

Vergleichende Untersuchungen unterschiedlicher Steuerungskonzepte mit einem aktiven Side Stick im Fahrsimulator

Benjamin STRENGE, Stefan SIEBURG, Ludger SCHMIDT

*Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik, Universität Kassel
Mönchebergstraße 7, D-34125 Kassel*

Kurzfassung: Im Projekt E2V wurde ein neuartiges, zweirädriges Elektrofahrzeug für abgeschlossene, nicht urbane Räume wie den Kasseler Bergpark Wilhelmshöhe entwickelt. Die Steuerung des Fahrzeuges erfolgt über einen zentral zwischen beiden Sitzplätzen angebrachten Side Stick, sodass auch Personen ohne Führerschein oder mit körperlichen Einschränkungen das Fahrzeug nutzen können. Der verwendete aktive Side Stick ermöglicht, den Fahrer durch haptische Signale z. B. auf das Abkommen vom Weg hinzuweisen und das Übertragungsverhalten per Software zu konfigurieren. Um ein sicheres, effizientes und komfortables Steuerungskonzept für das E2V zu bestimmen, wurden verschiedene Konfigurationen des aktiven Side Sticks definiert und in einem OpenDS-basierten Fahrsimulator getestet. Signifikante objektive Unterschiede wurden nicht festgestellt, aber eine subjektive Präferenz für ein auf der Längsachse isometrisches und auf der Querachse isotonisches Steuerungskonzept.

Schlüsselwörter: Mensch-Maschine-Interaktion, Fahrzeugsteuerung, Side Stick, Assistenzsystem, OpenDS, Simulator

1. Projekthintergrund und Ziel

Im Projekt E2V wurde ein neuartiges, einachsiges Elektrofahrzeug entwickelt, das in abgeschlossenen Räumen wie z. B. Stadtzentren, verkehrsfreien Wohngebieten, Parks und Kulturlandschaften eingesetzt werden soll, in denen sich die Nutzung herkömmlicher Straßenfahrzeuge aufgrund baulicher Gegebenheiten oder Umwelt- und Tourismusaspekten verbietet. Als Piloteinsatzgebiet wurde der Kasseler Bergpark Wilhelmshöhe ausgewählt. Da das E2V auf zwei Rädern an nur einer Achse fährt, werden Kurvenfahrten nicht wie bei herkömmlichen PKW durch Änderung des Radlenkwinkels realisiert, sondern wie bei einem Kettenfahrzeug über unterschiedliche Drehgeschwindigkeiten der beiden Räder.

Die bis heute üblichen Bedienelemente zur Fahrzeugführung – Lenkrad, Pedale, Schalthebel – resultierten in erster Linie aus der mechanischen Kopplung mit den entsprechenden Stellelementen und nicht aus ergonomischen Überlegungen (Schieben et al. 2008). Die Steuerung des E2V erfolgt stattdessen einhändig über einen zentral zwischen den beiden Sitzplätzen angebrachten Side Stick, um auch Personen ohne Führerschein und/oder mit körperlichen Einschränkungen (z. B. halbseitiger Lähmung) die Verwendung des Fahrzeugs zu ermöglichen. Unter ergonomischen Gesichtspunkten hat die Steuerung mittels Side Stick diverse Vorteile gegenüber der herkömmlichen Lenkung mittels Lenkrad und Pedalerie. So wird durch das Wegfallen des Lenkrads der Raum vor dem Fahrer frei für die Anzeige wichtiger Informationen oder kann, wie im Falle des E2V, für eine bessere

Sicht auf die Umgebung verwendet werden. Auch ist durch die zentrale Positionierung des Side Sticks eine Verwendung von beiden Sitzplätzen aus möglich, sodass Links- und Rechtshänder gleichermaßen ihre bevorzugte Hand zur Steuerung verwenden können. Zudem entspricht bei Verwendung eines Side Sticks die Dimensionalität des Bedienelements der Dimensionalität der Fahraufgabe (Penka 2002), da die Längsdynamik über nur eine Achse gesteuert wird, statt wie beim herkömmlichen Automatikwagen über drei bzw. beim Schaltwagen über vier verschiedene Bedienelemente (Gaspedal, Bremspedal, Kupplungspedal und Schalthebel).

Da die Steuerbefehle vom Stick elektronisch übertragen werden, entfällt die mechanische Kopplung bei der Bedienung. Um haptisches Feedback generieren und unterschiedliche Steuerungskonzepte untersuchen zu können, wurde ein aktiver Side Stick der Firma Stirling Dynamics ausgewählt. Dieser kann nicht nur seine Position registrieren, sondern auch die auf ihn einwirkenden Kräfte. Umgekehrt kann der Stick per Software angesteuert werden, seine Trägheit oder Dämpfung zu ändern und künstliche Kraftbarrieren (sog. Soft- und Hardstops) oder beliebige andere Kräfte zu erzeugen. Dadurch besteht beispielsweise die Möglichkeit, den Fahrer durch haptische Signale auf Hindernisse oder ein Abkommen vom Weg hinzuweisen. Weiterhin kann der Stick unkompliziert per Software für verschiedene Steuerungskonzepte konfiguriert werden. Das Ziel der in diesem Beitrag vorgestellten Untersuchung war, für das E2V ein sicheres, effizientes und komfortables Steuerungskonzept zu bestimmen.

2. Versuchsbeschreibung

Auf Basis einer Literaturrecherche zu Bedienkonzepten für vergleichbare Steuerungen und den dabei postulierten Vor- und Nachteilen wurden unterschiedliche Konfigurationen für den aktiven Side Stick des E2V definiert. Da das E2V als einachsiges Fahrzeug nur über zwei Räder verfügt und somit keine Lenkwinkel entstehen, ist eine entsprechende kraft- oder positionsreflektierende Rückmeldung auf der Querachse (vgl. Schieben et al. 2008) im Gegensatz zu herkömmlichen Fahrzeugen nicht sinnvoll. Ebenso ist die Beschleunigung des E2V in Relation zur niedrigen Maximalgeschwindigkeit von nur 10 km/h so groß, dass die Längsdynamik fast als binäre Größe betrachtet werden kann (entweder Stillstand oder Fahren mit Maximalgeschwindigkeit). Daher wurde darauf verzichtet, Steuerungsansätze mit direkter haptischer Rückmeldung des Fahrzeugzustands einzubeziehen. Stattdessen wurden isotonische Steuerungen mit unterschiedlichen Trägheits- und Dämpfungswerten und isometrische Steuerungskonzepte verglichen.

2.1 Steuerungskonzept A

Bei diesem Steuerungskonzept handelt es sich um eine auf beiden Achsen isotonische Steuerung mit geringer Trägheit und Dämpfung sowie ohne künstliche Hard- oder Softstops. Die Beschleunigung und Lenkung werden proportional zur Auslenkung des Side Sticks ermittelt, die durch keinerlei sonstige Einflüsse modifiziert wird. Diese Konfiguration ähnelt dem Verhalten eines herkömmlichen passiven Computer-Joysticks.

2.2 Steuerungskonzept B

Dieses Steuerungskonzept stellt eine auf beiden Achsen isometrische Steuerung dar. Der Stick kann also nicht sichtbar bewegt werden; zur Bestimmung der Beschleunigung und Lenkung werden stattdessen die vom Nutzer auf den Side Stick ausgeübten Längs- und Querkraften genutzt. Das Konzept hat den Vorteil, dass sich durch den Entfall der Längsbewegung des Unterarmes die reibungsähnlichen Effekte zwischen Armauflage und Unterarm reduzieren, was eine bequemere Armhaltung ermöglichen soll (Eckstein 2000).

2.3 Steuerungskonzept C

Wie B ist dieses Steuerungskonzept ebenfalls in Längsrichtung isometrisch. Bei der Querdynamik wird hingegen eine isotonische Steuerung verwendet, wobei Dämpfung und Trägheit des Side Sticks an das Fahrzeugverhalten angepasst wurden. Die konstanten Winkelverhältnisse der oberen Extremitäten ermöglichen hierbei eine genauere Wahrnehmung des Stellteilwinkels in Querrichtung (Eckstein 2000). Außerdem wurden auf der Querachse Hardstops verwendet, sodass die seitliche Bewegung des Sticks auf einen etwas kleineren Bereich beschränkt wurde.

2.4 Steuerungskonzept D

Ähnlich wie Steuerungskonzept A ist dieses Konzept auf beiden Achsen isotonisch. Allerdings wurde wie bei Steuerungskonzept C eine Anpassung der Trägheit und Dämpfung des Side Sticks an das Reaktionsverhalten des Fahrzeugs durchgeführt, jedoch nicht nur in Quer-, sondern auch in Längsrichtung. Hieraus resultierte im Vergleich zu Konzept A eine schwergängigere Steuerung, die näherungsweise das Reaktionsverhalten des simulierten Fahrzeugs nachstellt. Zusätzlich wurden Softstops in beiden Richtungen verwendet, um ungewolltes Übersteuern zu vermeiden.

2.5 Assistenzsystem

Bei allen vier Steuerungskonzepten (A bis D) wurde stets dasselbe Assistenzsystem verwendet: Wenn das Fahrzeug vom Weg abkam, vibrierte der Side Stick wie bei einem „virtuellen Kiesbett“ (Kelsch et al. 2006) in Querrichtung, um den Fahrer zu warnen. Auf diese Weise sollte gewährleistet werden, dass das E2V nur auf befahrbaren Wegen verwendet wird, um zum Schutz der Passagiere und der Parklandschaft beizutragen.



Abbildung 2: E2V-Mockup mit OpenDS-Fahrsimulation im Labor

2.6 Versuchsablauf

Im E2V-Fahrsimulator (Abbildung 2) sollten die Versuchsteilnehmer nacheinander mit jedem der vier Steuerungskonzepte dieselbe Strecke in einer 3D-Simulationsumgebung des Kasseler Bergparks Wilhelmshöhe durchfahren. Um systematische Verzerrungen durch Übungseffekte u. ä. bestmöglich auszuschließen, wurden N=24 Versuchsteilnehmer (21 bis 58 Jahre; m=17, w=7) akquiriert, denen jeweils zufällig eine der $4! = 24$ möglichen Permutationen für die Reihenfolge der Steuerungskonzepte zugewiesen wurde. Die Software des Fahrsimulators basierte auf OpenDS und frei verfügbaren sowie selbst erstellten Daten und Modellen des Bergparks (Abbildung 3).

Die Teststrecke verlief teils parallel zum Berg, teils bergab und variierte mehrfach ihre Breite. Die Umgebung war von Baumbewuchs geprägt, der sich abseits des Weges befand und mit dem nicht kollidiert werden konnte. An Abzweigungen und Weggabelungen wurden rot-weiß-gestreifte Sperren als 3D-Objekte positioniert, die den Testpersonen signalisieren sollten, welcher der möglichen Wege zu befahren war. Des Weiteren wurden auf der Teststrecke für diesen Versuch diverse statische 3D-Objekte zur Darstellung menschlicher Parkbesucher platziert, deren Position zwischen den Durchläufen nicht verändert wurde. Die Objekte wurden so platziert, dass die Ideallinie verlassen werden musste, um Kollisionen zu verhindern. Bei Kollision wurde eine Audiodatei abgespielt und der Side Stick in Längsrichtung vibriert, um zu signalisieren, dass ein Parkbesucher angefahren wurde.



Abbildung 3: Screenshot der Simulationsumgebung aus den Fahrversuchen

Die Aufgabenstellung gab an, dass die Strecke möglichst zügig abgefahren werden sollte, wobei weder Personen angefahren noch der dargestellte Weg verlassen werden sollte. Die Anzahl der Kollisionen, Abkommen vom Weg sowie die benötigte Zeit wurden aufgezeichnet. Darüber hinaus wurden die Versuchsteilnehmer ab dem zweiten Durchlauf jeweils gebeten, durch Anordnung entsprechender Karten auf einem Tisch eine subjektive Rangfolge anzugeben, wie gut ihnen die bis dahin verwendeten Steuerungskonzepte im Vergleich gefallen haben. Im Anschluss an die vier Versuchsdurchläufe wurden die Teilnehmer gebeten einen Fragebogen auszufüllen, um demografische Daten und eine subjektive Bewertung des simulierten Assistenzsystems zu erfassen.

3. Ergebnisse

Die Ergebnisse der objektiven Messungen können Tabelle 1 entnommen werden. Ein Abkommen vom Weg für weniger als zwei Sekunden wurde hierbei nicht gezählt, da das Assistenzsystem den Nutzer entsprechend gewarnt und in vielen Fällen eine rasche Rückkehr auf den Weg ermöglicht hat (vgl. Abbildung 5).

Tabelle 1: Objektive Ergebnisse bzgl. benötigter Fahrzeit, Anzahl Kollisionen und Häufigkeit des Abkommens vom Weg

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Standardabweichung
Zeit A (s)	286,4	371,0	300,80	18,62
Zeit B (s)	290,4	407,1	306,22	26,79
Zeit C (s)	290,4	357,2	303,49	17,62
Zeit D (s)	289,1	522,1	310,56	49,27
Kollisionen A	0	4	0,92	1,10
Kollisionen B	0	5	1,13	1,26
Kollisionen C	0	4	0,71	1,00
Kollisionen D	0	3	0,75	1,15
Abkommen $\geq 2s$ A	0	7	1,04	2,05
Abkommen $\geq 2s$ B	0	13	1,50	3,11
Abkommen $\geq 2s$ C	0	6	1,08	1,79
Abkommen $\geq 2s$ D	0	6	1,13	1,80

Zwischen den einzelnen Steuerungskonzepten konnten auf 5 %-Niveau keine signifikanten Abweichungen bzgl. der durchschnittlichen Fahrzeiten, Kollisionshäufigkeiten oder des Abkommens vom Weg festgestellt werden.

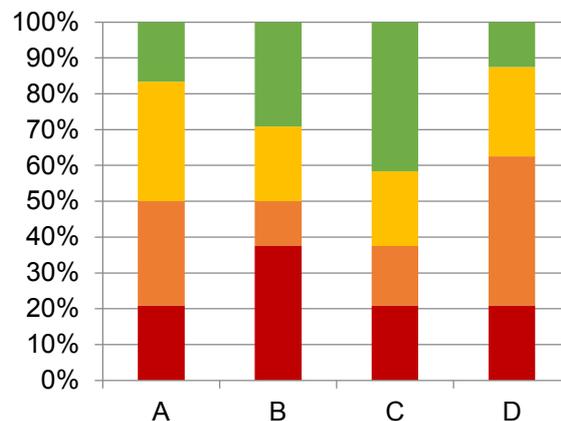


Abbildung 4: Visualisierung der subjektiven Präferenzen für die vier Steuerungskonzepte

Die Ergebnisse der subjektiven Bewertungen sind in Abbildung 4 dargestellt. Konzept B wurde am häufigsten zur subjektiv schlechtesten Variante (rot) gewählt. Steuerungskonzept C wurde von den Versuchsteilnehmern am häufigsten als subjektiv beste (grün) sowie beste oder zweitbeste Variante (grün+gelb) genannt. Mit Konzept C wurden tendenziell auch am wenigsten Kollisionen mit Parkbesuchern verursacht. Wie in Abbildung 5 dargestellt, wurde der Weg bei Konzept C insgesamt am häufigsten verlassen, allerdings vergleichsweise selten für mehr als zwei

Sekunden. Dies könnte darauf hindeuten, dass Konzept C besonders gut mit dem verwendeten Assistenzsystem harmoniert.

Das Assistenzsystem wurde von der Mehrheit der Testteilnehmer als eher hilfreich (29,2 %) oder sehr hilfreich (50 %) bewertet, seine Intensität wurde bei sinusförmiger Vibration mit 15 Hz und einer Amplitude von 20 N zumeist als genau richtig (70,8 %) oder tendenziell zu stark (25 %) empfunden.

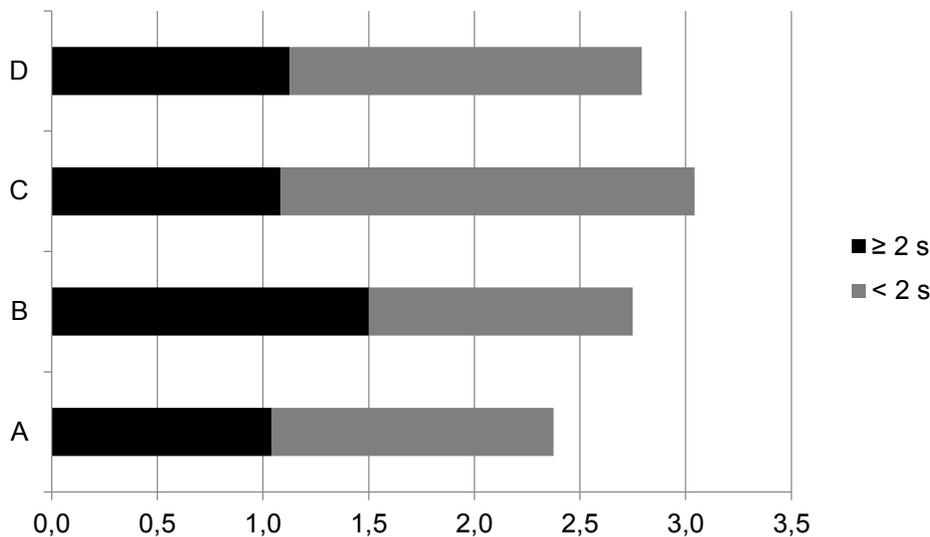


Abbildung 5: Häufigkeit des Abkommens vom Weg bei den vier Steuerungskonzepten

4. Fazit

Objektiv wurden mit einer Stichprobengröße von N=24 keine signifikanten Unterschiede zwischen den vier getesteten Konfigurationen des Side Sticks festgestellt. Das auf der Längsachse isometrische und auf der Querachse isotone Steuerungskonzept war subjektiv am beliebtesten.

5. Literatur

- Eckstein L (2000) Sidesticks im Kraftfahrzeug – ein alternatives Bedienkonzept oder Spielerei? In: Bubb H (Hrsg.) Ergonomie und Verkehrssicherheit: GfA-Konferenzbeiträge der Herbstkonferenz 2000. München: Utz, 65- 96.
- Kelsch J, Flemisch FO, Löper C, Schieben A, Schindler J (2006) Links oder rechts, schneller oder langsamer? Grundlegende Fragestellungen beim Cognitive Systems Engineering von hochautomatisierter Fahrzeugführung. In: Grandt M, Bauch A (Hrsg.) Cognitive Systems Engineering i. d. Fahrzeug- und Prozessführung. 48. FAS Anthropotechnik. DGLR-Bericht, 227–240.
- Penka A (2002) Vergleichende Untersuchung zu Fahrerassistenzsystemen mit unterschiedlichen aktiven Bedienelementen. Utz.
- Schieben A, Damböck D, Kelsch J, Rausch H, Flemisch FO (2008) Haptisches Feedback im Spektrum von Fahrerassistenz und Automation. In: Proceedings of 3. Tagung Aktive Sicherheit durch Fahrerassistenz, Garching.

Danksagung: Ein besonderer Dank gilt Herrn Oliver Rabe für seine Unterstützung beim Aufbau des Fahrsimulators und der Umsetzung der Versuchsgestaltung.