

Haptisch-multimodale Interaktion für hochautomatisierte, kooperative Fahrzeugführung bei Fahrstreifenwechsel-, Brems- und Ausweichmanövern

Matthias Heesen, Johann Kelsch, Christian Löper, Frank Flemisch

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
Institut für Verkehrssystemtechnik
Lilienthalplatz 7
38108 Braunschweig
Matthias-johannes.heesen@dlr.de

Kurzfassung

In Serienfahrzeugen werden seit einiger Zeit Assistenzsysteme angeboten, die den Fahrer entweder informieren bzw. warnen oder aktiv in die Ausführung der Fahraufgabe eingreifen. In Zukunft wird sowohl die Anzahl dieser Assistenzfunktionen als auch die Fähigkeiten über Assistenz hinaus in Richtung Automation weiter zunehmen. Dabei ist es entscheidend, solche Systeme so zu gestalten, dass die Interaktion auch für zahlreiche Automationsfunktionen konsistent ist, der Fahrer dies integriert und zusammenhängend begreifen kann und ausreichend in den Regelkreis der Fahrzeugführung eingebunden ist. So muss z.B. der Fahrer in der Lage sein, an Systemgrenzen sicher die Kontrolle über das Fahrzeug zu übernehmen.

Ein möglicher Ansatz dafür ist der der kooperativen Fahrzeugführung. Hier werden Fahrer und Automation als zwei Akteure angesehen, die hinsichtlich der Ausführung der Fahraufgabe kooperieren, wobei die jeweiligen Anteile an der Fahraufgabe dynamisch variieren können. Ein Beispiel einer kooperativen Fahrzeugführung ist H-Mode, eine von der H-Metapher (Flemisch 2003) abgeleitete haptisch-multimodale Bedienweise hochautomatisierter Fahrzeuge.

In diesem Beitrag wird die nutzerzentrierte Entwicklung und Integration einer neuen Funktion des H-Mode Konzeptes beschrieben. Sie deckt das Annähern an vorausfahrende Fahrzeuge mit den verbundenen Manövern wie Fahrstreifenwechsel, bis hin zum automatischen Notbremsen und / oder Ausweichen ab. Anschließend werden Ergebnisse des Tests eines ersten Prototyps dargestellt.

Einleitung: Von Assistenz über hochautomatisiertes Fahren zu kooperativer Fahrzeugführung und H-Mode

In Serienfahrzeugen finden neben den bereits etablierten Assistenzsystemen wie ABS und ESP immer häufiger Systeme Einzug, die den Fahrer entweder durch Information oder

Warnung in der Ausführung der Fahraufgabe unterstützen und teilweise aktiv in die Fahraufgabe eingreifen bzw. Teile zeitweise ganz übernehmen.

Solche Systeme lassen sich auf einem Assistenz- und Automationsspektrum einordnen, das vom manuellen Fahren bis hin zum vollautomatisierten Fahren reicht (Flemisch et al. 2008, Abb. 1).

Eher informierende bzw. warnende Systeme, wie z.B. Fahrstreifenverlassenswarner oder Kollisionswarnsysteme, können darauf im Bereich des assistierten Fahrens eingeordnet werden. Systeme, wie der automatische Abstandsregeltempomat (ACC), übernehmen weitestgehend die Kontrolle über die Längsführung. Ein solches System ist bereits semi-automatisiert, da eine Kontrolldimension der Fahraufgabe zu bedeutenden Teilen an eine Automation abgegeben wird. Auch ein stark mittenzentriertes aktives Fahrstreifenhaltesystem (LKS) wäre hier einzuordnen, da es einen Großteil der Kontrolle über die Querführung übernimmt.

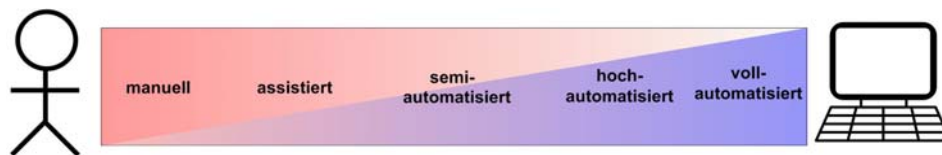


Abbildung 1: Automationsspektrum zwischen manuellem (links) und vollautomatisiertem Fahren (rechts).

In einigen Serienfahrzeugen sind bereits Kombinationen von aktiven Fahrstreifenhaltesystemen und ACC System zu finden. Solche Fahrzeuge lassen sich bereits heute den hochautomatisierten Fahrzeugen zuordnen. Hochautomatisiert daher, weil bedeutende Anteile an sowohl der Querführung als auch der Längsführung von einer Automation übernommen werden können. Der Fahrer bleibt hier aber, im Gegensatz zu einem vollautomatisierten Fahrzeug, ausreichend an der Kontrolle des Fahrzeuges beteiligt. Zu den hochautomatisierten Systemen lassen sich auch Kollisionsvermeidungssysteme zuordnen, da sie zumindest kurzzeitig, im Notfall, Manöver zur Kollisionsvermeidung automatisiert ausführen. In Serienfertigung befinden sich bislang allerdings nur Systeme, die eine aktive Notbremsung ausführen (aktive Gefahrenbremse AGB), als Beispiel sei hier Volvo City Safety genannt. Systeme die zur Kollisionsvermeidung ein Ausweichmanöver nutzen, wurden bislang nur im Rahmen der Forschung entwickelt und erfolgreich getestet. Hier sei als Beispiel auf das Projekt Proreta der TU Darmstadt verwiesen. (z.B. Bender et al. 2007).

Mit zunehmender Automatisierung kann, wie aus der Luftfahrt bekannt ist, eine Reihe von Herausforderungen entstehen. Der Fahrer kann z.B. zu weit aus dem Regelkreis der Fahrzeugführung genommen werden und so in kritischen Situationen wie Systemausfällen

oder Systemgrenzen nicht mehr adäquat eingreifen. Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass der Fahrer, neben dem verbleibenden Anteil, den er an der Fahraufgabe innehat, auch mit einer Bandbreite von tendenziell eher unabhängigen Assistenzsystemen gleichzeitig interagieren muss. Dies kann z.B. Mode Confusion mit sich bringen.

Die oben skizzierten Herausforderungen für Fahrzeugführung für hochautomatisierte Fahrzeuge werden im Folgenden mit dem Ansatz der kooperativen Fahrzeugführung adressiert:

Kooperation wird in diesem Zusammenhang einhergehend mit der Definition von Hoc (2001) definiert: Kooperation ist das gleichzeitige Streben zweier Akteure in Richtung der Erfüllung einer gemeinsamen Aufgabe, um diese besser zu erfüllen als jeder der Akteure für sich alleine. Die beiden Akteure können dabei hinsichtlich der Teilziele, der Ressourcen und der Durchführung interferieren. Jeder der beiden Akteure versucht diese Interferenz so zu beeinflussen, dass die bestmögliche Erfüllung der Aufgabe ermöglicht wird. Dazu ist ein permanenter Informationsaustausch zwischen den beiden Akteuren nötig.

Die Fahrzeugautomation wird in diesem Ansatz demnach als eigener Akteur angesehen, der mit dem Fahrer hinsichtlich der Ausführung der Fahraufgabe kooperiert. Das im Rahmen eines DFG Projektes entwickelte Interaktionskonzept H-Mode stellt einen ersten Schritt in Richtung eines solchen kooperativen Ansatzes dar. Die in der Vergangenheit entwickelte Funktionalität der H-Automation, wurde in diesem Zusammenhang um eine neue Funktionalität erweitert: Diese Funktionalität beinhaltet zum einen Notfall-Kollisionsvermeidungsmanöver, wie Notbrems- und Ausweichmanöver, jedoch setzt sie darüber hinaus bereits schon früh im Annäherungsprozess an. So werden im frühen Annäherungsprozess z.B. Fahrstreifenwechselmanöver von der Automation angeboten. Bei der Gestaltung des Systems war es maßgeblich, dass die neue Funktionalität konsistent zu der bereits bestehenden ist und auf die gleichen Prinzipien und Elemente zurückgreift.

H-Mode

Das Ziel des Projektes H-Mode ist die Entwicklung eines Interaktionskonzepts für eine integrierte Automation zum hochautomatisierten Fahren, in dem der Fahrer stets ausreichend im Regelkreis der Fahrzeugführung integriert bleibt. Das Konzept basiert auf der H-Metapher (Flemisch 2003), einer Designmetapher die von der Beziehung zwischen einem Reiter bzw. Kutscher und einem Pferd ausgeht, und leitet von dieser sinnvolle Konzepte für die Interaktion zwischen Fahrer mit einem hochautomatisierten Fahrzeug ab.

Eines der Hauptmerkmale des H-Modus ist die Unterscheidung von derzeit zwei Unterstützungsgraden, Tight Rein (im Folgenden TR abgekürzt) und Loose Rein (im Folgenden LR abgekürzt), zwischen denen der Fahrer aber auch die Automation je nach Unterstützungsbedarf wählen können. Trägt man die mögliche Unterstützung auf dem Assistenz- und Automationspektrum auf (Abb. 2), so ist Tight Rein auf der linken Seite des Spektrums zu finden und stellt eine spezifische Ausprägung des assistierten Fahrens dar, während Loose Rein auf der rechten Seite des Spektrums, und somit näher an der Vollautomation, eine Form des hochautomatisierten Fahrens darstellt.

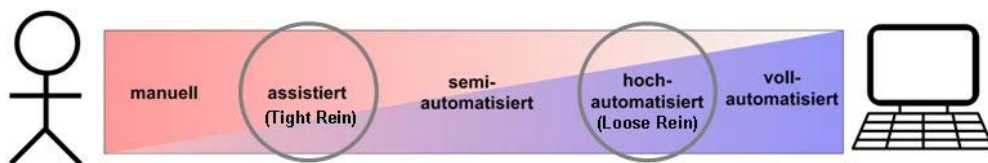


Abbildung 2: Tight Rein und Loose Rein auf dem Automationspektrum

Startpunkt für die Automation sowie Interaktion im H-Mode ist das Prinzip der geteilten Kontrolle ("Shared Control" z.B. Griffith & Gillespie 2004), das in Richtung kooperativer Kontrolle erweitert wird. Bei geteilter Kontrolle üben Fahrer sowie Automation ihren Einfluss auf das Fahrzeug über ein gemeinsames Stellteil aus (Abb. 3).

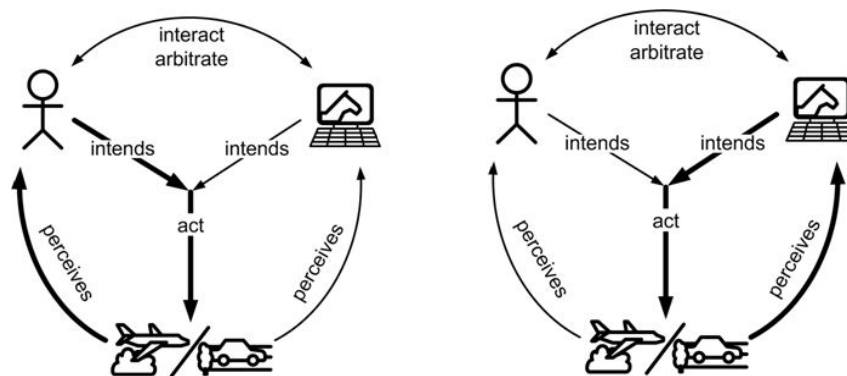


Abbildung 3: Geteilte Kontrolle zwischen Fahrer und Automation in Tight Rein (links) und Loose Rein (rechts)

Um die geteilte Kontrolle zu ermöglichen und die Automationsaktionen dabei für den Fahrer transparent zu machen, werden hier aktive Stellteile genutzt, über die der Fahrer den Input der Automation direkt über Position und Kräfte sowie weitere haptische Signale spüren kann. Die entwickelte Interaktion ist daher haptisch-multimodal ausgelegt. Dies bedeutet, dass ein Großteil der Kommunikation zwischen Fahrer und Fahrzeug auf haptischen Signalen beruht, die über die aktiven Stellteile vermittelt werden und durch visuelle und akustische Anteile ergänzt werden. Im Tight Rein hat der Fahrer dabei einen größeren Einfluss als die Automation. Der geringe Anteil der Automation äußert sich durch nur leichte Kräfte am

Stellteil (Abb. 3 markiert durch starke Linie vom Fahrer zum Fahrzeug). Im Loose Rein wird der erhöhte Automationsanteil durch höhere Kräfte auf dem Stellteil realisiert (Abb. 3 markiert durch starke Linie von der Automation zum Fahrzeug). Im Bedarfsfall wird dieser Kern der haptischen Interaktion durch akustische und visuelle Elemente erweitert (z.B. Schieben 2008).

Im H-Mode Projekt wurden bislang grundlegende Funktionen wie aktive Fahrstreifenhalteunterstützung aber auch longitudinale Unterstützung in Form von Geschwindigkeitsempfehlung bzw. aktiverer Geschwindigkeitshalteunterstützung, erarbeitet und untersucht (Flemisch et al. 2006, 2008). Dabei konnte die generelle Gebrauchstauglichkeit sowie Akzeptanzaspekte der bisherigen Funktionen herausgestellt werden.

Arbitrierung und Handlungsspannung

Da die Automation im H-Mode als eigenständiger Akteur angesehen wird, kann es zwischen Fahrer und Automation auch zu Unterschieden in der Situationswahrnehmung und Handlungsabsicht kommen. So kann hinsichtlich der Ausführung der Fahraufgabe auch Uneinigkeit zwischen Automation und Fahrer bis hin zu einem Konflikt bestehen. Damit das Gesamtsystem handlungsfähig bleibt, müssen diese Unterschiede in der Situationswahrnehmung und Handlungsabsicht in eine gemeinsame Handlungs- und Situationswahrnehmung überführt werden. Dazu wird das Konzept der Arbitrierung genutzt (Kelsch 2006).

Die Arbitrierung unterstützt die Entscheidungsfindung, indem mittels haptisch multimodaler Kommunikation zwischen Fahrer und Automation vermittelt wird. Jeder der beiden Akteure kann so frühzeitig identifizieren, was der jeweils andere gerade ausführt bzw. plant. So kann jeder Akteur entweder darauf eingehen oder eine andere Handlung initiieren.

Am aktuellen Beispiel der Annäherung an ein vorausfahrendes Fahrzeug wird deutlich, dass bei einer fortschreitenden Annäherung die Dringlichkeit, sich zu einer Handlung zu entschließen, kontinuierlich höher wird, bis sie schließlich im letztmöglichen Zeitpunkt zur Initiierung eines erfolgreichen Ausweichmanövers maximal wird.

In diesem Zusammenhang wurde der Begriff der Handlungsspannung als Prozessführungsgröße eingeführt. Diese hilft die Interaktion bzw. Arbitrierung zwischen Fahrer und Automation zu strukturieren.

Die Handlungsspannung ist dabei als abstrakte Größe zu verstehen, in die neben den verkehrs- bzw. fahrzeugbezogenen Faktoren wie Time to Collision (TTC), Reibwert etc. auch Größen des Fahrers wie z.B. der Fahrerzustand als Faktor einfließt.

Zur besseren Operationalisierung des Spannungsbegriffes wurden zunächst diskrete Spannungsstufen definiert (Abb. 5), die hier der Einfachheit wegen nur auf der TTC beruhen. Diese Spannungsstufen dienen dabei als Triggerpunkte für einerseits die Darbietung von Interaktionselementen und andererseits die Auslösung von Manövern. Wann welches haptische Element bzw. welches Manöver initiiert wird, hängt zum einen von der Spannungsstufe ab, zum anderen aber auch davon, welche Manöver für die Automation aktuell durchführbar sind (Löper 2009). Die Einteilung der Spannungsstufen wurde dabei, sowohl durch und Charakteristika menschlicher Reaktionszeiten, als auch durch die Zeit, die zur erfolgreichen Ausführung einzelner Manöver benötigt wird (Abb. 4), bestimmt.

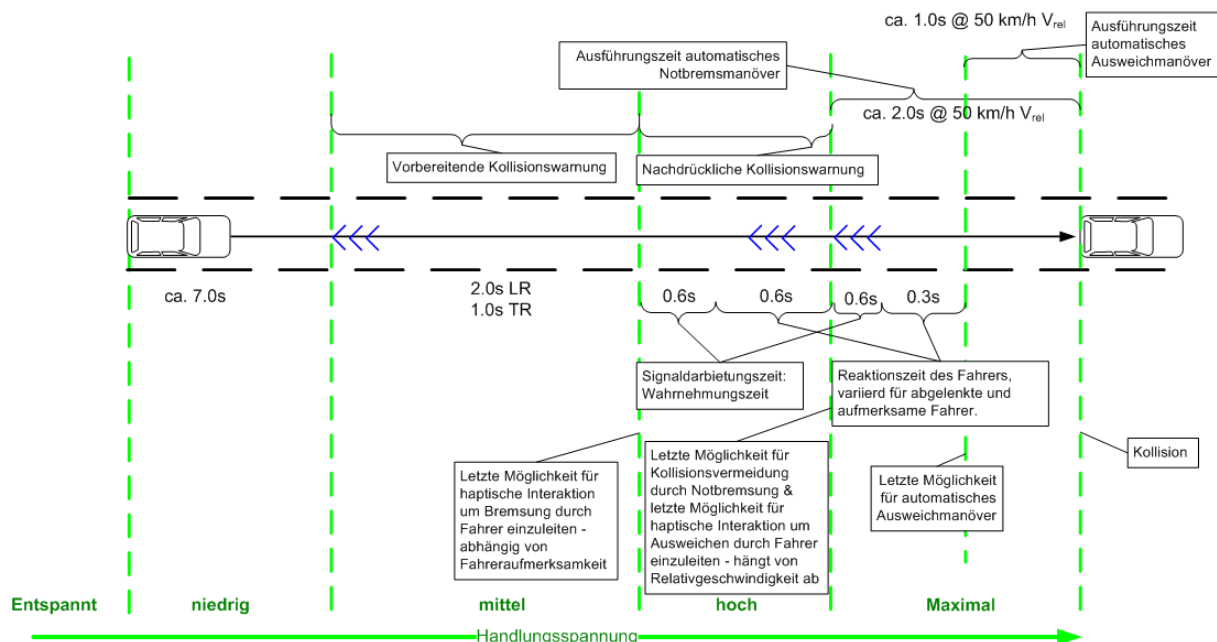


Abbildung 4: Operationalisierung des Spannungsbegriffes durch Einteilung in Spannungsstufen. Die Übergänge zwischen den Spannungsstufen sind als grün gestrichelte Linien dargestellt.

Die niedrige Spannungsstufe repräsentiert hier den Übergang vom normalen, freien Fahren (entspannt) in den Annäherungsvorgang und richtet sich in etwa nach der durchschnittlichen TTC, in der sich Fahrer zu einem Fahrstreifenwechsel entschließen (TTC Werte aus Fastenmeier et al. 2001 entnommen).

Der Übergang von der niedrigen auf die mittlere Spannungsstufe orientiert sich an menschlicher Reaktionszeit bei Ablenkung (Green 2000). Der Übergang von der mittleren auf die hohe Spannungsstufe hingegen, orientiert sich an der menschlichen Reaktionszeit bei voller Aufmerksamkeit (Green 2000). Hier bleibt gerade noch genug Zeit für die

Signaldarbietung und die sofortige Ausführung des entsprechenden Manövers. (Abb. 4). In der maximalen Spannungsstufe reagiert die Automation sofort in Abhängigkeit ihrer eigenen Systemgrenzen bezogen auf das auszuführende Manöver.

Aufbau der Exploration im Smlab

Die Entwicklung solcher Konzepte und Anwendung auf neue Funktionalitäten des H-Mode sind Bestandteile eines iterativen Prozesses, in dem konträre Aspekte der Systementwicklung wie z.B. Nutzererwartungen und technische Machbarkeit dynamisch ausbalanciert werden und unter Einbeziehung potentieller Nutzer die Systementwicklung vorangetrieben wird (Flemisch 2008). Zu diesem Vorgehen gehören auch explorative Untersuchungen mit einer im Vergleich zu experimentellen Untersuchungen geringeren Anzahl von Versuchspersonen, mit denen jedoch intensiver in einen auch qualitativen Dialog getreten wird (z.B. Nielsen 1993). Diese werden durchgeführt, um zum einen Erwartungen von Nutzern zu erfassen, damit diese in die weitere Entwicklung einfließen können, und zum anderen, um einen ersten Eindruck von der Gebrauchstauglichkeit von Prototypen zu erhalten. Die hier beschriebene Exploration war wie in Abb. 5 beschrieben aufgebaut. Von diesen Schritten werden im Folgenden die rot umrandeten näher erläutert und die Ergebnisse dargestellt. Die Darstellungsreihenfolge richtet sich dabei nach der Reihenfolge aus der explorativen Untersuchung.

Für die aktuelle Exploration wurden 6 Versuchspersonen im Alter von 23 bis 50 Jahren (durchschnittlich 35,5 Jahre) mit Fahrerfahrung von 5 bis 26 Jahren (durchschnittlich 16,8 Jahre) eingeladen. 3 der Versuchspersonen waren weiblich, 3 männlich. Die Untersuchung fand in einem feststehenden Simulator des Instituts für

Verkehrssystemtechnik am DLR Braunschweig statt. Dieser besteht aus einer Sitzkiste, die



Abbildung 5: Ablaufschema der Untersuchung



Abbildung 6: Simulator

ausgestattet ist mit einem aktiven Lenkrad und einer aktiven Gas- / Bremspedal Kombination, welche eine Eigenentwicklung des DLR ist. Die Fahrscenen werden über einen Projektor auf eine 2 mal 1,5 Meter Projektionsfläche vor der Sitzkiste projiziert. Modulare Displays dienen zur Darstellung von Automationsanzeigen oder fahrzeugbezogenen Anzeigen wie z.B. einem Tachometer, sowie zur Darstellung von Zweitaufgaben. (Abb. 6)

Durch die H-Metapher ausgelöste generelle Nutzererwartungen an die Automation

Eine der interessierenden Fragen war, wie durch die H-Metapher erzeugte mentale Modelle einer Automation geartet sind. Dafür wurde den Versuchspersonen zunächst die H-Metapher vorgestellt. Danach wurden die Versuchspersonen nach generellen Erwartungen zum Automationsverhalten befragt, die noch nicht auf spezifische Situationen des Straßenverkehrs bezogen sind.

So konnten sich die Versuchspersonen zum Beispiel zu potentiellen Vor- und Nachteilen eines Fahrzeuges, das nach der H-Metapher gestaltet wurde, äußern.

In einem weiteren Schritt sollten die Versuchspersonen anhand einer Liste von Attributen auf einer 7er Skala angeben, in wie weit dieses Attribut für ein Fahrzeug das nach der H-Metapher gestaltet wurde, erwartet wird.

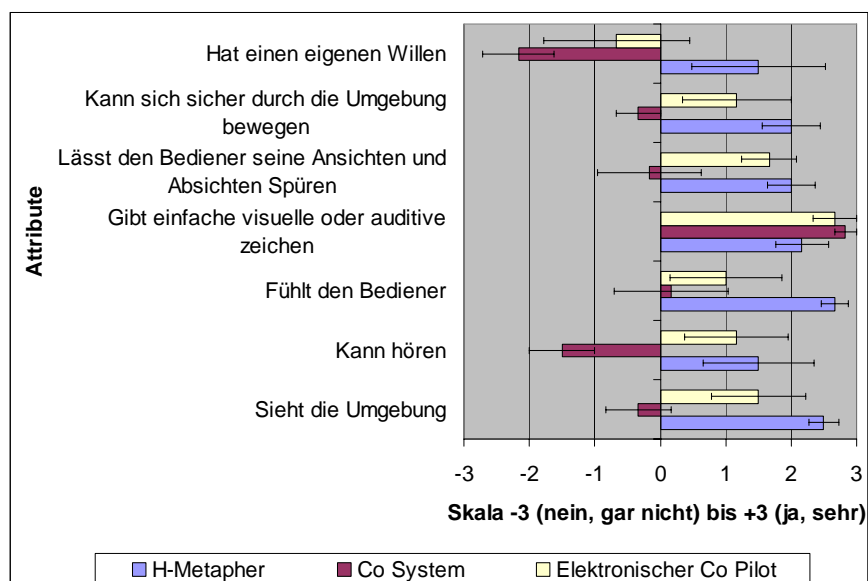


Abbildung 7: Erwartungen an die Attribute eines Fahrzeug das entweder nach der H-Metapher, der Co-Pilot-Metapher oder der Co-Systemmetapher gestaltet wurde (Auszug).

Um einen Vergleich anstellen zu können, in wie weit sich diese Erwartungen von Erwartungen gegenüber Systemen die auf anderen Designmetaphern beruhen unterscheiden, sollten 2 weitere Systeme bzw. Metaphern, eine elektronischer Co-Pilot Metapher und eine Co-System Metapher anhand der gleichen Attribute eingeschätzt werden. (Abb. 7).

Zusammengefasst wird, im Gegensatz zu dem elektronischen Co-Piloten oder einem Co-System, von einem nach der H-Metapher gestalteten System eher erwartet, dass es den Bediener fühlt, bzw. den Bediener seine Absichten spüren lässt. Es wird aber auch erwartet, dass es einfache visuelle oder auditive Zeichen gibt. Dies ist soweit konsistent mit der Auslegung der haptisch multimodalen Interaktion. Ebenso wird eher erwartet, dass es hören kann und die Umgebung sieht, sowie sich sicher durch die Umgebung bewegen kann. Außerdem wird erwartet, dass es einen eigenen Willen hat.

Insgesamt fiel auf, dass die Streuungsmaße bei den Attributierungen der 3 Systeme bei der H-Metapher fast durchweg geringer ausfielen als beim elektronischen Co-Piloten und beim Co-System. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass ein mentales Model, welches durch die H-Metapher erzeugt wird, konkreter ist im Vergleich zu mentalen Modellen bezüglich des elektronischen Co-Piloten und des Co-Systems, bei denen eine höhere Plastizität der Metapher vorliegen könnte.

Nutzererwartungen an das Automationsverhalten und die Interaktion für Fahrstreifenwechsel-, Brems- und Ausweichmanöver

In einem nächsten Schritt konnten die Versuchspersonen äußern, welches konkrete Verhalten sie von einem Fahrzeug, das nach der H-Metapher gestaltet wurde, direkt in spezifischen Verkehrssituationen erwarten würden. Im Fall der aktuellen Exploration handelte es sich dabei um unterschiedliche Annäherungssituationen.

Generelles Szenario, sowohl in der Erwartungsabfrage als auch in späteren Durchfahrten mit dem Prototyp war eine Autobahn mit drei Fahrstreifen. Auf dieser sollten die Versuchspersonen auf dem mittleren Fahrstreifen fahren, und dabei Kollisionen mit auf ihrem Fahrstreifen auftauchenden vorausfahrenden Fahrzeugen vermeiden.

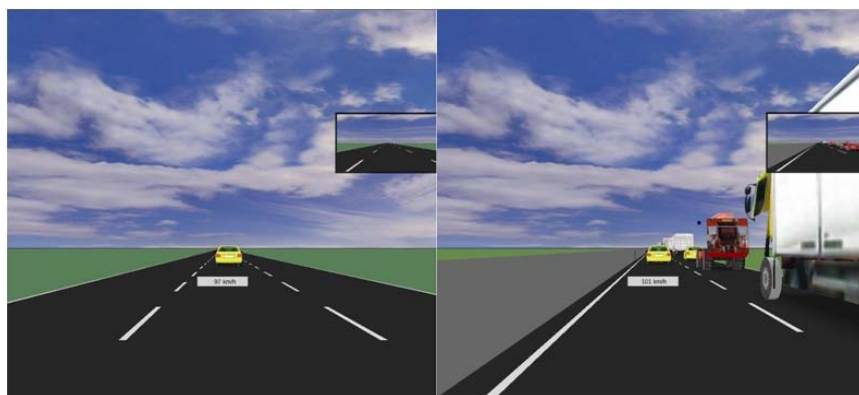


Abbildung 8: Szenarien der Exploration: mit Ausweichmöglichkeit (links) und ohne Ausweichmöglichkeit (rechts)

Um unterschiedliche Situationen mit unterschiedlicher Handlungsspannung umzusetzen, erschienen die Fahrzeuge je nach Spannung in unterschiedlichen Time to Collision (TTC) vor dem eigenen Fahrzeug. Die genaue Einteilung der TTC richtete sich dabei nach den Übergängen zwischen einzelnen Spannungsstufen (Abb. 4).

In einer Bedingung waren der linke und rechte Fahrstreifen der Autobahn frei (3lane Szenario), so dass ein Ausweichen auf diese möglich war. In einer anderen Bedingung waren linker und rechter Fahrstreifen blockiert (1lane Szenario). Hier bestand nur die Möglichkeit des Bremsens (Abb. 8).

Um nicht nur relativ abstrakte Äußerungen der Versuchspersonen erfassen zu können, sondern auch direkt eine konkrete Vorstellung davon zu bekommen welches Automationsverhalten und insbesondere welche haptische Interaktion Versuchspersonen in diesen Situationen erwarten, wurde das Theatersystem genutzt (Schieben et al. 2009). Im Theatersystem sitzt die Versuchsperson im Simulator und spielt hier sozusagen die Automation. Dies tut sie, indem sie direkt an den Stellteilen, sowohl das erwartete Automationsverhalten, als auch Interaktionselemente demonstriert. Im Theatersystem existiert ein zweites Stellteil, das mit dem Stellteil im Simulator entweder mechanisch oder elektronisch gekoppelt ist. Ein Mitglied des Designteams hat hier die Möglichkeit, an diesem Stellteil direkt zu fühlen, welche Art von haptischer Interaktion sich die Versuchspersonen in der jeweiligen Spannungsstufe vorstellt, und kann haptische Interaktion auch direkt einspielen. Neben den haptischen Elementen kann die Versuchsperson in der Erwartungsabfrage auch Erwartungen über akustische und visuelle Elemente äußern.

Generelle Erwartungen zu Automationsverhalten bei Annäherung

Fast alle Versuchspersonen erwarteten sowohl für TR als auch für LR ein Eskalationsschema. Dieses soll dabei anfänglich eher informierende, vorschlagende Unterstützung umfassen und schließlich, bei ausbleibender Reaktion des Fahrers, in einem automatischen Notfallmanöver resultieren.

Verhalten bei niedriger bis mittlerer Handlungsspannung:

Im TR bei niedriger Spannung erwartete keine Versuchsperson ein aktives Eingreifen des Systems. 3 Versuchspersonen erwarteten hier eine auditive Warnung in Form eines Warntons. Eine Versuchsperson erwartete eine visuelle Fahrstreifenwechselempfehlung in Form eines Pfeils in die Richtung des gewünschten Fahrstreifens.

Im LR hingegen erwarteten 4 Versuchspersonen einen akustischen Hinweisreiz. Eine Versuchsperson erwartete eine Kombination aus akustischem und visuellem Hinweisreiz sowie eine ansteigende Gegenkraft auf dem Gaspedal. 5 Versuchspersonen erwarteten jedoch

schon in der niedrigen Spannungsstufe bzw. an der Grenze zur mittleren Spannungsstufe, einen automatischen Spurwechsel.

Verhalten bei höherer Spannung:

Bei höherer Spannung wurde im TR, anstelle eines aktiven Fahrstreifenwechselmanövers, von 3 Versuchspersonen eher ein informierendes bzw. vorschlagendes haptisches Signal am Lenkrad erwartet, z.B. in Form einer Lenkradvibration oder einem Impuls auf dem Lenkrad. Eine Versuchsperson erwartete eher eine ansteigende Gegenkraft auf dem Gaspedal.

Bei hoher Spannung erwarteten im TR 5 von 6 Versuchspersonen bei ausbleibender Reaktion des Fahrers einen automatischen Eingriff. 4 Versuchspersonen erwarteten als automatischen Eingriff eine automatische Bremsung, eine Versuchsperson erwartete ein automatisches Ausweichmanöver.

Im LR erwarteten alle Versuchspersonen ein automatisches Notfallmanöver. Hier erwarteten 3 Versuchspersonen ein automatisches Ausweichmanöver und 3 ein automatisches Bremsmanöver.

Zusammenfassung der Erwartungen zu Automationsverhalten bei Annäherung

Zusammengefasst wurde im TR bei niedriger Spannung eher kein aktiver Eingriff und eher eine informierende Funktion erwartet. Diese Information sollte dabei eher akustischer als visueller Natur sein. Bei Erhöhung der Spannung wurde erwartet, dass sich die Information eher in ein haptisches Signal am Lenkrad mit vorschlagendem Charakter wandelt. Bei sehr hoher Spannung wurde im TR auch ein automatischer Eingriff in Form einer automatischen Bremsung erwartet. Nur eine von 6 Personen erwartete ein automatisches Ausweichen.

Im LR erwarteten die meisten Versuchspersonen, auch schon bei niedriger Spannung, eine akustische oder visuelle Information. Viele Versuchspersonen erwarteten aber auch schon bei niedriger Spannung einen automatischen Fahrstreifenwechsel, also einen sehr frühen aktiven Eingriff. Bei höherer Spannung wurde ebenso ein automatischer Fahrstreifenwechsel erwartet. Bei sehr hoher Spannung schließlich wurde ein vollautomatischer Eingriff erwartet, der entweder in Form eines Ausweichmanövers oder eines Vollbremsmanövers vorliegen sollte.

Automations- und Interaktionsdesign für Fahrstreifenwechsel-, Brems- und Ausweichmanöver

Die Erwartungen der Versuchspersonen werden im Verlauf der Exploration auch mit einem unabhängig von den Nutzerwartungen entwickelten ersten Prototyp verglichen. Dieser Prototyp wurde aufgrund theoretischer Überlegungen und unter Nutzung des Theatersystems

vom Designteam entwickelt. Im Folgenden wird das im Prototyp umgesetzte Interaktionsdesign zum Annähern, Fahrstreifenwechseln, Notbremsen und Ausweichen näher beschrieben.

Zwischen dem Beginn einer Annäherung und hochkritischem Annähern wurde zur Arbitrierung einer Handlung ein Eskalationsschema angepasst, das auf die Handlungsspannung als Prozessführungsgröße zurückgreift.

Die Interaktion im Tight Rein:

Die TR Interaktion geht von einem aktiv beteiligten Fahrer aus. Hier wird in der niedrigen Spannungsstufe auf die Darbietung eines Signals verzichtet.

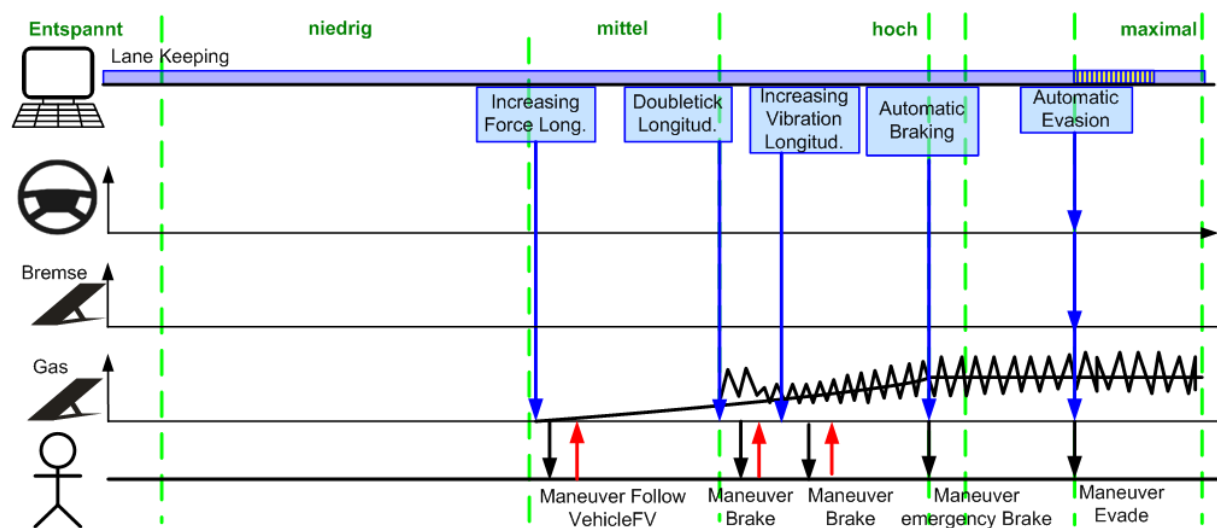


Abbildung 9: Interaktionsdiagramm für Automationslevel Tight Rein. Die Übergänge zwischen den einzelnen Spannungsstufen sind als grün-gestrichelte, senkrechte Linien eingezeichnet.

Bei weiterer Annäherung an ein vorausfahrendes Fahrzeug bzw. Hindernis beginnt mit Überschreiten des Übergangs von der niedrigen auf die mittlere Spannungsstufe eine ansteigende Gegenkraft auf dem Gaspedal (Abb. 9 - Increasing Force Longitudinal).

Bei weiterer Annäherung wird, mit Überschreiten des Übergangs von der mittleren zur hohen Spannungsstufe, zusätzlich zu der ansteigenden Gegenkraft auf dem Gaspedal zunächst ein diskretes haptisches Signal in Form eines deutlichen zweifachen Pedalimpulses dargeboten (Abb. 9 – Doubletick Longitudinal). Dieser Doubletick geht über in eine Vibration des Gaspedals, welche in ihrer Amplitude mit zunehmender Annäherung ansteigt (Abb. 9 Increasing Vibration Longitudinal.). Wird schließlich die Stufe von der hohen Spannungsstufe zu der maximalen Spannungsstufe überschritten, so bleibt hier gerade noch genügend Zeit, ein sofortiges automatisches Automationsmanöver erfolgreich auszuführen. Dies ist, sofern es

möglich ist, eine automatische Vollbremsung (Abb. 9 Automatic Braking). Bleibt jedoch keine Zeit mehr für eine Vollbremsung und wird von der Automation die Möglichkeit eines Ausweichmanövers erkannt, so wird in diesem relativ progressiven Design, das eine hohe Sensorzuverlässigkeit voraussetzt, ein automatisches Ausweichmanöver durchgeführt (Abb. 9 – Automatic Evasion).

Der Fahrer hat dabei jederzeit die Möglichkeit, auf eines der Signale mit einem entsprechenden Manöver zu reagieren und die Handlungsspannung selber aufzulösen.

Erscheinen plötzlich Hindernisse vor dem eigenen Fahrzeug, wird direkt in einer höheren Spannungsstufe eingestiegen. In diesem Fall wird auf die Darbietung der Interaktion/Arbitrierung niedrigerer Spannungsstufen verzichtet.

Die Interaktion im Loose Rein

Im Gegensatz zu TR wird im LR davon ausgegangen, dass der Fahrer weniger aktiv an der Bewältigung der Fahraufgabe beteiligt ist. Hier beginnt das Eskalationsschema bereits früher, um den Fahrer bei Bedarf zunächst wieder verstärkt in den Loop zu holen. Dies geschieht damit der Fahrer aktiv eine Entscheidung bezüglich des zu fahrenden Manövers treffen kann und somit stets über den gerade aktuellen Zustand des Systems informiert ist. So beginnt die Interaktion im LR bereits mit dem Übergang vom Zustand Entspannt zum Bereich niedriger Spannung (Abb. 10).

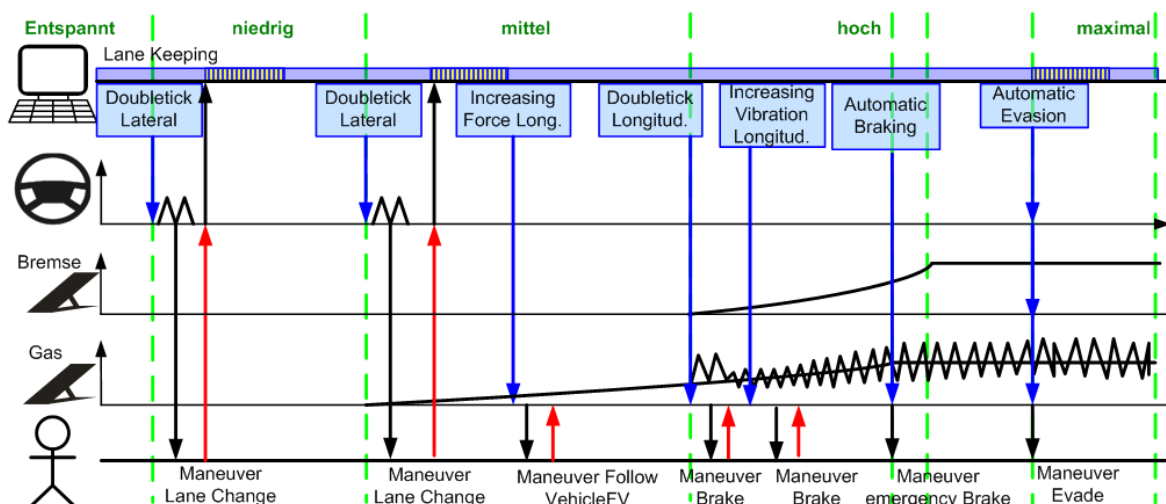


Abbildung 10: Interaktionsdiagramm für Automationslevel Loose Rein. Die Übergänge zwischen den einzelnen Spannungsstufen sind als grün-gestrichelte, senkrechte Linien eingezeichnet.

Wird von der Automation eine Annäherung an ein vorausfahrendes Fahrzeug erkannt und ist ein Fahrstreifenwechsel durchführbar, so strebt die Automation zunächst einen Fahrstreifenwechsel an, um die gegenwärtige Geschwindigkeit beizubehalten. Die

Entscheidung, den Fahrstreifen zu wechseln, bleibt bei der hier angewendeten Art der Arbitrierung dem Fahrer überlassen. Dem Fahrer wird lediglich mit Überschreiten des Übergangs von Entspannt zur niedrigen Spannungszone eine Fahrstreifenwechselempfehlung in Form eines diskreten, lateral gerichteten und zweifachen Impulses auf dem Lenkrad dargeboten (Abb. 10 - Doubletick Lateral). Dieser Doubletick ist so ausgeprägt, dass sich dieser nicht direkt auf die Querführung des Fahrzeuges auswirkt.

Reagiert der Fahrer nicht auf diesen Doubletick, bei gleichzeitiger weiterer Annäherung, wird mit Überschreiten des Übergangs von der niedrigen zur mittleren Spannungszone eine kontinuierlich ansteigende Gegenkraft auf dem Gaspedal dargeboten. Dies ist soweit analog zur Interaktionsstrategie im TR, die Gegenkraft beginnt im LR aber bereits eine Sekunde früher als im LR, da hier von unterschiedlichen Vorbedingungen ausgegangen wird (Fahrer hat größeren Anteil an der Ausführung der Fahraufgabe als im Loose Rein).

Bei weiterer Annäherung und ab dem Überschreiten des Überganges von der mittleren zur niedrigen Spannungsstufe, ist die Interaktion zwischen TR und LR angeglichen, d.h. in LR sind ab der hohen Spannungsstufe die gleichen Interaktionselemente zu finden wie im TR. Zusätzlich wird im LR jedoch ab dem Übergang von der mittleren zur hohen Spannungsstufe bereits eine automatische Teilbremsung ausführt, während im TR hier die Automation noch nicht eingreift.

Die Interaktion wird angeglichen, da in niedrigen Spannungsstufen für TR und LR unterschiedliche Handlungsdringlichkeit angenommen wird. So muss z.B. im LR der Fahrer erst wieder weiter in den Loop geholt werden (z.B. Kaber & Endsley 1997). In späten Spannungsstufen ist die Handlungsdringlichkeit jedoch, sowohl vom TR als auch vom LR ausgehend, gleich hoch, so dass hier die Interaktion einen einheitlichen Verlauf annimmt.

Ebenso kann, wenn im Verlauf der Interaktion noch keine Entscheidung gefallen ist, mit einer zunehmend invasiven Interaktion eine Verlagerung der Autorität hin zur Automation ausgedrückt werden, die schließlich bei ausbleibender Fahrerreaktion in einem vollautomatisierten Eingriff mündet. Während bis zur Auslösung des vollautomatischen Eingriffs der Mensch jederzeit die Kontrolle übernehmen kann, ist während des automatischen Notfallmanövers auch eine Einschränkung der menschlichen Eingriffsmöglichkeiten, z.B. in Form einer haptischen Entkoppelung vorstellbar (Flemisch 2010) und wurde hier exemplarisch realisiert.

Das hier beschriebene Automations- und Interaktionsdesign wurde in einem Prototyp umgesetzt und im Simulator getestet. Im Folgenden werden die Ergebnisse beschrieben.

Testergebnisse im Simulator bei Erstkontakt (Naive Run)

In einem sogenannten Naive Run wurden die Versuchspersonen das erste Mal mit diesem Prototyp konfrontiert. Der Naive Run dient dazu, eine Vorstellung davon zu bekommen in wie weit die Funktionsweise des Systems ohne vorherige Vermittlung von Systemwissen verständlich ist, wie dies z.B. bei einem Mietfahrzeug ohne Lesen der Bedienungsanleitung der Fall wäre.

Als Szenario diente das schon in der Erwartungsabfrage genutzte Szenario der Autobahn mit 3 Fahrstreifen, mit und ohne Ausweichmöglichkeit. Zur Erzeugung von Ablenkung sollten die Versuchspersonen im Naive Run, neben dem Fahren und der Vermeidung von Kollisionen, eine visuelle Zweitaufgabe bearbeiten.

Bewertungen des Gesamtsystems im Naive Run

Um das System aggregiert über alle Situationen hinweg zu beurteilen, wurden alle Spannungssituationen unterbrechungsfrei durchfahren.

Insgesamt wurde das System sowohl im TR als auch im LR von den Versuchspersonen durchweg positiv bewertet (Abb. 12 links). Die Versuchspersonen fanden das System insgesamt gut, betrachteten es als nützlich und fanden die Aktionen der Automation nachvollziehbar. Ebenso zeigte sich ein hohes Systemvertrauen. LR wurde dabei tendenziell positiver beurteilt als TR.

Ähnliche Resultate wurden auch bezüglich der Kontrollierbarkeitsbeurteilung erzielt (Abb. 12 rechts). Zur Beurteilung der Kontrollierbarkeit diente eine 15fach abgestufte Kategorienunterteilungsskala, die auf der Würzburger Störungsbewältigungsskala (Neukum & Krüger 2003) beruhte (Abb. 11).

Wie wirkte sich die Automation auf die Kontrollierbarkeit des Fahrzeuges aus?															
Wegen Automation nicht mehr kontrollierbar		Starke Verschlechterung der Kontrollierbarkeit			Leichte Verschlechterung der Kontrollierbarkeit			weder pos. noch negativ	Leichte Verbesserung der Kontrollierbarkeit			Starke Verbesserung der Kontrollierbarkeit			Ohne Automation nicht mehr kontrollierbar
-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3	+4	+5	+6	+7	

Abbildung 11: Skala zur Erfassung der Kontrollierbarkeit

Die Skala wurde so modifiziert, dass sie nicht nur negative Einflüsse auf die Kontrollierbarkeit erfasste, sondern auch Verbesserung der Kontrollierbarkeit.

Der Einfluss der Automation auf die Kontrollierbarkeit wurde so eingeschätzt, dass diese Art der Automation die Kontrollierbarkeit deutlich verbessert. Insbesondere die Kontrollierbarkeit in kritischen Situationen wurde als verbessert wahrgenommen. Das gleiche gilt auch für die Bewertung des Sicherheitsgewinns durch das System (Abb. 12 rechts).

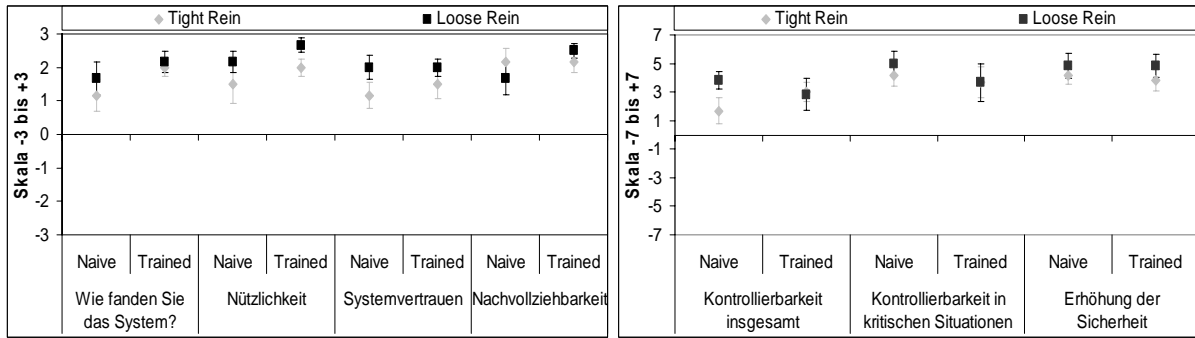


Abbildung 12: Beurteilung des Gesamtsystems hinsichtlich Akzeptanz und Kontrollierbarkeit. Es werden TR und LR und Naive- mit Trained Run verglichen. Fehlerbalken = Standardfehler des Mittelwertes.

Bewertung in den einzelnen Spannungsstufen

Um einen genaueren Blick auf die Interaktionsmechanismen werfen zu können, wie z.B. die Wahrnehmbarkeit einzelner Interaktionssignale und deren Timing, wurden die Kollisionssituationen mit unterschiedlicher Spannung in einem zweiten Naive Run einzeln durchfahren und bewertet. D.h. nach jeder Kollisionssituation, egal ob vermieden oder kollidiert, wurde angehalten, um das System in genau dieser Situation zu bewerten.

Insbesondere in den Situationen mit niedriger Spannung, aber auch in einigen anderen

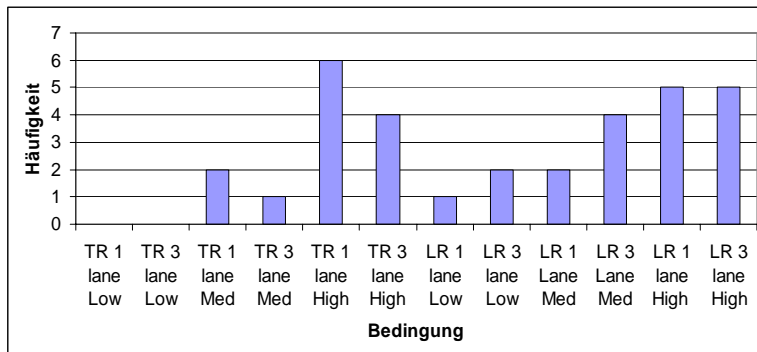


Abbildung 13: Anzahl der Versuchspersonen, die im Durchlauf „Einzelne Spannungsstufen“ das System bewusst erlebten und beurteilten

Situationen, konnten viele Versuchspersonen selbständig durch das Einleiten eines Manövers (Fahrstreifenwechseln oder Abbremsen) die Spannung auflösen, bevor überhaupt die Interaktion für die Annäherung dargeboten wurde. In diesen

Fällen konnte demnach keine bewusste Beurteilung des Systems stattfinden.

Die Beurteilung des Systems in den segmentierten Durchfahrten einzelner Spannungssituationen, beruht also teilweise nur auf wenigen Versuchspersonen (Abb. 13). Die Bedingungen TR 1 lane und TR 3 lane, jeweils in der Spannungsstufe niedrig, wurden von keiner Versuchsperson bewusst erlebt und daher nicht beurteilt (Abb. 13).

Akzeptanz und Kontrollierbarkeit in den einzelnen Spannungsstufen

Für die verbliebenen Versuchspersonen zeigte sich, dass bezüglich Akzeptanz und Nützlichkeit, das System in jeder Annäherungssituation wieder positiv beurteilt wurde. Auch wenn die Beurteilungen in den unterschiedlichen Annäherungssituationen auf unterschiedlich

vielen Versuchspersonen beruhen, konnte eine tendenziell bessere Beurteilung des LR gegenüber dem TR System beobachtet werden.

Ebenso wurde die Funktion des Systems in fast jeder Annäherungssituation als Verbesserung der Kontrollierbarkeit angesehen. Auch hier konnte, eine tendenziell bessere Beurteilung des LR gegenüber dem TR beobachtet werden konnte.

Ausnahmen von dieser positiven Beurteilung der Kontrollierbarkeit fanden sich im Tight Rein. Hier wurde in der Annäherungssituation bei mittlerer Spannung ohne Ausweichmöglichkeit und in der Annäherungssituation bei hoher Spannung mit Ausweichmöglichkeit, jeweils von einer Versuchsperson eine leichte Verschlechterung der Kontrollierbarkeit angegeben. Die Bewertung könnte durch die Beurteilung der in dieser Exploration nur schwach ausgelegten TR Fahrstreifenhaltefunktionalität begründet sein.

In den verbleibenden Fällen, in denen die Funktion des Systems nicht als Verbesserung angegeben wurde, wurde der Einfluss auf die Kontrollierbarkeit zumindest mit weder positiv noch negativ angegeben.

Analyse des Alarmtimings in den einzelnen Spannungsstufen

Bezüglich des Alarmtimings zeigte sich, dass das Timing der Signale als tendenziell genau richtig eingeschätzt wird. Es zeigten sich zwar wenige Bewertungen als eher leicht zu spät, hier hätte aber aufgrund des Versuchsdesigns mit plötzlich auftauchenden Fahrzeugen nicht früher gewarnt werden können. Einigen Versuchspersonen war anscheinend nicht bewusst, dass eine Warnung nicht gegeben werden kann, wenn ein Vorderfahrzeug noch nicht vorhanden ist, bzw. waren sich aufgrund der Ablenkung nicht darüber bewusst, dass das Vorderfahrzeug nicht früher aufgetaucht ist.

Obwohl teilweise schon recht früh mit dem Eskalationsschema begonnen wird, wurde nur in einem Fall die haptische Information als zu früh eingeschätzt. Jedoch muss hier auch erwähnt werden, dass die frühzeitig einsetzende und kontinuierlich ansteigende Gegenkraft auf dem Gaspedal, von einer Mehrheit der Versuchspersonen nicht bewusst wahrgenommen wurde und daher der Zeitpunkt nicht eindeutig bewertet werden kann.

Analyse der Interaktionselemente in den einzelnen Spannungsstufen

Um die Interaktion verbessern zu können wurde betrachtet, welche Interaktionssignale von den Versuchspersonen überhaupt wahrgenommen und wie diese dann interpretiert werden. Zunächst wurde hierfür das LR Element lateraler Doubletick betrachtet (Abb.10). Im Naive Run wurde dieses Signal in der niedrigen Spannungsstufe von 3 Versuchspersonen und in der

mittleren Spannungsstufe von 2 Versuchspersonen bewusst wahrgenommen. Keiner der Versuchspersonen empfand das Signal als störend. Da dieses Signal eher einen empfehlenden als einen warnenden Charakter hat, ist es nicht negativ zu werten, dass einige VP es im Erstkontakt noch nicht identifizieren konnten.

Anders verhielt es sich sowohl im TR als auch im LR mit der ansteigenden Gegenkraft auf dem Gaspedal (Abb. 9 & 10). Diese wurde in der mittleren Spannungssituation von den wenigsten Versuchspersonen bewusst wahrgenommen. Möglicher Grund war ein zu leichter Anstieg der Kraft, die anfänglich wahrscheinlich noch nicht wahrnehmbar war, bzw. durch den leichten Anstieg eine Art Adaption an die Gegenkraft stattfand. Erst mit Eintritt in die hohe Spannungsstufe wurden die Versuchspersonen durch das diskrete Signal des Doubleticks und die anschließende Vibration auf dem Gaspedal auf die Interaktion aufmerksam (Abb. 9 & 10). Diese Signale wurden von allen Versuchspersonen eindeutig identifiziert und auch mit einem nachdrücklichen Charakter assoziiert.

Testergebnisse im Simulator nach Automationstraining (Trained Run)

Nach einem Training, in dem Systemwissen über die prinzipielle Funktionsweise des Systems vermittelt wurde, wurden, wie im ersten Naive Run, nochmals alle Szenarien ohne Unterbrechung durchfahren. Nach der Durchfahrt der Szenarien sollten die Versuchspersonen das System noch mal insgesamt über alle Szenarios aggregiert beurteilen. Diesmal war von Interesse, wie das System mit Systemwissen beurteilt wird.

Die Beurteilung des Gesamtsystems fiel nach dem Automationstraining, insbesondere bezüglich der Akzeptanz der Nützlichkeit und der Nachvollziehbarkeit, tendenziell besser aus als nach dem Naive Run (Abb. 12). In den Kategorien Systemvertrauen, Kontrollierbarkeit insgesamt und Erhöhung der Sicherheit bleibt die Beurteilung in etwa gleich (Abb. 12). Die Kontrollierbarkeit in kritischen Situationen wurde nach dem Trained Run zwar immer noch positiv, jedoch etwas schlechter als nach dem Naive Run beurteilt (Abb. 12). Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass viele Versuchspersonen im Naive Run dachten, automatische Notfallmanöver selbständig ausgeführt zu haben, im Trained Run aber wussten, dass hier eine Automation eingreift und ihnen kurzzeitig die Kontrolle entzogen wurde.

Zusammenfassung der Ergebnisse

Insgesamt ist das entwickelte Design im Wesentlichen mit den Erwartungen der Versuchspersonen konsistent. Im hochautomatisierten Modus LR (Loose Rein) werden jedoch früher automatische Eingriffe in Form von Notbremsungen erwartet, als es im Prototyp

umgesetzt und getestet wurde. Ebenso werden eher akustische Interaktionselemente erwartet, die im aktuellen Prototyp nicht umgesetzt wurden. Dies war eine bewusste Designentscheidung, um der zurzeit beobachtbaren Proliferation von akustischen Signalen in Kraftfahrzeugen entgegenzuwirken.

Bei der Untersuchung des Prototyps konnte insgesamt beobachtet werden, dass das entwickelte Design von den Versuchspersonen als nützlich und einfach zu verstehen beurteilt wurde. Ebenso wurde die Interaktion als nicht störend und als tendenzielle Verbesserung der Kontrollierbarkeit bewertet. Obwohl teilweise früh im Eskalationsprozess Informationen dargeboten wurden, wurden diese im Allgemeinen als zeitlich genau richtig bewertet. Dies ist ein Hinweis darauf, dass eine permanente haptische Informationsvermittlung so gestaltet werden kann, dass sie nicht als störend empfunden wird. Die meisten Interaktionssignale wurden von den Versuchspersonen bereits bei erstem Systemkontakt identifiziert und mit der richtigen Bedeutung belegt. Jedoch besteht an Signalen wie der ansteigenden Gegenkraft auf dem Gaspedal noch Verbesserungspotential. Hier muss an einer reliablen Vermittlung haptischer Informationen gearbeitet, und das Design verbessert werden. In diesem Zusammenhang ist ebenso eine Erweiterung um visuelle und möglicherweise akustische Komponenten denkbar.

Ausblick

Ausgehend von dieser Exploration und Gebrauchstauglichkeitsuntersuchung wird das hier beschriebene H-Mode-System für Brems-, Fahrstreifenwechsel- und Ausweichmanövern weiterentwickelt, in einen High Fidelity Simulator sowie in ein Realfahrzeug migriert und mit größeren Stichproben untersucht. Nach Weiterentwicklung und Erprobung der Funktionalität zum Annähern, Bremsen und Ausweichen werden die bestehenden Funktionen des Systems konsequent um weitere Funktionalitäten für neue Szenarien erweitert wie z.B. das Auffahren auf die Autobahn und Kreuzungssituationen. Weitere Schritte sind eine iterative Verfeinerung der Teilkonzepte haptisch-multimodale Koppelung, Arbitrierung und Automationstransitionen, eine integrative Ausformulierung des H-Mode, sowie, in Kooperation mit Forschungspartnern, die Abstrahierung dieser Konzepte in Richtung eines verallgemeinerbaren Konzeptes einer kooperativen Fahrzeugführung.

Literatur

Bender, E., Darms, M., Schorn, M., Stählin, U., Isermann, R., Winner, H. Landau, K. (2007) Antikollisionssystem Proreta – Der Weg zum unfallvermeidenden Fahrzeug. Teil 2: Ergebnisse. ATZ Heft 5 Jg. 109

- Fastenmeier, W., Hinderer, J., Lehnig, U., Gstalter, H. (2001). Analyse von Spurwechselfvorgängen im Verkehr. In: Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 55, Nr. 1, S.15-23
- Flemisch, F. O.: Adams, C. A., Conway, S. R., Goodrich, K. H., Palmer, M. T., & Schutte, P. C.: The H-Metaphor as a Guideline for Vehicle Automation and Interaction (No. NASA/TM—2003-212672). Hampton: NASA, Langley Research Center, 2003.
- Flemisch, F.; Kelsch, J.; Heesen, M. (2010). Skizze des Gestaltungsraumes haptisch-multimodaler Koppelung zwischen Mensch, Co-System und Regelstrecke als Teil einer kooperativen Bewegungsbeeinflussung; Neue Arbeits- und Lebenswelten gestalten. GfA-Frühjahrskonferenz, Darmstadt
- Flemisch, F.; Kelsch, J.; Löper, C.; Schieben, A.; Schindler, J.; Heesen, M.: Cooperative Control and Active Interfaces for Vehicle Assistance and Automation; FISITA World automotive Congress; Munich; 2008
- Flemisch, F. O., Schindler, J., Kelsch, J., Schieben, A., & Damböck, D. (2008). Some Bridging Methods towards a Balanced Design of Human-Machine Systems, Applied to Highly Automated Vehicles. Applied Ergonomics International Conference, Las Vegas.
- Flemisch, F.; Schieben, A.; Kelsch, J.; Löper, C. (2008). Automation spectrum, inner / outer compatibility and other potentially useful human factors concepts for assistance and automation; In: Ed. Waard, D.; Flemisch, F.; Lorenz, B.; Oberheid, H.; Brookhuis, K. Human Factors for Assistance and Automation; Shaker, Maastricht
- Green, M. (2000). "How long does it take to Stop?" Methodological Analysis of driver perception times. Transportation Human Factors, 2(3), 195-216.
- Griffith, P., & Gillespie, R. B. (2004). Shared Control Between Human and Machine: Haptic Display of Automation During Manual Control of Vehicle Heading. Proceedings of the 12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems,
- Hoc, J.M. (2001) Towards a cognitive approach to human machine cooperatin in dynamic situations. International Journal of Human Computer Studies. 54. 509-540
- Kelsch, J., Flemisch, F. et al. (2006): Links oder rechts, schneller oder langsamer? Grundlegende Fragestellungen beim Cognitive Systems Engineering von hochautomatisierter Fahrzeugführung. DGLR Fachauschusssitzung Anthropotechnik, Karlsruhe.
- Kaber, D. B. Endsley M. R. (1997). Out-of-the-Loop Performance Problems and the Use of Intermediate Levels of Automation for Improved Control System Functioning and Safety. Process Safety Progress, 16(3), 126–131.
- Löper, Christian; Flemisch, Frank O. (2009): Ein Baustein für hochautomatisiertes Fahren: Kooperative, manöverbasierte Automation in den Projekten H-Mode und HAVEit. In: Stiller, Christoph; Maurer, Markus (Hg.): 6. Workshop Fahrerassistenzsysteme. Karlsruhe: Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe e.V., S. 136–146.
- Neukum, A. & Krüger, H.-P. (2003). Fahrerreaktion bei Lenksystemstörungen – Untersuchungsmethodik und Bewertungskriterien. VDI-Berichte, 1791, 297-318.
- Nielsen, J. (1993): Usability Engineering. AP Professional: Cambridge, MA, USA.
- Schieben, A., Heesen, M., Schindler, J., Kelsch, J., & Flemisch, F. (2009). The theater-system technique: Agile designing and testing of system behavior and interaction, applied to highly automated vehicles. Paper presented at the 1st International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications, Essen, Germany