

Systemausfälle bei Längsführungsassistenten – Sind bessere Systeme schlechter?

Ute Niederée und Mark Vollrath

Schlüsselwörter: Fahrerassistenzsysteme, Automatisierung, Systemausfall, Zuverlässigkeit

Zusammenfassung

Unangepasstes Fahren und überhöhte Geschwindigkeit sind bei einem Großteil der schweren Unfälle im Straßenverkehr beteiligt. Fahrerassistenzsysteme (FAS) können den Fahrer nicht nur bei Überschreiten einer sicheren Geschwindigkeit warnen, sondern auch die Geschwindigkeit selbständig regeln. Aus anderen Bereichen wie der Luftfahrt ist allerdings bekannt, dass höhere Automatisierungsstufen zu neuen Problemen führen können. Diese treten vor allem bei Systemausfällen auf, wenn der Fahrer plötzlich aktiv eingreifen muss. Um die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf das Autofahren zu überprüfen, wurde eine Fahrsimulatorstudie durchgeführt, bei der zwei unterschiedliche Automatisierungsstufen (Warnung vs. aktive Geschwindigkeitsregelung) mit unterschiedlicher Zuverlässigkeit (70 vs. 95%) verglichen wurden. Es zeigen sich sehr deutlich negative Effekte der hohen Automatisierung insbesondere bei hoher Zuverlässigkeit.

Insgesamt weist diese Studie darauf hin, dass der Zusammenhang zwischen Automatisierungsgrad, Systemzuverlässigkeit und Fahrerverhalten dringend besser untersucht werden sollte, um keine neuen Probleme durch die Einführung teilautomatischer Fahrerassistenzsystemen zu schaffen.

Abstract

Excessive and mal-adjusted speed is involved in a large fraction of road accidents. Driver Assistance Systems (ADAS) can not only warn the driver if he exceeds a safe speed, but also regulate the speed automatically. However, from other areas it is well known that higher levels of automation may lead to new problems. This is particularly the case, when the system fails and the driver suddenly has to become active. In order to examine to what extent these results may also be transferred to driving, a simulator study was performed at two different levels of automation (warning vs. active speed control) and with different reliabilities (70 vs. 95%). There were clear negative effects of high levels of automation, especially with a large reliability. Overall, this study suggests that the relationship between the degree of automation, system reliability and driver behavior should urgently be investigated to avoid new problems through the introduction of driver assistance systems with higher levels of automation.

Einleitung

Eine der interessantesten und wichtigsten technischen Entwicklungen im 20. und 21. Jahrhundert ist die wachsende Automatisierung verschiedenster Bereiche des täglichen Lebens. Flugzeuge sind schon seit langer Zeit hochautomatisiert. Auf der Straße gewinnen FAS in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung. Automation soll den Fahrer entlasten, unterstützen und die Fahrsicherheit erhöhen. Allerdings entsteht durch diese Teilautomation eine nicht gänzlich unkritisch zu betrachtende neue Funktionsteilung zwischen Mensch und Maschine. War der Mensch zuvor aktiv Fahrer, so wird er jetzt zunehmend Beobachter und Überwacher des Systems. Das könnte insbesondere bei Systemausfällen problematisch werden.

Schon Studien aus den 80er Jahren belegen, dass Anwender, die mit automatisierten Systemen arbeiten, Schwierigkeiten bei der manuellen Übernahme der erforderlichen Aufgaben bei

Systemausfall haben (Endsley & Kiris, 1995). Eine wesentliche Ursache dafür ist, dass Automation den Aufbau eines mentalen Modells der Situation erschwert. Dieses wird jedoch benötigt, um einen Systemausfall zu entdecken und dann die Situation erfolgreich manuell bewältigen zu können. Dabei spielt der Grad der Systemzuverlässigkeit eine große Rolle. Je höher dieser ist, desto eher vertraut der Anwender dem System blind (Parasuraman & Riley, 1997). Das kann zu verlängerten Reaktionszeiten führen. Dieses Phänomen wird in der Fachliteratur als "Out-of-The-Loop" bezeichnet (Endsley & Kiris, 1995). Im Gegenzug dazu können sehr unzuverlässige Systeme dazu führen, dass sie vom Nutzer nicht eingesetzt werden, weil er ihnen misstraut (Parasuraman & Riley, 1997; Wickens et al., 2004).

Allerdings stammen diese Ergebnisse aus dem Flugbereich und aus Überwachungsaufgaben in der Industrie. Trotz zunehmender Verbreitung von FAS ist der Einfluss des Automatisierungsgrades und der Systemzuverlässigkeit von FAS auf die Fahrsicherheit bislang unzureichend untersucht. Welche Auswirkungen haben unterschiedliche Automatisierungsgrade mit unterschiedlicher Zuverlässigkeit auf das Verhalten von Autofahrern? Unter welchen Umständen sind diese noch in der Lage, sicher einzugreifen? Um einen Beitrag zur Beantwortung dieser Fragen zu liefern, wurden in einer Fahrsimulatorstudie zwei unterschiedliche Stufen von Automation bei Längsführung mit jeweils zwei unterschiedlichen Zuverlässigkeitsgraden eingeführt. Dabei wurde untersucht, wie gut die Fahrer bei Systemausfällen reagieren.

Methode

An der Untersuchung nahmen insgesamt 39 Versuchspersonen (Vpn) teil. Für die vorliegenden Ergebnisse wurden die Daten von 36 Vpn ($m = 12$, $w = 24$) im Alter von 19-48 Jahren ($M = 25.3$; $SD = 6.8$) ausgewertet. Die Vpn waren durchschnittlich seit 7 Jahren im Besitz eines Führerscheins ($SD = 5.8$) und legten bis zu 20.000 km im Jahr zurück (86.1%). Die Teilnahme an diesem Versuch erfolgte freiwillig und wurde entgolten.

Durchgeführt wurde die Untersuchung in einem Fahrsimulator mit 3 Leinwänden und einem 180° Blickfeld. Die Strecke bestand aus einer einspurigen 86 km langen Landstraße mit Gegenverkehr (mittlere Verkehrsdichte) und einer Geschwindigkeitsbegrenzung von 100 km/h auf geraden Strecken. Die Höchstgeschwindigkeit in den 60 Kurven mit unterschiedlichen Radien variierte zwischen 50–80 km/h bei einer Kurvenlänge von 150-300 m.

In dem Versuchsplan wurden die beiden Faktoren Automatisierung (hoch oder niedrig) und Systemzuverlässigkeit (70 oder 95%) mit vier unabhängigen Gruppen untersucht. Als zusätzlicher abhängiger Faktor wurde der Zeitpunkt des Systemausfalls (erstes, mittleres und letztes Drittel der Fahrt) eingeführt. Schließlich führte jede Vp die Fahrt einmal mit System (in der jeweiligen Ausprägung) und einmal ohne System durch, wobei die Reihenfolge variiert wurde. Für die im Folgenden dargestellten Auswertungen wurde pro Parameter die Differenz des Verhaltens mit System minus Verhalten ohne System errechnet.

Jede Vp absolvierte vor den Fahrten ein speziell auf diesen Versuch abgestimmtes Training im Simulator. Die Vp wurden instruiert, sich wie im realen Leben an Geschwindigkeitsbegrenzungen zu halten. Weiterhin wurden sie darüber informiert, dass es sich bei dem jeweiligen System um einen Prototyp handelt, der noch nicht 100% zuverlässig sei und dass die Verantwortung für sicheres Fahren natürlich bei ihnen läge. Insgesamt dauerte der Versuch 2 ½ Stunden und wurde an zwei Terminen durchgeführt.

Für die Automatisierung wurde der Bereich der Längsführung gewählt, da bereits eine Reihe von FAS in Serienfahrzeugen verfügbar sind (z.B. ACC, Geschwindigkeitswarnungen). Als Verkehrssituation wurde die Landstraße gewählt. Der Fahrer hat im Bereich der Längsführung die Aufgabe, sich an die jeweilige Geschwindigkeitsbegrenzung zu halten. Fahrzeuge auf der eigenen Spur kamen nicht vor, so dass eine Abstandsregelung nicht erforderlich war.

In dieser Situation übernimmt das System mit der hohen Stufe der Automatisierung vollständig die Aufgabe der Geschwindigkeitsregulation. Es erkennt die aktuelle Geschwindigkeitsbegrenzung und bremst bzw. beschleunigt das Fahrzeug entsprechend. Der Fahrer muss nur noch lenken. Diese Abstufung wird als ISA+ACC bezeichnet (ISA: Intelligent Speed Adaptation, Erkennung der adäquaten Geschwindigkeit; ACC: Adaptive Cruise Control, automatische Anpassung der Geschwindigkeit an die Verkehrssituation).

Bei der niedrigen Stufe der Automation (hier bezeichnet als Speed-Decision SD) erfolgt eine Rückmeldung über die Abweichung der aktuellen Geschwindigkeit von der zulässigen Höchstgeschwindigkeit über ein Head-Up-Display. Dies wurde in Ampelanalogie realisiert (siehe Abb. 1). Bei Geschwindigkeiten, die bis zu 4% über der erlaubten Geschwindigkeit lagen, wurde ein grüner Kreis dargestellt. Zwischen 5 und 19% erschien ein gelbes Licht, darüber ein rotes. Die nicht erleuchteten Kreise waren jeweils grau (inaktiv) dargestellt. Der Fahrer musste bei SD Gas geben und bremsen.

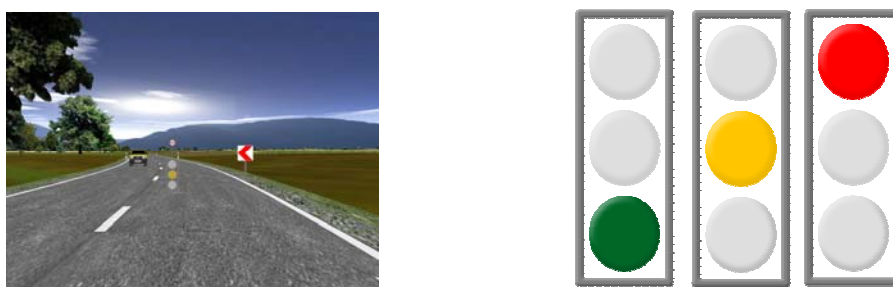


Abb. 1: Darstellung der Anzeige der SD bei Einfahrt in eine Kurve mit etwas zu hoher Geschwindigkeit (links). Rechts im Bild sind die möglichen Systemzustände der SD dargestellt.

Um die visuelle Beanspruchung bei beiden Systemen ähnlich zu halten, wurde bei ISA+ACC ein grüner Kreis an derselben Stelle im Head-Up-Display eingeblendet. Für den Fahrer war dies die Rückmeldung, dass das System aktiv ist.

Für beide Systeme wurde die Systemzuverlässigkeit in den verschiedenen Gruppen in Anlehnung an die vorhandene Literatur (Wickens & Dixon, 2007) jeweils auf 70% und 95% festgelegt. Praktisch umgesetzt versagte das System bei 70% Systemzuverlässigkeit bei 18 dieser Kurven. Bei 95% waren es entsprechend 3 Ausfälle. Diese wurden auf das erste, mittlere und letzte Drittel der Strecke verteilt. Bei einem Systemausfall von ISA+ACC leuchtete der grüne Kreis (System aktiv), aber das System fuhr mit 100 km/h weiter, statt zu verzögern. Der Fahrer musste abbremesen. Bei SD wurde ebenfalls die Geschwindigkeitsbegrenzung nicht erkannt, so dass die Rückmeldung über die gefahrene Geschwindigkeit auf 100 km/h bezogen wurde. Auch hier musste der Fahrer seine Geschwindigkeit korrekt anpassen.

Für die folgende Auswertung werden die Reaktionen in den drei Kurven der Bedingung „Systemzuverlässigkeit 95%“ herangezogen. Auch in der Bedingung „Systemzuverlässigkeit 70%“ hatten in diesen Kurven Ausfälle stattgefunden. Dort war es der 5., 12. und 18. Systemausfall, so dass diese Vp eine andere Systemzuverlässigkeit erlebt hatten. Im Vergleich der drei Kurven wird außerdem der Lern- bzw. Gewöhnungseffekt untersucht. Als abhängige Variable werden Fahrparameter herangezogen, die die Reaktion des Fahrers auf den Systemausfall beschreiben. Dabei wurde berechnet, in welchem Abstand vom Schild die Fahrer beginnen, ihre Geschwindigkeit anzupassen (vorher: negative Werte; nachher: positive Werte). Außerdem wurden minimale, mittlere und maximale Geschwindigkeit in dem Bereich zwischen dem Beginn der Geschwindigkeitsbegrenzung vor der Kurve und dem Aufheben der Begrenzung nach der Kurve berechnet.

Ergebnisse

Zuerst wird die Reaktion auf den Systemausfall bei der Kurve im letzten Drittel der Strecke untersucht, da hier beide Gruppen eine unterschiedliche Erfahrung mit der Systemzuverlässigkeit gemacht haben. Die Reaktion auf den ersten Systemausfall in der Gruppe mit höherer Automatisierung und die Veränderung im Lauf des Versuchs wird in einem zweiten Schritt dargestellt.

Für die Auswertung wurden pro Parameter zweifaktorielle Varianzanalysen für unabhängige Stichproben berechnet. Bei der Reaktionszeit auf die Schilder ergaben sich ein signifikanter Haupteffekt des Automatisierungsgrades ($F_{1,32} = 58.0$; $p = .000$), ein tendenzieller Haupteffekt der Systemzuverlässigkeit ($F_{1,32} = 3.8$; $p = .059$) und keine Interaktion ($F_{1,32} = .07$; $p = .784$). Wie Abb. 2 zeigt, sind die Reaktionszeiten mit ISA+ACC deutlich erhöht. Bei einem Systemausfall von ISA+ACC beginnen die Vpn durchschnittlich 20 Sekunden später, ihre Geschwindigkeit anzupassen, als bei Fahrten ohne System. Tendenziell ist die Reaktionszeit bei höherer Systemzuverlässigkeit erhöht. Wenn die Vpn weniger Erfahrung mit Systemausfällen haben, verlangsamt dies die Geschwindigkeitsanpassung zusätzlich.

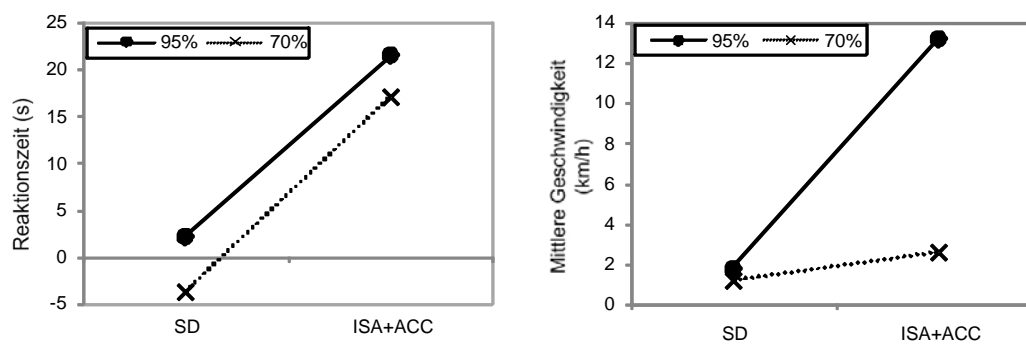


Abb.2: Reaktionszeit (links) und mittlere Geschwindigkeit (rechts) in Abhängigkeit von den Automatisierungsstufen (x-Achse) und den unterschiedlichen Stufen der Systemzuverlässigkeit.

Die mittlere Geschwindigkeit beschreibt das Geschwindigkeitsniveau im Kurvenbereich. Hier zeigt sich ein signifikanter Haupteffekt des Automatisierungsgrades ($F_{1,32} = 5.0$; $p = .031$), eine Tendenz für die Zuverlässigkeit ($F_{1,32} = 3.9$; $p = .056$) und tendenziell eine Wechselwirkung ($F_{1,32} = 3.1$; $p = .089$). Wie Abb. 2 rechts zeigt, führt die höhere Automatisierung zu einer höheren mittleren Geschwindigkeit bei Systemausfall, wobei dieser Effekt insbesondere bei hoher Systemzuverlässigkeit auftritt. Bei SD gibt es keinen deutlichen Effekt der unterschiedlichen Zuverlässigkeit. Auch der Effekt bei ISA+ACC mit niedriger Zuverlässigkeit ist relativ klein gegenüber dem Effekt bei hoher Zuverlässigkeit.

Die maximale Geschwindigkeit in dem untersuchten Bereich (Abb. 3 links) stellt im Wesentlichen dar, mit welcher Geschwindigkeit die Vp in den Kurvenbereich einfährt bzw. inwieweit sie ihre Geschwindigkeit bereits vorher reduziert hat. Hier zeigt sich ein signifikanter Effekt des Automatisierungsgrades ($F_{1,32} = 49.7$; $p = .000$), kein Effekt der Systemzuverlässigkeit ($F_{1,32} = .01$; $p = .941$) und keine Interaktion ($F_{1,32} = .36.4$; $p = .565$). Mit ISA+ACC ist die maximale Geschwindigkeit in beiden Zuverlässigkeitsbedingungen deutlich erhöht. Die Fahrer fahren ca. 25 km/h schneller in diesen Bereich ein als bei der manuellen Fahrt oder mit SD.

Schließlich wurde die minimale Geschwindigkeit (s. Abb. 3 rechts) untersucht, um die Stärke der Anpassung nach Systemausfall zu prüfen. Hier kann eine signifikante Hauptwirkung des Automatisierungsgrades ($F_{1,32} = 15.3$; $p = .000$) und der Zuverlässigkeit ($F_{1,32} = 5.5$; $p = .025$), aber keine Interaktion ($F_{1,32} = 41.7$; $p = .410$) nachgewiesen werden. Die minimale Geschwindigkeit ist bei ISA+ACC geringer als bei SD und bei 70% Systemzuverlässigkeit geringer als bei 95%.

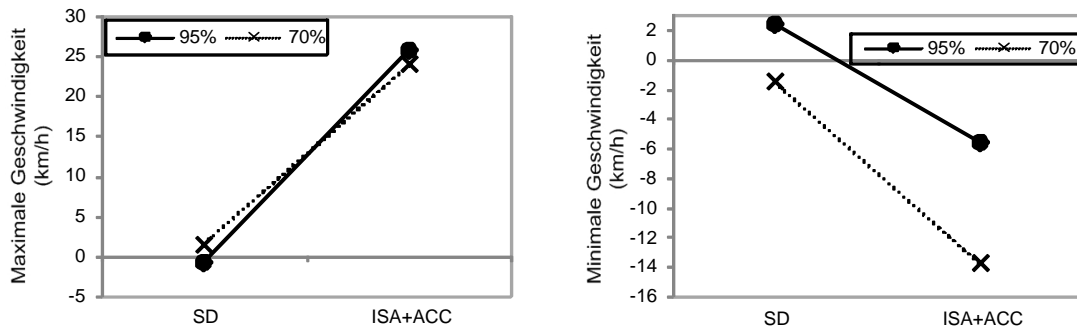


Abb.3: Maximale Geschwindigkeit (links) und minimale Geschwindigkeit (rechts) in Abhängigkeit von den Automatisierungsstufen (x-Achse) und den unterschiedlichen Stufen der Systemzuverlässigkeit.

Fasst man diese Ergebnisse zusammen, so ergibt sich folgendes Bild:

- Bei hoher Automatisierung reagieren die Fahrer wesentlich später (20 Sekunden) auf einen Systemausfall als bei niedriger Automatisierung oder manueller Fahrt.
- Dadurch wird insgesamt eine höhere Geschwindigkeit im Kurvenbereich erreicht. Das wird allerdings nur bei hoher Systemzuverlässigkeit sehr deutlich.
- Bei niedriger Systemzuverlässigkeit des hoch automatisierten Systems wird noch deutlich verzögert reagiert, aber die mittlere Geschwindigkeit ist nur wenig erhöht. Erklärt werden kann das durch eine stärkere Verzögerung. Dadurch werden auch kleinere minimale Geschwindigkeiten erreicht.

Damit zeigt sich, dass insbesondere die hohe Automatisierung zu Problemen bei Systemausfällen führt. Dies wird durch den Grad der Systemzuverlässigkeit modifiziert, wobei Lerneffekte eine Rolle zu spielen scheinen. Für eine genauere Analyse wurden für ISA+ACC die drei Systemausfälle bei der Bedingung 95% Zuverlässigkeit im Verlauf untersucht und mit den drei Systemausfällen in der Bedingung 75% verglichen, die in die Analysen einbezogen worden waren. Abb. 4 zeigt diesen Verlauf.

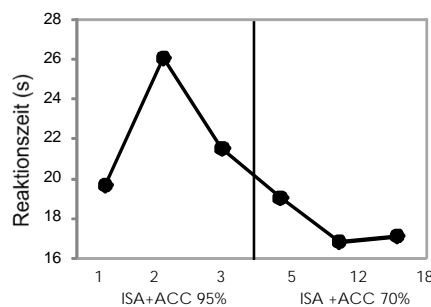


Abb. 4: Veränderung der Geschwindigkeitsanpassung bei Systemausfall in den drei untersuchten Kurven, was in der Zuverlässigkeitsbedingung 95% dem 1., 2. und 3. Ausfall entspricht und in der 70% Bedingung dem 5., 12. und 18. Ausfall.

Beim ersten Systemausfall benötigen die Fahrer 20 Sekunden länger für den Beginn der Geschwindigkeitsreduzierung. Dies dauert beim 2. Ausfall sogar noch etwas länger. Beim dritten Ausfall ist die Zeit dann wieder etwas kürzer. Auch beim 6. Systemausfall der anderen Gruppe ist die Zeit ähnlich verlängert und verkürzt sich dann zum 12. und 18. Ausfall. Am Ende wird allerdings immer noch fast 18 Sekunden länger benötigt als bei manueller Fahrt.

Diskussion und Ausblick

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass bei Systemausfällen von automatischen Systemen auch bei Autofahrern ähnliche Probleme auftreten, wie sie im Bereich der Luftfahrt und bei komplexen Systemen nachgewiesen wurden. Bei reinen Warnsystemen, wie sie hier als Geschwindigkeitswarnung SD untersucht wurden, scheint ein Systemausfall wenig negative Effekte zu haben. Da die Fahrer immer die Geschwindigkeit regeln müssen, verändert sich dieses Verhalten durch die Systeme nur minimal. Bei Systemen mit niedriger Automatisierung scheint daher primär von Interesse zu sein, ob sich Belege für positive Effekte im Sinne einer besseren Geschwindigkeitsregulation finden lassen. Da in der vorliegenden Studie eine ganze Reihe von Kurven ohne Systemausfälle durchfahren wurde, wird dies in weiteren Auswertungen mit dem Verhalten ohne System verglichen werden.

Das System ISA+ACC, das Teile der Fahrhandlung für den Fahrer übernimmt, erscheint bei Systemausfall problematisch. Die Übernahme der manuellen Kontrolle war dabei um 20 Sekunden verzögert. Dies verändert sich auch bei häufigen Systemausfällen nur wenig. Die Fahrer lernen allerdings, ihr Verhalten anzupassen und verzögern stärker, so dass die mittlere Geschwindigkeit insgesamt nicht deutlich erhöht ist. Ob dies in der Realität genügen würde, um kritische Situationen zu vermeiden, ist schwer abschätzbar. Außerdem konnte dieser Lernverlauf nur bei dem System mit niedriger Zuverlässigkeit gezeigt werden. Es ist unklar, ob er bei längerer Fahrt mit dem hoch zuverlässigen System auch aufgetreten wäre. Hier wären längere Untersuchungen interessant.

Einschränkend soll darauf hingewiesen werden, dass in dieser Studie ein spezieller Systemausfall untersucht wurde. Das System erkannte die Geschwindigkeitsbegrenzung nicht und konnte so auch nicht auf den Ausfall hinweisen. Dieser Fall ist sicherlich nicht unrealistisch. Andererseits gibt es Situationen, in denen ein System selbst erkennen kann, dass es fehlerhaft arbeitet, zum Beispiel, wenn ein Sensor ausfällt. Es wäre zu vermuten, dass eine Rückmeldung über den Systemausfall an den Fahrer, die negativen Effekte deutlich vermindert. Hier wären angesichts der Relevanz des Themas weitere Untersuchungen dringend notwendig.

Insgesamt scheinen die Ergebnisse die Annahme zu stützen, dass ein Systemausfall umso gravierendere Folgen haben wird, je seltener er stattfindet. Es wäre interessant, weitere Abstufungen einzuführen, um den Zusammenhang zwischen Zuverlässigkeit und Reaktion besser beschreiben zu können. Außerdem muss die Frage des Erlernens des Umgangs mit Ausfällen besser geklärt werden, indem bei seltenen Ausfällen längere Fahrten durchgeführt werden. Bei dem momentanen Wissensstand scheint hohe, aber nicht 100% zuverlässige Automation eher problematisch als unzuverlässige Automation zu sein, zumindest was das Verhalten der Fahrer betrifft. Auch im Bereich des Autofahrens zeigt sich damit wieder eine der „Ironien der Automation“ (Bainbridge, 1983).

Literatur

- Bainbridge, L. (1983). Ironies of Automation. *Automatica* 19(6), p. 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), p. 381-393.
- Parasuraman, R. & Riley, V. (1997). Human and Automation: Use, Misuse, Disuse, Abuse. *Human Factors* 39(2), p. 230-253.
- Wickens, C. D. & Dixon, S. R. (2007). The Benefits of Imperfect Diagnostic Automation: A Synthesis of the Literature. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 8, p. 201-212.
- Wickens, C. D., Lee, J. D., Liu, Y & Becker, S. E. G. (2004). *An Introduction to Human Factors Engineering* (p. 418-435). Pearson: London.