

# Design considerations for cooperative trajectory planning in human-machine systems

## Entwurfsbetrachtungen für die kooperative Trajektorienplanung in Mensch-Maschine-Systemen

Julian Schneider\* and Sören Hohmann\*

\* Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute of Control Systems (IRS),  
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe, e-mail: julian.schneider@kit.edu

**Abstract** — This paper describes a possible design for emancipated cooperative trajectory planning between a human and an automation system. Shared control research, which deals with the design of interactive human-machine systems, generally assumes that a reference trajectory exists for a cooperative system. However, this assumption generally cannot be made. As a result, control conflicts arise between a human and an automation that can only be resolved at a higher level. Only very few works within shared control research deal with cooperative trajectory planning so far. In these existing works, a leader-follower approach is applied in which either the human's trajectory desire is considered or the automation chooses a trajectory. In contrast, this paper will present an approach that implements emancipated trajectory planning between a human and an automation. For this purpose, the necessary design steps as well as possible methods and models are discussed here.

**Zusammenfassung** — In diesem Beitrag wird ein möglicher Entwurf für die emanzipierte, kooperative Trajektorienplanung zwischen einem Menschen und einer Automation beschrieben. Die Shared Control Forschung, die sich mit dem Entwurf von interaktiven Mensch-Maschine-Systemen beschäftigt, geht im Allgemeinen davon aus, dass für ein kooperatives System eine Solltrajektorie vorliegt. Diese Annahme kann im Allgemeinen jedoch nicht getroffen werden. Als Folge treten Stellgrößenkonflikte zwischen dem Menschen und der Automation auf, die nur auf einer höhergelagerten Ebene gelöst werden können. Nur sehr wenige Arbeiten innerhalb der Shared Control Forschung setzen sich bislang mit kooperativer Trajektorienplanung auseinander. In den bestehenden Arbeiten wird ein Leader-Follower-Konzept angewendet, in dem entweder der Trajektorienwunsch des Menschen berücksichtigt wird oder die Automation eine Trajektorie wählt. Im Gegensatz dazu soll in diesem Paper ein Vorgehen vorgestellt werden, der eine emanzipierte Trajektorienplanung zwischen einem Menschen und einer Automation umsetzt. Dazu werden hier die notwendigen Vorgehensschritte sowie mögliche Methoden und Modelle diskutiert.

### I. EINLEITUNG

Interaktive Mensch-Maschine Systeme versprechen durch die synergetische Nutzung der Fähigkeiten des Menschen und einer Automation Performanzgewinne und eine Reduktion der Arbeitslast für den Menschen bis hin zu einem symbiotischen Mensch-Maschine-Zustand, bei dem das menschliche Erleben der Zusammenarbeit mit der Maschine verschmilzt [11].

Solche interaktiven Mensch-Maschine-Systeme wurden in der Vergangenheit viel im Kontext der Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen unter dem Stichwort Shared Control untersucht und entwickelt [9]. Im Kontext des automatisierten Fahrens können Fahrer und Automation auf die Fahrzeuglängs- und/oder -querführung einwirken. Losgelöst von der Fahrzeugsteuerung wirken in abstrahierter Weise ein Mensch und eine Automation über Stellgrößen auf ein gemeinsames System ein. Vom System bekommen die beiden Partner im Allgemeinen Feedback über Ausgangsgrößen (siehe die Pfeile in Abb. 1).

Eine notwendige Bedingung, für die in Abb. 1 gezeigte Shared Control Systemstruktur ist, dass Mensch und Automation die gleiche Referenz bzw. Solltrajektorie als Information benötigen (siehe Abb. 2). In den meisten Arbeiten wird davon ausgegangen, dass die Referenz beiden Akteuren zur Verfügung steht. Dabei resultiert die Solltrajektorie meist aus Information aus der Umwelt, wie beispielsweise der Fahrspurmitte

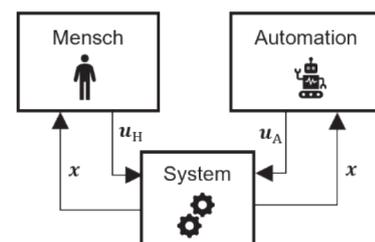


Abb. 1. Allgemeine Shared Control Systemstruktur.

beim automatisierten Fahren. Forschungen zum Fahrverhalten menschlicher Fahrer hingegen zeigen, dass nicht jeder Fahrer stets die Fahrspurmitte als Solltrajektorie wählt, sondern sich diese über die gesamte Fahrspur verteilen [2, 7]. Folglich wird in Experimenten auch von Stellkonflikten zwischen Fahrer und Automation berichtet: „subjects (...) fought the guiding forces (of the automation) indicating the automation trajectories did not optimally match the driver's trajectories.“ [3, S. 24]. Darüber hinaus gibt es Mensch-Maschine-Systeme, die in einer unstrukturierten Umwelt agieren, in denen beispielsweise Fahrspuren nicht existieren. Dort muss eine gemeinsame Trajektorie erst gefunden werden, wie z. B. in [13]. Es benötigt daher über der Ausführungsebene (Aktionsebene) noch eine

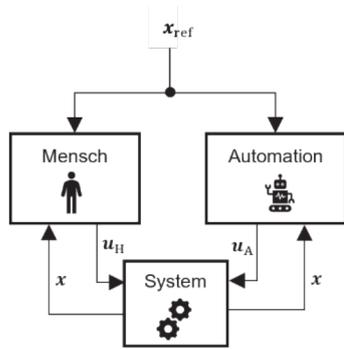


Abb. 2. Allgemeine Shared Control Systemstruktur mit gemeinsamer Referenztrajektorie

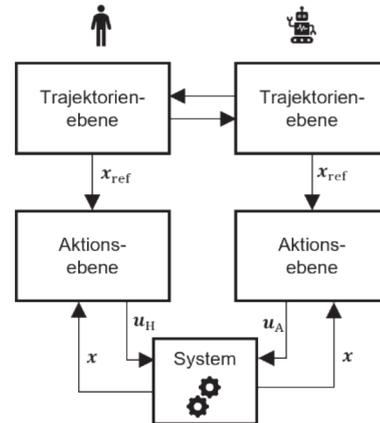


Abb. 3. Shared Control Regelstruktur ergänzt um eine darüber liegende Trajektorienebene

zusätzliche Ebene, in der eine gemeinsame Trajektorie ermittelt wird (siehe Abb. 3).

Für die Einigung auf eine gemeinsame Trajektorie in einem kooperativen oder kollaborativen Anordnung gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Herangehensweisen. In der Robotik werden oft anwendungsspezifische Lösungen umgesetzt, die nicht generalisierbar sind. Zum anderen wird meist – aus der Anwendung motiviert – versucht, mithilfe von Methoden der Intentionserkennung die Referenz des Menschen zu erkennen und diese einzuregeln. Die Human-Machine-Systems-Community sucht generalisierbare Beschreibungsformen für Mensch-Maschine-Systeme in Form von Ebenenmodellen. Hier ist die Trajektorienebene zur Einigung auf eine gemeinsame Trajektorie explizit berücksichtigt. Die Ebenenmodelle sind jedoch von generativer Natur und beinhalten zunächst keine Vorgehensweise zur Einigung auf eine gemeinsame Trajektorie. In der Arbeit von [3] wird im Kontext des automatisierten Fahrens bei der Trajektorienwahl für ein Ausweichmanöver dafür plädiert, den Menschen über die Trajektorienwahl entscheiden zu lassen. Weitere daran anschließende Forschungen untersuchen daher hauptsächlich die Ermittlung der Referenz des Menschen [3, 4, 5, 6] und die den Menschen unterstützende Einregelung der menschlichen Referenz durch die Automation. Nicht immer kann jedoch garantiert werden, dass der Mensch eine sichere Trajektorie wählt. [10] stellen daher – ebenfalls im Kontext des automatisierten Fahrens – einen Ansatz vor, bei dem die Automation eine eigene Referenz plant und korrigierende Stellgrößen auf das Fahrzeug gibt, wenn detektiert wird, dass das Fahrzeug den im Ansatz definierten *safe space* verlässt. [7] stellen – ebenfalls im Kontext des automatisierten Fahrens – einen Ansatz vor, bei dem Stellgrößenkonflikte durch eine kooperative Trajektorienplanung gelöst werden sollen. Hier wird die gewünschte Querposition auf der Fahrspur  $y_{des}$  des Menschen geschätzt und mit in die Trajektorienplanung der Automation aufgenommen. Dabei wird zusätzlich das Aufmerksamkeitslevel  $\sigma$  des Fahrers als Fahrer-Zustandsparameter bestimmt. In Abhängigkeit des Aufmerksamkeitslevels  $\sigma$  wird der Querpositionswunsch  $y_{des}$  des Menschen mehr oder weniger berücksichtigt. Im Gegensatz zu [5] haben [7] und [10] gemeinsam, dass die Automation eine eigene Referenz plant und einen Kompromiss mit der Referenz des Menschen bildet. Dabei haben [7] und [10] gemeinsam, dass die Automation anhand von Sicherheitsbetrachtungen entscheidet, welcher Akteur wie viel Einfluss auf die Trajektorienwahl besitzt. In der Arbeit von [7] geschieht dies über den Parameter, in [10] ist es *Occurence\_Auto*. In der Arbeit von [13] wird der Einfluss beider Akteure hingegen nicht von der Automation festgelegt, sondern von beiden Akteuren kontinuierlich verhandelt. Diese Vorgehensweise ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn

Anwendungen weniger zeit- und sicherheitskritisch sind, wie beispielsweise die Einigung auf eine gemeinsame Trajektorie beim Begleiten eines Patienten durch einen Roboter [13].

In diesem Paper soll eine strukturelle Idee vorgeschlagen werden, wie die kooperative Trajektorienfindung zwischen einem Menschen und einer Automation stattfinden kann, wobei im Gegensatz zu den Arbeiten von [3, 4, 5, 6] von vornherein weder vollständig dem Bewegungswunsch des Menschen gefolgt werden soll, noch die Automation darüber entscheiden soll, wieviel Einfluss jeder Akteur auf die Trajektorienwahl besitzt [7, 10]. Stattdessen sollen beide Akteure ihren Einfluss zur Laufzeit aushandeln. Abschnitt II stellt ein allgemeines Meta-Vorgehen für die kooperative Trajektorienfindung vor und ordnet die bestehenden Arbeiten aus der Literatur darin ein. Im darauffolgenden Abschnitt III werden Anforderungen für die hier vorgestellten strukturellen Überlegungen für eine emanzipierte kooperative Trajektorienfindung vorgestellt. Der letzte Abschnitt IV geht diesbezüglich auf mögliche Methoden und Modelle ein.

## II. VORGEHEN UND SYSTEMSTRUKTUR ZUR KOOPERATIVEN TRAJEKTORIENFINDUNG

Aus den in Abschnitt I vorgestellten Arbeiten lässt sich das folgende Meta-Vorgehen für den Entwurf einer kooperativen Trajektorienfindung herauslesen:

1. Auswahl eines Trajektorien-Planungsverfahrens: Der erste Vorgehensschritt besteht darin, ein Trajektorienplanungsverfahren aus der Literatur zu wählen, das die Anwendungs-Anforderungen erfüllt (z.B. Berechnungsaufwand, Echtzeitfähigkeit, (nicht) parametrisches Verfahren, etc.). Mögliche Trajektorien-Planungsverfahren sind wie in [7, Abschnitt 1.B] aufgeführt, beispielsweise potentialfeldbasierte Ansätze mit einer anschließenden Graphensuche (z.B.  $A^*$ ), optimierungs-basierte Ansätze oder interpolationsbasierte Ansätze (z.B. Polynominterpolation, Spline-Interpolation, Klothoiden, etc.). Jedes Trajektorien-Planungsverfahren besitzt dabei eine Menge an Parametern, die sich zum einen aus aktuellen Zustandsgrößen ergeben (z. B. Position, Geschwindigkeit), zum zweiten aus Einstellparametern (z. B. Prädiktionshorizont) und zum dritten aus Wunschparametern (z.B. Ausführungszeit, max. Längs- bzw. Querbeschleunigung), die auch über Gütemaßeinträge angegeben sein können (z. B. Bestrafung der Ausführungszeit für möglichst kurze Ausführungszeit, analoge Formulierung für Ruck, Querbeschle-

unigung etc.). Die benötigte, gesamte Parametermenge zur Durchführung der Trajektorienplanung wird im Folgenden mit  $\mathcal{T}$  beschrieben.

2. Teilsystem Trajektorienplanung Automation: In diesem Teilsystem berechnet die Automation anhand des in Schritt 1 ausgewählten Verfahrens eine Trajektorie für den eingestellten Zeithorizont. Hierfür werden die Parameterwerte für die Automation festgelegt, die die Anforderungen an die Automation erfüllen. Die Parametermenge der Automation ist  $\mathcal{T}_A^*$  und die von der Automation berechnete Trajektorie über einen gewissen Zeithorizont wird im Folgenden als  $\mathfrak{T}_A^*$  bezeichnet.  $\mathfrak{T}_A^*$  wird im Folgenden auch als der Bewegungswunsch der Automation bezeichnet.
3. Teilsystem Schätzung Trajektorienwunsch des Menschen: Alle vorgestellten Arbeiten, die den Bewegungswunsch des Menschen berücksichtigen, beinhalten ein anwendungsspezifisches Schätz- bzw. Identifikationsmodul zur Schätzung des Bewegungs-wunschs des Menschen. Das ausgewählte Trajektorien-planungsverfahren aus Schritt 1 bedingt in diesem Schritt die Parametermenge, die aus dem gemessenen menschlichen Verhalten geschätzt werden muss. Das Schätzmodul schätzt die Parameter entweder offline aus vorherigen, aufgezeichneten Daten [5] oder online [7]. Die Parametermenge mit den geschätzten Parametern des Menschen (Index H) wird im Folgenden als  $\hat{\mathcal{T}}_H$  bezeichnet. Das Dach bezeichnet im Folgenden immer einen geschätzten bzw. identifizierten Wert. Die geschätzte Trajektorie bzw. der Bewegungswunsch des Menschen wird als  $\hat{\mathfrak{T}}_H$  bezeichnet.
4. Verschaltung der Trajektorienwünsche des Menschen und der Automation: Alle vorgestellten Arbeiten berücksichtigen in einer bestimmten Weise den Bewegungswunsch des Menschen und der Automation. In diesem Modul wird festgelegt, wie die beiden Bewegungswünsche miteinander zu einer Trajektorie für das Gesamtsystem verschaltet bzw. kombiniert werden.
  - a. **Schätzung Fahrerzustandsparameter:** Ein Subsystem innerhalb der Verschaltung der beiden Trajektorienwünsche kann die Bestimmung eines oder mehrerer zusätzlicher Parameter sein, anhand dessen die Verschaltung vorgenommen wird. In [7] ist es die Bestimmung des Fahreraufmerksamkeitslevels  $\sigma \in [0,1]$  in [10] ist es der Parameter  $\text{Occurrence\_Auto} \in \{0,1\}$ , der von einer Fahrstil-Risikoeinschätzung abhängt.

In Tabelle 1 werden die oben definierten Meta-Schritte für die Arbeiten aus Abschnitt I beschrieben. Darin befinden sich die Meta-Vorgehens Schritte 1-4 in den Spalten 2-5.

Abb. 4 zeigt die unterschiedlichen Umsetzungen des vierten Meta-Vorgehens-Schritts (Verschaltung der Trajektorienwünsche) aus den vorgestellten Arbeiten aus Abschnitt I. In [5] (Abb. 4a) wird stets der geschätzte Bewegungswunsch des Menschen  $\hat{\mathcal{T}}_A^*$  durchgeschaltet. Da in dieser Arbeit kein separater Bewegungswunsch für die Automation  $\mathcal{T}_A^*$  ermittelt wird, existieren in dieser Arbeit die Subsysteme Trajektorien-generierung der Automation (Meta-Vorgehens-Schritt 2) und die Parameterschätzung des Menschen (z.B. Fahrerzustand, Meta-Vorgehens-Schritt 4a) nicht. Abb. 4b zeigt das Vorgehen in [7]. Die Verschaltung der beiden Trajektorienwünsche  $\hat{\mathcal{T}}_H$  und  $\mathcal{T}_A^*$  geschieht hier additiv anhand der Gewichtung des Fahrerzu-

standsparameters  $\sigma$ . In Abhängigkeit von  $\sigma$  wird hier entweder mehr dem Bewegungswunsch des Menschen  $\hat{\mathcal{T}}_A^*$  gefolgt oder dem der Automation  $\mathcal{T}_A^*$ . In [10] greift die Automation nur in den Fällen ein, in denen ein riskantes Fahrprofil detektiert wird ( $\text{Occurrence\_Auto} = 1$ ) (Abb. 4c). In diesem Fall betrachtet die Automation nur ihren eigenen kalkulierten Bewegungswunsch und überlagert die daraus folgende Stellgröße auf Aktionsebene der des Menschen. Der Bewegungswunsch des Menschen  $\hat{\mathcal{T}}_H$  wird im Falle des Eingreifens durch die Automation nicht explizit berücksichtigt. Gleichzeitig führt der Mensch während der gesamten Zeit seinen eigenen Bewegungswunsch  $\hat{\mathfrak{T}}_H$  aus. Die Vorgehen aus [5], [7] und [10] haben gemeinsam, dass die Verschaltung ihrer Bewegungswünsche durch die Automation festgelegt wird. Dabei wird entweder fest dem Trajektorienwunsch des Menschen gefolgt ([5]), ein Kompromiss zwischen beiden Trajektorienwünschen erzielt, wobei die Automation anhand der Fahrerzustandsschätzung diesen Kompromiss festlegt ([7]) oder es wird dem Trajektorienwunsch der Automation gefolgt ([10]), wobei die Automation festlegt, wann diese eingreift. Der Mensch hat in allen drei Fällen kein Mitspracherecht darüber, in welcher Weise die beiden Trajektorienwünsche verschaltet werden bzw. kann kein Feedback zur Verschaltungsweise geben. Eine solche Festlegung der Verschaltung durch einen Partner ist in sicherheits- und zeitkritischen Aufgaben vorteilhaft, da in diesen Fällen keine Zeit für eine Aushandlung der Verschaltung bleibt. Hier muss jedoch stets sichergestellt sein, dass die Festlegung der Verschaltung durch die Automation die Sicherheit korrekt und auf eine Weise einhält, die der Mensch akzeptiert bzw. als hilfreich empfindet. Eine solche Vorgehensweise entspricht einem Leader-Follower-Prinzip. Eine Aushandlung und damit eine dynamische Einigung auf einen gemeinsamen Bewegungswunsch findet dagegen in [13] statt (Abb. 4d). Die Besonderheit in diesem Ansatz liegt darin, dass eine Einigung über die gemeinsame Trajektorie zwischen dem Menschen und der Automation erzielt wird. Dies entspricht im Gegensatz zum Leader-Follower-Prinzip einem emanzipierten Ansatz. Ein Merkmal dieses Ansatzes ist, dass beiden Akteuren die Möglichkeit gegeben wird, auf den Bewegungswunsch des anderen Akteurs zu reagieren. Als Ergebnis liegt nach den erfolgten Reaktionen eine Einigung über einen gemeinsamen Bewegungswunsch vor.

Das Vorgehen in [13] stellt im Vergleich zur Literatur ein neues Vorgehen in der kooperativen Trajektorienfindung dar. Kern dieses Vorgehens bildet die emanzipierte Einigung auf eine gemeinsame Trajektorie. Für die Weiterentwicklung einer solchen emanzipierten Einigung auf eine gemeinsame Trajektorie sollen im folgenden Abschnitt allgemeine Anforderungen definiert werden und in Abschnitt IV werden mögliche Methoden zur Umsetzung einer kooperativen Trajektorienfindung vorgestellt, die einen Einigungsprozess umsetzen.

### III. ANFORDERUNGEN FÜR DEN ENTWURF EINER KOOPERATIVEN TRAJEKTORIENFINDUNG

Das Berücksichtigen derselben Referenztrajektorie führt zur Vermeidung von Stellgrößenkonflikten in Mensch-Maschine-Systemen [3]. Die Modellierung der kooperativen Trajektorienfindung als Einigungsprozess stellt dabei bereits im Entwurf sicher, dass beide Akteure dieselbe Trajektorie, nämlich die, auf die sich geeinigt wurde, als gemeinsame Referenztrajektorie wählen. Als erste Anforderung wird daher die Modellierung kooperativer Trajektorienfindung als Einigungsprozess vorgeschlagen.

Zweitens soll dieser Einigungsprozess gleichberechtigt statt-

Tabelle I. Zuordnung der Arbeiten aus Abschnitt I zu den Meta-Vorgehensschritten zum Entwurf einer kooperativen Trajektorienfindung.

Arbeit	1) Trajektorienplanungs-verfahren	2) Trajektorienplanung Automation	3) Schätzung Trajektorienwunsch Mensch	4) Verschaltung der Trajektorienwünsche
[5]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Es findet keine explizite Planung der Trajektorie statt.</li> <li>Stattdessen: Reproduktion des menschlichen Fahrverhaltens auf Aktionsebene, d.h. Nachbildung der Stellgröße des Menschen.</li> <li>Aufstellung eines Fahrerverhaltensmodells zwischen lateralem Fehler bezüglich Fahrspurmitte (Eingangsgröße) und Lenkmoment (Ausgangsgröße).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nicht vorhanden (siehe links)</li> <li>zusätzlich auch deshalb nicht vorhanden, weil vollständig der Trajektorienwunsch des Menschen umgesetzt wird (siehe Spalte Verschaltung).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Offline</li> <li>Aufzeichnung des lateralen Fehlers bezüglich der Fahrspurmitte und Lenkmoment des Fahrers in Testfahrten</li> <li>Schätzung der Modellparameter <math>K_{HSC}</math> und <math>t_{LH}</math> des Fahrerverhaltensmodells aus aufgezeichneten Daten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wahl der Trajektorie des Menschen als gemeinsame Trajektorie.</li> </ul>
[7]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Polynomielle Trajektorienplanung in Kombination mit optimierungsbasierter Auswahl über Kostenfunktionen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Siehe links</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Online</li> <li>Schätzung der gewünschten Sollposition <math>y_{des}</math> des Fahrers anhand Prädiktionshorizont <math>\tau_{pr}</math> aktuellen Zustandsgrößen sowie CTRV-Modell (constant turn rate and velocity model)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wahl der (geschätzten) Trajektorie des Menschen als gemeinsame Trajektorie im Falle eines aufmerksamen Fahrers (<math>\sigma = 1</math>).</li> <li>Additive Überlagerung der Trajektorie der Automation <math>\mathfrak{x}_A</math> im Falle <math>\sigma &lt; 1</math>.</li> </ul>
[10]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rapidly-Exploring-Random-Tree (RRT)</li> <li>Erweiterung des Standard-RRT zu HM-RRT</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Auswahl einer optimalen Trajektorie aus Punktfolge, die zuvor von HM-RRT generiert wurde.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine</li> <li>Automation berücksichtigt Bewegungswunsch des Menschen nicht, sondern überlagert menschliche Stellgröße im eingreifenden Fall.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Automation greift bei Detektion eines sicherheitskritischen Fahrstils korrigierend ein und überlagert auf Aktionsebene Stellgröße des Menschen.</li> </ul>
[13]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Optimierungsbasierte Auswahl von Bewegungsprimitiven (Base-Local-Planner)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Optimierungsbasierte Berechnung eines nächsten Bewegungsprimitivs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Online</li> <li>Schätzung des Bewegungsprimitivs des Menschen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Es findet eine Einigung statt, in diesem Fall: verhandlungsbasiert.</li> <li>Online-Findung eines Konsenses über die gemeinsame Trajektorie</li> </ul>

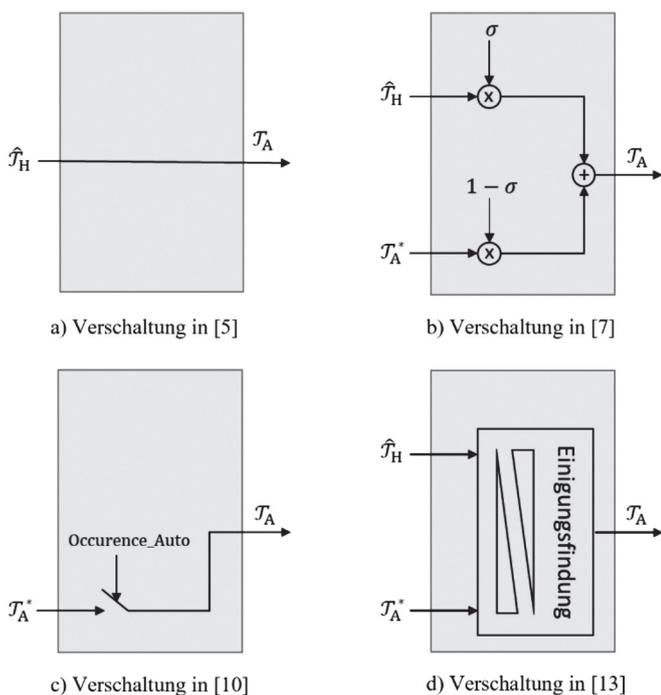


Abb. 4. Vergleich der Verschaltungsmöglichkeiten der Trajektorienwünsche des Menschen (H) und der Automation (A).

finden, d.h. Mensch und Maschine haben den gleichen Einfluss innerhalb dieses Einigungsprozesses. Keiner der Partner darf den anderen in irgendeiner Weise überstimmen.

Damit handelt es sich im Gegensatz zu Leader-Follower-Ansätzen aus der Literatur um einen emanzipierten Ansatz.

Drittens liegt keine sicherheits- und zeitkritische Anwendung vor, in der es passieren kann, dass innerhalb einer kurzen Zeitspanne eine Entscheidung getroffen werden muss, da nicht garantiert werden kann, dass innerhalb der geforderten Zeit eine Einigung gefunden wird.

Viertens soll das Vorgehen zur kooperativen Trajektorienfindung in Form eines Einigungsprozesses möglichst generalisierbar und anwendungsunabhängig sein.

Zusammenfassen lassen sich die vier Anforderungen an eine kooperative Trajektorienfindung über:

5. Modellierung als Einigungsprozess.
6. Emanzipierter Ansatz (vs. Leader-Follower): Beide Akteure haben gleichen Einfluss bzw. sind gleichberechtigt (Mensch darf am Ende nicht von Automation überstimmt werden).

7. Keine Sicherheits- und zeitkritische Anwendung.
8. Generalisierbarkeit, d.h. Unabhängigkeit von spezifischer Anwendung.

Die vier genannten Anforderungen besitzen die folgenden Implikationen (Folgen) für den Entwurf einer kooperativen Trajektorienfindung:

9. Als Folge der Modellierung als Einigungsprozess ist eine Kommunikation bzw. ein Dialog zwischen den beiden Akteuren erforderlich. Dies erfolgt über den Austausch der systemtheoretischen Größen Information und bzw. oder Energie in Form physikalischer Größen (z.B. Kräfte). Information könnte auch über gesprochenen Dialog stattfinden.
10. Als Folge des voran genannten Kommunikationsaspekts wird von der Struktur her ein Verstehens- bzw. Interpretationsmodul des Bewegungswunschs des Menschen benötigt (Meta-Vorgehensschritt 3) und ein Modul, das den Bewegungswunsch der Automation bildet (Meta-Vorgehensschritt 2).
11. Als eine weitere des Kommunikationsaspekts tritt während des Einigungsprozesses eine Reaktion auf die Reaktion des Partners auf den eigenen Bewegungswunsch statt. Dieser Reaktionskreislauf konvergiert bis zur Einigung auf die gemeinsame Referenztrajektorie.

Im nächsten Abschnitt werden mögliche Methoden zur Modellierung der kooperativen Trajektorienfindung unter Einhaltung der vier genannten Anforderung vorgestellt und diskutiert.

#### IV. MÖGLICHE METHODIKEN UND MODELLE ZUR KOOPERATIVEN EINIGUNG AUF EINE GEMEINSAME TRAJEKTORIE

Für die Wahl der Vorgehensweise zur kooperativen Trajektorienfindung unter Berücksichtigung eines Einigungs-Prozesses gibt es zwei mögliche Ausgangspunkte: Das Wissen darüber, wie sich der Mensch und Automation einigen werden, d.h. der Konsens auf eine gemeinsame Trajektorie, liegt entweder bereits vor oder der Konsens muss erst ermittelt werden. Der erste Fall (Konsens liegt vor) kann beispielsweise in Versuchen ermittelt und modellhaft beschrieben werden. Im zweiten Fall, ohne Vorwissen über den Konsens, muss der dieser erst ermittelt werden.

Der Fall, in dem Wissen über die Einigung bereits vorliegt, wird sich in der Modellierung der Mensch-Maschine-Interaktion als Differentialspiel unter Ausnutzung des Nash-Gleichgewichts zunutze gemacht. Mensch und Maschine werden hier als rationale Akteure in Form von Optimalreglern modelliert und das Verhalten des Menschen und der Maschine resultiert aus der Nash-Strategie. Dieses Vorgehen der Postulierung des Verhaltens im Konsensfall als Nash-Strategie findet häufig auf der Aktionsebene statt. Das modellhafte Wissen über das Verhalten des Menschen im Konsensfall wird dabei über Gütemaßeinträge eines Optimalregelungsansatzes beschrieben. Die Gütemaßeinträge werden aus Daten von Versuchsexperimenten über inverse Optimierung bestimmt.

Dass es sich hierbei um die Anwendung eines Konsenses eines Einigungsprozesses handelt, lässt sich zum einen aus dem Nash-Gleichgewicht motivieren. Zum anderen kann es am Berechnungsverfahren der *iterative best response* zur Bestimmung

der Stellgröße im Nash-Gleichgewicht veranschaulicht werden: Jeder Partner berechnet abwechselnd seine optimale Stellgröße bei festgehaltener Stellgröße des Partners. Dies geschieht iterativ, bis die Stellgrößen gegen die Nash-Strategie konvergieren.

Auf der Trajektorienebene kann dieses Vorgehen nicht angewendet werden, da modellhaftes Wissen über das Trajektorienplanungsverhalten des Menschen bekannt sein müsste. Insbesondere müssten die Gütemaßeinträge eines Trajektorienoptimierungsplaners bestimmt werden. Laut [1] handelt der Mensch hingegen nicht unterteilt in eine Trajektorienplanungs- und Trajektorienausführungsebene, sondern nimmt dies in einem Schritt vor. Modellhaftes Wissen über das Trajektorienplanungsverhalten eines Menschen im Konsensfall mit einer Maschine lässt sich somit also nicht bestimmen. Daher muss der Konsens über eine gemeinsame Trajektorie erst gefunden werden. In [12] werden zwei Methoden zur Einigung auf ein gemeinsames Fahrmanöver vorgestellt. Dabei handelt es sich um einen verhandlungstheoretischen Ansatz [12, Abschnitt 3.2, 8]) sowie um einen spieltheoretischen Ansatz [12, Abschnitt 3.3]. Beide Ansätze betrachten die Einigung auf ein diskretes Fahrmanöver. Im Fall der kooperativen Trajektorienfindung müssen die beiden Ansätze im Gegensatz zur Verhandlung über ein diskretes Ereignis auf die kontinuierliche Verhandlung über Trajektorien bzw. trajektorienbeschreibende Parameter erweitert werden.

#### V. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im vorliegenden Paper wurde eine Literaturrecherche zu kooperativen Trajektorienplanungsmethoden zwischen einem Menschen und einer Maschine innerhalb der Mensch-Maschine-Kooperation vorgestellt (Abschnitt 1). Die Ansätze wurden miteinander verglichen und daraus wurde eine Meta-Vorgehensweise zum Entwurf einer kooperativen Trajektorienfindung herausgearbeitet (Abschnitt 2). In Abschnitt 3 wurden Anforderungen für ein Vorgehen, das den Aspekt der Einigung auf eine gemeinsame Trajektorie beinhaltet, vorgestellt. In Abschnitt 4 wurden mögliche Methoden und Modelle für diese Vorgehensweise diskutiert.

Als nächste Schritte müssen zum einen die vorgestellten Methoden (Verhandlungstheorie und Spieltheorie) auf die kontinuierliche Verhandlung einer Trajektorie erweitert werden. Zum zweiten muss untersucht werden, wie der Kommunikationsfluss zwischen den beiden Akteuren Mensch und Automation zur Einigung auf eine gemeinsame Referenztrajektorie aussieht.

#### VI. LITERATUR

- [1] E. Todorov und M. I. Jordan, „Optimal feedback control as a theory of motor coordination“, *Nat Neurosci*, Bd. 5, Nr. 11, Art. Nr. 11, 2002.
- [2] B. Gunay, „Car following theory with lateral discomfort“, *Transportation Research Part B: Methodological*, Bd. 41, Nr. 7, S. 722–735, 2007.
- [3] D. A. Abbink, M. Mulder, und E. R. Boer, „Haptic shared control: smoothly shifting control authority?“, *Cogn Tech Work*, Bd. 14, Nr. 1, S. 19–28, 2012.
- [4] L. Profumo, L. Pollini, und D. A. Abbink, „Direct and Indirect Haptic Aiding for Curve Negotiation“, in *2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, S. 1846–1852, 2013.

- [5] R. Boink, M. M. van Paassen, M. Mulder, und D. A. Abbink, „Understanding and reducing conflicts between driver and haptic shared control“, in 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), S. 1510–1515, 2014.
- [6] A. W. de Jonge, J. G. W. Wildenbeest, H. Boessenkool, und D. A. Abbink, „The Effect of Trial-by-Trial Adaptation on Conflicts in Haptic Shared Control for Free-Air Teleoperation Tasks“, IEEE Transactions on Haptics, Bd. 9, Nr. 1, S. 111–120, 2016.
- [7] A. Benloucif, A.-T. Nguyen, C. Sentouh, und J.-C. Popieul, „Cooperative Trajectory Planning for Haptic Shared Control Between Driver and Automation in Highway Driving“, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Bd. 66, Nr. 12, S. 9846–9857, 2019.
- [8] S. Rothfuß, R. Schmidt, M. Flad, und S. Hohmann, „A Concept for Human-Machine Negotiation in Advanced Driving Assistance Systems“, in 2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), S. 3116–3123, 2019.
- [9] M. Marcano, S. Díaz, J. Pérez, und E. Irigoyen, „A Review of Shared Control for Automated Vehicles: Theory and Applications“, IEEE Transactions on Human-Machine Systems, Bd. 50, Nr. 6, S. 475–491, 2020.
- [10] C. Huang, H. Huang, J. Zhang, P. Hang, Z. Hu, und C. Lv, „Human-Machine Cooperative Trajectory Planning and Tracking for Safe Automated Driving“, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Bd. 23, Nr. 8, S. 12050–12063, 2022.
- [11] J. Inga et al., „Human-Machine Symbiosis: A Multivariate Perspective for Physically Coupled Human-Machine Systems“, International Journal of Human-Computer Studies, Bd. 170, S. 102926, 2022.
- [12] S. Rothfuß, „Human-Machine Cooperative Decision Making“, PhD Thesis, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, 2022.
- [13] J. Schneider, S. Rothfuß, und S. Hohmann, „Negotiation-based cooperative planning of local trajectories“, Frontiers in Control Engineering, Bd. 3, 2022.