (KU). In O. Heller (Hrsg.), *Forschungsbericht 1981*. Würzburg: Würzburger Psychologisches Institut.
- Parasuraman, R., & Riley, V. (1997). Human and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse. *Human Factors*, 39(2), S. 230-253.

Parasuraman, R., Sheridan, T. B., & Wickens, C. D. (2008). Situation Awareness, Mental Workload, and Trust in Automation: Viable, Empirically Supported Cognitive Constructs. *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2(2), S. 140-160.

Sheridan, T. B. (2002). *Humans and automation: System design and research issues*. New York: Wiley.

Kontaktinformationen

Ute Niederée, E-Mail: ute.niederee@tu-braunschweig.de

Prof. Dr. Mark Vollrath, E-Mail: mark.vollrath@tu-braunschweig.de