

## Evaluation zweier Bedienkonzepte zur Steuerung eines Fahrzeugs mit drei Bewegungsfreiheitsgraden

Bernhard Weber, Michael Panzirsch, Silvia Montoya-Zamarron,  
Carsten Preusche & Barbara Deml

### Zusammenfassung

Neuartige Konzepte für Elektromobilität sehen vor, dass das Fahrzeug über vier unabhängig voneinander lenkbare Radnabenmotoren angetrieben wird (*four-wheel independent steering, 4WIS*). Dabei ergeben sich durch die mechanische Entkopplung von Lenk- bzw. Antriebsaktuatorik und Stellteilen (*X-by-Wire*) völlig neue Möglichkeiten zur Gestaltung der Mensch-Maschine-Schnittstelle. Ein Bedienkonzept für ein 4WIS-Fahrzeug sollte eine intuitive und sichere Nutzung der zusätzlichen Bewegungsfreiheitsgrade (Seitwärtsfahrt, Rotationen auf der Stelle, etc.) ermöglichen.

Angeregt durch die Entwicklungen in der Luftfahrt, wurden auch im Automobilbereich erste Konzepte zur Steuerung mit Joystick-ähnlichen Stellteilen, sogenannten Sidesticks, vorgelegt (z.B. Eckstein, 2001). Neuere Studien liefern dabei erste Hinweise, dass die Sidestick-Steuerung verglichen mit dem konventionellen Steuerkonzept (Lenkrad, Pedalerie) mindestens gleich gute Fahrleistungen bei tendenziell geringerer Beanspruchung ermöglicht (Weber et al., 2011).

In der vorliegenden Studie wurden zwei Bedienkonzepte zur Steuerung eines Fahrzeugs mit drei Bewegungsfreiheitsgraden (Longitudinal-, Lateral- und Gierbewegung) untersucht. Dabei wurde eine integrierte Steuerung mit einem 3DoF Sidestick mit einer auf einen 2DoF Sidestick und eine Spacemouse verteilten Steuerung verglichen. Die Ergebnisse der durchgeführten Fahrsimulationsstudie ( $N=16$ ) weisen darauf hin, dass der Sidestick eine bessere Lateralsteuerung (Seitwärts-, Schrägfahrten) ermöglicht, wohingegen Giermanöver (Rotations-, Kurvenfahrten) besser mit der zusätzlichen Spacemouse gefahren werden können. Weitere Entwicklungen des Bedienkonzepts werden auf Basis der bisherigen Befunde diskutiert.

### 1 Einleitung

Die Gestaltung der Stellteile in einem konventionellen Fahrzeug (Lenkrad, Pedalerie) ergab sich im Wesentlichen aus der mechanischen Kopplung von Stellteilen und ausführenden Aktuatoren. Bei neuartigen X-by-Wire Systemen entfällt die mechanische Übertragung, wodurch neuartige Bedienkonzepte

ermöglicht werden. Fly-by-Wire Konzepte wurden bereits erfolgreich in der Luftfahrt umgesetzt. Als prominentes Beispiel ist hier der Airbus A320 zu nennen, der mit einem joystickartigen Stellteil, dem Sidestick, gesteuert wird (Moir & Seabridge, 2003).

Auch im Automobilbereich wurden diverse X-by-Wire Konzepte vorgelegt und alternative Bedienkonzepte entworfen (z.B. Huang, 2003). Wie im Bereich der Luftfahrt erscheinen auch hier Ansätze, die eine Steuerung mit einem Sidestick vorsehen, besonders erfolgversprechend (z.B. Eckstein, 2001). In einer aktuellen Überblicksarbeit (Weber et al., 2011) wurden die Befunde von insgesamt acht Studien zur Steuerung von Längs- und Querdynamik mit einem Sidestick zusammengetragen. Insgesamt zeigte sich, dass die Sidesticksteuerung im Vergleich zur konventionellen Steuerung mindestens gleich gute Fahrleistungen bei ähnlicher Beanspruchung ermöglicht. Dabei nahmen an den meisten Studien Probanden teil, die nur wenig oder gar keine Erfahrung damit hatten, ein Fahrzeug mit einem Sidestick zu steuern.

Dieser Befund spricht für die schnelle Erlernbarkeit und somit Intuitivität des Sidestick-Konzepts. Ein Vorteil liegt beispielsweise darin, dass die Steuerung der Längsdynamik richtungskompatibel gestaltet werden kann (Stellteilauslenkung nach vorne bedeutet Beschleunigung; Stellteilauslenkung nach hinten bedeutet Bremsen). Bei einer konventionellen Steuerung werden sowohl die Beschleunigung als auch das Bremsen durch Vorwärtsbewegungen der Fußpedale gesteuert. Insgesamt werden die beiden Bewegungsfreiheitsgrade (Längs- und Querdynamik) mit fünf Bedienelementen (drei Pedale, Schaltknüppel, Lenkrad) gesteuert (Bubb, 2000). Mit einem Sidestick verkürzen sich die Reaktionszeiten bei der Längssteuerung deutlich, da Umsetzzeiten (z.B. Wechsel Gas-, Bremspedal) entfallen. Zudem sind bei der Quersteuerung weder größere Stellteilbewegungen noch ein Umgreifen erforderlich. Sicherheitsrelevant erscheint auch die Tatsache, dass die Sicht auf sekundäre und tertiäre Bedienelemente nicht eingeschränkt wird und sich gleichzeitig der Überlebensraum vergrößert. Trotz dieser Vorzüge des Sidestick-Konzepts stehen noch systematische Untersuchungen zum Einfluss nicht intendierter Steuerbefehle durch Trägheitseinflüsse aus (z.B. bei einer Vollbremsung).

Während der Sidestick als Bedienelement im Fahrzeug eine ergonomisch bessere Alternative darstellen kann, ist die Fragestellung der vorliegenden Arbeit, ob sich diese Vorteile auch bei der Steuerung von drei Bewegungsfreiheitsgraden nutzen lassen. Hintergrund für diese Studie ist das beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelte Elektromobil *RoMo* (*ROboterMObil*; siehe Bild 1), das über ein dezentrales Antriebssystem verfügt (Schaub, 2011). Vier Radnabenmotoren erlauben eine unabhängige Steuerung bzw. Antrieb der Räder (four wheel independent steering, 4WIS; Bünte, 2011). Jedes Rad kann in einem Winkel von  $120^\circ$  eingeschlagen werden. Zwar können durch die Einschränkung der Radwinkel nicht beliebige Momentanpole gewählt werden; dennoch werden

völlig neue Fahrmanöver wie Rotationen auf der Stelle oder auch Seitwärtsfahrten ermöglicht (Bünthe, 2011).

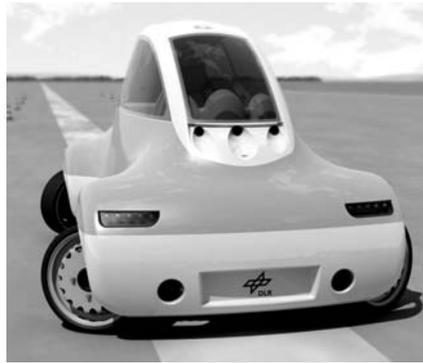


Bild 1: Das RoMo

Für die Steuerung eines solchen 4WIS Fahrzeugs wie dem RoMo, bei dem die drei Bewegungsfreiheitsgrade (Longitudal-, Lateral- und Gierbewegung) unabhängig voneinander angesteuert werden können, wäre ein Sidestick mit voller Funktionsintegration denkbar. Als Erweiterung des zweidimensionalen Sidesticks könnte hier ein dreidimensionaler Sidestick zum Einsatz kommen, der für die Gierbewegung eine Drehung um die Hochachse des Stellteils ermöglicht.

Auch hier liegen bereits Erfahrungen aus der Luftfahrt vor. In seiner Überblickarbeit zur Steuerung von Hubschraubern mit Sidesticks, berichtet Aiken (1985), dass dreiachsige Systeme (Roll-, Nick- und Gierbewegung, Höhenkontrolle mit zusätzlichem Kollektivhebel) mit einem Drehgriff als akzeptabel empfunden wurden und einem vierachsigen System (Höhenkontrolle durch Translationen entlang der Hochachse des Sidesticks) vorgezogen wurden. Jedoch weist Aiken (1985) darauf hin, dass auch eine Integration von drei Steuerdimensionen in ein Stellteil, bei Präzisionsflügen und Situationen mit hoher Arbeitsbelastung zu deutlichen Leistungseinbußen führen kann. Auch Wyllie (1988) berichtet, dass Piloten erhebliche Probleme bei gleichzeitiger Bedienung mehrerer Bewegungsfreiheitsgrade hatten.

In der vorliegenden Studie sollte eine integrierte Steuerung eines 4WIS Fahrzeugs mit einem 3DoF Sidestick mit einem 2DoF Sidestick und einem zusätzlichen Stellteil zur Bedienung eines dritten Bewegungsfreiheitsgrades in einer Fahr-simulationsstudie evaluiert werden.

## 2 Methoden

### 2.1 Teilnehmer

An der Studie nahmen  $N=16$  rechthändige, männliche DLR-Mitarbeiter im Alter von 23 bis 43 Jahren ( $M=29,5$  Jahre;  $SD=5,3$ ) teil. Für alle Teilnehmer lagen aus

einer anderen Studie bereits Daten zur senso- und feinmotorischen Fähigkeit vor. Im verwendeten Testverfahren zur Messung der sensomotorischen Koordinationsleistung des Wiener Testsystems von Schuhfried®, sollten die Eigenbewegungen eines Kreissegments mit drei Bewegungsrichtungen mit zwei Joysticks kompensiert werden. Der durchschnittliche Prozentrang der Studienteilnehmer lag dabei deutlich über dem der Eichstichprobe ( $M_{SMK}=77,8$ ;  $SD_{SMK}=12,0$ ; Range: 47-95). Weiterhin lagen Daten zur Präzision von Hand-Armbewegungen („Control Precision“ nach Fleishman, 1972) vor, die beim Liniennachfahren und einer Punktierungsaufgabe erfasst wurde (Motorische Leistungsserie des Wiener Testsystems). Auch in diesem Leistungsbereich wiesen die Teilnehmer überdurchschnittliche Prozentränge auf ( $M_{SMK}=67,3$ ;  $SD_{SMK}=25,7$ ; Range: 24-100).

## 2.2 Experimentalsetting

Das technische Setup bestand aus einem 47" LCD-Bildschirm (200 Hz) zur Darstellung der Fahrsimulation, einem DLR/KUKA Leichtbauroboter-System zur Simulation der Joystick-Kinematik, dem daran installierten Joystickgriff und einer Spacemouse (siehe Bild 2).

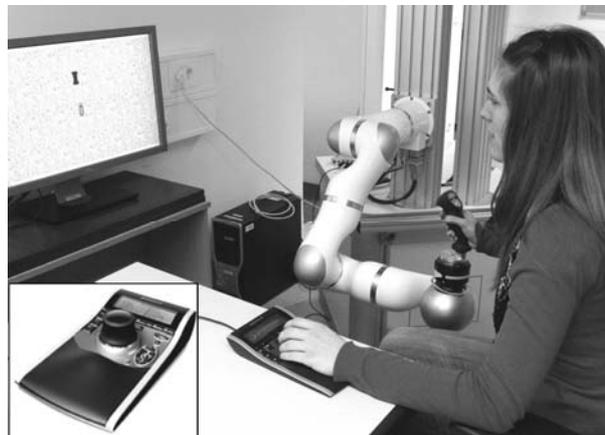


Bild 2: Experimentalaufbau

Der Roboterarm verfügt über sieben Gelenke mit Positions- und Drehmomentsensorik. Zudem ist zusätzlich ein 6-DoF Kraft-Drehmomentsensor am äußersten Segment angebracht, um Eingabekräfte präzise zu erfassen. In dieser Studie wurde das robotische System so konfiguriert, dass longitudinale, laterale Bewegungen und auch Rotationen um die Hochachse möglich waren. Die Joystick-Kinematik wurde dabei nicht isometrisch (reine Krafteingabe), sondern isomorph (federzentriert) ausgestaltet, da auf diese Weise die Steuereingaben besser nachvollzogen werden können und die in der Realität vorkommenden

Vibrationen bzw. Trägheitseffekte die Steuerung weniger beeinträchtigen (z.B. Mayer & Cox, 2003).

Die verwendete Spacemouse (3DConnexion von Logitech<sup>®</sup>) ist ein isomorphes 3D Eingabegerät, das über drei translatorische und drei rotatorische Freiheitsgrade verfügt und über einen puk-artigen Aufsatz gesteuert wird (siehe Bild 2, Kasten).

### 2.3 Experimentalaufgabe

Die Teilnehmer sollten in der Simulationsumgebung verschiedene Fahrmanöver mit einem 4WIS Fahrzeug absolvieren. Bei den Fahraufgaben handelte es sich um Kompensationsaufgaben, d.h., es sollten die Bewegungen einer Sollposition (angezeigt durch eine halbtransparente Kopie des gesteuerten Fahrzeugs; vgl. Bild 3) kompensiert werden und Abweichungen des gesteuerten Fahrzeugs von dieser Sollposition minimiert werden. Alle Einzelaufgaben wurden je zweimal durchgeführt, um den Teilnehmern die Möglichkeit zu geben, die Aufgabe und die Steuerung im ersten Durchgang kennenzulernen und zu erproben.

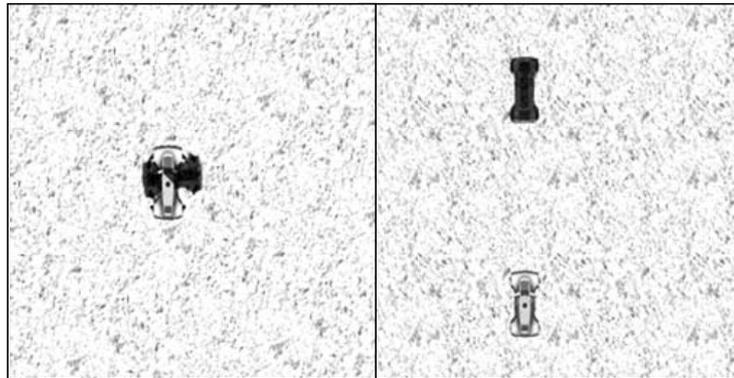


Bild 3: Sollpositionen (schwarz) bei Rotations- und Geradeausfahrt

Der erste Aufgabenblock (A1) bestand aus Vorwärtsfahrten mit drei Endgeschwindigkeiten, einer Rückwärtsfahrt und Seitwärtsfahrten nach links vs. rechts mit niedriger vs. mittlerer vs. hoher Geschwindigkeit. Der zweite Aufgabenblock bestand aus Rotationsfahrten nach links vs. rechts mit hoher vs. niedriger Geschwindigkeit (A2). Dies ermöglichte den Teilnehmern, die Steuerung der einzelnen Bewegungsfreiheitsgrade mit den verschiedenen Steuerkonzepten kennenzulernen und zu trainieren.

Im Anschluss folgten zwei komplexere Aufgabenblöcke, die die gleichzeitige Steuerung von mindestens zwei Bewegungsfreiheitsgraden erforderte: leichte vs. starke Schrägfahrten nach links vs. rechts (B1) und eine weite vs. enge Kurvenfahrt nach links vs. rechts mit niedriger vs. hoher Geschwindigkeit (B2).

## 2.4 Versuchsdesign

Die Versuchsteilnehmer wurden entsprechend ihrer senso- bzw. feinmotorischen Fähigkeiten zwei Versuchsgruppen zugewiesen, um eine Gleichverteilung hinsichtlich der beiden Merkmale zu gewährleisten.

In der ersten Versuchsgruppe („Separation Lateralbewegung“=SL) wurde eine integrierte Steuerung ( $x, y, \Psi$ ) mit einer verteilten Steuerung verglichen, bei der die Lateralsteuerung ( $y$ ) auf eine Spacemouse gelegt wurde und die beiden verbleibenden Bewegungsfreiheitsgrade ( $x, \Psi$ ) auf den Joystick.

Analog hierzu wurde auch in der zweiten Versuchsgruppe („Separation der Gierbewegung“=SG) die integrierte mit der verteilten Steuerung verglichen, wobei hier die Gierbewegung ( $\Psi$ ) entweder in die Joysticksteuerung integriert oder auf die Spacemouse separiert wurde.

Innerhalb jeder Versuchsgruppe wurde die Stellteilreihenfolge (Integriert vs. verteilte Steuerung) und die Abfolge der Aufgabenblöcke A1 vs. A2 sowie B1 vs. B2 systematisch variiert, um potentielle Reihenfolgeeffekte zu kontrollieren.

Um die Dauer der Versuchsdurchführung zu reduzieren, wurden jedoch nicht alle Aufgabenblöcke mit beiden Stellteilkonzepten durchlaufen. In der SL-Gruppe wurden beim jeweils zweiten Stellteilkonzept nur die für die Lateralbewegung (Seitwärts- und Schrägfahrt), in der SG-Gruppe die für die Gierbewegung (Rotation, Kurvenfahrt) relevanten Aufgaben wiederholt.

## 2.5 Prozedere

Der Proband nahm in einem Abstand von ca. 1,5 m vor dem Bildschirm Platz und die Sitzposition (Armhaltung, Lehnstellung, Abstand zu den Eingabengeräten, Griffhaltung) wurde ggf. vom Versuchsleiter korrigiert. Der Teilnehmer wurde dann schriftlich über die Stellteilkonzepte, das Prozedere und die Experimental-aufgabe unterrichtet. Es wurde darauf hingewiesen, dass die Zielsetzung sei, die Abweichungen von der Sollposition zu minimieren, wobei ruckartige Steuerbefehle zu vermeiden seien und eine kontinuierliche Steuerung anzustreben sei. Zudem wurde der Teilnehmer vor jedem Aufgabenblock und jeder Einzelaufgabe auf standardisierte Weise mündlich instruiert.

Nach jedem Aufgabenblock füllte der Teilnehmer einen Fragebogen zur Arbeitsbelastung (NASA-TLX; Hart & Staveland, 1988) aus. Wurden alle Aufgaben mit einem Stellteilkonzept abgeschlossen, wurde dessen Gebrauchstauglichkeit anhand der „System Usability Scale“ (SUS; Brooke, 1996) bewertet. In einem abschließenden Fragebogen wurden demographische Variablen und Vertrautheit im Umgang mit einem Joystick bzw. einer Spacemouse erhoben.

## 3 Ergebnisse

In einer Voranalyse sollte die Häufigkeit der Nutzung eines PC-Joysticks bzw. einer Spacemouse verglichen werden. Tatsächlich war die Nutzungshäufigkeit

sowohl beim Joystick ( $M=0,5$ ;  $SD=0,5$  auf einer Skala von 0=nie bis 6=häufig) als auch bei der Spacemouse ( $M=0,8$ ;  $SD=1,2$ ) sehr gering. Zudem ergab sich kein signifikanter Unterschied beim Vergleich der Nutzungshäufigkeit beider Eingabegeräte ( $t(15) = .89$ ; ns).

Als Performanzkriterien wurden zwei Metriken bestimmt: Der Bedienaufwand und der Kontrollfehler. Der Bedienaufwand ( $BA$ ) entspricht dabei der bei der Regelung nötigen Stellteilauslenkung (vgl. Mayer, 1987):

$$BA = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_i^n \text{norm.Stellteilauslenkung}(t_i)^2} \quad (1)$$

In einer Vorstudie wurden die ergonomisch günstigsten Maximalauslenkungen für beide Eingabegeräte bestimmt. Die Auslenkung der beiden Stellteile wurde jeweils auf Werte von -1 bis 1 (positive und negative Maximalauslenkung) skaliert, so dass auch die Vergleichbarkeit der Eingaben garantiert wurde. Jeweils anhand eines direkt proportionalen Verhältnisses wurde aus der Vorwärts- bzw. Rückwärtsauslenkung des Joysticks die longitudinale, aus der seitlichen Auslenkung die laterale Sollgeschwindigkeit und aus der rotatorischen Auslenkung der Solllenkwinkel bzw. Sollrotationsgeschwindigkeit errechnet.

Der Kontrollfehler ( $KF$ ) ist die mittlere Abweichung von Fahrzeug- und Sollposition:

$$KF = \frac{\sum_i^n |Fhrzgspos(t_i) - Sollpos(t_i)|}{n} \quad (2)$$

In den folgenden Analysen wurden nur die Fahraufgaben analysiert, die mit beiden Stellteilvarianten durchlaufen wurden (Seitwärts- und Schrägfahrt in der SL-Gruppe bzw. Rotations- und Kurvenfahrt in der SG-Gruppe).

In der Experimentalgruppe, in der die Lateralbewegung entweder in die Joysticksteuerung integriert oder auf die Spacemouse separiert wurde (SL), wurden die Seitwärtsfahrt sowie die Schrägfahrt analysiert. Während bei reiner Seitwärtsfahrt der Bedienaufwand mit Joystick und Spacemouse ähnlich war ( $M_J=2,79$ ;  $M_S=2,75$ ; Cohen's  $d=0,15$ , vgl. Cohen, 1988, siehe Tabelle 1), zeigte sich beim lateralen Kontrollfehler ( $Y$ -Komponente) ein kleiner Effekt zugunsten der Joysticksteuerung ( $M_J=0,54$  m;  $M_S=0,61$  m;  $d=0,32$ ). Die Auswertung der NASA-TLX-Fragebögen ergab jedoch, dass die Arbeitsbelastung mit Joysticksteuerung größer war als mit Spacemousesteuerung ( $M_J=7,74$ ;  $M_S=6,85$ ;  $d=0,33$ ; Skalenrange: 1-20). Dieser Effekt kann einerseits damit zusammenhängen, dass die nötigen Eingabekräfte beim Joystick höher sind. Zudem zeigten weitere Analysen, dass jeweils bei Rechtsfahrten sowohl der Bedienaufwand ( $M_L=2,70$ ;  $M_R=2,89$ ;  $d=0,49$ ) als auch der Kontrollfehler in  $Y$ -Richtung ( $M_L=0,51$  m;  $M_R=0,57$  m;  $d=0,33$ ) größer waren.

Tab. 1: Ergebnisübersicht  
Mittelwerte (*SD* in Klammern)

Fahraufgabe Kriterium	3 DoF Joystick	2 DoF Joystick + Spacemouse	Effektstärke <i>d</i>
<b>Separation Lateralbewegung (SL)</b>			
<b>Seitwärtsfahrt</b>			
Bedienaufwand Y	2,79 (0,29)	2,75 (0,25)	0,15
Kontrollfehler Y [m]	0,54 (0,13)	0,61 (0,28)	0,32
Arbeitsbelastung	7,74 (2,35)	6,85 (3,02)	0,33
<b>Schrägfahrt</b>			
Bedienaufwand Y	3,30 (0,57)	3,41 (0,76)	0,16
Bedienaufwand X	2,55 (0,27)	2,42 (0,21)	0,54
Kontrollfehler Y [m]	0,76 (0,22)	0,92 (0,42)	0,48
Kontrollfehler X [m]	1,13 (0,35)	1,16 (0,36)	0,08
Arbeitsbelastung	9,04 (2,61)	9,88 (2,37)	0,34
Usability (Lateralseparation)	40,25 (3,24)	34,38 (6,76)	1,11
<b>Separation Gierbewegung (SG)</b>			
<b>Rotationsfahrt</b>			
Bedienaufwand $\Psi$	0,125 (0,016)	0,115 (0,015)	0,64
Kontrollfehler $\Psi$ [Grad]	13,23 (4,78)	11,69 (3,61)	0,36
Arbeitsbelastung	7,75 (4,05)	5,8 (2,47)	0,58
<b>Kurvenfahrt</b>			
Bedienaufwand $\Psi$	0,081 (0,028)	0,083 (0,03)	0,03
Bedienaufwand Y	0,70 (0,91)	0,38 (0,52)	0,43
Bedienaufwand X	3,44 (0,20)	3,26 (0,37)	0,61
Kontrollfehler $\Psi$ [Grad]	10,58 (3,88)	10,56 (4,03)	0,01
Kontrollfehler Y [m]	2,10 (0,94)	2,39 (1,27)	0,26
Kontrollfehler X [m]	1,83 (0,96)	1,82 (1,16)	0,01
Arbeitsbelastung	11,09 (2,47)	10,9 (2,41)	0,08
Usability (Gierseparation)	33,87 (7,9)	34,75 (5,7)	0,13

Bei der Schrägfahrt mussten die Lateralbewegung (*Y*) und die Longitudinalbewegung (*X*) gleichzeitig mit dem Joystick oder mit Spacemouse und Joystick koordiniert werden. Dabei zeigte sich, dass zwar der Bedienaufwand in Lateralrichtung bei beiden Stellteilkonzepten ähnlich war ( $M_J=3,30$ ;  $M_{S+J}=3,41$ ;  $d=0,16$ ), aber der Bedienaufwand in Longitudinalrichtung beim Joystick deutlich höher war als bei der Spacemouse ( $M_J=2,55$ ;  $M_{S+J}=2,44$ ;  $d=0,54$ ). Beim lateralen Kontrollfehler zeigte sich wie beim Seitwärtsfahren ein Vorteil für die Steuerung mit Joystick ( $M_J=0,76$  m;  $M_{S+J}=0,92$  m;  $d=0,48$ ). Hinsichtlich des longitudinalen Kontrollfehlers zeigte sich kein Unterschied zwischen den Bedingungen ( $M_J=1,13$  m;  $M_{S+J}=1,16$  m;  $d=0,08$ ). Bei verteilter Steuerung mit Spacemouse und Joystick war die Arbeitsbelastung höher als bei integrierter Steuerung ( $M_J=9,04$ ;  $M_{S+J}=9,88$ ;  $d=0,34$ ).

Insgesamt wurde die Gebrauchstauglichkeit (SUS-Fragebogen, Skalenrange: 0-50) der integrierten Steuerung als wesentlich besser beurteilt als die der verteilten Steuerung ( $M_J=40,25$ ;  $M_{S+J}=34,38$ ;  $d=1,11$ ). Die verteilte Steuerung wurde insgesamt als unnötig komplex und weniger intuitiv empfunden.

In einer zweiten Experimentalgruppe (SG) wurde die Gierbewegung ( $\Psi$ ) bei Rotations- und Kurvenfahrten entweder mit dem Joystick kommandiert oder mit der Spacemouse. Dabei zeigte sich bei Rotationsfahrten ein deutlich höherer Bedienaufwand bei Joysticksteuerung ( $M_J=0,125$ ;  $M_S=0,115$ ;  $d=0,64$ ), bei gleichzeitig höherem Kontrollfehler ( $M_J=13,23^\circ$ ;  $M_S=11,69^\circ$ ;  $d=0,36$ ) und deutlich höherer Arbeitsbelastung ( $M_J=7,75$ ;  $M_S=5,80$ ;  $d=0,58$ ). Die schlechteren Ergebnisse für die Joysticksteuerung lassen sich teilweise durch die insgesamt höheren nötigen Eingabekräfte erklären. Ähnlich wie bei der Seitwärtsfahrt zeigte sich zudem eine deutliche Divergenz des Bedienaufwandes bei Rechts- vs. Linksdrehungen ( $M_L=0,117$ ;  $M_R=0,133$ ;  $d=0,78$ ), d.h., bei Rechtsdrehungen waren besonders starke Korrekturen nötig.

Anders stellt sich das Befundmuster bei den Kurvenfahrten (gleichzeitige Steuerung von Gier- und Longitudinalbewegung) dar. Weder für Bedienaufwand ( $M_J=0,081$ ;  $M_{S+J}=0,083$ ;  $d=0,03$ ) und Kontrollfehler in  $\Psi$ -Richtung ( $M_J=10,58$ ;  $M_{S+J}=10,56$ ;  $d=0,01$ ) noch für die Arbeitsbelastung ( $M_J=11,09$ ;  $M_{S+J}=10,09$ ;  $d=0,01$ ) zeigten sich Unterschiede zwischen der integrierten vs. verteilten Steuerung. Allerdings ergab die zusätzliche Auswertung für die  $X$ - und  $Y$ -Richtung, dass bei integrierter Joysticksteuerung der Bedienaufwand sowohl in  $X$ - ( $M_J=3,44$ ;  $M_{S+J}=3,26$ ;  $d=0,61$ ) als auch in  $Y$ -Richtung ( $M_J=0,70$ ;  $M_{S+J}=0,38$ ;  $d=0,43$ ) deutlich erhöht war. Der Kontrollfehler in  $Y$ -Richtung war jedoch etwas geringer bei Joysticksteuerung ( $M_J=2,10$  m;  $M_{S+J}=2,39$  m;  $d=0,26$ ).

Beim Vergleich der beiden Bedienkonzepte hinsichtlich ihrer Gebrauchstauglichkeit zeigte sich kein nennenswerter Unterschied ( $M_J=33,87$ ;  $M_{S+J}=34,75$ ;  $d=0,13$ ).

#### 4 Diskussion

In der vorliegenden Studie wurde ein 3DoF Sidestick zur integrierten Steuerung mit einem 2DoF Sidestick mit zusätzlichem Stellteil zur verteilten Steuerung eines 4WIS-Fahrzeugs mit drei Bewegungsfreiheitsgraden verglichen. Dabei wurde die Fahrgüte bei elementaren Fahraufgaben wie dem Seitwärtsfahren oder Rotationsfahrten und bei komplexeren Fahraufgaben, die die Bedienung von mindestens zwei Bewegungsfreiheitsgraden erforderten, untersucht.

Die Ergebnisse der Fahrsimulationsstudie weisen darauf hin, dass Seitwärtsfahrten präziser mit dem Sidestick gesteuert werden können als mit der Spacemouse. Die präzisere Steuerung mit Sidestick lässt sich einerseits durch die stabilere Arm- bzw. Handhaltung erklären. Bei lateralen Steuerbewegungen wird der Arm stabil über die Armauflage gerollt, wodurch scheinbar eine genauere Stellteiljustierung als bei der Spacemouse möglich wird. Im Gegensatz zum

stabilen Umfassungsgriff beim Sidestick, wird die Spacemouse bei Seitwärtsfahrten mit zwei Fingern gesteuert. Zudem ist der Sidestick durch die höhere Federsteifigkeit toleranter gegenüber nicht intendierten Stellauslenkungen (z.B. Zittern, Abrutschen). Die größeren Eingabekräfte resultieren jedoch auch in einer subjektiv größeren Arbeitsbelastung.

Auch bei zusätzlicher Bedienung einer weiteren Bewegungsdimension bei der Schrägfahrt zeigt sich dieser Performanzvorteil bei Sidesticksteuerung. Die Separation von Lateral- und Longitudinalsteuerung auf Sidestick und Spacemouse hingegen wurde von den Studienteilnehmern als inkonsistent und als unnötig komplex beschrieben. Interessanterweise zeigt sich dennoch ein Vorteil der Entkopplung: Der Bedienaufwand in Longitudinalrichtung ist insgesamt geringer, was auf eine glattere Steuerung und seltenere korrektive Eingriffe hinweist.

Ein etwas anderes Bild ergibt sich bei Fahrten mit Gierbewegung. Bei reiner Rotationsfahrt schnitten die Probanden deutlich besser ab, wenn sie mit der Spacemouse führen. Der Bedienaufwand und der Kontrollfehler waren geringer bei gleichzeitig reduzierter Arbeitsbelastung. Dieser Befund lässt sich einerseits damit erklären, dass im Gegensatz zur Seitwärtsfahrt die Rotationsbewegung der Spacemouse mit mehreren Fingern präziser ausgeführt werden konnte. Andererseits waren die nötigen Eingabekräfte zur Steuerung des Sidesticks zu hoch, um akkurate Drehbewegungen auszuführen. Noch deutlicher als bei der Seitwärtsfahrt traten Asymmetrie-Effekte bei der Steuerung auf: Dieser Effekt lässt sich damit erklären, dass sich bei dorsal (d.h. in Richtung Handrücken) gebeugter Hand im Kontaktgriff die mögliche Kraftaufbringung wegen der entstehenden Sehneninsuffizienz halbiert (Bullinger & Solf, 1979).

Da bei Kurvenfahrten die nötigen Stellteildrehungen deutlich geringer waren, traten keinerlei Asymmetrie-Effekte auf. Auch beim Vergleich der beiden Stellteilkonzepte zeigten sich keine wesentlichen Unterschiede, abgesehen vom erhöhten Bedienaufwand in Longitudinal- und Lateralrichtung bei integrierter Steuerung. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Probanden intuitiv die laterale Position des Führungsfahrzeugs bei Sidesticksteuerung mitnutzen, obgleich nur eine Gier- und Longitudinalsteuerung erforderlich war. Tatsächlich war der Kontrollfehler in lateraler Richtung kleiner beim Fahren mit dem 3DoF-Sidestick. Die schon bei der Schrägfahrt beobachteten stärkeren Korrekturen in Longitudinalrichtung zeigen jedoch, dass das verteilte Steuerkonzept eine kontinuierliche, glattere Steuerung ermöglicht.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine laterale Steuerung mit dem Sidestick besser gelingt als mit der Spacemouse. Entsprechend wurde die Gebrauchstauglichkeit des Sidesticks für die Lateralsteuerung als besser bewertet. Bei der Steuerung von Gierbewegungen mit dem Sidestick traten jedoch deutliche biomechanische Probleme auf, wenn große Drehmomente zur Steuerung nötig wurden. Die Gebrauchstauglichkeit beider Bedienkonzepte wurde als ähnlich beurteilt.

Genereller Vorteil einer separierten Steuerung ist, dass Kreuzkopplungen wie bei voll integrierter Steuerung mit einem 3DoF Sidestick deutlich seltener auftreten. Sowohl bei der Lateral- als auch der Giersteuerung war die Führung insgesamt kontinuierlicher mit dem verteilten Bedienkonzept. Nachteil der verteilten Funktionsaufschaltung ist jedoch die größere Systemkomplexität und die eingeschränkte Praxistauglichkeit durch die Fixierung beider Hände zur Steuerung des Fahrzeugs. Zudem kann kein redundantes System mit zwei identischen Stellteilen (Eckstein, 2001) konfiguriert werden, obgleich dies im Sinne der Haltungsvervariabilität, Steuerungsasymmetrien, etc. erstrebenswert erscheint.

Das bestehende prototypische Steuerkonzept mit einem 3DoF Sidestick könnte noch weiter optimiert werden, indem die nötigen Stellteilauslenkungen und Eingabekräfte angepasst werden. So wird in der Literatur z.B. empfohlen, biomechanische Asymmetrien durch steifere Kraftgradienten oder höhere Maximalkräfte für Links- als für Rechtsbewegungen zu kompensieren (Mayer & Cox, 2003; Black & Moorehouse, 1979).

Kreuzkopplungen könnten weiterhin durch manöverabhängige Funktionsaufschaltungen vermieden werden (Bünthe, 2011). So wäre es bspw. denkbar, den rotatorischen Freiheitsgrad nur bei geringeren Geschwindigkeiten freizuschalten, um genaueres Rangieren zu ermöglichen. Bei höheren Geschwindigkeiten könnte dieser Freiheitsgrad blockiert werden und die Steuerung mittels der beiden translatorischen Freiheitsgrade erfolgen.

## Literatur

- Aiken, E.W. (1985). A Review of the Effect of Side-Stick Controllers on Rotorcraft Handling Qualities, *International Conference on Rotorcraft Basic Research, February 19-21*, pp27-34.
- Black, G.T. & Moorhouse, D.J. (1979). *Flying Qualities Design Requirements for Sidestick Controllers*. Technical Report
- Brooke, J. (1996). SUS: A "quick and dirty" usability scale". In P.W. Jordan, B. Thomas, B.A. Weerdmeester & A.L. McClelland. *Usability Evaluation in Industry*. London: Taylor and Francis.
- Bubb, H. (2000). Operator support in technical systems. *Human Error and System Design and Management, Lecture Notes in Control and Information Sciences, 253*, pp. 153-162.
- Bullinger, H.-J. & Solf, J.J (1979). *Ergonomische Arbeitsmittelgestaltung*, Nr. 196. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW, Verlag für Neue Werbung.
- Bünthe, T. (2011). Human Machine Interface Concept for Interactive Motion Control of a Highly Maneuverable Robotic Vehicle, *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, IV11*.
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. New York: LEA.
- Eckstein, L. (2001). *Entwicklung und Überprüfung eines Bedienkonzepts und von Algorithmen zum Fahren eines Kraftfahrzeuges mit aktiven Sidesticks*, Fortschritt-Berichte VDI-Reihe 12, 471. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Fleishman, J. (1972). Structure and measurement of psychomotor abilities. In R.N. Singer (ed.), *The Psychomotor Domain*, pp. 78-196. Philadelphia: Lea & Febiger.

- Hart, S. & Staveland, L. (1988). Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P.A. Hancock & N. Meshkati (eds.), *Human Mental Workload*. Amsterdam: North-Holland Press.
- Huang, Pei-shih (2003): *Regelkonzepte zur Fahrzeugführung unter Einbeziehung der Bedienelementeigenschaften*. Dissertation, TU München.
- Mayer, A. (1987). *Untersuchung über den Einfluss eines aktiven Bedienelements auf die menschliche Regelungsleistung*. VDI-Fortschrittberichte, Reihe 17, Biotechnik, (1987), Nr. 37. Düsseldorf: VDI-Verlags GmbH.
- Mayer, J., & Cox, T. (2003). *Evaluation of two unique side stick controllers in a fixed-base flight simulator*, Technical Report.
- Moir, I. & Seabridge, A.G. (2003). *Civil Avionics Systems*. London: Professional Engineering Publishing Ltd.
- Schaub, A., Brembeck, J., Burschka, D. & Hirzinger, G. (2011). Robotisches Elektromobil mit kamerabasiertem Autonomieansatz. *ATZechnik*, 02/2011, 10-16. Springer Automotive Medien.
- Weber, B. Panzirsch, M., Preusche, C. & Deml, B. (2011). Der aktive Sidestick als Bedienelement im Elektromobil. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.), *Mensch, Technik, Organisation - Vernetzung im Produktentstehungs- und -herstellungsprozess. Jahresdokumentation*. Dortmund: GfA-Press.
- Wyllie, C.E. (1988). Aircraft Side Hand Controllers – Where to From Here?, *Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference, May 23-27*, pp. 454-460.

### Autoren

Dr. Dipl.-Psych. B. Weber  
Prof. Dr. B. Deml

Universität Magdeburg  
Institut für Arbeitswissenschaft,  
Fabrikautomatisierung und Fabrikbetrieb  
(IAF)

Dipl.-Ing. M. Panzirsch,  
Dipl.-Ing. S. Montoya-Zamarron  
Dipl.-Ing. C. Preusche

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt  
(DLR)  
Institut für Robotik und Mechatronik  
Wessling - Oberpfaffenhofen

Kontakt:

bernhard.weber@dlr.de