

Julian Ludwig

Automatisierte kooperative Transition einer Regelungsaufgabe zwischen Mensch und Maschine am Beispiel des hochautomatisierten Fahrens

Julian Ludwig

**Automatisierte kooperative Transition einer
Regelungsaufgabe zwischen Mensch und Maschine
am Beispiel des hochautomatisierten Fahrens**

Karlsruher Beiträge zur
Regelungs- und Steuerungstechnik
Karlsruher Institut für Technologie

Band 09

Automatisierte kooperative Transition einer Regelungsaufgabe zwischen Mensch und Maschine am Beispiel des hochautomatisierten Fahrens

von
Julian Ludwig

Karlsruher Institut für Technologie
Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme

Automatisierte kooperative Transition einer Regelungsaufgabe zwischen
Mensch und Maschine am Beispiel des hochautomatisierten Fahrens

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs
von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von Julian Ludwig, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 24. August 2020

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Sören Hohmann

Korreferent: Prof. Dr. phil. Klaus Bengler

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

KIT Scientific Publishing

Straße am Forum 2

D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.

Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2021 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 2511-6312

ISBN 978-3-7315-1069-7

DOI 10.5445/KSP/1000125864

Vorwort

Diese Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme (IRS) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Sören Hohmann, der mir als Institutsleiter und Hauptreferent dieser Arbeit diese Tätigkeit ermöglicht hat, sowie mit seiner guten Betreuung und seinem Interesse sehr zum Gelingen dieses Promotionsvorhabens beigetragen hat.

Ebenso danke ich Prof. Dr. phil. Klaus Bengler für die Übernahme des Korreferats und ihm und seinen Mitarbeitern am Lehrstuhl für Ergonomie (Lfe) der Technischen Universität München (TUM) für die freundliche Aufnahme und die Unterstützung bei der Durchführung der Experimente. Insbesondere die gute Zusammenarbeit im Rahmen des PAKoS-Projekts mit Luis und Burak möchte ich hier hervorheben.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei allen meinen Kolleginnen und Kollegen am IRS, die einerseits mit fachlichen Diskursen, kritischem Feedback und hilfreicher Mitarbeit zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, andererseits mit gemeinsamen Spaziergängen, Spieleabenden, Feiern und Urlaubsreisen auch über die Arbeit hinaus ein äußerst angenehmes Umfeld geschaffen haben. Die Diskussionen mit meinem langjährigen Bürokollegen Christoph, welche meinen Horizont definitiv erweitert haben, sollen hierbei gesondert Erwähnung finden.

Besonderer Dank gilt auch meinen Lektoren Jonas, Marlene, Mathias, Michael, Nadia und Simon, die mit ihren inhaltlichen Anmerkungen und sprachlichen Korrekturen die schriftliche Ausarbeitung nochmal deutlich verbessert haben. Weiterhin möchte ich mich bei allen Studentinnen und Studenten bedanken, die mich als studentische Hilfskräfte und Abschlussarbeiter während der Zeit am Institut unterstützt haben. Hervorzuheben sind hierbei Julian und Marlene, deren Engagement weit über die Erwartungen hinausging.

Dankbar bin ich weiterhin meinen Eltern Rosi und Willi, sowie meinen Schwerstern Simone und Stephanie und deren Familien. Sie haben mir diesen Weg ermöglicht, mich ermutigt ihn zu gehen und mir mein Leben lang wenn immer nötig helfend zur Seite gestanden.

Mein größter Dank gilt jedoch dem wunderbarsten Menschen in meinem Leben, ohne den ich diese Arbeit vielleicht nie begonnen, auf jeden Fall aber nicht in dieser Form abgeschlossen hätte. Vielen Dank Nadia für die Unterstützung während der gesamten Zeit!

Karlsruhe, im September 2020

*We all need to be mocked from time to time [...],
lest we take ourselves too seriously.*

Tyrion Lannister
in George R.R. Martin's
A Game of Thrones

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungen und Symbole	XI
1 Einleitung	1
2 Stand der Wissenschaft	5
2.1 Transition der Fahraufgabe im hochautomatisierten Fahren	5
2.2 Dynamische Rollen Anpassung mittels Haptic Shared Control	8
2.3 Haptic Shared Control basierte Übergaben der Fahrzeugführung	9
2.4 Modellierung und Adaption von Mensch-Maschine-Interaktion mittels Spieltheorie	11
2.5 Wissenschaftliche Lücke und Forschungsfrage	12
3 Modellierung von Übergaben unter Verwendung von Differentialspielen	15
3.1 Spieltheoretische Grundlagen	15
3.2 Differentialspiele	18
3.2.1 Lösung mit Hilfe des Hamilton-Ansatzes	20
3.2.2 Lösung mit Hilfe des Batch-Ansatzes	23
3.3 Anwendung von Differentialspielen zur Modellierung von Interaktion mit Übergaben	26
3.4 Simulation der Transitionen zwischen zwei Partnern an einem Beispielsystem ..	34
4 Adaption des Transitionsparameters an die Aktion des Menschen	39
4.1 Formulierung des Schätzproblems	39
4.2 Verfahren zur Schätzung des aktuellen Übergabezustands basierend auf der menschlichen Aktion	41
4.2.1 Berechnung des Schätzwerts basierend auf dem Hamilton-Ansatz	42
4.2.2 Berechnung des Schätzwerts basierend auf dem Batch-Ansatz	53

4.3	Simulation zur Adaption an einen Partner in einem Beispielsystem	57
5	Experimentelle Validierung	63
5.1	Vergleich von Übergabekonzepten	63
5.1.1	Versuchsbeschreibung	64
5.1.2	Ergebnisse	70
5.1.3	Interpretation und Zusammenfassung	80
5.2	Vergleich von direkter und kooperativer Übergabe der Fahrzeugquerführung . . .	83
5.2.1	Versuchsbeschreibung	84
5.2.2	Ergebnisse	98
5.2.3	Interpretation und Zusammenfassung	106
5.3	Vergleich von kooperativen Übergaben der Fahrzeugquerführung mit zeitba- siertem und adaptivem Transitionsverlauf	108
5.3.1	Versuchsbeschreibung	108
5.3.2	Ergebnisse	113
5.3.3	Interpretation und Zusammenfassung	125
5.4	Gesamtergebnis und Bewertung	127
6	Zusammenfassung	131
A	Weiterführende Daten zu den Ergebnissen der Experimente	XV
A.1	Daten zum Vergleich von Übergabekonzepten	XV
A.2	Daten zum Vergleich von direkter und kooperativer Übergabe der Fahrzeug- querführung	XVIII
A.3	Daten zum Vergleich von kooperativen Übergaben der Fahrzeugquerführung mit zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf	XXI
	Literaturverzeichnis	XXV

Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematischer Aufbau des Übergabeprozesses	3
3.1	Struktur der Mensch-Maschine Interaktion in einem Shared Control Szenario bei Auslegung der Automation mit Hilfe eines Differentialspiels	27
3.2	Prinzipiskizze des simulierten Feder-Masse-Dämpfer-Systems	34
3.3	Transitionsparameterverlauf von Spieler 1 und Spieler 2 für das Simulationsszenario	35
3.4	Simulation des Beispielszenarios unter Verwendung des Hamilton- und des Batch-Ansatzes	37
4.1	Erweiterung der Regelungsstruktur um eine Adaption zur Ermittlung des aktuellen Transitionsparameters des Menschen	40
4.2	Transitionsparameterverlauf von Spieler 1 und Spieler 2 im Differentialspiel zur Generierung der vorgegebenen Aktion für das Simulationsszenario	58
4.3	Simulation des Beispielszenarios unter Verwendung der Adaption basierend auf dem Hamilton- und dem Batch-Ansatz bei Erzeugung der Messgröße mit konstantem Transitionsparameter über dem Optimierungshorizont	59
4.4	Simulation des Beispielszenarios unter Verwendung der Adaption basierend auf dem Hamilton- und dem Batch-Ansatz bei Erzeugung der Messgröße mit zeitvariantem Transitionsparameter über dem Optimierungshorizont	61
5.1	Versuchsstand des Experiments zum Vergleich von Übergabekonzepten	65
5.2	Verlauf der zur Umsetzung der Übergabe genutzten Parameter κ , α_A und α_M für alle im Experiment untersuchten Transitionsmethoden	68
5.3	Solllenkradwinkel im Szenario „Halten“ und im Szenario „Anstieg“	69
5.4	Lenkradwinkelverläufe aller Probanden im Szenario „Halten“ aufgeteilt nach Übergabemethoden	72
5.5	Lenkmomentverläufe der Automation für alle Probanden im Szenario „Halten“ aufgeteilt nach Übergabemethode	74
5.6	Lenkradwinkelverläufe aller Probanden im Szenario „Anstieg“ aufgeteilt nach Übergabemethode	75
5.7	Lenkmomentverläufe der Automation für alle Probanden im Szenario „Anstieg“ aufgeteilt nach Übergabemethode	76

5.8	Statistischer Vergleich des Lenkwinkelfehlers zwischen allen Übergabekonzepten für das Szenario „Halten“	78
5.9	Statistischer Vergleich des Lenkwinkelfehlers zwischen allen Übergabekonzepten für das Szenario „Anstieg“	79
5.10	Auswertung der Frage „Wie gut konnten Sie der vorgegebenen Linie während der Übergabe folgen?“ aufgeteilt nach Übergabemethode	80
5.11	Auswertung der Frage „Wie empfanden Sie das Lenkgefühl während des Übergabevorgangs?“ aufgeteilt nach Übergabemethode	81
5.12	Statischer Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie an der Technischen Universität München	85
5.13	Projektionssystem des Fahrsimulators	85
5.14	Icons zur Anzeige des Zustands der Automation und der Übergabeaufforderung	86
5.15	Screenshot der SuRT-App	87
5.16	Geometrische Zusammenhänge des linearen Einspurmodells	88
5.17	Schematische Darstellung der Abfolge der Streckenkomponenten	91
5.18	Umgebungssituation zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung	93
5.19	Variationen des Übernahmeszenarios	95
5.20	Kriterien zur Bewertung des Ausweichmanövers	98
5.21	Fahrzeugschwerpunkttrajektorien aller Probanden für die Versuchsdurchgänge mit der direkten Übergabe	100
5.22	Fahrzeugschwerpunkttrajektorien aller Probanden für die Versuchsdurchgänge mit der kooperativen Übergabe	100
5.23	Statistischer Vergleich der minimalen Zeitlücke zur Kollision K_τ zwischen direkter und kooperativer Transition	101
5.24	Statistischer Vergleich des minimalen lateralen Abstands zu anderen Objekten K_d zwischen direkter und kooperativer Transition	101
5.25	Statistischer Vergleich des Platzbedarfs auf der Ausweichspur K_Δ zwischen direkter und kooperativer Transition	102
5.26	Statistischer Vergleich der maximalen Querbeschleunigung K_a zwischen direkter und kooperativer Transition	102
5.27	Verlauf des Transitionsparameters für alle Probanden bei der kooperativen Transition	104
5.28	Übergabesituationen von ausgewählten Probanden für die direkte und die kooperative Transition	105
5.29	Überarbeitetes Konzept zur Anzeige des Zustands der Automation	109
5.30	Fahrzeugschwerpunkttrajektorien aller Probanden für die Versuchsdurchgänge mit zeitbasiertem Transitionsverlauf	114
5.31	Fahrzeugschwerpunkttrajektorien aller Probanden für die Versuchsdurchgänge mit adaptivem Transitionsverlauf	114

5.32	Statistischer Vergleich der minimalen Zeitlücke zur Kollision K_τ zwischen zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf	116
5.33	Statistischer Vergleich des minimalen lateralen Abstands K_d zu anderen Objekten zwischen zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf	116
5.34	Statistischer Vergleich des Platzbedarfs auf der Ausweichspur K_Δ zwischen zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf	117
5.35	Statistischer Vergleich der maximalen Querbeschleunigung K_a zwischen zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf	117
5.36	Statistischer Vergleich der mittleren absoluten Querabweichung zur Referenz K_y zwischen zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf	118
5.37	Verlauf des Transitionsparameters für alle Probanden bei Verwendung der zeitbasierten Transitionsmethode	119
5.38	Verlauf des Transitionsparameters für alle Probanden bei Verwendung der adaptiven Transitionsmethode	120
5.39	Übergabesituation von Versuchsperson 30 für den zeitbasierten und den adaptiven Transitionsverlauf	121
5.40	Übergabesituation von Versuchsperson 24 für den zeitabhängigen und den adaptiven Transitionsverlauf	123
5.41	Besonderheiten der Adaption in den Übergabesituationen von Versuchsperson 2 und Versuchsperson 19	124

Tabellenverzeichnis

3.1	Werte der System- und Gütemaßparameter für die Simulation	36
5.1	Gütemaß- und Modellparameter für das Experiment zum Vergleich der Übergabekonzepte	66
5.2	Gütemaß- und Modellparameter für das Experiment zum Vergleich von direkter und kooperativer Übergabe der Fahrzeugquerführung	90
5.3	Übersicht der Ergebnisse des statistischen Vergleichs von direkter und kooperativer Transition	103
5.4	Übersicht der Ergebnisse des statistischen Vergleichs von zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf	118
A.1	Mittlerer absoluter Referenzwinkelfehler K_δ beim Experiment zum Vergleich der Übergabekonzepte für alle Versuchspersonen	XVI
A.2	Subjektive Bewertung der Leistungen bei der Aufgabenerfüllung und des Gefühls am Lenkrad aller Versuchspersonen für alle fünf Übergabekonzepte	XVII
A.3	Detaillierte Ergebnisse der paarweisen t -Tests für alle Kombinationen der Übergabekonzepte in beiden Szenarien	XVIII
A.4	Kennzahlen aller Versuchspersonen aus dem Experiment zum Vergleich von direkter und kooperativer Übergabe der Fahrzeugquerführung für den Versuchsdurchgang mit direkter Transition	XIX
A.5	Kennzahlen aller Versuchspersonen aus dem Experiment zum Vergleich von direkter und kooperativer Übergabe der Fahrzeugquerführung für den Versuchsdurchgang mit kooperativer Transition	XX
A.6	Kennzahlen aller Versuchspersonen aus dem Experiment zum Vergleich von kooperativen Übergaben mit zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf für den Versuchsdurchgang mit zeitbasiertem Transitionsverlauf	XXII
A.7	Kennzahlen aller Versuchspersonen aus dem Experiment zum Vergleich von kooperativen Übergaben mit zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf für den Versuchsdurchgang mit adaptivem Transitionsverlauf	XXIII

Abkürzungen und Symbole

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
AF	Direktes Übergabekonzept „Frühestmöglich Abschalten“
AS	Direktes Übergabekonzept „Spätestmöglich Abschalten“
GD	Graduelles Übergabekonzept „Zeitvariantes Differentialspiel“
GO	Graduelles Übergabekonzept „Zeitvarianter Optimalregler“
GS	Graduelles Übergabekonzept „Skalieren des Reglerausgangs“
HMI	Human Machine Interface (Mensch-Maschine-Schnittstelle)
IRS	Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme
LfE	Lehrstuhl für Ergonomie
PAKoS	Forschungsprojekt „Personalisierte, adaptive, kooperative Systeme für automatisierte Fahrzeuge“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung
SuRT	Surrogate Reference Task

Lateinische Buchstaben

Symbol	Beschreibung
A	Systemmatrix
B	Eingangsmatrix
C	Kurzform für $T(P_1 + P_2) - \tilde{A}$
C	Schräglaufsteifigkeit
c	Federkonstante
D_i	Kurzform für $P_i T - \tilde{A}^T$
d	Dämpfungskonstante / Abstand
E	Fehlerfunktion
e	Fehlergrößenvektor

Symbol	Beschreibung
F	Kraft
G	Operator aus dem Riccati-Differentialgleichungssystem
H	zeitdiskrete Eingangsmatrix
H	Hamilton-Funktion
h	Verschiebungsrichtung zur Berechnung der ersten Fréchet-Ableitung
I	Trägheitsmoment
i	Lenkübersetzung
J	Kostenfunktion
J	Menge der Kostenfunktionen aller Spieler
K	Kenngröße
k	Verschiebungsrichtung zur Berechnung der zweiten Fréchet-Ableitung
K	Körper
l	Abstand zum Schwerpunkt
m	Masse
N	Anzahl der Spieler
P	Menge der Spieler eines Spiels
P	Lösung der Riccati-Differentialgleichung
p	Richtung des gradientenbasierten Optimierungsverfahrens
Q	Zustandsgewichtungsmatrix
q	Gewichtungsfaktor einer Zustandsgröße
R	Stellgrößengewichtungsmatrix
r	Gewichtungsfaktor einer Stellgröße
S	Endzustandsgewichtungsmatrix
s	Schrittweite des gradientenbasierten Optimierungsverfahrens
T	Kurzform für $\tilde{B}R^{-1}\tilde{B}^T$
T	Optimierungshorizont
t	Zeit
U	Strategieraum, Menge aller möglichen Strategiekombinationen
u	Stellgrößenvektor
u	Stellgröße/Strategie
v	Geschwindigkeit
x	Zustandsgrößenvektor
x	Position
y	Querposition

Griechische Buchstaben

Symbol	Beschreibung
α	Transitionsparameter
β	Schwimmwinkel
Γ	Spiel
δ	Lenkradwinkel
κ	Skalierungsfaktor der Stellgröße
λ	Lagrange-Multiplikatoren
μ	Mittelwert
σ	Standardabweichung
τ	Abtastzeit
Φ	zeitdiskrete Systemmatrix
ψ	Gierwinkel

Indizes, Exponenten und weitere Markierungen

Symbol	Beschreibung
\square_0	Wert zu Beginn des Optimierungszeitraums
\square_A	Variable/Parameter der Automation
\square_a	Kenngröße der adaptiven Übergabemethode
\square_a	bezogen auf die Querbeschleunigung
\square_d	Kenngröße der direkten Übergabemethode
\square_d	bezogen auf den Abstand zu Kollisionsobjekten
\square_E	Ende des Übergabeprozesses
\square_{ext}	Erweiterung
\square_F	Variable/Parameter des Fahrzeugs
\square_H	bezogen auf das Hindernis
\square_h	die Hinterachse betreffend
\square_{HO}	Hände am Lenkrad erkannt
\square_k	Kenngröße der kooperativen Übergabemethode
\square_k bzw. $\square_{\square,k}$	Wert zum diskreten Zeitpunkt k
\square_L	Variable/Parameter des Lenkstrangs
\square_M	Variable/Parameter des Menschen
$\square_{(P_1, P_2)}$	bezogen auf die partielle Ableitung nach dem Element (P_1, P_2)
\square_S	bezogen auf die Schutzplanke
\square_T	Wert am Ende des Optimierungszeitraums

Symbol	Beschreibung
\square_v	die Vorderachse betreffend
\square_y	bezogen auf den lateralen Abstand zur Solltrajektorie
\square_z	Kenngröße der zeitbasierten Übergabemethode
\square_α	bezogen auf die partielle Ableitung nach dem Element α
\square_Δ	bezogen auf den Platzbedarf auf der Zielspur
\square_δ	bezogen auf den Lenkradwinkel
\square_τ	bezogen auf die Time-to-Collision
$\square^{(n)}$	Wert in Iterationsschritt n
\square'	Ableitung
\square^*	optimaler Wert / Wert für Nash-Gleichgewicht
\square^T	Transponierter Wert
$\bar{\square}$	Referenzwert
$\tilde{\square}$	Wert nach Transformation des Differentialspiels in Darstellung ohne Referenz
$\vec{\square}$	Vektor/Matrix in der Darstellung mit allen Werten über dem Optimierungshorizont

1 Einleitung

Der Einsatz von Maschinen erleichtert das Leben der Menschen, indem sie diese bei Aufgaben unterstützen oder ihnen die Erledigung vollständig abnehmen. Der technische Fortschritt erlaubt die Automatisierung von immer komplexeren Aufgaben, sodass Mensch und Automation zukünftig häufiger Arbeitsbereiche teilen und Aufgaben kooperativ erledigen.

Die Kooperation zwischen Mensch und Maschine kann als ein Zustand, bestehend aus den Befugnissen, Fähigkeiten, Verantwortungsbereichen und Eingriffen der beiden Partner, beschrieben werden [FHH⁺12]. Als besonders anspruchsvoll gelten in diesem Zusammenhang die Zeiträume, in denen der Zustand wechselt, die sogenannten Transitionen. Für einen erfolgreichen Wechsel des Zustands müssen die Akteure ihr jeweiliges Modell über die Interaktion gleichermaßen anpassen. Geschieht dies nicht, sind zwei Fälle möglich. Im ersten Fall übernimmt ein Partner Teile der Tätigkeit, die im Modell des anderen Partners noch diesem zugeordnet sind. Dies wird in der zitierten Veröffentlichung als Überschuss an Kontrolle bezeichnet und führt potenziell zu verminderter Akzeptanz für das System. Problematischer ist demgegenüber der zweite Fall zu sehen. In diesem übernimmt ein Partner nicht die Bereiche, die ein anderer abgibt, und somit entsteht ein sogenanntes Defizit an Kontrolle über die Tätigkeit. Je nach Aufgabe können sich hierdurch kritische Situationen entwickeln.

Besonders anfällig für Fehler sind Transitionen nach Phasen, in denen die Automation die gemeinsame Aufgabe für längere Zeit alleine erledigt hat, da dies zum sogenannten Out-of-the-Loop Performance Problem führen kann [EK95a]. Durch die zeitweise Entkopplung und den potenziellen Fokus auf andere Tätigkeiten vermindert sich das zur Bewältigung der Aufgabe nötige Situationsbewusstsein des Menschen. Der Begriff Situationsbewusstsein wird dabei als die Wahrnehmung der Umgebung, das Erfassen ihrer Bedeutung und die Prognose des Umgebungszustands in naher Zukunft definiert [End88]. Beispiele aus der Luftfahrt zeigen die möglichen katastrophalen Folgen, wenn bei einer Transition der Flugzeugführung an den Piloten¹ die Ausgangslage aufgrund mangelnden Situationsbewusstseins falsch eingeschätzt und fehlerhaft gehandelt wird [ES97, YSH07].

Aktuelles Beispiel für die zunehmende Automatisierung ist das hochautomatisierte Fahren. Es wird bereits intensiv an Systemen, welche die Fahraufgabe vollständig übernehmen können, geforscht und deren Funktion in Versuchsfahrzeugen getestet (z.B. [Way18, WRW⁺19]).

¹ Alle Angaben zu Personen gelten in dieser Arbeit unabhängig vom Geschlecht. Aus Gründen der Lesbarkeit wird in der gesamten Arbeit die männliche Form verwendet.

Während bei aktuellen Fahrzeugen der Fahrer die Fahrsituation die gesamte Zeit überwachen, bewerten und falls erforderlich auf die Ereignisse sofort reagieren muss, darf er sich bei zukünftigen Systemen mit höheren Automatisierungsgraden nun auch fahrfremden Tätigkeiten widmen. Systeme, bei denen die Fahrer erstmalig komplett von der Fahraufgabe entbunden sind, werden als Level-3-Systeme bzw. *Conditional Driving Automation* bezeichnet [SAE16]. Der Nutzer muss bei Anwendung eines solchen Systems jedoch in der Lage sein, eine sogenannte Übernahmeaufforderung aufzunehmen und als Rückfallebene für die Automation die Fahraufgabe zeitnah übernehmen². Die Grenzen dieser Systeme und damit Auslöser für eine Übernahmeaufforderung können Fehlerdetektionen in Soft- und Hardware sein oder auch Straßen- und Wetterbedingungen, welche die Funktion des Systems einschränken [LCZ⁺18, KVV16]. Die Gestaltung dieser Transition der Fahraufgabe zurück an den Fahrer wird als eine der zentralen, ungelösten Herausforderungen auf dem Weg zum hochautomatisierten Fahren betrachtet [ARB⁺15].

Bei Systemen mit noch höherem Automatisierungsgrad (Level 4) übernimmt das System die Funktion der Rückfallebene selbst und kann in einem eingeschränkten Betriebsbereich, wie beispielsweise der Autobahn, alle Situationen selbst bewältigen. Dennoch kann es auch hier aus Komfort- oder Akzeptanzgründen sinnvoll sein, zunächst den Nutzer zur Übernahme aufzufordern, bevor Manöver zur Herstellung eines risikominimalen Zustands durchgeführt werden. Weiterhin muss auch für diese Systeme spätestens bei Verlassen des Betriebsbereichs der Automation eine Übergabe der Fahrzeugführung an den Fahrer erfolgen.

Eine Beschreibung des Ablaufs einer solchen Übergabe einer Aufgabe von einem Automatisierungssystem an den Menschen stellen Karakaya et al. am Beispiel des hochautomatisierten Fahrens vor [KKB18]. Der Ablauf ist schematisch in Abbildung 1.1 dargestellt. Ausgangspunkt des Übergabeprozesses ist die Aufforderung an den Menschen, die Kontrolle der Fahrzeugführung zu übernehmen, nachdem das bevorstehende Erreichen einer Systemgrenze erkannt wurde. Bis zu diesem Zeitpunkt war es ihm gestattet, sich mit fahrfremden Tätigkeiten zu befassen, da die Automation die Fahraufgabe bis dahin selbstständig und zuverlässig erledigen konnte. Das Ziel des Prozesses muss sein, die Fahraufgabe in der Art an den Menschen zu übertragen, dass dieser spätestens ab dem Erreichen der Systemgrenze in der Lage ist, das Fahrzeug sicher zu führen. Die Autoren unterteilen den Übergabeprozess zwischen diesen beiden Zeitpunkten hierzu in zwei Phasen³. In der *Präparationsphase* löst sich der Fahrer von seiner Nebentätigkeit und bereitet sich auf die Übernahme vor. Er begibt sich in eine geeignete Position, um Lenkrad und Pedale zu bedienen und beginnt damit, die aktuelle Fahrsituation wahrzunehmen. Da er noch nicht die Fahrzeugbewegung beeinflussen kann, muss die Automation in dieser Phase noch die sichere Kontrolle gewährleisten. Sobald die Hände des Fahrers am Lenkrad sind,

² Die exakte Formulierung der Anforderung lautet: „[The driver] is receptive to a request to intervene and responds by performing DDT [dynamic driving task] fallback in a timely manner“.

³ Die Autoren von [KKB18] verwenden in ihrer Arbeit die Begriffe Transitionsphase 1 und 2. Hier wird stattdessen die Terminologie Präparationsphase und Transitionsphase genutzt, welche eine bessere Unterscheidbarkeit bietet und den Fokus dieser Arbeit auf die haptische Transition der Aufgabe verdeutlicht.

beginnt die *Transitionsphase*. Jetzt ist der Fahrer physisch dazu in der Lage, das Fahrzeug zu steuern, jedoch fehlt ihm, wie bereits erläutert, mit hoher Wahrscheinlichkeit das nötige Situationsbewusstsein, um die Fahraufgabe korrekt und sicher durchzuführen. Stattdessen baut er die Fähigkeit erst auf, wobei der genaue Verlauf bis zu dem Punkt an dem der Fahrer die Aufgabe alleine sicher bewältigen kann offen bleibt. Wird die Automation bereits mit Erreichen der physischen Bereitschaft am Ende der Präparationsphase deaktiviert, entsteht ein Defizit an Kontrolle. Dieses Defizit muss vermieden werden, um eine sichere Transition zu gewährleisten.

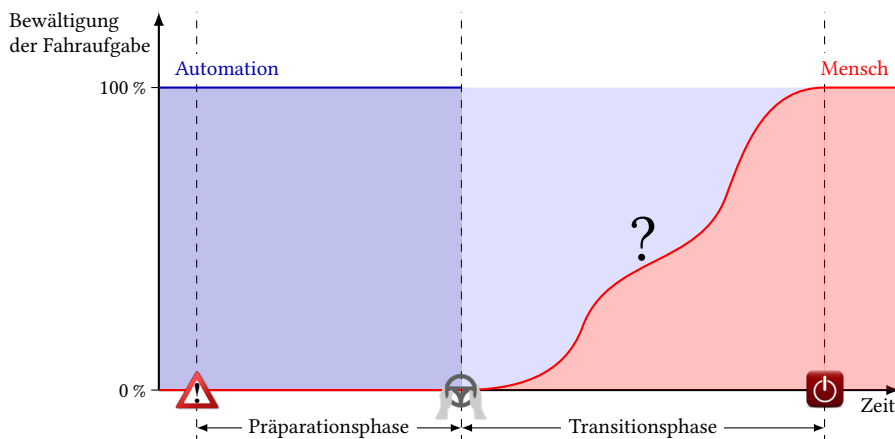


Abbildung 1.1: Schematischer Aufbau des Übergabeprozesses angelehnt an [KKB18]. Nach der Übernahme der Bedienelemente ist der Fahrer nicht sofort in der Lage, die Fahraufgabe sicher zu bewältigen, sondern baut diese Fähigkeit erst mit einem unbekanntem Verlauf auf. Wird die Automation in dieser Phase sofort deaktiviert (dunkelblauer Bereich), entsteht ein Defizit in der Bewältigung der Fahraufgabe (hellblauer Bereich).

Aus dieser Problematik ergibt sich die zentrale Fragestellung der vorliegenden Dissertationsschrift:

Wie muss eine Automation gestaltet werden, die den Menschen bei der Übernahme der Aufgabe in der Transitionsphase unterstützt?

Zur Beantwortung dieser Frage werden zunächst in Kapitel 2 die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Übergabe der Fahraufgabe von der Automation an den Menschen, sowie Methoden aus dem Stand der Wissenschaft zur Modellierung von Interaktion und der dynamischen Verteilung von Rollen dargestellt. Die sich daraus ergebende Forschungslücke führt am Ende des Kapitels zu den konkreten Forschungsfragen dieser Arbeit. In Kapitel 3 erfolgt die Vorstellung des spieltheoretischen Konzepts der Differentialspiele, deren Lösung, sowie der Erweiterung der Modellierung, um mit diesem Ansatz eine Interaktion zweier Partner mit dynamischen Rollen abbilden zu können. Ein neu entwickeltes Verfahren für die Adaption des

Übergabeverlaufs an die menschliche Aktion ist Gegenstand von Kapitel 4. Zur Validierung der neuen Methoden und für deren Vergleich mit konventionellen Ansätzen wurden drei Experimente durchgeführt. Hierfür wurden die entwickelten Ansätze im Kontext des eingangsmotivierten Anwendungsfalls von Übernahmeaufforderungen an Systemgrenzen einer hochautomatisierten Fahrfunktion umgesetzt. Der Ablauf und die Resultate dieser Experimente werden in Kapitel 5 präsentiert und deren Ergebnisse diskutiert. Die Arbeit schließt in Kapitel 6 mit einer Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse.

2 Stand der Wissenschaft

In diesem Kapitel werden bisherige wissenschaftliche Aussagen zu Transitionen von Aufgaben zwischen Mensch und Maschine zusammengefasst. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Transition der Fahraufgabe. In Abschnitt 2.1 werden zunächst die Transitionsarten klassifiziert und Experimente präsentiert, welche die Nachteile von direkten Übergaben ohne Unterstützung aufzeigen. Anschließend wird in Abschnitt 2.2 das Prinzip des Haptic Shared Control eingeführt und dessen praktische Anwendungen auf dynamische Anpassung der Rollen in der Mensch-Maschine-Interaktion dargestellt. Erste Umsetzungen derartiger Systeme für die Übergabe nach einer hochautomatisierten Fahrt und deren Mängel sind Gegenstand von Abschnitt 2.3. In Abschnitt 2.4 werden spieltheoretische Konzepte zur Modellierung und Adaption der Kooperation von Mensch und Maschine gezeigt, welche das Potenzial besitzen, die Beeinträchtigungen der zuvor genannten Verfahren zu beheben. Am Ende des Kapitels wird in Abschnitt 2.5 die bestehende Forschungslücke zusammenfassend formuliert und die Leitfrage aus der Einleitung in die konkreten Forschungsfragen zerlegt, welche in dieser Arbeit beantwortet werden sollen.

2.1 Transition der Fahraufgabe im hochautomatisierten Fahren

Transitionen im hochautomatisierten Fahren können nach dem Initiator der Transition und dem Partner, der nach der Übergabe die Kontrolle innehat, unterteilt werden [LW15]. Somit ergeben sich vier Kategorien aus der Kombination von Fahrer bzw. Automation als Auslöser mit jeweils Fahrer und Automation als Verantwortlicher nach Abschluss der Übergabe. Die Klassifizierung kann um eine Dimension erweitert werden, die beschreibt, ob die Übergabe zwingend notwendig oder optional ist [LHC⁺16]. Besondere wissenschaftliche Aufmerksamkeit erhält hierbei die notwendige, von der Automation herbeigeführte Transition an den Menschen, da die benötigte Zeitdauer bis zur vollständigen Wiederherstellung der Fahrfähigkeit unklar ist und aus dem potenziellen Defizit an Kontrolle das Risiko des Auftretens von kritischen Situationen besteht.

Aufgrund der hohen Relevanz existieren bereits viele wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur Übergabe der Fahrzeugführung an den Menschen aus einer hochautomatisierten Fahrt. Ei-

ne ausführliche Übersicht über 22 Studien zu diesem Thema gibt [VVK⁺16]. Der Schwerpunkt dieser Studien liegt jedoch größtenteils auf der Präparationsphase. Ermittelt werden demnach Zeiten, die für eine erfolgreiche Übernahme notwendig sind, sowie Einflussfaktoren auf diese Zeiten, wie die Komplexität der Situation [DFTB12, GDLB13], die Art der Nebentätigkeit des Fahrers [PHMM13, RGL⁺14] oder die Modalität und Gestaltung der Übernahmeaufforderung [NMN14a, PHM⁺15]. Die Mehrheit dieser Arbeiten definieren die Übergabezeit als die Zeit zwischen Übernahmeaufforderung und motorischer Handlungsbereitschaft [NMN14a] oder erster Reaktion an den Stellteilen [PHMM13, RGL⁺14], d.h. die Zeitdauer, die benötigt wird, bis der Fahrer die Kontrolle über Lenkrad und Pedale übernimmt (Ende der Präparationsphase) bzw. eine erste Lenk- oder Bremsaktion durchführt (erster Teil der Transitionsphase). Die automatisierte Fahrfunktion wird zeitgleich mit der Übernahmeaufforderung innerhalb von 1 s ausgerammt [PHMM13] oder direkt abgeschaltet, sobald eine erste Fahraktion des Fahrers erfolgt ist [GDLB13]. Teilweise werden keine näheren Angaben zum Deaktivierungsprozess gegeben [NMN14a, RGL⁺14]. Die nachfolgend aufgeführten Veröffentlichungen zeigen jedoch, dass die Fähigkeit des Fahrers, nach einer Übernahmeaufforderung das Fahrzeug sicher zu steuern, noch stark beeinträchtigt sein kann.

Beispielsweise zeigen Merat et al. [MJL⁺14], dass die Qualität der Spurhaltung, gemessen an der Standardabweichung der Spurposition, der Anzahl der Lenkumkehrungen und der Frequenz der Lenkkorrektureingriffe, noch bis zu 40 s nach der Übernahmeaufforderung verschlechtert sein kann. Brandenburg und Skottke [BS14] berichten analog dazu verringerte Sicherheitsabstände für die Längsführung in einem Zeitraum von 5-6 min nach der Übernahme aus einer hochautomatisierten Fahrt.

Die Autoren von [DFTB12] betrachten in ihrem Experiment zeitkritische Übergaben in komplexen Situationen. Sie zeigen, dass es in diesen Fällen vermehrt zu Fahrfehlern kommt. In ihrem Versuch verglichen sie die Fahrleistung in drei unterschiedlich anspruchsvollen Szenarien (Spurhalten, Spurwechsel, Spurauswahl) für eine manuelle Fahrt und drei Varianten eines Automatisierungssystems, welches die Systemgrenze 4 s, 6 s oder 8 s vor Erreichen erkennt und den Fahrer zu diesem Zeitpunkt zur Übernahme der Fahrzeugführung auffordert. Während der automatisierten Fahrt beschäftigten sich die Probanden mit einer Nebenaufgabe auf einem Display. Im einfachsten Szenario konnten alle Probanden die Situation beherrschen, jedoch zeigte sich bei den komplexeren Situationen ein signifikanter Anstieg der Fahrfehler bei Vorwarnzeiten von 4 s und 6 s im Vergleich zur manuellen Fahrt. Selbst bei einer Vorwarnzeit von 8 s führten einige Probanden den notwendigen Spurwechsel gar nicht, zu spät oder in die falsche Richtung aus.

Das Gefahrenpotenzial im Anschluss an eine Übernahmesituation zeigt sich auch in [GDLB13]. Die Autoren verglichen die Reaktionen von durchgehend manuell fahrenden Probanden mit denen von Probanden, die die Fahraufgabe erst kurz zuvor von der Automation übernommen hatten. Dafür betrachteten sie zwei Variationen eines Szenarios, in dem ein vorausfahrendes

Fahrzeug den Blick auf ein stehendes Hindernis 5 s bzw. 7 s vor einer potenziellen Kollision freigab. Zu diesem Zeitpunkt wurden die bis dahin automatisiert fahrenden und mit Hilfe einer Nebenaufgabe abgelenkten Probanden zur Übernahme der Fahrzeugführung aufgefordert. Zwar gelang es allen Versuchspersonen, das Hindernis zu umfahren, jedoch reagierten die zunächst automatisiert fahrenden Probanden später und mit einem signifikant dynamischeren Ausweichmanöver. Die mittleren Beschleunigungen des Fahrzeugs entsprachen dem zwei- bis dreifachen der Werte der Gruppe der Probanden, die durchgehend manuell gefahren waren. Zudem sicherten 18 der 26 zunächst automatisiert fahrenden Probanden ihren Spurwechsel nicht mit einem Schulterblick ab, wodurch ein hohes potenzielles Kollisionsrisiko mit benachbarten Verkehrsteilnehmern deutlich wurde.

Russell et al. [RHN⁺ 16] analysieren in ihrer Studie die Hypothese, dass ein Fahrer zum Zeitpunkt der Übernahme ein inkorrektes Modell von Fahrzeug und Situation besitzt und somit Zeit benötigt, um sich an die neue Ausgangslage anzupassen. Dazu führten sie einen Versuch durch, in dem sie Probanden mit einem Experimentierfahrzeug mehrmals einen Parcours abfahren ließen. In jeder Runde mussten die Versuchspersonen nach einer Übernahmeauforderung einen Spurwechsel nach rechts oder links durchführen. Nach vier Durchgängen wurden Parameter des Fahrzeugs variiert und der Anpassungsprozess während der folgenden Durchgänge beobachtet. Ihre Ergebnisse zeigen, dass bei Modifikation der Lenkübersetzung Lenkoszillationen auftraten und es über vier Durchgänge dauerte, bis sich die Versuchspersonen an die neue Parametrierung angepasst hatten und das Lenkverhalten dem Stand vor der Modifikation entsprach. Die Autoren schlagen vor, diesen Anpassungsprozess bei der Gestaltung der Transition von automatisiertem zu manuellem Fahren zu berücksichtigen. Das direkte Abschalten der Automation soll durch eine Phase der geteilten Fahrzeugführung ersetzt werden, um den Menschen an die neue Situation heranzuführen. Zu einer ähnlichen Schlussfolgerung kommen auch Kaustubh et al., die in [KWM16] ein hybrides Modell vorstellen, mit dem sich Übergaben der Fahrzeugführung zwischen Mensch und Automation simulieren lassen. Da auch hier der direkte Wechsel vom Zustand „automatisiertes Fahren“ in den Zustand „manuelles Fahren“ Oszillationen im Lenkwinkel verursacht, empfehlen sie ebenfalls einen graduellen Abschaltvorgang.

Die genannten Quellen zeigen dementsprechend, dass sich das Fahrverhalten nach der Übernahme noch von dem einer durchgängig manuellen Fahrt unterscheidet. Insbesondere in kritischen Übergabesituationen können diese Beeinträchtigungen in der Erfüllung der Fahraufgabe das Kollisionsrisiko erhöhen. Es wird empfohlen, in den Übergabeprozess eine Phase zu integrieren, in der der Fahrer und die Automation die Fahraufgabe gemeinsam durchführen und der Fahrer durch diese graduelle Übergabe langsam an die Fahraufgabe herangeführt wird. Im nachfolgenden Abschnitt werden deshalb Konzepte vorgestellt, die eine gemeinsame Ausführung einer Aufgabe von Mensch und Maschine, mit der Möglichkeit die Rollen im Betrieb zu verändern, erlauben.

2.2 Dynamische Rollen Anpassung mittels Haptic Shared Control

Einen erfolgversprechenden Ansatz, den Menschen beim Aufbau des Situationsbewusstseins zu unterstützen, bietet das Konzept des Haptic Shared Control. Abbink und Mulder [AM10] definieren Haptic Shared Control als Methoden der Mensch-Maschine-Interaktion, die es sowohl dem Menschen als auch der Automation erlauben, Kräfte auf ein Stellglied auszuüben, über welches das System gesteuert wird. Die Vorteile dieses Konzepts benennt [AMB12]: Die Nutzung desselben Stellgliedes ermöglicht den beiden Partnern Mensch und Maschine kontinuierlich miteinander zu interagieren und ihre Absichten über die applizierte Kraft direkt haptisch zu kommunizieren. So kann der menschliche Partner geführt werden, wodurch seine Leistung erhöht und seine Arbeitsbelastung vermindert wird. Trotzdem behält der menschliche Partner die Kontrolle über das System und kann die Automation jederzeit überstimmen. Umsetzungen dieses Konzepts zeigen gute Ergebnisse in vielfältigen Anwendungsbereichen, wie der Luftfahrt [GWS08], der Robotik [BAHH11] und der Fahrerassistenz [GG05, FKL⁺08]. Nachfolgend werden Haptic Shared Control Methoden vorgestellt, die es erlauben, die Rollen im Betrieb anzupassen und die Führung in Richtung des Menschen oder der Automation zu verschieben.

Oguz et al. [OKSB10] stellen eine Methode vor, die es erlaubt, zwischen einer gleichberechtigten Rollenverteilung und einer Verteilung, in welcher der Nutzer der dominante Akteur ist, hin- und herzuschalten. Die aktuelle Verteilung wird über die applizierte Kraft verhandelt. Liegt die Eingabe des Menschen über einer vordefinierten Schwelle, wird die Kontrolle zu ihm verschoben. Liegt sie darunter, wird angenommen, dass er Hilfe benötigt und folglich mehr unterstützt. In [KSB13a] wird die Methode noch um zusätzliche visuelle und vibrotaktile Reize erweitert, um dem Nutzer über den aktuellen Zustand zu informieren.

Passenberg et al. [PGPB11] führen Experimente mit verschiedenen Kooperationsgraden in unterschiedlichen Testszenarien durch, um anschließend anhand der Kriterien Aufgabenerfüllung und Arbeitsaufwand den statisch-optimalen Grad an Unterstützung für ein spezifisches Szenario zu berechnen. Als Erweiterung führen sie eine Online-Adaption durch, in der sie die aktuelle Kräfteverteilung zwischen Mensch und Maschine mit aufgezeichneten Verteilungen der Kräfte im entsprechenden Szenario vergleichen und die Unterstützung entsprechend wählen.

In der als Blended Shared Control bezeichneten Variante von Enes und Book [EB10] wird ein Verteilungsfaktor eingeführt, mit dem der Stellaufwand kontinuierlich zwischen Mensch und Automation verschoben werden kann. Sie nehmen an, dass der Mensch die Aufgabe übernehmen möchte, falls der Abstand zum Zielzustand und/oder die Differenz zwischen seiner Stellgröße und der der Automation hoch ist, sodass in diesem Fall die Kontrolle über die Aufgabe

zum menschlichen Partner verschoben wird. Maske et al. [MCP16] erweiterten diesen Ansatz und nutzen die Rate, mit der die menschliche Stellgröße von der der Automation abweicht, als Indikator für die Absicht, die Aufgabe übernehmen zu wollen. Unter der Annahme einer korrekten Reaktion des Menschen in einer unvorhergesehenen Situation ermöglicht dieser Ansatz eine schnelle Abgabe der Kontrolle an den Menschen.

Zusammengefasst zeigen die Quellen interessante Verfahren, mit denen sich der Designgrundsatz des Haptic Shared Control auf Anwendungen mit variablem Automatisierungsgrad übertragen lässt. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ansätze gehen jedoch trotzdem von einer durchgängigen Kooperation von Mensch und Maschine aus. Der menschliche Partner ist somit nie vollständig von der Aufgabe entkoppelt, wodurch davon ausgegangen werden kann, dass er stets situationsbewusst handelt und durchgängig in der Lage ist, die Aufgabe vollständig zu übernehmen. Dies erlaubt die Verschiebung der Kontrolle, ohne die Aktion des Menschen explizit zu bewerten, da davon ausgegangen werden kann, dass seine Handlung exakt so beabsichtigt ist. Für die in dieser Arbeit betrachteten Szenarien der Kontrollübergabe an einen potenziell unaufmerksamen Menschen lassen sich diese Ansätze somit nicht direkt verwenden, sondern können nur als Ausgangspunkt für weitere Arbeiten dienen.

2.3 Haptic Shared Control basierte Übergaben der Fahrzeugführung

Parallel zur Entstehung dieser Arbeit wurden zwei Ansätze entwickelt, die den Gedanken aufgreifen, die Transition der Fahraufgabe zwischen Fahrer und Automation durch eine Haptic Shared Control Phase zu realisieren. Die grundlegenden Ideen dieser beiden Ansätze und, soweit vorhanden, erste Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt.

Im Ansatz von Wada et al. [WSOS16] wird zunächst für Fahrer und Automation das als Pseudo-Arbeit bezeichnete Produkt von Lenkmoment und Lenkradwinkel gebildet. Aus dem Vergleich der ermittelten Größen mit vordefinierten Schwellwerten wird anschließend einer von vier möglichen kooperativen Zuständen bestimmt. Diese geben an, welcher der beiden Partner die Initiative über die Fahrzeugbedienung besitzt und ob die Intentionen der Partner konsistent sind. Befindet sich das System in einem Zustand, in dem der Mensch die Fahrzeugbewegung maßgeblich beeinflusst, die Automation jedoch in die entgegengesetzte Richtung steuert, wird eine Transition der Kontrolle zum Fahrer eingeleitet. Dafür wird der Verstärkungsfaktor der Differenz von Soll- und Ist-Lenkwinkel im Regler abhängig vom Lenkmoment des Menschen reduziert. Drei Parametrierungen der graduellen Abschaltung sowie eine sofortige Abschaltung wurden in einem Experiment miteinander verglichen. Die Teilnehmer mussten in einem kleinen, hochautomatisiert fahrenden Elektrofahrzeug einen Spurwechsel durchführen und so die Übergabe initiieren. Die Ergebnisse des nur sechs Probanden umfassenden Experiments

zeigen geringere Lenkradwinkelgeschwindigkeiten, wenn das Moment der Automation langsamer reduziert wird.

Der Ansatz wurde anschließend auch in einem statischen Fahr Simulator untersucht [SWS17, SWS18]. Als Versuchsszenario wurde eine Situation gewählt, welche einen spontanen Entschluss des Fahrers, die nächste Abfahrt zu nehmen, abbilden soll. Die Probanden wurden dafür nicht durch eine Nebentätigkeit abgelenkt und sollten auf einen Signalton hin das Manöver durchführen. 24 Versuchsteilnehmer absolvierten das Szenario jeweils mehrfach manuell, mit sofortigem Abschalten der Automation, mit graduellem Abschalten der Automation und mit graduellem Abschalten der Automation und zusätzlicher Anzeige des Kooperationslevels über ein Vibrationsarmband. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass das Verfahren in der Lage ist, die Lenk- und Fahrzeugstabilität gegenüber dem sofortigen Abschalten signifikant zu verbessern.

Zudem wurde der Ansatz auch für eine von der Automation initiierte Transition im Fahr Simulator getestet [WK17]. Die Probanden wurden diesmal während der automatisierten Fahrt durch Rechenaufgaben abgelenkt und angewiesen, nach der Übernahmeaufforderung die nächste Ausfahrt zu nehmen. Als Faktoren wurden zum einen der Startpunkt der Übergabe (direkt mit Übernahmeaufforderung oder erst nach Bestätigung durch den Fahrer mittels Tastendruck) und zum anderen die Übergabemethode (sofort oder graduell) untersucht. Die Analyse der Fahrten von vier Probanden zeigt deutlich geringere Standardabweichungen der Fahrzeugquerposition für die Variante, in der die Übergabe mit Tastendruck bestätigt wurde. Bezüglich des Faktors Startzeitpunkt der Übergabe erzielt die Shared Control Variante geringere Standardabweichungen als die sofortige Abschaltung. Dies zeigt laut Aussage der Autoren, dass es mit Hilfe von Shared Control möglich ist, einen stufenlosen Übergabeverlauf auch dann zu realisieren, wenn die Übergabe nicht durch den Fahrer bestätigt wird.

Eine erste Idee für einen alternativen Ansatz verfolgen Lv et al. [LWC⁺18]. Die Automationsfunktion ermittelt hier die optimale Stellgröße mittels eines modellbasierten Prädikativreglers und steuert die Differenz zwischen optimalem und vom Fahrer gestellten Moment vor. Zudem wird die gewünschte Beteiligung des Fahrers an der Fahraufgabe abhängig von dessen kognitiver Belastung und der Bereitschaft der Muskulatur berechnet. Abhängig von der Differenz der gewünschten zur tatsächlichen Beteiligung wird anschließend mit einem PI-Regler ein unterstützendes Moment der Automation berechnet und zusätzlich auf das Lenkrad appliziert. Die Funktionsweise des Ansatzes wird durch eine Rechnersimulation verifiziert. Bisher wurden jedoch keine Ergebnisse mit realen menschlichen Aktionen und entsprechenden online-fähigen Methoden zur Bestimmung der Soll-Beteiligung des Fahrers vorgestellt. Ohne ein entsprechendes Experiment, welches sowohl die praktische Umsetzbarkeit zeigt als auch Daten von der Interaktion des System mit dem Menschen liefert, lässt sich nicht beantworten, ob die Transition der Fahraufgabe von der Automation an den Menschen hierdurch verbessert werden kann.

Auch wenn die beiden Ansätze zeigen, dass eine Transitionsphase mit Hilfe von Haptic Shared Control von der Wissenschaft als geeignetes Mittel zur sicheren und komfortablen Gestaltung des Übergabeprozesses in Betracht gezogen wird, sind trotzdem noch mehrere Defizite der vorgestellten Methoden ersichtlich. Das Transitionsverfahren mittels der Pseudo-Arbeit [WSOS16, SWS17, SWS18, WK17] geht wie die Ansätze aus Abschnitt 2.2 von der Annahme aus, dass der menschliche Partner während der Übergabe korrekt handelt. Deshalb kann ihm bei Konflikten mit der Automationsfunktion die Kontrolle überlassen werden. Für vom Fahrer initiierte Übergaben in mehrfach trainierten Situationen stellt sich diese Annahme als gerechtfertigt dar und der Ansatz liefert gute Ergebnisse [WSOS16, SWS17, SWS18]. Für unvorhergesehene Aufforderungen an den Fahrer, das Fahrzeug zu übernehmen, wurde der Ansatz bisher nur unzureichend untersucht, jedoch erscheint die Berechtigung der Annahme hier zweifelhaft. Der Ansatz von Lv et al. aus [LWC⁺18] eignet sich für diese Szenarien theoretisch besser, da er die Bereitschaft des Fahrers in den Transitionsprozess mit einbindet. Allerdings wurden bisher keine Ergebnisse von der Nutzung des Systems durch Probanden veröffentlicht. Aus diesem Grund lässt sich die Qualität der aktuellen Bereitschaftszustandsbestimmung des Menschen und der darauf angepassten Transition nicht bewerten. Beiden Methoden gemein ist das Grundprinzip, zunächst den Zustand der Kooperation zu bestimmen und die Transition entsprechend anzupassen. Die Regler der Verfahren werden jedoch heuristisch ausgelegt, da den Ansätzen ein Modell fehlt, welches die Interaktion zwischen Mensch und Maschine explizit abbildet. Basierend auf einem solchen Modell könnte ein systematisches Reglerentwurfverfahren erstellt werden, welches die Besonderheiten der Interaktion berücksichtigt und so den idealen Transitionsverlauf erzeugt. Aus diesem Grund werden im nächsten Abschnitt bereits vorhandene Ansätze zur Modellierung der Mensch-Maschine-Interaktionen vorgestellt.

2.4 Modellierung und Adaption von Mensch-Maschine-Interaktion mittels Spieltheorie

Um die Interaktion zwischen Fahrer und Fahrzeug zu beschreiben, verwenden mehrere Autoren einen Ansatz, der auf Differentialspielen basiert [TAT11, NC13, FOSH14]. Sie modellieren die Kooperationspartner als Spieler, welche mit dem Fahrzeug und über die Stellglieder auch haptisch miteinander interagieren, dabei jedoch individuelle Ziele verfolgen. Unter Berücksichtigung des Fahrzeugmodells sowie der wechselseitigen Ziele einigen sich die Spieler auf ihre Stellgrößen. Die Ansätze werden jedoch bisher ausschließlich für eine dauerhafte Kooperation mit Hilfe von Haptic Shared Control angewendet. Mensch und Maschine besitzen hierbei statisch vordefinierte Rollen, nach denen sie durchgehend handeln. Für diesen Anwendungsfall zeigen diese Konzepte vielversprechende Ergebnisse. Eine Erweiterung der Modellierung für wechselnde Rollen der Spieler, also somit auch für die vollständige Übergabe der Fahraufgabe an den Menschen bei Erreichen der Systemgrenze, existiert jedoch noch nicht.

Sollen auch derartige Rollenwechsel abgebildet werden, ist eine Erweiterung der Modellierung erforderlich. Die nachfolgenden Quellen stellen erste Ansätze vor, die Differentialspiele auch zur Nachbildung der Adaption eines Partners an den anderen nutzen.

Shen und Cruz Jr. [SCJ08] verwenden dazu das iterative Prinzip des Fictitious Play, d.h. die Spieler agieren zunächst basierend auf einer Annahme und beobachten die entsprechende Reaktion des Partners. Auf Basis dieser Beobachtung wird anschließend das Modell modifiziert und eine neue Iteration unter der neuen Annahme durchgeführt. Die Funktionsweise wird durch Simulation mit einem fiktiven System demonstriert.

Li et al. [LTC⁺15] stellen die These auf, dass eine Kooperation genau dann koordiniert ist, wenn die Kooperationspartner die identische Vorstellung davon besitzen, wie das Ziel erreicht werden soll, d.h. auch darüber, wie die Aufgabe zwischen den Partnern verteilt wird. Deshalb adaptieren sie in ihrem Ansatz das Ziel der Automation im Differentialspiel in der Art, dass die aus dieser Aufgabenverteilung resultierende Stellgröße des Menschen genau dem tatsächlich aufgebracht Wert entspricht. Zwar ermöglicht das Verfahren die Verschiebung des jeweiligen Anteils der Partner an der Aufgabe, jedoch keine vollständige Übertragung an einen der beiden Beteiligten. Die Anwendung erfolgte in einem Experiment, in dem gemeinsam mit einem Roboter einer Trajektorie gefolgt werden soll. Die Analyse der Ergebnisse von zehn Probanden zeigt, dass es mit der Methode möglich ist, einen guten Kompromiss zwischen dem Stellaufwand des Menschen und dem Positionierungsfehler zu erzeugen, während bei festen Rollen stets die Reduzierung eines der beiden Kriterien bevorzugt wird.

Beide vorgestellten Verfahren bedienen sich Differentialspielen mit unbegrenzter Dauer. Dieser Spezialfall ermöglicht es, einen expliziten funktionalen Zusammenhang zwischen den Zielen und den Stellgrößen der Partner anzugeben, der jeweils die Grundlage für das anschließende Adaptionsverfahren bildet. Für die Anwendung im Straßenverkehr, in der die Verkehrssituation und daraus abgeleitet auch die Ziele der beiden Partner nur für einen sehr beschränkten Zeitraum vorhersehbar sind, kann dieser Spezialfall nicht genutzt werden. Aus diesem Grund sind die Verfahren nicht zur Abbildung von Adaptionsprozessen in diesem Anwendungsbereich geeignet und neue Ansätze müssen hierfür entwickelt werden.

2.5 Wissenschaftliche Lücke und Forschungsfrage

Die Ausführungen zu Beginn dieses Kapitels zeigen, dass die Übergabe der Fahraufgabe an Systemgrenzen zurück an den Menschen einen Risikofaktor des hochautomatisierten Fahrens darstellt. Mit Hilfe einer intelligenten Transitionsphase kann dieses Risiko gegebenenfalls reduziert werden. Die in Abschnitt 2.2 vorgestellten Veröffentlichungen zeigen, dass sich das Konzept des Haptic Shared Control in diversen Anwendungsbereichen gut dazu eignet, um

Menschen beim Aufbau des Situationsbewusstseins zu helfen und sie bei der Erfüllung der Aufgabe zu unterstützen.

Der Fokus bestehender Ansätze liegt hierbei jedoch auf Anwendungen, die kontinuierlich eine gemeinsame Ausführung einer Aufgabe von Mensch und Maschine beinhalten und somit nicht auf die Fälle übertragbar sind, in denen die Verantwortung über die Aufgabe vollständig von einem Partner an einen potenziell unaufmerksamen Partner übergeben wird. Zwar existieren erste Ansätze (s. Abschnitt 2.3), die Haptic Shared Control für Transitionen im hochautomatisierten Fahren nutzen, jedoch liegt diesen Methoden kein systematischer Reglerentwurf zugrunde, der die Kooperation explizit modelliert und für die Aktion der Automation berücksichtigt, um einen idealen Transitionsverlauf zu erzeugen. Zudem fehlen aussagekräftige Studien, welche die Leistung einer Haptic Shared Control basierten Übergabe in relevanten Fahrsituationen aufzeigen.

Die vorhandenen Ansätze zur expliziten Modellierung von Kooperation und dynamischer Adaption innerhalb eines solchen Frameworks aus Abschnitt 2.4 sind auf dauerhafte Kooperationen beschränkt oder aufgrund ihrer Limitierung auf einen mathematischen Spezialfall ebenfalls für die Unterstützung des Menschen während der Übernahme einer Aufgabe in unvorhergesehenen Situationen ungeeignet.

Fasst man den Stand der Wissenschaft zusammen, erkennt man, dass keine geeigneten Konzepte zur Gestaltung einer Automation existieren, welche den Menschen bei der unerwarteten Übernahme einer Aufgabe effizient unterstützen. Das Ziel dieser Arbeit ist es, diese Forschungslücke zu schließen.

Um unter diesen Gesichtspunkten die in Kapitel 1 formulierte Leitfrage nach Gestaltungsempfehlungen für die Unterstützung bei der Übernahme einer Aufgabe umfassend zu beantworten, müssen folglich zunächst allgemeine methodische Konzepte entwickelt und diese im Anschluss für die konkrete Anwendung validiert werden. Daraus ergeben sich die folgenden vier Forschungsfragen dieser Arbeit:

1. Wie lässt sich die dynamische Verteilung einer Aufgabe in der Interaktion zwischen Mensch und Maschine modellieren?
2. Wie lässt sich eine Automation realisieren, welche die Übernahmefähigkeit des Menschen anhand dessen Aktion erkennt und ihre eigene Leistung entsprechend anpasst?
3. Wie lassen sich die neuen Konzepte auf praktische Fragestellungen wie die Übergabe bei hochautomatisiertem Fahren anwenden?
4. Wie wirken sich diese Konzepte im realen Zusammenspiel mit dem Menschen aus und können sie den Transitionsprozess nachweisbar verbessern?

Mit der Beantwortung dieser Fragen befassen sich die nachfolgenden Kapitel. Die Vorstellung des Modellierungsansatzes (erste Frage) erfolgt in Kapitel 3. Darauf aufbauend wird in Kapitel 4 die zweite Frage geklärt und ein neuartiges Verfahren für die Adaption des Übergabeverlaufs an die aktuelle menschliche Reaktion gezeigt. Die letzten beiden Fragen werden in Kapitel 5 beantwortet, in dem die Anwendung und Bewertung der entwickelten Konzepte mit Hilfe von Fahrsimulatorexperimenten vorgestellt wird.

3 Modellierung von Übergaben unter Verwendung von Differentialspielen

Im nachfolgenden Kapitel wird die Modellierung vorgestellt, mit der in dieser Arbeit die Interaktion zwischen Mensch und Automation beschrieben wird. Zudem wird erläutert, wie über diese Modellierung Übergaben nachgebildet werden können. Die Beschreibung erfolgt über Differentialspiele, da diese, wie in Abschnitt 2.4 dargelegt, gute Ergebnisse für die Abbildung von Mensch-Maschine-Interaktion liefern. Differentialspiele stammen aus dem Gebiet der Spieltheorie, weshalb zunächst in Abschnitt 3.1 die notwendigen spieltheoretischen Grundlagen erläutert werden, bevor anschließend in Abschnitt 3.2 der Aufbau von Differentialspielen und deren Lösung behandelt werden. In Abschnitt 3.3 erfolgt der Übertrag der mathematischen Formulierung auf die Mensch-Maschine-Interaktion, sowie die Umsetzung von Übergaben innerhalb dieses Frameworks. Die Modellierungsmethode und deren Anwendung im Kontext des hochautomatisierten Fahrens wurden bereits in [LGFH17] und [LMH⁺18] veröffentlicht. Den Abschluss des Kapitels bildet ein Simulationsbeispiel in Abschnitt 3.4, anhand dessen die Möglichkeiten der erarbeiteten Beschreibungsform aufgezeigt werden.

3.1 Spieltheoretische Grundlagen

Die Spieltheorie ist eine mathematische Disziplin, welche die Analyse von strategischen Entscheidungssituationen (= Spielen) behandelt, in denen mehrere, rational agierende, Entscheidungsträger (= Spieler) das Ergebnis beeinflussen. Während sich die Disziplin anfangs mit der namensgebenden Untersuchung von Gesellschaftsspielen beschäftigte [Neu28], erweiterte sich das Anwendungsgebiet schnell auf andere Bereiche wie Ökonomie, Soziologie, Biologie und Informatik, in denen Fragestellungen mit mehreren Entscheidern eine große Rolle spielen. Nachfolgend werden die für diese Arbeit relevanten Aspekte der Spieltheorie vorgestellt. Eine ausführlichere Einführung ist beispielsweise in den Werken [BW16, Bau16, HI06, Meh07, Win15] zu finden.

Um für jeden Spieler i angeben zu können, welche Aktion (= Strategie) u_i ausgewählt werden sollte, um seine Kostenfunktion $J_i(u_1, \dots, u_i, \dots, u_N)$ zu minimieren⁴, muss das Spiel zunächst vollständig beschrieben werden:

Definition 3.1 (Spiel)

Ein Spiel $\Gamma = (\mathbb{P}, \mathbb{U}, \mathbb{J})$ wird nach [HI06, S.4] vollständig beschrieben durch

- die Menge der Spieler $\mathbb{P} = \{1, \dots, N\}$,
- den Strategieraum \mathbb{U} , der die Menge aller möglichen Strategiekombinationen $u = \{u_1, \dots, u_N\}$ der Spieler angibt,
- die Kostenfunktionen $\mathbb{J} = \{J_1, \dots, J_N\}$ aller Spieler und
- die Spielregeln.

Die Spielregeln definieren die Eigenschaften des Spiels wie beispielsweise die Handlungszeitpunkte (simultan/sequentiell) oder den Wissensstand (vollständige Information/unvollständige Information) der beteiligten Spieler und legen dadurch die möglichen Lösungskonzepte fest. Eine grundlegende Unterscheidung der Methoden erfolgt hierbei durch die Erlaubnis bzw. das Verbot für die Spieler, bindende Verträge untereinander einzugehen, d.h. dass die Spieler ihre Strategien verbindlich vereinbaren können. Erlaubt das Spiel diese Art der Absprachen, kann die Analyse über das Teilgebiet der kooperativen Spieltheorie erfolgen. Die zentralen Fragestellungen lauten dann, welche Strategiekombination vereinbart und wie deren Kosten unter den Spielern aufgeteilt werden sollten. Eine gute Einführung hierzu gibt [Win15, Kapitel 7]. Die in dieser Arbeit behandelte Interaktion zwischen Mensch und Automation gestattet diese Art von Absprachen jedoch nicht, wodurch sie in das zweite Teilgebiet, die nicht-kooperative Spieltheorie, fällt. Auch wenn es zunächst paradox erscheinen mag, Kooperation mit nicht-kooperativer Spieltheorie zu beschreiben, sei darauf hingewiesen, dass auch dieses Teilgebiet nicht ausschließt, dass die Partner ein gemeinsames Ziel verfolgen bzw. sich bei der Erreichung ihrer individuellen Ziele unterstützen. Da keine Möglichkeit besteht, bindende Verträge zu schließen, muss das Resultat jedoch selbsterhaltend sein, d.h. die Spieler müssen sich basierend auf ihren individuellen Kostenfunktionen auf eine Strategiekombination einigen. Um eine formelle Beschreibung eines solchen Resultats zu erhalten, wird zunächst die Definition der besten Antwort gegeben:

⁴ Üblicherweise nutzt die Spieltheorie Auszahlungsfunktionen, die maximiert werden sollen. In dieser Arbeit wird jedoch die in der Optimierungstheorie übliche Beschreibung von Kosten verwendet, die naturgemäß minimiert werden sollen. Die Beschreibungen können ohne Weiteres über den geltenden Zusammenhang $\max J = \min(-J)$ ineinander überführt werden.

Definition 3.2 (Beste Antwort)

Eine Strategie $u_i^* \in \mathbb{U}_i$ heißt beste Antwort auf eine gültige Strategiekonstellation der anderen Spieler $u_{-i} = \{u_1, \dots, u_{i-1}, u_{i+1}, \dots, u_N\}$, falls für jede andere Strategie u_i gilt:

$$J_i(u_1, \dots, u_i^*, \dots, u_N) \leq J_i(u_1, \dots, u_i, \dots, u_N), \text{ mit } u \in \mathbb{U} \quad (3.1)$$

Es handelt sich also für Spieler i um genau die Strategie bzw. Strategien, die für eine gegebene Strategie der Mitspieler die eigene Kostenfunktion minimieren. Eine einseitige Änderung der Strategie dieses Spielers kann somit keine weitere Reduktion seiner Kosten erzielen. Damit eine Strategiekombination selbsterhaltend ist, müssen die Spieler wechselseitig eine beste Antwort wählen, wodurch es für keinen Spieler möglich ist, durch eine abweichende Handlung eine Verbesserung zu erzielen. Daraus ergibt sich das zentrale Lösungskonzept der nicht-kooperativen Spieltheorie, welches das von John Nash 1951 aufgestellte und nach ihm benannte Nash-Gleichgewicht ist [Nas51]. Es wird nach [Eng05, S. 263] definiert zu:

Definition 3.3 (Nash-Gleichgewicht)

Eine zulässige Kombination von Strategien $u^* = \{u_1^*, \dots, u_N^*\}$ wird als Nash-Gleichgewicht bezeichnet, wenn für jede zulässige Strategiekombination gilt:

$$J_i(u_1^*, \dots, u_i^*, \dots, u_N^*) \leq J_i(u_1^*, \dots, u_i, \dots, u_N^*) \quad \forall i \in \mathbb{P} \quad (3.2)$$

Je nach Wahl der Elemente eines Spiels kann dieses kein, ein oder mehrere Gleichgewichte haben. Zudem kann ein Nash-Gleichgewicht auch ineffizient sein, d.h. beide Spieler könnten jeweils eine höhere Auszahlung erreichen, wenn sie sich stattdessen auf eine nicht selbsterhaltende Strategiekombination einigen könnten, wie das berühmte Beispiel des Gefangenendilemmas veranschaulicht [Kol98].

Aufgrund der erfolgreichen Verwendung von Differentialspielen zur Modellierung der Interaktion zwischen Mensch und Automation (vgl. Abschnitt 2.4) wird diese Beschreibungsform auch in der vorliegenden Arbeit eingesetzt. Im nachfolgenden Abschnitt werden deshalb zunächst die Struktur und Spielregeln des Differentialspiels erläutert, bevor anschließend Verfahren vorgestellt werden, um Nash-Gleichgewichte für diese Art von Spielen zu ermitteln.

3.2 Differentialspiele

Die Erweiterung der Spieltheorie um nicht-kooperative Differentialspiele erfolgte erstmals durch Isaacs in den Jahren 1954 und 1955 im Rahmen von Zwei-Spieler-Nullsummenspielen, bei denen die Kosten eines Spielers zeitgleich dem Gewinn des anderen entsprechen und umgekehrt [Isa54a, Isa54b, Isa54c, Isa55]. Die Verallgemeinerung auf Nicht-Nullsummenspiele erfolgte anschließend durch Starr und Ho [SH69b, SH69a]. Eine gute Einführung in die Thematik bieten [BO99, Bau16, Bre11, Eng05, Meh07], aus denen die wichtigsten Inhalte im Weiteren zusammengefasst wurden.

In einem Differentialspiel beeinflussen die Spieler über die Wahl ihrer Strategien $\mathbf{u}_i(t)$ ein System, dessen Dynamik über die Differentialgleichung

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}_1(t), \dots, \mathbf{u}_N(t)) \quad (3.3)$$

beschrieben werden kann. Die Strategien der Spieler sind nun vektorielle Funktionen über der Zeit t . Das bedeutet, die Spieler können einerseits kontinuierlich während des Spiels ihre Aktionen ändern, andererseits über die Elemente des Vektors $\mathbf{u}_i(t)$ auf verschiedene Weise auf das System einwirken. Analog zur Systemtheorie wird $\mathbf{x}(t)$ als Zustandsvektor und $\mathbf{u}_i(t)$ nachfolgend als Stellgrößenvektor des Spielers i bezeichnet. Die Kostenfunktionen der Spieler können von den Stellgrößen aller Spieler sowohl direkt als auch indirekt über die Beeinflussung der Zustände abhängen. Eine allgemeine Darstellung bietet das Bolza'sche Gütemaß, welches zum einen durch das Integral über der Funktion h den Trajektorienverlauf der Zustände und Stellgrößen während des Spiels ($t \in [t_0, T]$) berücksichtigt, zum anderen mittels der Funktion g auch den Endzustand in die Bewertung mit einfließen lässt [Föl94]:

$$J_i(\mathbf{u}_1(t), \dots, \mathbf{u}_i(t), \dots, \mathbf{u}_N(t)) = g(\mathbf{x}(T), T) + \int_{t_0}^T h(t, \mathbf{x}(t), \mathbf{u}_1(t), \dots, \mathbf{u}_N(t)) dt \quad (3.4)$$

Das Ziel der Spieler ist folglich, das System ausgehend von Systemzustand \mathbf{x}_0 zum Zeitpunkt $t = t_0$ während der Dauer des Spieles so zu beeinflussen, dass ihre individuellen Kosten minimal werden.

Eine populäre Klasse von Differentialspielen bilden die Linear-Quadratischen-Differentialspiele (LQ-Differentialspiele), da diese bei Erfüllung entsprechender Voraussetzungen die Berechnung von expliziten Lösungen für die optimalen Strategien der Spieler erlauben [Bau16]. In

dieser Klasse von Differentialspielen lässt sich die Dynamik des Systems über eine lineare Zustandsdifferentialgleichung der Form

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \sum_{i=1}^N \mathbf{B}_i(t)\mathbf{u}_i(t) \quad (3.5)$$

beschreiben und die Spieler optimieren ein Bolza'sches Gütemaß in quadratischer Form gemäß

$$J_i = \frac{1}{2} \mathbf{x}^\top(T) \mathbf{S}_i \mathbf{x}(T) + \frac{1}{2} \int_0^T \mathbf{x}^\top(t) \mathbf{Q}_i(t) \mathbf{x}(t) + \sum_{j=1}^N \mathbf{u}_j^\top(t) \mathbf{R}_{ij}(t) \mathbf{u}_j(t) dt. \quad (3.6)$$

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird die explizite Angabe der Abhängigkeit der Vektoren und Matrizen von der Zeit t im Folgenden vernachlässigt und deren Wert zum Zeitpunkt T durch den Index T dargestellt.

Da alle Spieler die Absicht haben, ihr eigenes Gütemaß zu minimieren, entsteht ein gekoppeltes Optimierungsproblem. Im Rahmen dieser Arbeit soll ein solches Differentialspiel zur Modellierung der Interaktion von Mensch und Automation genutzt werden, weshalb nachfolgend der Fall für zwei Spieler betrachtet wird. Um abbilden zu können, dass die Spieler das Ziel haben, den Systemzustand einer individuellen, potenziell zeitvarianten Referenztrajektorie $\bar{\mathbf{x}}_i$ folgen zu lassen, werden die Gütemaße zudem modifiziert. Statt einer direkten Bestrafung des Systemzustands wird dessen Abweichung zu dieser Referenztrajektorie bestraft. Damit ergibt sich folgende Beschreibung eines Zweispieler LQ-Differentialspiels mit Zustandsreferenzen:

Definition 3.4 (Zweispieler LQ-Differentialspiel mit Zustandsreferenzen)

Im Zweispieler LQ-Differentialspiel mit Zustandsreferenzen interagieren zwei Spieler mit dem Ziel, ihre quadratischen Gütefunktionen J_1 und J_2 der Form

$$J_1 = \frac{1}{2} (\mathbf{x}_T - \bar{\mathbf{x}}_{1,T})^\top \mathbf{S}_1 (\mathbf{x}_T - \bar{\mathbf{x}}_{1,T}) + \frac{1}{2} \int_0^T (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_1)^\top \mathbf{Q}_1 (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_1) + \sum_{i=1}^2 \mathbf{u}_i^\top \mathbf{R}_{1i} \mathbf{u}_i dt \quad (3.7a)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} (\mathbf{x}_T - \bar{\mathbf{x}}_{2,T})^\top \mathbf{S}_2 (\mathbf{x}_T - \bar{\mathbf{x}}_{2,T}) + \frac{1}{2} \int_0^T (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_2)^\top \mathbf{Q}_2 (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_2) + \sum_{i=1}^2 \mathbf{u}_i^\top \mathbf{R}_{2i} \mathbf{u}_i dt \quad (3.7b)$$

zu minimieren. Der Zustandsvektor wird ausgehend vom Startzustand \mathbf{x}_0 über ein lineares Zustandsraummodell von den Spielern beeinflusst:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}_1\mathbf{u}_1 + \mathbf{B}_2\mathbf{u}_2 \quad (3.7c)$$

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0. \quad (3.7d)$$

Die Gleichungen (3.7c) und (3.7d) bilden die Nebenbedingungen für die Optimierung

$$\mathbf{u}_1^* = \arg \min_{\mathbf{u}_1} J_1 \quad (3.7e)$$

$$\mathbf{u}_2^* = \arg \min_{\mathbf{u}_2} J_2. \quad (3.7f)$$

In den beiden folgenden Abschnitten werden Methoden vorgestellt, mit denen sich Strategiekombinationen $(\mathbf{u}_1^*, \mathbf{u}_2^*)$ berechnen lassen, die ein Nash-Gleichgewicht des Optimierungsproblems aus Definition 3.4 bilden. Zudem werden Aussagen über die Existenz und Eindeutigkeit der Lösung für die entsprechenden Verfahren getätigt. Für die Lösungsmethoden wird eine offene Informationsstruktur angenommen, d.h. die Lösung erfolgt als Steuerung basierend auf dem Startzustand und den Modellannahmen über die Spieler und das System. Die Verfahren lassen sich analog auch für Problemstellungen mit mehr als zwei Spielern anwenden.

3.2.1 Lösung mit Hilfe des Hamilton-Ansatzes

Eine Möglichkeit, die optimalen Stellgrößen der beiden Spieler zu berechnen, liefern die Methoden der dynamischen Optimierung. Dazu muss die Darstellung mit Zustandsreferenzen zunächst in die linear-quadratische Form entsprechend der Gleichungen (3.5) und (3.6) umgewandelt werden. Dies erfolgt, indem die Anzahl der Zustände durch eine Erweiterung des Zustandsvektors verdoppelt wird [Eng05, S. 101 ff.]:

$$\tilde{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{x}_{\text{ext}} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Für die zusätzlichen Zustände \mathbf{x}_{ext} gilt

$$\dot{\mathbf{x}}_{\text{ext}} = \mathbf{0} \quad (3.9)$$

$$\mathbf{x}_{\text{ext}}(0) = \mathbf{1}, \quad (3.10)$$

d.h. alle Einträge des Vektors besitzen durchgehend den Wert 1.

Damit lässt sich das Differentialspiel aus Definition 3.4 umschreiben in die Form

$$J_1 = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{x}}_T^\top \tilde{\mathbf{S}}_1 \tilde{\mathbf{x}}_T + \frac{1}{2} \int_0^T \tilde{\mathbf{x}}^\top \tilde{\mathbf{Q}}_1 \tilde{\mathbf{x}} + \sum_{i=1}^2 \mathbf{u}_i^\top \mathbf{R}_{1i} \mathbf{u}_i dt \quad (3.11a)$$

$$J_2 = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{x}}_T^\top \tilde{\mathbf{S}}_2 \tilde{\mathbf{x}}_T + \frac{1}{2} \int_0^T \tilde{\mathbf{x}}^\top \tilde{\mathbf{Q}}_2 \tilde{\mathbf{x}} + \sum_{i=1}^2 \mathbf{u}_i^\top \mathbf{R}_{2i} \mathbf{u}_i dt \quad (3.11b)$$

mit der erweiterten Systemgleichung

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \tilde{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{B}}_1 \mathbf{u}_1 + \tilde{\mathbf{B}}_2 \mathbf{u}_2, \quad (3.11c)$$

dem Startzustand

$$\tilde{\mathbf{x}}(0) = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (3.11d)$$

sowie den Matrizen

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{B}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_i \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\mathbf{Q}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_i & -\text{diag}(\bar{\mathbf{x}}_i^\top \mathbf{Q}_i) \\ -\text{diag}(\bar{\mathbf{x}}_i^\top \mathbf{Q}_i)^\top & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (3.11e)$$

und

$$\tilde{\mathbf{S}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_i & -\text{diag}(\bar{\mathbf{x}}_{i,T}^\top \mathbf{S}_i) \\ -\text{diag}(\bar{\mathbf{x}}_{i,T}^\top \mathbf{S}_i)^\top & \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (3.11f)$$

Zur Lösung dieser Problemstellung lässt sich der Hamilton-Formalismus verwenden [Kir04, S. 187 f.], [PLB15, S. 295 ff.]. Mit Hilfe der Lagrange-Multiplikatoren λ_i wird dazu die Hamilton-Funktion H_i für jeden Spieler i aufgestellt:

$$H_i = -\frac{1}{2} \left(\tilde{\mathbf{x}}^\top \tilde{\mathbf{Q}}_i \tilde{\mathbf{x}} + \sum_{j=1}^2 \mathbf{u}_j^\top \mathbf{R}_{ij} \mathbf{u}_j \right) + \lambda_i^\top \left(\tilde{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{x}} + \sum_{j=1}^2 \tilde{\mathbf{B}}_j \mathbf{u}_j \right) \quad (3.12)$$

Als Optimalitätsbedingungen ergeben sich damit für jeden Spieler die Koppelgleichung

$$\frac{\partial H_i}{\partial \mathbf{u}_i} = -\mathbf{R}_{ii} \mathbf{u}_i + \tilde{\mathbf{B}}_i^\top \lambda_i = 0 \quad (3.13)$$

sowie die kanonischen Differentialgleichungen

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \frac{\partial H_i}{\partial \boldsymbol{\lambda}_i} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{x}} + \sum_{j=1}^2 \tilde{\mathbf{B}}_j \mathbf{u}_j \quad (3.14)$$

und

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}}_i = -\frac{\partial H_i}{\partial \tilde{\mathbf{x}}} = \tilde{\mathbf{Q}}_i \tilde{\mathbf{x}} - \tilde{\mathbf{A}}^\top \boldsymbol{\lambda}_i. \quad (3.15)$$

Zudem gilt für die Lagrange-Multiplikatoren $\boldsymbol{\lambda}_i$ am Ende des Optimierungshorizonts

$$\boldsymbol{\lambda}_i(T) = -\frac{\partial}{\partial \tilde{\mathbf{x}}} \left(\frac{1}{2} \tilde{\mathbf{x}}^\top \tilde{\mathbf{S}}_1 \tilde{\mathbf{x}} \right) \Bigg|_T = -\tilde{\mathbf{S}}_1 \tilde{\mathbf{x}}. \quad (3.16)$$

Gleichung (3.13) kann nach \mathbf{u}_i aufgelöst werden zu:

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{R}_{ii}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}_i^\top \boldsymbol{\lambda}_i. \quad (3.17)$$

Weiterhin wird zur Lösung des Differentialgleichungssystems (3.14) und (3.15) der Ansatz

$$\boldsymbol{\lambda}_i = -\mathbf{P}_i \tilde{\mathbf{x}} \quad (3.18)$$

gewählt. Eingesetzt in (3.15) erhält man durch Anwenden der Produktregel:

$$-\dot{\mathbf{P}}_i \tilde{\mathbf{x}} - \mathbf{P}_i \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \tilde{\mathbf{Q}}_i \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{A}}^\top \mathbf{P}_i \tilde{\mathbf{x}} \quad (3.19)$$

Setzt man nun in Gleichung (3.19) nacheinander die Gleichungen (3.14), (3.17) und (3.18) ein, erhält man für jeden Spieler eine Gleichung der Gestalt

$$\left(\dot{\mathbf{P}}_i + \tilde{\mathbf{A}}^\top \mathbf{P}_i + \mathbf{P}_i \tilde{\mathbf{A}} - \mathbf{P}_i \tilde{\mathbf{B}}_i \mathbf{R}_{ii}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}_i^\top \mathbf{P}_i - \mathbf{P}_i \tilde{\mathbf{B}}_i \mathbf{R}_{ii}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}_i^\top \mathbf{P}_i + \tilde{\mathbf{Q}}_i \right) \tilde{\mathbf{x}} = 0, \quad (3.20)$$

welche jeweils für alle $\tilde{\mathbf{x}}$ erfüllt sein muss. Das ist gleichbedeutend damit, dass der Term in den Klammern gleich Null ist. Dies wird wiederum genau durch die Kombination von \mathbf{P}_1 und \mathbf{P}_2 erfüllt, welche das, aus den gekoppelten Riccati-Differentialgleichungen bestehende, Gleichungssystem

$$\dot{\mathbf{P}}_1 = -\tilde{\mathbf{A}}^\top \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_1 \tilde{\mathbf{A}} + \mathbf{P}_1 \tilde{\mathbf{B}}_2 \mathbf{R}_{22}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}_2^\top \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_1 \tilde{\mathbf{B}}_1 \mathbf{R}_{11}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}_1^\top \mathbf{P}_1 - \tilde{\mathbf{Q}}_1 \quad (3.21a)$$

$$\dot{\mathbf{P}}_2 = -\tilde{\mathbf{A}}^\top \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{A}} + \mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{B}}_1 \mathbf{R}_{11}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}_1^\top \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{B}}_2 \mathbf{R}_{22}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}_2^\top \mathbf{P}_2 - \tilde{\mathbf{Q}}_2 \quad (3.21b)$$

mit den Endwerten

$$\mathbf{P}_1(T) = \tilde{\mathbf{S}}_1 \quad (3.21c)$$

$$\mathbf{P}_2(T) = \tilde{\mathbf{S}}_2 \quad (3.21d)$$

löst. Die Endwerte folgen hierbei aus dem Vergleich von Gleichung (3.16) und dem Ansatz (3.18).

Nur wenn das Differentialgleichungssystem (3.21) eine Lösung besitzt, existiert ein entsprechendes Nash-Gleichgewicht für einen beliebigen Startzustand \mathbf{x}_0 . Dieses ist dann eindeutig [Eng05, S.274 f]. Da diese Lösung im Allgemeinen nicht analytisch bestimmt werden kann, müssen die Matrizen \mathbf{P}_i in der Regel numerisch, beispielsweise mit einem Euler-Verfahren, berechnet werden.

Die optimalen Stellgrößentrajektorien der beiden Spieler ergeben sich anschließend unmittelbar durch Einsetzen von (3.18) in (3.17) zu

$$\mathbf{u}_1^* = -\mathbf{R}_{11}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}_1^\top \mathbf{P}_1 \tilde{\mathbf{x}} \quad (3.22a)$$

$$\mathbf{u}_2^* = -\mathbf{R}_{22}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}_2^\top \mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{x}} \quad (3.22b)$$

unter Verwendung der mit Hilfe von (3.21) berechneten Matrizen \mathbf{P}_1 und \mathbf{P}_2 .

3.2.2 Lösung mit Hilfe des Batch-Ansatzes

Alternativ lässt sich das Differentialspiel lösen, indem das dynamische Optimierungsproblem (3.7) durch Diskretisierung zunächst in ein Parameteroptimierungsproblem umgewandelt wird. Für eine Abtastzeit $\tau = T/N$ können die Spielergütemaße mit einer Quadraturformel approximiert werden. Mit der linksseitigen Rechteckformel aus [BSMM08, S. 969] ergibt sich beispielsweise die diskretisierte Darstellung zu

$$J_i = \frac{1}{2} (\mathbf{x}_N - \bar{\mathbf{x}}_{i,N})^\top \mathbf{S}_i (\mathbf{x}_N - \bar{\mathbf{x}}_{i,N}) + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \left((\mathbf{x}_k - \bar{\mathbf{x}}_{i,k})^\top \tau \mathbf{Q}_{i,k} (\mathbf{x}_k - \bar{\mathbf{x}}_{i,k}) + \sum_{j=1}^2 \mathbf{u}_{j,k}^\top \tau \mathbf{R}_{ij,k} \mathbf{u}_{j,k} \right), \quad (3.23)$$

wobei \square_k bzw. $\square_{i,k}$ den Wert der zugehörigen Matrix bzw. des zugehörigen Vektors \square bzw. \square_i in Abtastschritt k bezeichnet. Alternativ lässt sich Gleichung (3.23) in folgender Matrixnotation darstellen:

$$J_i = \frac{1}{2} (\vec{\mathbf{x}} - \vec{\mathbf{x}}_i)^\top \vec{\mathbf{Q}}_i (\vec{\mathbf{x}} - \vec{\mathbf{x}}_i) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \vec{\mathbf{u}}_j^\top \vec{\mathbf{R}}_{ij} \vec{\mathbf{u}}_j \quad (3.24)$$

mit den Vektoren

$$\vec{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_0 \\ \mathbf{x}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{x}_N \end{bmatrix}, \vec{\bar{\mathbf{x}}}_i = \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{x}}_{i,0} \\ \bar{\mathbf{x}}_{i,1} \\ \vdots \\ \bar{\mathbf{x}}_{i,N} \end{bmatrix}, \vec{\mathbf{u}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0 \\ \mathbf{u}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{N-1} \end{bmatrix}$$

sowie den Matrizen

$$\vec{\mathbf{Q}}_i = \begin{bmatrix} \tau \mathbf{Q}_{i,0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \tau \mathbf{Q}_{i,N-1} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{S}_i \end{bmatrix}, \vec{\mathbf{R}}_{ij} = \begin{bmatrix} \tau \mathbf{R}_{ij,0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \tau \mathbf{R}_{ij,N-1} \end{bmatrix}.$$

Die zeitdiskrete Systemmatrix Φ und die zeitdiskreten Eingangsmatrizen \mathbf{H}_i ergeben sich für Systeme mit $\det \mathbf{A} \neq 0$ aus ihren kontinuierlichen Entsprechungen gemäß [Lun14, S. 444] zu

$$\Phi = e^{\mathbf{A}\tau} \quad (3.25)$$

und

$$\mathbf{H}_i = \mathbf{A}^{-1}(\Phi - \mathbf{I})\mathbf{B}_i, \quad (3.26)$$

woraus die folgende zeitdiskrete Zustandsraumdarstellung resultiert:

$$\mathbf{x}_{k+1} = \Phi \mathbf{x}_k + \sum_{i=1}^2 \mathbf{H}_i \mathbf{u}_{i,k} \quad (3.27)$$

Auf dieses umformulierte Problem lässt sich nun der Batch-Ansatz anwenden [BBM17, S. 164 f.]. Durch iteratives Einsetzen von Gleichung (3.27) lassen sich zunächst alle zukünftigen Zustände in Abhängigkeit des Startzustands \mathbf{x}_0 und der Steuerfolgen der Spieler $\vec{\mathbf{u}}_i$ ausdrücken:

$$\vec{\mathbf{x}} = \vec{\Phi} \mathbf{x}_0 + \sum_{i=1}^2 \vec{\mathbf{H}}_i \vec{\mathbf{u}}_i \quad (3.28)$$

mit

$$\vec{\Phi} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \Phi \\ \Phi^2 \\ \vdots \\ \Phi^N \end{bmatrix}, \vec{\mathbf{H}}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \dots & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{H}_i & \mathbf{0} & \dots & \vdots \\ \Phi \mathbf{H}_i & \mathbf{H}_i & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \Phi^{N-1} \mathbf{H}_i & \dots & \Phi \mathbf{H}_i & \mathbf{H}_i \end{bmatrix}.$$

Damit lässt sich die Zustandsfolge über den Optimierungshorizont \vec{x} in den Gütemaßen der Spieler J_i aus Gleichung (3.24) ersetzen, wodurch diese nur noch vom Startzustand \mathbf{x}_0 und den Eingangsgrößen der Spieler \vec{u}_i abhängig sind. Somit ergibt sich für Spieler i :

$$J_i = \frac{1}{2} \left(\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 + \sum_{j=1}^2 \vec{H}_j \vec{u}_j - \vec{x}_i \right)^\top \vec{Q}_i \left(\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 + \sum_{j=1}^2 \vec{H}_j \vec{u}_j - \vec{x}_i \right) + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \vec{u}_j^\top \vec{R}_{ij} \vec{u}_j \quad (3.29)$$

Als notwendige Bedingung für ein Minimum von J_i muss der Gradient von J_i bezüglich der Optimierungsvariablen \vec{u}_i null sein. Für den Gradienten von Spieler i gilt:

$$\frac{\partial J_i}{\partial \vec{u}_i} = (\vec{H}_i^\top \vec{Q}_i \vec{H}_i + \vec{R}_{ii}) \vec{u}_i + \vec{H}_i^\top \vec{Q}_i \vec{H}_{\bar{i}} \vec{u}_{\bar{i}} + \vec{H}_i^\top \vec{Q}_i (\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 - \vec{x}_i) \quad (3.30)$$

Anhand der Gleichung (3.30) ist zu erkennen, dass die Lage des Optimums von der Stellgröße des jeweils anderen Spielers \bar{i} abhängt. Da sich gemäß der Definition des Nash-Gleichgewichts 3.3 jeder Spieler in einem Minimum befinden muss, werden die Berechnungen analog für jeden Spieler durchgeführt und in einem Gleichungssystem zusammengefasst. Für den hier vorgestellten Fall mit zwei Spielern ergibt sich:

$$\begin{bmatrix} \vec{H}_1^\top \vec{Q}_1 \vec{H}_1 + \vec{R}_{11} & \vec{H}_1^\top \vec{Q}_1 \vec{H}_2 \\ \vec{H}_2^\top \vec{Q}_2 \vec{H}_1 & \vec{H}_2^\top \vec{Q}_2 \vec{H}_2 + \vec{R}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{u}_1^* \\ \vec{u}_2^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{H}_1^\top \vec{Q}_1 (\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 - \vec{x}_1) \\ \vec{H}_2^\top \vec{Q}_2 (\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 - \vec{x}_2) \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (3.31)$$

Stellt man dieses Gleichungssystem nach den optimalen Steuerfolgen der Spieler \vec{u}_i^* um, erhält man unmittelbar die Berechnungsvorschrift für das Nash-Gleichgewicht:

$$\begin{bmatrix} \vec{u}_1^* \\ \vec{u}_2^* \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \vec{H}_1^\top \vec{Q}_1 \vec{H}_1 + \vec{R}_{11} & \vec{H}_1^\top \vec{Q}_1 \vec{H}_2 \\ \vec{H}_2^\top \vec{Q}_2 \vec{H}_1 & \vec{H}_2^\top \vec{Q}_2 \vec{H}_2 + \vec{R}_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \vec{H}_1^\top \vec{Q}_1 (\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 - \vec{x}_1) \\ \vec{H}_2^\top \vec{Q}_2 (\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 - \vec{x}_2) \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Für ein System mit n Zuständen, m_i Stellgrößen von Spieler i und einem Zeithorizont mit N Schritten muss folglich eine $(m_1 N + m_2 N) \times (m_1 N + m_2 N)$ -Matrix invertiert werden, um die optimalen Stellgrößenverläufe zu ermitteln. Nur wenn diese Inverse existiert, existiert auch ein Nash-Gleichgewicht für die beiden Spieler. Durch die Inversion dieser Matrix ist der Batch-Ansatz für lange Zeithorizonte rechenaufwendiger als die numerische Lösung der Riccati-Differentialgleichungen aus dem Hamilton-Ansatz (jeweils N -malige Berechnung der $2n \times 2n$ -Matrizen \vec{P}_i). Die Lösung mittels des Batch-Ansatzes stellt jedoch ein allgemeineres Lösungsverfahren dar, in das weitere Nebenbedingungen integriert werden können, wie beispielsweise in [Fla16] erfolgt.

Nachdem in diesem Abschnitt der Aufbau von Differentialspielen und Ansätze für deren Lösung vorgestellt wurden, wird im Folgenden die Anwendung der Grundlagen zur Beantwortung der ersten Forschungsfrage dieser Arbeit erläutert.

3.3 Anwendung von Differentialspielen zur Modellierung von Interaktion mit Übergaben

Analog zu den Arbeiten aus Abschnitt 2.4 wird auch in dieser Arbeit die Modellierung der Mensch-Maschine-Interaktion mit Differentialspielen verfolgt. Diese Beschreibungsform ist durch die Forschungsergebnisse aus [TJ02, MTL10] motiviert, die zeigen, dass das Bewegungsverhalten des Menschen als optimal bezüglich einer Gütefunktion betrachtet werden kann. Die Quellen belegen, dass sich mit den als Optimalregler aufgestellten Modellen die Trajektorien der menschlichen Aktion präzise beschreiben und präzisieren lassen. Ein Optimalregler ist auch eine sehr allgemeine und flexible Möglichkeit, eine Automation umzusetzen, welche auf Basis eines Systemmodells die Aufgabe entsprechend der Gütefunktion optimal erfüllt. Durch die Kombination eines als Optimalregler modellierten Menschen mit einer ebenso ausgelegten Automation, welche beide auf ein gemeinsames System einwirken, liegen alle notwendigen Bestandteile für die Beschreibung der Interaktion als Differentialspiel vor. Wendet die Automation in diesem Szenario eine Strategie an, die Bestandteil eines Nash-Gleichgewichts ist, ergibt sich folglich ein solches Gleichgewicht nur dann, wenn der Mensch mit seiner besten Antwort gemäß Definition 3.2 auf diese Strategie reagiert. Die Ergebnisse von Inga et al. [IFH19] zeigen, dass die Beschreibung als Differentialspiel das Verhalten von Testpersonen tatsächlich besser abbilden kann als eine Modellierung der Interaktion, welche die Stellgrößen des Partners als bekannte Störgrößen auffasst.

Um nun das menschliche Verhalten bei der Ermittlung der optimalen Stellgröße der Automation zu berücksichtigen, muss ein Modell des Menschen in Form eines Gütemaßes innerhalb der Automation vorliegen. Zusammen mit einem Modell der Regelstrecke und der Zielvorgabe der Automation lässt sich so ein Differentialspiel aufstellen. Dessen Lösung ergibt dann den optimalen Stellgrößenverlauf der Automation bei Kooperation mit diesem Partner für das vorgegebene System. In Abbildung 3.1 wird die Interaktionsstruktur grafisch veranschaulicht.

Die Kommunikation mit dem Menschen erfolgt durch haptische Interaktion über das, für Haptic Shared Control obligatorische, gemeinsame Stellglied, wodurch dem Menschen zu jedem Zeitpunkt die Aktion der Automation mitgeteilt wird. Die Berechnung der optimalen Stellgröße der Automation erfordert keine Messung der Stellgröße des Menschen, da über das Modell innerhalb der Automation das menschliche Verhalten abgebildet wird und so trotzdem eine Antizipation und darüber hinaus eine Prädiktion zukünftiger Aktionen des menschlichen Kooperationspartners erfolgen kann.

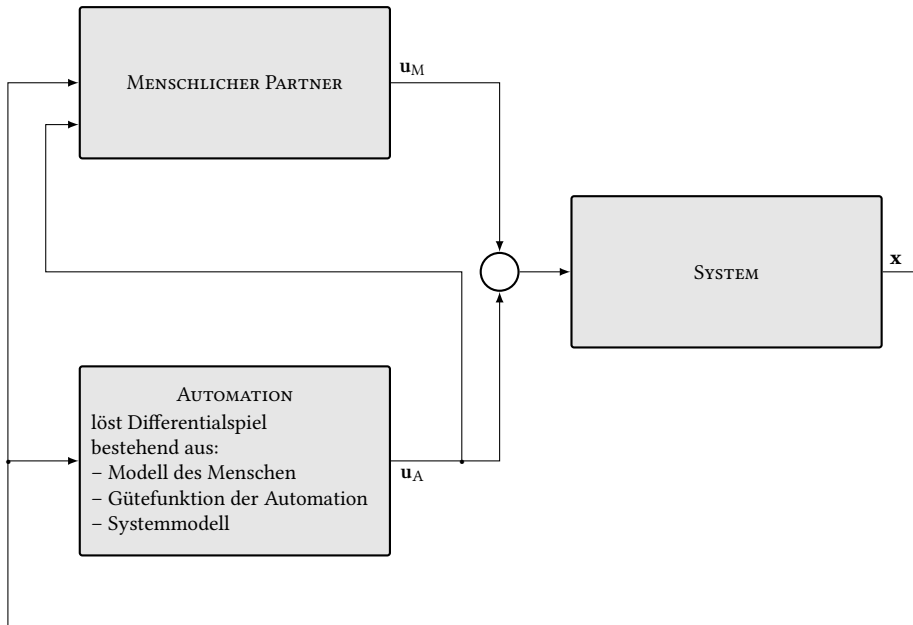


Abbildung 3.1: Struktur der Mensch-Maschine Interaktion in einem Shared Control Szenario bei Auslegung der Automation mit Hilfe eines Differentialspiels

Im Folgenden wird vorgestellt, wie sich mit Hilfe einer Modifikation der Modellierung eine kooperative Transitionsphase umsetzen lässt. Bei einer kooperativen Transition wechselt die Aufgabenerfüllung von einem Partner zum anderen, wobei die Aufgabe während des Übergabeprozesses jedoch kooperativ gelöst wird, indem sich beide Partner an der Aufgabe beteiligen. Der Grad, mit dem ein Partner sich an der gemeinsamen Aufgabe beteiligt, wird dabei von den Gewichtungsmatrizen der Gütefunktionen (3.7a) und (3.7b) beeinflusst. Die Beteiligung hängt zum einen vom Verhältnis der Einträge der Zustandsgewichtungsmatrix \tilde{Q} zu denen der Stellgrößengewichtungsmatrix R der eigenen Gütefunktion ab. Zum anderen ist sie abhängig vom Verhältnis der entsprechenden Einträge in der Gütefunktion des Partners. Wenn die Aufgabe von einem Kooperationspartner an den anderen übergeben werden soll, verändert sich der Beteiligungsgrad der beiden Partner. Folglich müssen auch diese Verhältnisse in den Gütemaßen variiert werden, um dies im Modell korrekt abzubilden. Dazu wird zunächst definiert, wie eine Transition idealerweise verläuft.

Definition 3.5 (Ideale Transition)

Als ideale Transition wird eine Übertragung einer Aufgabe zwischen zwei Partnern definiert, wenn sich dieser Übergabeprozess nicht auf die Systemzustände auswirkt. Dies ist gleichbedeutend damit, dass sich die gemeinsame Beeinflussung des Systems während der Transition nicht von der Art und Weise unterscheidet, mit der ein Partner die Aufgabe alleine ausführen würde.

Ausgehend von dieser Definition soll zuerst die Situation betrachtet werden, dass ein Partner sich gar nicht an der Aufgabe beteiligt ($\mathbf{u}_i = \mathbf{0}$), wie es beispielsweise bei einer abgeschalteten Automation oder einem nicht zur Übernahme der Aufgabe bereiten Menschen der Fall ist. Die optimale Aktion des Spielers soll in diesem Fall darin bestehen, keine Stellgröße aufzubringen. Um dies mit endlichen Gewichtungsparemtern und unabhängig vom aktuellen Systemzustand zu erreichen, darf dieser Spieler weder Interesse an dem Wert der Zustände im Verlauf des Optimierungshorizonts haben, noch einen bestimmten Endzustand anstreben. Mathematisch ist das gleichbedeutend mit

$$\mathbf{Q}_i = \mathbf{0}, \forall t \in [0, T] \quad (3.33)$$

und

$$\mathbf{S}_i = \mathbf{0}. \quad (3.34)$$

Dies lässt sich im Hamilton-Ansatz leicht durch Einsetzen in Gleichung (3.21) zeigen, wodurch das entsprechende \mathbf{P}_i des Spielers immer gleich $\mathbf{0}$ bleibt und sich somit nach Gleichung (3.22) auch die optimale Stellgröße zu $\mathbf{0}$ ergibt. Im Batch-Ansatz ist dies sogar noch offensichtlicher, da die Werte zu $\vec{\mathbf{Q}}_i = \mathbf{0}$ führen, wodurch aus Gleichung (3.32) unmittelbar $\vec{\mathbf{R}}_{ii} \vec{\mathbf{u}}_i^* = \mathbf{0}$ folgt. Dies ist nur für $\mathbf{u}_i^* = \mathbf{0}$ immer erfüllt.

Es bleibt zu klären, wie sich die Einträge der Zustandsgewichtungsmatrizen der Spieler während der Transitionsphase verändern müssen, um eine ideale Transition abzubilden. Hierzu wird die kombinierte Stellgröße beider Spieler $\mathbf{u}_1^* + \mathbf{u}_2^*$ für ein gemeinsam via Haptic Shared Control geregeltes System betrachtet. Da die Kooperationspartner über dasselbe Stellglied auf das System einwirken, gilt

$$\mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_2 =: \mathbf{B}. \quad (3.35)$$

Weiterhin wird angenommen, dass beide Partner ihre einzelnen Stellgrößen im selben Verhältnis bestrafen, d.h. sie möchten die Aufgabe prinzipiell auf dieselbe Art erledigen und be-

vorzug nicht unterschiedliche Eingriffe. Hierdurch können die beiden Gütemaße (3.7a) und (3.7b) bzgl. der Stellgrößengewichtungsmatrix normiert werden:

$$\mathbf{R}_{11} = \mathbf{R}_{22} =: \mathbf{R} \quad (3.36)$$

Im Fall einer einzelnen skalaren Stellgröße pro Spieler ist das immer möglich.

Lemma 3.1 (Gemeinsame Aktion in einem Haptic Shared Control Differentialspiel)

Gegeben sei ein Zweispieler LQ-Differentialspiel mit Zustandsreferenzen gemäß Definition 3.4. Beide Spieler wirken gemäß (3.35) über ein gemeinsames Stellglied auf das System ein und ihre Gütemaße können hinsichtlich der Stellgrößengewichtungsmatrix normiert werden, so dass Gleichung (3.36) gilt.

In diesem Fall ist die Summe der optimalen Stellgrößen beider Spieler $\mathbf{u} = \mathbf{u}_1^ + \mathbf{u}_2^*$ identisch mit der optimalen Steuergröße eines linear-quadratischen Optimierungsproblems mit den Gewichtungsmatrizen $\mathbf{S} := \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2$, $\mathbf{Q} := \mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_2$ und \mathbf{R} .*

Haben die Spieler darüber hinaus dieselbe Referenztrajektorie $\bar{\mathbf{x}}_1 = \bar{\mathbf{x}}_2 =: \bar{\mathbf{x}}$, so ist diese auch identisch zur Referenztrajektorie dieses linear-quadratischen Optimierungsproblems.

Beweis von Lemma 3.1:

Die Summe der optimalen Stellgrößen unter den gegebenen Bedingungen ergibt sich mit dem Hamilton-Ansatz gemäß (3.22) zu

$$\mathbf{u}_1^* + \mathbf{u}_2^* = -\mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}^\top \mathbf{P}_1 \tilde{\mathbf{x}} + -\mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}^\top \mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{x}} = -\mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}^\top (\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2) \tilde{\mathbf{x}}. \quad (3.37)$$

Sie ist also genau dann identisch zur optimalen Lösung eines einzelnen Spielers

$$\mathbf{u}^* = -\mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}^\top \mathbf{P} \tilde{\mathbf{x}}, \quad (3.38)$$

wenn gilt

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2. \quad (3.39)$$

Für den Endwert $\mathbf{P}(T)$ folgt das für $\tilde{\mathbf{S}} = \tilde{\mathbf{S}}_1 + \tilde{\mathbf{S}}_2$. Die Änderung von \mathbf{P} entspricht dann

$$\dot{\mathbf{P}} = \dot{\mathbf{P}}_1 + \dot{\mathbf{P}}_2. \quad (3.40)$$

Mit Hilfe der Gleichungen (3.21a) und (3.21b) folgt

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{P}}_1 + \dot{\mathbf{P}}_2 &= -\tilde{\mathbf{A}}^\top \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_1 \tilde{\mathbf{A}} + \mathbf{P}_1 \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}^\top \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_1 \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}^\top \mathbf{P}_1 - \tilde{\mathbf{Q}}_1 \\ &\quad - \tilde{\mathbf{A}}^\top \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{A}} + \mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}^\top \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}^\top \mathbf{P}_2 - \tilde{\mathbf{Q}}_2 \end{aligned} \quad (3.41)$$

$$\begin{aligned} &= -\tilde{\mathbf{A}}^\top (\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2) - (\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2) \tilde{\mathbf{A}} \\ &\quad + (\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2) \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}^\top (\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2) - (\tilde{\mathbf{Q}}_1 + \tilde{\mathbf{Q}}_2). \end{aligned} \quad (3.42)$$

Gleichung (3.42) entspricht somit exakt der Riccati-Differentialgleichung im Einspieler-Fall

$$\dot{\mathbf{P}} = -\tilde{\mathbf{A}}^\top \mathbf{P} - \mathbf{P} \tilde{\mathbf{A}} + \mathbf{P} \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}^\top \mathbf{P} - \tilde{\mathbf{Q}}, \quad (3.43)$$

wenn $\tilde{\mathbf{Q}} = \tilde{\mathbf{Q}}_1 + \tilde{\mathbf{Q}}_2$. Anhand der Struktur von $\tilde{\mathbf{Q}}$ bzw. des Endwerts der Differentialgleichung $\tilde{\mathbf{S}}$ (vgl. Gleichungen (3.11e) bzw. (3.11f)) folgt somit unmittelbar $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_2$ und $\mathbf{S} = \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2$. Weiterhin folgt bei $\bar{\mathbf{x}}_1 = \bar{\mathbf{x}}_2$ auch deren Gleichheit zur Referenztrajektorie $\bar{\mathbf{x}}$ des vergleichbaren Ersatzproblems mit einem Spieler. \square

Die Aussage über die gemeinsame Aktion gilt analog, falls das Zweispieler LQ-Differentialspiel mit Zustandsreferenzen entsprechend Abschnitt 3.2.2 mit Hilfe einer zeitdiskreten Darstellung approximiert wird:

Lemma 3.2 (Gemeinsame Aktion in einem diskretisierten Haptic Shared Control Differentialspiel)

Die gemeinsame Aktion $\tilde{\mathbf{u}}_1^ + \tilde{\mathbf{u}}_2^*$ in einem diskretisierten Haptic Shared Control Differentialspiel entspricht der Lösung, die man durch Diskretisieren des linear-quadratischen Optimierungsproblems mit $\mathbf{S} := \mathbf{S}_1 + \mathbf{S}_2$, $\mathbf{Q} := \mathbf{Q}_1 + \mathbf{Q}_2$ und \mathbf{R} erhält.*

Gilt zusätzlich $\bar{\mathbf{x}}_1 = \bar{\mathbf{x}}_2 := \bar{\mathbf{x}}$, ist dies auch in diesem Fall die Referenztrajektorie dieses linear-quadratischen Optimierungsproblems.

Beweis von Lemma 3.2:

Aus $\mathbf{B}_1 = \mathbf{B}_2 =: \mathbf{B}$ und $\mathbf{R}_{11} = \mathbf{R}_{22} =: \mathbf{R}$ ergeben sich durch die Zeitdiskretisierung mit (3.26) und der Darstellung der Gütemaße bzw. des Systemzustands über dem Optimierungshorizont

gemäß (3.24) bzw. (3.28) auch $\vec{H}_1 = \vec{H}_2 =: \vec{H}$ und $\vec{R}_{11} = \vec{R}_{22} =: \vec{R}$. Somit verändert sich Gleichung (3.31) zu

$$\begin{bmatrix} \vec{H}^\top \vec{Q}_1 \vec{H} + \vec{R} & \vec{H}^\top \vec{Q}_1 \vec{H} \\ \vec{H}^\top \vec{Q}_2 \vec{H} & \vec{H}^\top \vec{Q}_2 \vec{H} + \vec{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{u}_1^* \\ \vec{u}_2^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \vec{H}^\top \vec{Q}_1 (\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 - \vec{x}_1) \\ \vec{H}^\top \vec{Q}_2 (\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 - \vec{x}_2) \end{bmatrix} = \mathbf{0}. \quad (3.44)$$

Der optimale Stellgrößenverlauf der jeweiligen Spieler muss also dieses Gleichungssystem erfüllen. Um einen Ausdruck für die Summe der Stellgrößen der Spieler zu erhalten, werden die beiden Zeilen des Gleichungssystems (3.44) addiert. Nach Zusammenfassung der Terme ergibt sich

$$(\vec{H}^\top \vec{Q}_1 \vec{H} + \vec{H}^\top \vec{Q}_2 \vec{H} + \vec{R})(\vec{u}_1^* + \vec{u}_2^*) + \vec{H}^\top \left(\vec{Q}_1 (\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 - \vec{x}_1) + \vec{Q}_2 (\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 - \vec{x}_2) \right) = \mathbf{0}. \quad (3.45)$$

Löst man diese Gleichung nach $\vec{u}_1^* + \vec{u}_2^*$ auf und verwendet die Substitution $\vec{Q} = \vec{Q}_1 + \vec{Q}_2$ erhält man:

$$\vec{u}_1^* + \vec{u}_2^* = -(\vec{H}^\top \vec{Q} \vec{H} + \vec{R})^{-1} \left(\vec{H}^\top \vec{Q} \left(\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 - \vec{Q}^{-1} (\vec{Q}_1 \vec{x}_1 + \vec{Q}_2 \vec{x}_2) \right) \right) \quad (3.46)$$

Dies entspricht exakt der Lösung eines einzelnen Spielers mit den Gütemaßmatrizen \vec{Q} und \vec{R} sowie der Referenztrajektorie $\vec{Q}^{-1} (\vec{Q}_1 \vec{x}_1 + \vec{Q}_2 \vec{x}_2)$. Letztere wird bei einem identischen Referenzverlauf für beide Spieler mit $\vec{x}_1 = \vec{x}_2 =: \vec{x}$ ebenfalls zu \vec{x} . Weiterhin folgt für die Bestandteile der Matrix \vec{Q} unmittelbar $S = S_1 + S_2, Q = Q_1 + Q_2$. \square

Mit diesen Erkenntnissen lassen sich Rückschlüsse darüber ziehen, wie die Transition gestaltet werden muss, um die in [FHH⁺12] beschriebenen Risiken eines Überschusses bzw. Defizits an Kontrolle vermeiden zu können. Hierfür muss zunächst mathematisch definiert werden, wie ein einzelner Spieler die Aufgabe löst, um einen Maßstab für eine idealen Transition nach Definition 3.5 zu erhalten. Die Stellgrößen sollen im Falle der alleinigen Aufgabenerfüllung durch Minimierung des folgenden Gütemaßes beschrieben werden können:

$$J = \frac{1}{2} (\mathbf{x}_T - \bar{\mathbf{x}}_T)^\top S^* (\mathbf{x}_T - \bar{\mathbf{x}}_T) + \frac{1}{2} \int_0^T (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^\top Q^* (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) + \mathbf{u}^\top \mathbf{R} \mathbf{u} \, dt \quad (3.47)$$

Für die nachfolgenden Erläuterungen wird der Fall betrachtet, dass die Aufgabe vollständig von Spieler 1 an Spieler 2 übertragen werden soll. Die Transitionen in die entgegengesetzte Richtung erfolgen analog. Zu Beginn der Transition beteiligt sich der übernehmende Spieler nicht an der Aufgabe. Gemäß der Gleichungen (3.33) und (3.34) muss also

$$Q_2 = \mathbf{0} \quad (3.48)$$

und

$$S_2 = 0 \quad (3.49)$$

erfüllt sein. Damit der abgebende Spieler die Aufgabe zu Beginn der Transition optimal nach Gleichung (3.47) erfüllt, muss sein Gütemaß diesem entsprechen und somit

$$Q_1 = Q^*, \quad (3.50)$$

$$S_1 = S^* \quad (3.51)$$

und

$$\bar{x}_1 = \bar{x} \quad (3.52)$$

gelten. Am Ende der Transition sollen die Rollen vertauscht sein, d.h. die Matrizen Q_1 und S_1 sind null und Spieler 2 handelt nach dem Gütemaß (3.47).

Aus Lemma 3.1 bzw. Lemma 3.2 kann nun abgeleitet werden, wie die Transition verlaufen muss, damit sie auch während des Übergabeprozesses ideal bleibt. Für die Gütemaße der Spieler muss während des gesamten Prozesses gelten:

$$Q_1 + Q_2 = Q^* \quad (3.53)$$

$$S_1 + S_2 = S^* \quad (3.54)$$

$$\bar{x}_1 = \bar{x}_2 = \bar{x} \quad (3.55)$$

Mit der zusätzlichen Annahme, dass sich im Übergabeprozess die Gewichtungen aller Zustände im selben Maße ändern, können die Gewichtungsmatrizen der Spieler Q_i in einen zeitvarianten Transitionsparameter $\alpha_i(t)$ und die Matrix Q^* , welche die Gewichtung bei alleiniger Ausführung der Aufgabe angibt, zerlegt werden:

$$Q_i = \alpha_i(t)Q^* \quad (3.56)$$

Mit der Wahl des Transitionsparameters $\alpha_i(t)$ im Intervall $[0, 1]$ können alle Beteiligungsgrade des entsprechenden Partners zwischen „keiner Beteiligung“ ($\alpha_i = 0$) und dem Verhalten bei „alleiniger Aufgabenerfüllung“ ($\alpha_i = 1$) modelliert werden. Um für diese Darstellung die Bedingung einer idealen Transition zu erfüllen, muss

$$\alpha_2 = 1 - \alpha_1 \quad (3.57)$$

gelten, d.h. die Übergabeparameter müssen konträr zueinander verlaufen. Es sei explizit darauf hingewiesen, dass kein linearer Zusammenhang zwischen dem Transitionsparameter α_i

und der resultierenden optimalen Stellgröße \mathbf{u}_1^* besteht, also das Verhältnis von α_1 zu α_2 im Allgemeinen nicht das Verhältnis von \mathbf{u}_1^* zu \mathbf{u}_2^* widerspiegelt.

Fasst man alle gewonnen Erkenntnisse zusammen und wendet sie auf die Modellierung einer Haptic Shared Control Interaktion mit einem Differentialspiel an, so ergibt sich die nachfolgende Definition:

Definition 3.6 (Ideale Transition für ein Zweispieler LQ-Differentialspiel in einem Haptic Shared Control Szenario)

Aus den Anforderungen für eine ideale Transitionen gemäß Definition 3.5 in einem Haptic Shared Control Szenario ergibt sich ein Spezialfall des Zweispieler LQ-Differentialspiels mit Zustandsreferenzen aus Definition 3.4 mit den Gütemaßen

$$J_1 = \frac{1}{2}(\mathbf{x}_T - \bar{\mathbf{x}}_T)^\top \alpha_{1,T} \mathbf{S}^*(\mathbf{x}_T - \bar{\mathbf{x}}_T) + \frac{1}{2} \int_0^T (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^\top \alpha_1 \mathbf{Q}^*(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) + \mathbf{u}_1^\top \mathbf{R} \mathbf{u}_1 dt \quad (3.58a)$$

$$J_2 = \frac{1}{2}(\mathbf{x}_T - \bar{\mathbf{x}}_T)^\top \alpha_{2,T} \mathbf{S}^*(\mathbf{x}_T - \bar{\mathbf{x}}_T) + \frac{1}{2} \int_0^T (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^\top \alpha_2 \mathbf{Q}^*(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) + \mathbf{u}_2^\top \mathbf{R} \mathbf{u}_2 dt, \quad (3.58b)$$

der Systemgleichung

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u}_1 + \mathbf{B} \mathbf{u}_2 \quad (3.58c)$$

und dem Startzustand

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0. \quad (3.58d)$$

Die Transitionsparameter $\alpha_i(t) \in [0, 1]$ geben die Beteiligung der Spieler an der Aufgabe an. Damit die Transitionen ideal gemäß Definition 3.5 erfolgen, muss $\forall t \in [0, T]$ stets gelten:

$$\alpha_2 = 1 - \alpha_1 \quad (3.58e)$$

Die Lösung dieses speziellen Spiels erfolgt analog mit den Verfahren aus Abschnitt 3.2.1 bzw. Abschnitt 3.2.2. Die Modellparameter \mathbf{Q}^* , \mathbf{S}^* und \mathbf{R} lassen sich mit diversen Verfahren aus den Steuer- und Zustandsgrößentrajektorien bei manueller Durchführung ermitteln und die Automation entsprechend auslegen [HSB12, JAB13, LK12, PCC⁺15]. Der Verlauf der Transitionsparameter lässt sich hingegen frei vorgeben und damit auch der Verlauf der Übergabe bestimmen. So kann sowohl die Dauer als auch die Form der Transitionsphase festgelegt werden und situationsspezifische Faktoren, wie die verbleibende Fähigkeit der Automation oder die

Kritikalität der Situation, für die Auswahl des Verlaufs berücksichtigt werden. Weiterhin kann die Reaktion des Menschen sensorisch erfasst und beispielsweise durch eine dazu passende schrittweise Übergabe sichergestellt werden, dass der menschliche Partner in der Lage ist, auf die vorgegebene Transition adäquat zu reagieren. Im Rahmen der Abschlussarbeit [Got16] wurden verschiedene Übergabeverläufe umgesetzt und miteinander verglichen. Nachfolgend soll anhand eines Beispielsystems die Umsetzung von Übergaben mit Hilfe der Modellierung mit einem zeitvarianten Differentialspiel gemäß Definition 3.6 gezeigt werden.

3.4 Simulation der Transitionen zwischen zwei Partnern an einem Beispielsystem

Die in diesem Abschnitt durchgeführte Simulation veranschaulicht, wie mit der Methode aus Abschnitt 3.3 Übergaben modelliert werden können. Dazu werden zunächst das simulierte Szenario und anschließend die Ergebnisse gezeigt.

Simulationsszenario

Als Aufgabenstellung liegt die Positionierung einer Masse m vor, welche mit einer Feder mit Federkonstante c und einem Dämpfer mit Dämpfungskonstante d gelagert ist. Das System ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

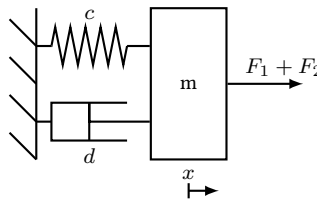


Abbildung 3.2: Prinzipskizze des simulierten Feder-Masse-Dämpfer-Systems

Die beiden Akteure beeinflussen die Position x und die Geschwindigkeit v der Masse, indem sie eine Kraft F_1 bzw. F_2 auf die Masse ausüben. Hieraus ergibt sich folgende Systemgleichung:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{c}{m} & -\frac{d}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} F_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix} F_2 \quad (3.59)$$

Das Ziel jedes Spielers besteht darin, jeweils die Stellgröße zu finden, welche einen Kompromiss aus geringem Abstand zur Zielposition \bar{x} , gewichtet mit q_x , bei gleichzeitig möglichst

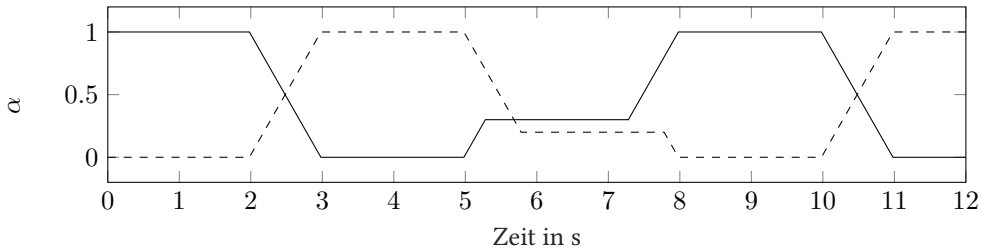


Abbildung 3.3: Transitionsparameterverlauf von Spieler 1 (durchgezogene Linie) und Spieler 2 (gestrichelte Linie) für das Simulationsszenario

niedriger Geschwindigkeit und niedrigem Kraftaufwand, gewichtet mit q_v bzw. r , darstellt. Zusammen mit dem individuellen Transitionsparameter α_i kann das Gütemaß eines Spielers zur Beschreibung dieses Ziels wie folgt formuliert werden:

$$\begin{aligned}
 J_i = & \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_T - \bar{x}_T \\ v_T \end{bmatrix}^\top \alpha_{i,T} \begin{bmatrix} q_x & 0 \\ 0 & q_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_T - \bar{x}_T \\ v_T \end{bmatrix} \\
 & + \frac{1}{2} \int_0^T \begin{bmatrix} x - \bar{x} \\ v \end{bmatrix}^\top \alpha_i \begin{bmatrix} q_x & 0 \\ 0 & q_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - \bar{x} \\ v \end{bmatrix} + r F_i^2 dt \quad (3.60)
 \end{aligned}$$

Für das simulierte Szenario werden drei Transitionen vorgegeben, d.h. die alleinige Durchführung der Aufgabe wechselt drei mal zwischen den beiden Partnern. Die Referenzposition liegt zu Beginn des Szenarios bei $\bar{x} = 1$ m und Spieler 1 beginnt mit der Lösung der Aufgabe ausgehend vom Startzustand $[x_0, v_0]^\top = [0 \text{ m}, 0 \text{ m/s}]^\top$. Es folgen zwei Transitionen, wodurch die Kontrolle zunächst an Spieler 2 und anschließend wieder zurück an Spieler 1 übergeben wird. Die Transitionen unterscheiden sich jedoch in ihrer Form. Bei der ersten Transition gilt die Bedingung (3.57) und der Transitionsparameter α_1 von Spieler 1 fällt im gleichen Maße, wie der Transitionsparameter α_2 von Spieler 2 ansteigt. Dies ist bei der zweiten Übergabe nicht durchgehend der Fall. Stattdessen wurde eine Phase eingefügt, in der α_2 auf 0,2 absinkt, α_1 jedoch nur auf 0,3 ansteigt. Hierdurch wird die Anforderung für eine ideale Transition zeitweise verletzt. Vor der dritten Übergabe ändert sich die Sollposition \bar{x} auf 0 m. Der Verlauf der Transitionsparameter ist ansonsten identisch zur ersten Übergabe und die Anforderung wieder im gesamten Verlauf erfüllt. Abbildung 3.3 zeigt den Transitionsparameterverlauf beider Spieler für das gesamte Simulationsszenario. Die übrigen Parameter wurden gemäß Tabelle 3.1 gewählt.

In der praktischen Anwendung ist die Solltrajektorie üblicherweise abhängig von der aktuellen Situation und nur für einen begrenzten Zeitraum vorhersehbar. Dies wird auch in der Simulation berücksichtigt und ein Prädiktionshorizont der Länge 1 s gewählt. Es wird angenommen,

Parameter	Wert	Einheit
m	0,05	kg
d	0,25	kg/s
c	1	kg/s ²
q_x	3	1/m ²
q_v	0,1	s ² /m ²
r	1	1/N ²

Tabelle 3.1: Werte der System- und Gütemaßparameter für die Simulation

dass sowohl der Verlauf der Solltrajektorie als auch die Verläufe der Transitionsparameter in diesem Zeitraum exakt vorhergesagt werden können. Analog zur modellbasierten Prädiktivregelung erfolgt die Lösung des Optimierungsproblems iterativ über einen gleitenden Horizont. Das bedeutet, dass das Optimierungsproblem zunächst ausgehend vom aktuellen Zustand für einen Zeitraum entsprechend dem Prädiktionshorizont gelöst und diese Lösung für einen Abtastschritt verwendet wird. Anschließend werden die prädizierten Werte und der momentane Zustand aktualisiert und die Lösung für den nächsten Abtastschritt bestimmt [BBM17]. Diese Kombination aus Update der Werte und Berechnung des nächsten optimalen Schritts wird bis zum Ende der Simulation wiederholt. Für die Nutzung in der Praxis besitzt der iterative Ansatz gegenüber einer optimalen Steuerung den weiteren Vorteil, dass Fehler im Modell durch die stetige Aktualisierung des Zustands sofort korrigiert werden und sich nicht über den gesamten Zeitraum aufsummieren.

Die Simulation erfolgte mit einer Abtastzeit von 20 ms in MATLAB/Simulink R2016a auf einem aktuellen Computersystem (Intel Core i7-6600U; 2,81 GHz; 12 GB RAM). Das resultierende Differentialspiel wurde sowohl mit Hamilton- als auch mit dem Batch-Ansatz gelöst, wobei die Diskretisierung des Systems bzw. die numerische Lösung der Differentialgleichung mit dem Euler-Verfahren ebenfalls mit einer Diskretisierungszeit von 20 ms durchgeführt wurden.

Simulationsergebnisse

Die aus dem Simulationsszenario resultierenden Stell- und Zustandsgrößentrajektorien sind in Abbildung 3.4 dargestellt. Die Verläufe zeigen, dass die Unterschiede in der Lösung durch die unterschiedliche Reihenfolge von Diskretisierung und Optimierung bei Hamilton- und Batch-Ansatz gering sind. Die Verfahren heben sich jedoch in der benötigten Zeit pro Berechnung einer Lösung für den Prädiktionshorizont von 1 s voneinander ab. Auf dem gegebenen System ist die Berechnung der optimalen Stellgröße für diesen Zeitraum mit dem Hamilton-Ansatz nach 0,36 ms abgeschlossen, während der Batch-Ansatz hierfür 2,08 ms benötigt.

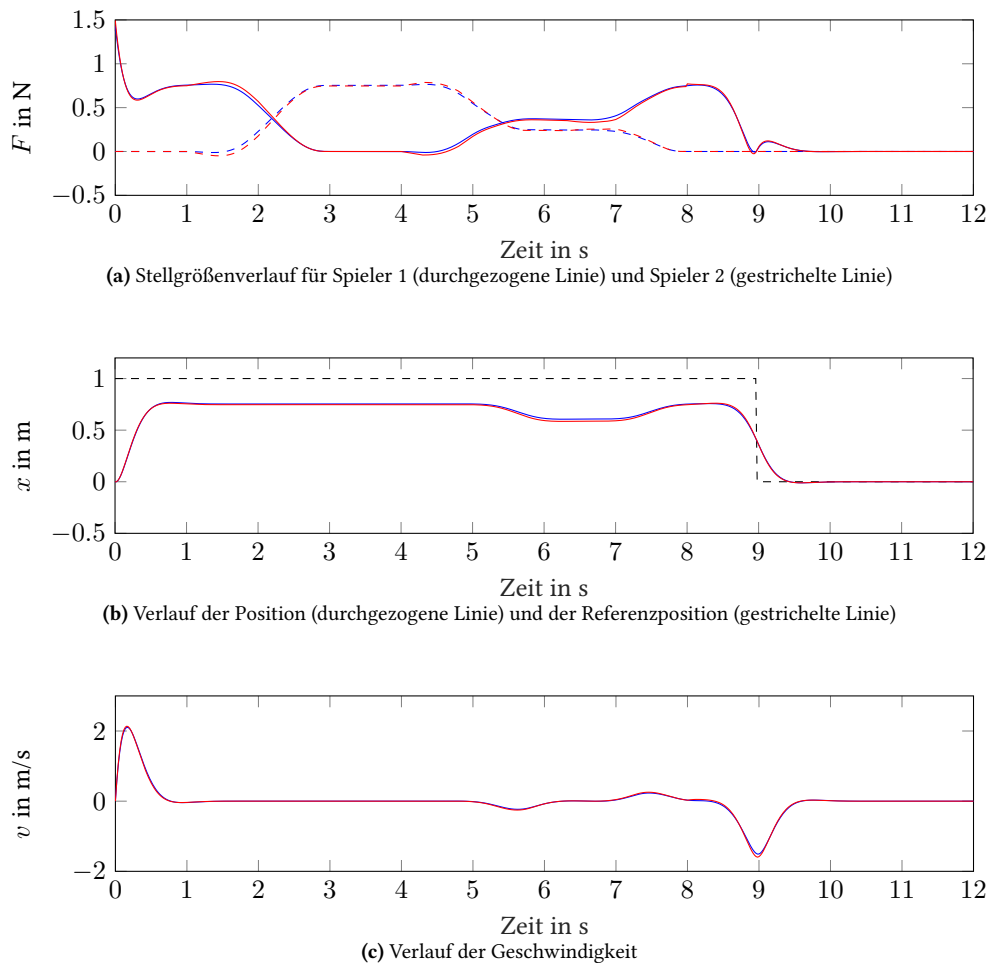


Abbildung 3.4: Simulation des Beispielszenarios unter Verwendung des Hamilton- (rot) und des Batch-Ansatzes (blau)

Da die Ergebnisse jedoch qualitativ identisch sind, wird die nachfolgende Beschreibung der resultierenden Übergaben nicht in die Lösungsverfahren unterteilt. Ausgehend vom Startzustand stellt Spieler 1 zunächst die optimale Stell- und Zustandsgrößenkombination für die alleinige Lösung der Aufgabe ein. Im Beispielsystem stellt sich für die konstante Kraft F der stationäre Zustand $x = \frac{F}{c}$ und $v = 0$ m/s ein. Da bei den gegebenen Parametern der quadratische Abstand zur Zielposition $\bar{x} = 1$ m via q_x dreimal so stark bestraft wird wie das mit r bestrafte Quadrat der aufgebrauchten Kraft, ergibt sich die Position $x = 0,75$ m durch eine Kraft $F_1 = 0,75$ N als optimaler Kompromiss. Diese Kraft muss folglich auch während der Transition von den beiden Kooperationspartnern zusammen aufgebracht werden, damit das System

den optimalen Zustand beibehält und die Transition als ideal gemäß Definition 3.5 bezeichnet werden kann.

Die Übergabe der Aufgabe an Spieler 2 beginnt, sobald die Veränderung der beiden Transitionsparameter α_1 und α_2 im Prädiktionshorizont sichtbar ist, hier also bei $t = 1$ s. Da während dieser ersten Übergabe die Bedingung (3.57) durch den konträren Verlauf von α_1 und α_2 erfüllt ist, bleibt die Summe der aufgebrauchten Kräfte beider Spieler konstant. Folglich bleibt auch das System während der gesamten Übergabe im gleichen Zustand und die Übergabe ist anhand der Systemzustände x und v nicht zu erkennen. Die entstehende Transition ist dementsprechend ideal.

Bei der zweiten Übergabe wird die Bedingung verletzt und Spieler 1 nimmt die Aufgabe nicht im gleichen Maße an, wie Spieler 2 sie abgibt. Durch die Multiplikation der Positionsgewichtung q_x mit 0,2 bzw. 0,3 ist die kombinierte Gewichtung nur noch 1,5 mal so groß wie die Gewichtung des Stellaufwands, wodurch sich der Zustand $x = 0,6$ m und $v = 0$ m/s als neuer optimaler Kompromiss ergibt und sich die Trajektorienfolgequalität somit verschlechtert. Erst ab $t = 7,8$ s, wenn wieder über den gesamten Prädiktionshorizont die Bedingung (3.57) gilt, wird dieselbe Abweichung zur Referenz wie zuvor erreicht.

Vor der dritten Übergabe ändert sich die Zielposition auf $\bar{x} = 0$ m. Da der Zustand $x = 0$ m und $v = 0$ m/s eine Ruhelage des Systems ist, können die Spieler mit $F_i = 0$ der Referenz exakt folgen. Da in diesem Fall jeder nicht-negative Wert von α_i zu $F_i = 0$ führt, können dann anhand der Stellgröße keine Rückschlüsse auf die Übergabeparameter der Spieler gezogen werden.

Die Simulation verdeutlicht, dass es mit der Modellierung über zeitvariante Differentialspiele möglich ist, Übergabeprozesse zwischen zwei Akteuren darzustellen. Die in Abhängigkeit der Transitionsparameter berechneten optimalen Stellgrößen sind für die beiden vorgestellten Lösungsverfahren nahezu identisch, unterscheiden sich jedoch in der Berechnungszeit. Über den Verlauf der Transitionsparameter können verschiedenste Übergabevorgänge realisiert werden. Soll die Erfüllung der Aufgabe während dieses Prozesses unabhängig von der Referenzposition gleich bleiben, müssen die Transitionsparameter konträr verlaufen.

Zusammengefasst wurde in diesem Kapitel das spieltheoretische Konzept der Differentialspiele und deren Lösung vorgestellt. Es wurde gezeigt, wie durch Verwendung zeitvarianter Gütemaße dieses Konzept zur Modellierung von Mensch-Maschine-Interaktion mit wechselnder Aufgabenverteilung verwendet werden kann. Über die Vorgabe der Transitionsparameter kann die Form und Dauer der Übergabe frei gestaltet werden. Dies gestattet eine Wahl des Transitionsverlaufs, die es dem übernehmenden Partner erlaubt, sich an die Situation anzupassen. Eine Alternative zur Vorgabe des Transitionsverlaufs wird im nächsten Kapitel präsentiert.

4 Adaption des Transitionsparameters an die Aktion des Menschen

In dem vorangegangenen Kapitel wurde eine Modellierung der Übergabeprozesse zwischen Mensch und Maschine vorgestellt und der Verlauf der Transition vorgegeben. Dabei ist es für die Anwendung notwendig, dass die Vorgabe in einer Art und Weise erfolgt, die es dem Menschen erlaubt sein eigenes mentales Modell an diese Vorgabe zu adaptieren. Alternativ dazu können diese Rollen auch vertauscht und die Automation so gestaltet werden, dass sie sich an die Involviertheit des Menschen anpasst. Dafür wird ein neues Verfahren benötigt, um zur Laufzeit den Transitionsparameter zu schätzen, der die Aktion des Menschen erklärt. Mit dieser Schätzung kann das Modell der Automation aktualisiert und die menschliche Aktion so ergänzt werden, dass immer eine ideale Transition entsteht. Die Vorstellung des hierfür entwickelten Adaptionsverfahrens ist Gegenstand dieses Kapitels. Dazu wird zunächst in Abschnitt 4.1 das Schätzproblem formuliert. Zur Lösung dieses Problems wird in Abschnitt 4.2 jeweils ein Verfahren hergeleitet, welches auf dem Hamilton- bzw. dem Batch-Ansatz basiert. Ein Vergleich der beiden Verfahren in der Simulation in Abschnitt 4.3 bildet den Abschluss des Kapitels.

4.1 Formulierung des Schätzproblems

Das Ziel des Adaptionsverfahrens lautet, den Transitionsparameter der Automation stets so zu wählen, dass eine ideale Transition gemäß Definition 3.5 zwischen den Partnern abläuft. Entsprechend der Modellierung nach Definition 3.6 wird Spieler 1 im Folgenden als der Partner betrachtet, dessen Transitionsverlauf unbekannt ist und mit α modelliert wird. Der zweite Partner verwendet das Ergebnis der Schätzung, um dann durch den konträren Transitionsverlauf $1 - \alpha$ gemäß Bedingung (3.57) die ideale Transition sicherzustellen.

Die bereits in Abschnitt 2.4 vorgestellten Adaptionsverfahren [SCJ08, LTC⁺15] verwenden den Sonderfall von Differentialspielen mit einem unendlichen Horizont und lassen sich deshalb nicht auf die Modellierung aus Abschnitt 3.3 anwenden. Dennoch wird auch für das hier vorgestellte Verfahren die Idee aufgegriffen, den Fehler e zwischen der zum aktuellen Zeitpunkt t_0 gemessenen Stellgröße \mathbf{u}_{1,t_0} und der für diesen Zeitpunkt prädizierten Stellgröße \mathbf{u}_{1,t_0}^* des Kooperationspartners zu nutzen. Basierend auf diesem Fehler wird das Modell adaptiert und

darauf aufbauend der Transitionsparameter der Automation ergänzt. Die Grundlage für dieses neue Adaptionsverfahren wurde im Rahmen der Masterarbeit [Geb18] geschaffen. Abbildung 4.1 zeigt die um die Adaption erweiterte Regelungsstruktur.

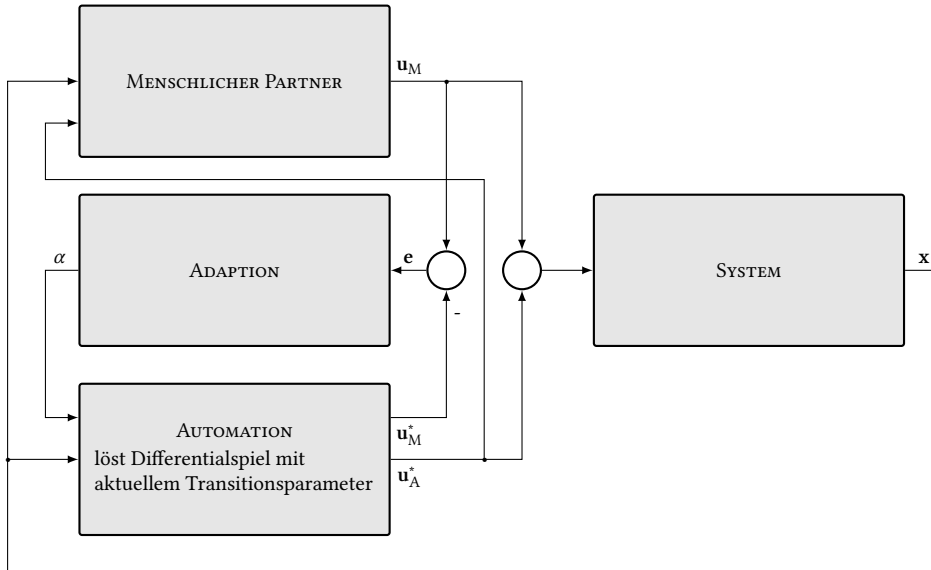


Abbildung 4.1: Erweiterung der Regelungsstruktur um eine Adaption zur Ermittlung des aktuellen Transitionsparameters des Menschen

Für die Adaption wird die folgende quadratische Fehlerfunktion gewählt:

$$E(\alpha) = \frac{1}{2} \mathbf{e}(\alpha)^\top \mathbf{e}(\alpha) = \frac{1}{2} (\mathbf{u}_{1,t_0} - \mathbf{u}_{1,t_0}^*(\alpha))^2 \quad (4.1)$$

Der Wert von \mathbf{u}_{1,t_0}^* hängt vom Verlauf von α über dem gesamten Prädiktionshorizont ab. Das bedeutet, es gibt unendlich viele Verläufe von α , die zu einem solchen \mathbf{u}_{1,t_0}^* führen können. Die Schätzung von α soll jedoch bereits ebenfalls zum Zeitpunkt t_0 auf Basis der aktuellen Messung \mathbf{u}_{1,t_0} erfolgen, da der aktuelle Zustand der Transition direkt für die Automation genutzt werden soll. Aus diesem Grund wird für das Schätzverfahren die Annahme getroffen, dass sich α über dem Prädiktionshorizont nicht verändert und so durch eine Konstante statt durch eine Trajektorie beschrieben werden kann. Da die Berechnungen in der Praxis jedoch iterativ über einen gleitenden Horizont erfolgen (vgl. Abschnitt 3.4), wird die Schätzung trotzdem nach jedem Optimierungsschritt aktualisiert. Durch die ständige Aktualisierung erhält man einen zeitvarianten Gesamtverlauf von α aus der Aneinanderreihung der geschätzten Konstanten.

Die Aufgabe des Adaptionsalgorithmus lautet, den aktuellen Transitionsparameter so anzupassen, dass dieser die Fehlerfunktion (4.1) minimiert:

$$\alpha = \arg \min E(\alpha) \quad (4.2)$$

Anders formuliert soll der konstante Transitionsparameter ermittelt werden, für den die optimale Stellgröße des Modells zum Zeitpunkt t_0 mit der tatsächlich applizierten Stellgröße übereinstimmt. Das hierfür verwendete Lösungsverfahren wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

4.2 Verfahren zur Schätzung des aktuellen Übergabezustands basierend auf der menschlichen Aktion

Zur Lösung des in Gleichung (4.2) beschriebenen Optimierungsproblems wird ein gradientenbasiertes Verfahren eingesetzt. In gradientenbasierten Verfahren wird die Lösung iterativ berechnet, indem der aktuelle Wert durch einen Schritt der Länge s entlang der, mit Hilfe des Gradienten berechneten, Optimierungsrichtung p verbessert wird:

$$\alpha^{(n+1)} = \alpha^{(n)} + s p \quad (4.3)$$

Um eine Schrittweitensteuerung zu vermeiden, die weitere zeitaufwendige Berechnungen von Lösungen des Differentialspiels benötigten würde, wird ein Newton-Verfahren zur Lösung des Optimierungsproblems (4.2) gewählt. In diesem wird die Schrittweite inhärent mitbestimmt und s kann zu 1 gewählt werden [NW06, S.46]. Mit der Optimierungsrichtung p gemäß [NW06, S.44] lautet die Update-Vorschrift des Newton-Verfahrens dann:

$$\alpha^{(n+1)} = \alpha^{(n)} - E''(\alpha^{(n)})^{-1} E'(\alpha^{(n)}) \quad (4.4)$$

Für die Berechnung des Optimums werden also sowohl die erste Ableitung E' als auch die zweite Ableitung E'' der Fehlerfunktion nach α benötigt. Die entsprechenden Berechnungsvorschriften bei Verwendung einer Fehlerfunktion gemäß (4.1) ergeben sich zu

$$\begin{aligned} E'(\alpha) &= \mathbf{e}'(\alpha)^\top \mathbf{e}(\alpha) \\ &= -\frac{d\mathbf{u}_1^*(\alpha)}{d\alpha} (\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_1^*(\alpha)) \end{aligned} \quad (4.5)$$

und

$$\begin{aligned} E''(\alpha) &= \mathbf{e}'(\alpha)^\top \mathbf{e}'(\alpha) + \mathbf{e}''(\alpha)^\top \mathbf{e}(\alpha) \\ &= \left(-\frac{d\mathbf{u}_1^*(\alpha)}{d\alpha} \right)^\top \left(-\frac{d\mathbf{u}_1^*(\alpha)}{d\alpha} \right) - \frac{d^2\mathbf{u}_1^*(\alpha)}{(d\alpha)^2} (\mathbf{u}_1 - \mathbf{u}_1^*(\alpha)). \end{aligned} \quad (4.6)$$

Die Anpassung des Transitionsparameters mit Hilfe der Gleichung (4.4) erfordert somit die Berechnung von \mathbf{u}_1^* , sowie deren erste und zweite Ableitung nach α . Da die Berechnungsformel von \mathbf{u}_1^* davon abhängt, ob der Hamilton- oder der Batch-Ansatz verwendet wird, werden die weiteren Schritte in den nachfolgenden Unterkapiteln getrennt dargestellt.

4.2.1 Berechnung des Schätzwerts basierend auf dem Hamilton-Ansatz

Unter Verwendung der Lösung aus dem Hamilton-Ansatz nach Gleichung (3.22) zur Lösung des Zweispieler LQ-Differentialspiels bei idealer Transition nach Definition 3.6 ergibt sich die erste Ableitung der Stellgröße des ersten Spielers nach α zu

$$\frac{d\mathbf{u}_1^*(\alpha)}{d\alpha} = -\mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}^\top \frac{d\mathbf{P}_1(\alpha)}{d\alpha} \tilde{\mathbf{x}}. \quad (4.7)$$

Die Ableitung $\frac{d\mathbf{P}_1(\alpha)}{d\alpha}$ lässt sich jedoch nicht unmittelbar berechnen, da die Funktion $\mathbf{P}_1(\alpha)$ nicht explizit vorliegt, sondern nur implizit über das Differentialgleichungssystem

$$\dot{\mathbf{P}}_1 = -\tilde{\mathbf{A}}^\top \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_1 \tilde{\mathbf{A}} + \mathbf{P}_1 \mathbf{T} \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_1 \mathbf{T} \mathbf{P}_1 - \alpha \tilde{\mathbf{Q}}^* \quad (4.8a)$$

$$\dot{\mathbf{P}}_2 = -\tilde{\mathbf{A}}^\top \mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{A}} + \mathbf{P}_2 \mathbf{T} \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2 \mathbf{T} \mathbf{P}_2 - (1 - \alpha) \tilde{\mathbf{Q}}^* \quad (4.8b)$$

mit den Endwerten

$$\mathbf{P}_1(T) = \alpha_T \tilde{\mathbf{S}}^* \quad (4.8c)$$

$$\mathbf{P}_2(T) = (1 - \alpha_T) \tilde{\mathbf{S}}^* \quad (4.8d)$$

gegeben ist (vgl. Gleichung (3.21)). Das in den Gleichungen (4.8a) und (4.8b) enthaltene Symbol \mathbf{T} wird in diesem Abschnitt durchgängig als Kurzform für den Ausdruck $\tilde{\mathbf{B}} \mathbf{R}^{-1} \tilde{\mathbf{B}}^\top$ verwendet.

Um die gesuchte Ableitung zu berechnen, hilft der Satz über implizite Funktionen weiter. Der Satz stellt Bedingungen auf, unter denen eine Operatorgleichung

$$\mathcal{F}(\mathbf{u}, \mathbf{v}) = \mathbf{0} \quad (4.9)$$

in der Umgebung eines Punktes (u_0, v_0) , für den die Gleichung (4.9) erfüllt ist, d.h.

$$\mathcal{F}(u_0, v_0) = \mathbf{0} \quad (4.10)$$

gilt, implizit eine Funktion $v = f(u)$ beschreibt. Nach [Zei91, S.250 f.] lautet der Satz:

Satz 4.1 (Satz über implizite Funktionen)

Seien X, Y und Z Banachräume über \mathbb{K} , und sei

$$\mathcal{F} : U(u_0, v_0) \subseteq X \times Y \rightarrow Z$$

eine C^n -Abbildung in einer offenen Umgebung des Punktes (u_0, v_0) , sodass (4.10) erfüllt ist und $1 \leq n \leq \infty$. Unter der Voraussetzung, dass der Operator

$$\mathcal{F}_v(u_0, v_0) : Y \rightarrow Z$$

bijektiv ist, gilt:

1. Es existieren Zahlen $r > 0$ und $\rho > 0$, sodass für jedes gegebene $u \in U$ mit $U := \{u \in X : \|u - u_0\| < \rho\}$ die Gleichung (4.9) eine eindeutige Lösung $v \in Y$ mit $\|v - v_0\| \leq r$ hat. Diese Lösung wird mit $v(u)$ bezeichnet.
2. Die Funktion $u \mapsto v(u)$ ist in U vom Typ C^n . Insbesondere gilt

$$v'(u) = -\mathcal{F}_v(u, v(u))^{-1} \mathcal{F}_u(u, v(u)) \quad \forall u \in U. \quad (4.11)$$

Für den vollständigen Beweis des Satzes sei auf [Zei91, S.251 ff.] verwiesen. Hier soll kurz auf die Gleichung (4.11) eingegangen werden, welche für das Adaptionverfahren von besonderer Bedeutung ist. Wenn nach dem Satz 4.1 eine Funktion $v(u)$ existiert, gilt:

$$\mathcal{F}(u, v(u)) = \mathbf{0} \quad (4.12)$$

Die Differentiation dieses Operators nach u unter Anwendung der Kettenregel ergibt

$$\mathcal{F}_u(u, v(u)) + \mathcal{F}_v(u, v(u)) \circ v'(u) = \mathbf{0}, \quad (4.13)$$

was wiederum mit Hilfe des inversen Operators von $\mathcal{F}_v(u, v(u))$ die Berechnung von $v'(u)$ gemäß (4.11) erlaubt. Damit ist es möglich, die Ableitung einer Funktion zu berechnen, ohne diese explizit zu kennen.

Bevor der Satz über implizite Funktionen nun zur Berechnung von $\frac{\partial P_1(\alpha)}{\partial \alpha}$ angewendet werden kann, muss zunächst noch die hierfür notwendige Fréchet-Ableitung erläutert werden. Die Fréchet-Ableitung stellt eine Erweiterung der Differentialrechnung auf normierte Räume dar. Sie wird über den linearen Anteil einer Zerlegung der Differenz zwischen zwei, sich um den infinitesimal kleinen Wert h unterscheidenden, Operatoren beschrieben. Formal ist die Fréchet-Ableitung nach [Zei91, S.228 f.] definiert zu:

Definition 4.1 (Erste und zweite Fréchet-Ableitung)

Sei $\mathcal{F} : U \subseteq X \rightarrow Y$ ein gegebener Operator, der auf einer offenen Umgebung des Punktes $u \in U$ definiert ist, wobei X und Y Banachräume über \mathbb{K} sind.

1. Das Differential $d\mathcal{F}(u)$ von \mathcal{F} am Punkt u existiert, falls es einen linearen beschränkten Operator der Form

$$d\mathcal{F}(u) : X \rightarrow Y$$

gibt, sodass

$$\mathcal{F}(u + h) - \mathcal{F}(u) = d\mathcal{F}(u)[h] + o(\|h\|), \quad h \rightarrow 0, \quad (4.14)$$

für alle $h \in X$ in einer offenen Umgebung von $h = 0$ in X erfüllt ist.

Das Differential $d\mathcal{F}(u)$ wird erste Fréchet-Ableitung $\mathcal{F}'(u)$ genannt. Weiterhin bezeichnet $d\mathcal{F}(u)[h] \equiv \mathcal{F}'(u)[h]$ den Wert der ersten Fréchet-Ableitung des Operators \mathcal{F} an der Stelle u in Richtung von h .

2. Das zweite Differential $d^2\mathcal{F}(u)$ von \mathcal{F} am Punkt u existiert, falls es einen bilinearen beschränkten Operator der Form

$$d^2\mathcal{F}(u) : X \times X \rightarrow Y$$

gibt, sodass

$$d\mathcal{F}(u + k)[h] - d\mathcal{F}(u)[h] = d^2\mathcal{F}(u)[k, h] + r \quad (4.15)$$

für alle $h \in X$ und alle k in einer offenen Umgebung von $k = 0$ in X erfüllt ist und für das Restglied r

$$\sup_{\|h\| \leq 1} \|r(u; k, h)\| = o(\|k\|), \quad k \rightarrow 0, \quad (4.16)$$

gilt. Analog zur ersten Ableitung wird $d^2\mathcal{F}(u)$ als zweite Fréchet-Ableitung $\mathcal{F}''(u)$ bezeichnet.

Die Fréchet-Ableitung $\mathcal{F}'(u)$ stellt eine Linearisierung des Operators \mathcal{F} an dem Punkt u dar. Eine weitere Linearisierung von $\mathcal{F}'(u)[h]$ an dem Punkt u führt zu dem bilinearen Operator $\mathcal{F}''(u)[k, h]$.

Die Fréchet-Ableitung wird eindeutig durch (4.14) bestimmt und kann, vorausgesetzt sie existiert, durch

$$\mathcal{F}'(u)[h] = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^{-1} [\mathcal{F}(u + \varepsilon h) - \mathcal{F}(u)] \equiv \left. \frac{d}{d\varepsilon} \mathcal{F}(u + \varepsilon h) \right|_{\varepsilon=0} \quad (4.17)$$

berechnet werden.

Analog dazu impliziert die Existenz von $\mathcal{F}''(u)$

$$\mathcal{F}''(u)[k, h] = \left. \frac{d}{d\varepsilon} \mathcal{F}'(u + \varepsilon k)[h] \right|_{\varepsilon=0}. \quad (4.18)$$

Darüber hinaus lassen sich mit den Gleichungen (4.17) und (4.18) im Fall von Operatoren mit mehreren Argumenten auch partielle Ableitungen $\mathcal{F}_{u_i}(u_1, u_2, \dots)$ berechnen, indem die Verschiebung h nur im Argument u_i berücksichtigt wird. Zur Verdeutlichung wird in dieser Arbeit das entsprechende Argument als Index der Verschiebung angegeben, also beispielsweise h_{u_1} bei einer partiellen Ableitung nach u_1 .

Mit Hilfe dieses erweiterten Konzepts der Ableitung und dem Satz über implizite Funktionen lässt sich nun die gesuchte Ableitung ermitteln. Dazu wird zunächst der folgende Operator definiert:

Definition 4.2 (Operator \mathcal{G})

Es sei der Operator \mathcal{G} eine Abbildung der Form

$$\mathcal{G} : U(\alpha_0, (\mathbf{P}_{1,0}, \mathbf{P}_{2,0})) \subseteq X \times Y \rightarrow Z$$

mit

$$X = [0, 1], Y = (C^1[0, T])^{n \times n} \times (C^1[0, T])^{n \times n}, Z = (C^1[0, T])^{n \times n} \times (C^1[0, T])^{n \times n}.$$

Der Operator sei in einer offenen Umgebung des Punktes $(\alpha_0, (\mathbf{P}_{1,0}, \mathbf{P}_{2,0}))$ mit $\alpha_0 \in X$ und $(\mathbf{P}_{1,0}, \mathbf{P}_{2,0}) \in Y$ definiert durch

$$\mathcal{G}(\alpha, (\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)) := \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{P}}_1 + \tilde{\mathbf{A}}^\top \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_1 \tilde{\mathbf{A}} - f(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2) + \alpha \tilde{\mathbf{Q}}^* \\ \dot{\mathbf{P}}_2 + \tilde{\mathbf{A}}^\top \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{A}} - g(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2) + (1 - \alpha) \tilde{\mathbf{Q}}^* \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

mit

$$\begin{aligned} f(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2) &:= \mathbf{P}_1 \mathbf{T} \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_1 \mathbf{T} \mathbf{P}_1, \\ g(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2) &:= \mathbf{P}_2 \mathbf{T} \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2 \mathbf{T} \mathbf{P}_2. \end{aligned}$$

Weiterhin sei \mathcal{G} im Sinne der Fréchet-Ableitung differenzierbar und der Operator der partiellen Fréchet-Ableitung nach $(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)$

$$\mathcal{G}_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)} = \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial (\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)} \quad (4.20)$$

im Punkt $(\alpha_0, (\mathbf{P}_{1,0}, \mathbf{P}_{2,0}))$ bijektiv.

Der Operator enthält die gekoppelten Riccati-Differentialgleichungen (4.8) in der Art, dass die Lösung der Gleichungen bei gegebenem α die Operatorgleichung

$$\mathcal{G}(\alpha, (\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)) = \mathbf{0} \quad (4.21)$$

erfüllt. Der Satz über impliziten Funktionen 4.1 sagt nun aus, dass innerhalb einer offenen Umgebung $V \subset X$ von α_0 und einer offenen Umgebung $W \subset Y$ von $(\mathbf{P}_{1,0}, \mathbf{P}_{2,0})$ eine stetig differenzierbare Abbildung $G : V \rightarrow W$ mit $(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2) = G(\alpha)$ existiert, welche für alle $\alpha \in V$ die folgende Gleichung erfüllt:

$$\mathcal{G}(\alpha, G(\alpha)) = \mathbf{0} \quad (4.22)$$

Berechnung von $\frac{dP_1}{d\alpha}$

Die zur Berechnung von Gleichung (4.7) benötigte Ableitung von P_1 nach α ist ein Bestandteil der ersten Ableitung dieser implizit gegebenen Funktion $G(\alpha)$:

$$G'(\alpha) = \begin{bmatrix} P_{1\alpha} \\ P_{2\alpha} \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} \frac{dP_1}{d\alpha} \\ \frac{dP_2}{d\alpha} \end{bmatrix}$$

Die Ableitung $G'(\alpha)$ kann gemäß (4.11) wiederum durch Differenzieren der Operatorgleichung (4.21) mit Hilfe der Fréchet-Ableitung (4.14) unter Anwendung der mehrdimensionalen Kettenregel analog zu Gleichung (4.13) ermittelt werden:

$$\mathcal{G}_\alpha(\alpha, G(\alpha))[h_\alpha] + \mathcal{G}_{(P_1, P_2)}(\alpha, G(\alpha))[G'(\alpha)[h_\alpha]] = 0 \quad (4.23)$$

für alle $h_\alpha \in X$.

Aus dieser Gleichung ergibt sich folgendes Differentialgleichungssystem zur Berechnung der Komponenten von $G'(\alpha)$:

Lemma 4.1 (Gekoppeltes Differentialgleichungssystem zur Berechnung von $P_{1\alpha}$ und $P_{2\alpha}$)

Die Ableitungen $P_{1\alpha}$ und $P_{2\alpha}$ lassen sich durch Lösen des gekoppelten Differentialgleichungssystems

$$\dot{P}_{1\alpha} = D_1 P_{1\alpha} + P_{1\alpha} C + P_1 T P_{2\alpha} - \tilde{Q}^* \quad (4.24a)$$

$$\dot{P}_{2\alpha} = D_2 P_{2\alpha} + P_{2\alpha} C + P_2 T P_{1\alpha} + \tilde{Q}^* \quad (4.24b)$$

mit den Kurzschreibweisen

$$C := T(P_1 + P_2) - \tilde{A}, \quad (4.24c)$$

$$D_i := P_i T - \tilde{A}^\top \quad (4.24d)$$

und den Endwerten

$$P_{1\alpha}(T) = \tilde{S}^* \quad (4.24e)$$

$$P_{2\alpha}(T) = -\tilde{S}^* \quad (4.24f)$$

bestimmen.

Beweis von Lemma 4.1:

Zum Beweis des Lemmas werden zunächst die einzelnen Summanden von Gleichung (4.23) getrennt betrachtet. Der erste Summand erfordert die Bestimmung der partiellen Ableitung des Operators \mathcal{G} nach dem Skalar α . Gemäß Gleichung (4.17) ergibt sich:

$$\mathcal{G}_\alpha(\alpha, G(\alpha))[h_\alpha] = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^{-1} \underbrace{[\mathcal{G}(\alpha + \varepsilon h_\alpha, G(\alpha)) - \mathcal{G}(\alpha, G(\alpha))]}_{\text{Alle Terme ohne } \alpha \text{ heben sich auf}} \quad (4.25)$$

$$= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^{-1} \left(\begin{bmatrix} (\alpha + \varepsilon h_\alpha) \tilde{\mathbf{Q}}^* \\ (1 - \alpha - \varepsilon h_\alpha) \tilde{\mathbf{Q}}^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \alpha \tilde{\mathbf{Q}}^* \\ (1 - \alpha) \tilde{\mathbf{Q}}^* \end{bmatrix} \right) \quad (4.26)$$

$$= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon h_\alpha \tilde{\mathbf{Q}}^* \\ -\varepsilon h_\alpha \tilde{\mathbf{Q}}^* \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

$$= \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Q}}^* \\ -\tilde{\mathbf{Q}}^* \end{bmatrix} h_\alpha \quad (4.28)$$

Für den zweiten Summanden von Gleichung (4.23) muss der Operator \mathcal{G} zunächst partiell nach $(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)$ differenziert werden und der resultierende Operator anschließend auf $G'(\alpha)[h_\alpha]$ angewendet werden. Zur Berechnung von $\mathcal{G}_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}(\alpha, G(\alpha))$ erfolgt die Verschiebung dieses Mal im Argument $(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)$ entsprechend

$$G + \varepsilon h_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)} := \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 + \varepsilon \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{P}_2 + \varepsilon \mathbf{H}_2 \end{bmatrix}. \quad (4.29)$$

Durch Anwendung der Fréchet-Ableitung gemäß Gleichung (4.17) ergibt sich:

$$\mathcal{G}_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}(\alpha, G(\alpha))[h_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}] = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^{-1} [\underbrace{\mathcal{G}(\alpha, G(\alpha) + \varepsilon h_G) - \mathcal{G}(\alpha, G(\alpha))}_{\text{Alle Terme ohne } \mathbf{P}_1 \text{ bzw. } \mathbf{P}_2 \text{ heben sich auf}}] \quad (4.30)$$

$$= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^{-1} \left(\begin{bmatrix} \frac{d}{d\mathbf{f}}(\mathbf{P}_1 + \varepsilon \mathbf{H}_1) + \tilde{\mathbf{A}}^\top(\mathbf{P}_1 + \varepsilon \mathbf{H}_1) \\ \frac{d}{d\mathbf{f}}(\mathbf{P}_2 + \varepsilon \mathbf{H}_2) + \tilde{\mathbf{A}}^\top(\mathbf{P}_2 + \varepsilon \mathbf{H}_2) \end{bmatrix} \right. \\ \left. + (\mathbf{P}_1 + \varepsilon \mathbf{H}_1) \tilde{\mathbf{A}} - f((\mathbf{P}_1 + \varepsilon \mathbf{H}_1), (\mathbf{P}_2 + \varepsilon \mathbf{H}_2)) \right) \\ \left. + (\mathbf{P}_2 + \varepsilon \mathbf{H}_2) \tilde{\mathbf{A}} - g((\mathbf{P}_1 + \varepsilon \mathbf{H}_1), (\mathbf{P}_2 + \varepsilon \mathbf{H}_2)) \right) \\ - \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{P}}_1 + \tilde{\mathbf{A}}^\top \mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_1 \tilde{\mathbf{A}} - f(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2) \\ \dot{\mathbf{P}}_2 + \tilde{\mathbf{A}}^\top \mathbf{P}_2 + \mathbf{P}_2 \tilde{\mathbf{A}} - g(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2) \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

$$\begin{aligned}
&= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^{-1} \left(\begin{aligned} &\varepsilon \dot{\mathbf{H}}_1 + \tilde{\mathbf{A}}^\top \varepsilon \mathbf{H}_1 + \varepsilon \mathbf{H}_1 \tilde{\mathbf{A}} \\ &\varepsilon \dot{\mathbf{H}}_2 + \tilde{\mathbf{A}}^\top \varepsilon \mathbf{H}_2 + \varepsilon \mathbf{H}_2 \tilde{\mathbf{A}} \\ &-\mathbf{P}_1 \mathbf{T} \mathbf{H}_1 \varepsilon - \mathbf{P}_1 \mathbf{T} \mathbf{H}_2 \varepsilon - \mathbf{H}_1 \mathbf{T} \mathbf{P}_1 \varepsilon - \mathbf{H}_1 \mathbf{T} \mathbf{P}_2 \varepsilon \\ &-\mathbf{P}_2 \mathbf{T} \mathbf{H}_1 \varepsilon - \mathbf{P}_2 \mathbf{T} \mathbf{H}_2 \varepsilon - \mathbf{H}_2 \mathbf{T} \mathbf{P}_1 \varepsilon - \mathbf{H}_2 \mathbf{T} \mathbf{P}_2 \varepsilon \\ &-\mathbf{H}_1 \mathbf{T} \mathbf{H}_1 \varepsilon^2 - \mathbf{H}_1 \mathbf{T} \mathbf{H}_2 \varepsilon^2 \\ &-\mathbf{H}_2 \mathbf{T} \mathbf{H}_1 \varepsilon^2 - \mathbf{H}_2 \mathbf{T} \mathbf{H}_2 \varepsilon^2 \end{aligned} \right) \quad (4.32)
\end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{H}}_1 + (\tilde{\mathbf{A}}^\top - \mathbf{P}_1 \mathbf{T}) \mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_1 (\tilde{\mathbf{A}} - \mathbf{T}(\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2)) - \mathbf{P}_1 \mathbf{T} \mathbf{H}_2 \\ \dot{\mathbf{H}}_2 + (\tilde{\mathbf{A}}^\top - \mathbf{P}_2 \mathbf{T}) \mathbf{H}_2 + \mathbf{H}_2 (\tilde{\mathbf{A}} - \mathbf{T}(\mathbf{P}_1 + \mathbf{P}_2)) - \mathbf{P}_2 \mathbf{T} \mathbf{H}_1 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Wendet man diesen Operator nun auf das Element $G'(\alpha)[h_\alpha]$ an, erhält man unter Nutzung der im Lemma genannten Kurzschreibweisen (4.24c) und (4.24d) für den zweiten Summanden aus Gleichung (4.23)

$$\mathcal{G}_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}(\alpha, G(\alpha))[G'(\alpha)[h_\alpha]] = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{P}}_{1\alpha} h_\alpha - \mathbf{D}_1 \mathbf{P}_{1\alpha} h_\alpha - \mathbf{P}_{1\alpha} h_\alpha \mathbf{C} - \mathbf{P}_1 \mathbf{T} \mathbf{P}_{2\alpha} h_\alpha \\ \dot{\mathbf{P}}_{2\alpha} h_\alpha - \mathbf{D}_2 \mathbf{P}_{2\alpha} h_\alpha - \mathbf{P}_{2\alpha} h_\alpha \mathbf{C} - \mathbf{P}_2 \mathbf{T} \mathbf{P}_{1\alpha} h_\alpha \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

$$= \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{P}}_{1\alpha} - \mathbf{D}_1 \mathbf{P}_{1\alpha} - \mathbf{P}_{1\alpha} \mathbf{C} - \mathbf{P}_1 \mathbf{T} \mathbf{P}_{2\alpha} \\ \dot{\mathbf{P}}_{2\alpha} - \mathbf{D}_2 \mathbf{P}_{2\alpha} - \mathbf{P}_{2\alpha} \mathbf{C} - \mathbf{P}_2 \mathbf{T} \mathbf{P}_{1\alpha} \end{bmatrix} h_\alpha. \quad (4.35)$$

Einsetzen der Summanden (4.28) und (4.35) in (4.23) ergibt das Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{Q}}^* \\ -\tilde{\mathbf{Q}}^* \end{bmatrix} h_\alpha + \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{P}}_{1\alpha} - \mathbf{D}_1 \mathbf{P}_{1\alpha} - \mathbf{P}_{1\alpha} \mathbf{C} - \mathbf{P}_1 \mathbf{T} \mathbf{P}_{2\alpha} \\ \dot{\mathbf{P}}_{2\alpha} - \mathbf{D}_2 \mathbf{P}_{2\alpha} - \mathbf{P}_{2\alpha} \mathbf{C} - \mathbf{P}_2 \mathbf{T} \mathbf{P}_{1\alpha} \end{bmatrix} h_\alpha = 0, \quad (4.36)$$

welches für alle Werte von h_α erfüllt sein muss. Hieraus ergibt sich unmittelbar das Differentialgleichungssystem des Lemmas bestehend aus den Gleichungen (4.24a) und (4.24b). Die zur Lösung erforderlichen Endwerte gemäß (4.24e) und (4.24f) erhält man durch Ableitung der Gleichungen (4.8c) und (4.8d) nach α , wodurch der Beweis des Lemmas 4.1 vollständig ist. \square

Die konkrete Berechnung der Lösung des Differentialgleichungssystems erfolgt erneut numerisch. Gemäß Gleichung (4.7) wird nur $\mathbf{P}_{1\alpha}$ für die Ableitung der Stellgröße u_1 nach α benötigt. Durch Einsetzen von $\mathbf{P}_{1\alpha}$ in (4.7) lässt sich zunächst diese Ableitung und damit schließlich der Gradient der Fehlerfunktion $E'(\alpha)$ nach Gleichung (4.5) berechnen. $\mathbf{P}_{2\alpha}$ wird bei der Berechnung der Lösung des Gleichungssystems ebenfalls bestimmt, aber für den Gradienten nicht benötigt. Die Werte von $\mathbf{P}_{2\alpha}$ sind jedoch für die nachfolgende Berechnung von $\frac{d^2 \mathbf{P}_1}{d\alpha^2}$ notwendig.

Berechnung von $\frac{d^2\mathbf{P}_1}{d\alpha^2}$

Für die Berechnung von $E''(\alpha)$ nach (4.6) wird neben der ersten Ableitung von u_1 nach α auch die zweite Ableitung $\frac{d^2u_1^*(\alpha)}{(d\alpha)^2}$ benötigt. Die erneute Ableitung von Gleichung (4.7) ergibt:

$$\frac{d^2u_1^*(\alpha)}{(d\alpha)^2} = -\mathbf{R}^{-1}\tilde{\mathbf{B}}^\top \frac{d^2\mathbf{P}_1(\alpha)}{(d\alpha)^2} \tilde{\mathbf{x}}. \quad (4.37)$$

Um den Term $\frac{d^2\mathbf{P}_1(\alpha)}{(d\alpha)^2}$ zu bestimmen, wird die Fréchet-Ableitung ein weiteres Mal auf die bereits einmal differenzierte Operatorgleichung (4.23) angewendet und diese partiell nach α abgeleitet. Mit Hilfe der mehrdimensionalen Kettenregel ergibt sich die Gleichung

$$\begin{aligned} & \mathcal{G}_{\alpha\alpha}(\alpha, G(\alpha))[k_\alpha, h_\alpha] \\ & + \mathcal{G}_{\alpha(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}(\alpha, G(\alpha))[G'(\alpha)[k_\alpha], h_\alpha] \\ & + \mathcal{G}_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)\alpha}(\alpha, G(\alpha))[k_\alpha, G'(\alpha)[h_\alpha]] \\ & + \mathcal{G}_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}(\alpha, G(\alpha))[G'(\alpha)[k_\alpha], G'(\alpha)[h_\alpha]] \\ & + \mathcal{G}_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}(\alpha, G(\alpha))[G''(\alpha)[k_\alpha, h_\alpha]] = 0 \end{aligned} \quad (4.38)$$

mit $h_\alpha, k_\alpha \in X$, welche dann innerhalb von

$$G''(\alpha) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{1\alpha\alpha} \\ \mathbf{P}_{2\alpha\alpha} \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} \frac{d^2\mathbf{P}_1}{(d\alpha)^2} \\ \frac{d^2\mathbf{P}_2}{(d\alpha)^2} \end{bmatrix}$$

die gesuchte Ableitung enthält. Die Komponenten von $G''(\alpha)$ lassen sich mit Hilfe des folgenden Lemmas berechnen:

Lemma 4.2 (Gekoppeltes Differentialgleichungssystem zur Berechnung von $\mathbf{P}_{1\alpha\alpha}$ und $\mathbf{P}_{2\alpha\alpha}$)

Die Ableitungen $\mathbf{P}_{1\alpha\alpha}$ und $\mathbf{P}_{2\alpha\alpha}$ lassen sich durch Lösen des gekoppelten Differentialgleichungssystems

$$\dot{\mathbf{P}}_{1\alpha\alpha} = \mathbf{P}_{1\alpha\alpha}\mathbf{C} + \mathbf{D}_1\mathbf{P}_{1\alpha\alpha} + \mathbf{P}_1\mathbf{T}\mathbf{P}_{2\alpha\alpha} + 2\mathbf{P}_{1\alpha}\mathbf{T}(\mathbf{P}_{1\alpha} + \mathbf{P}_{2\alpha}) \quad (4.39a)$$

$$\dot{\mathbf{P}}_{2\alpha\alpha} = \mathbf{P}_{2\alpha\alpha}\mathbf{C} + \mathbf{D}_2\mathbf{P}_{2\alpha\alpha} + \mathbf{P}_2\mathbf{T}\mathbf{P}_{1\alpha\alpha} + 2\mathbf{P}_{2\alpha}\mathbf{T}(\mathbf{P}_{1\alpha} + \mathbf{P}_{2\alpha}) \quad (4.39b)$$

mit C und D_i gemäß Gleichung (4.24c) bzw. (4.24d) und den Endwerten

$$P_{1\alpha\alpha}(T) = \mathbf{0} \quad (4.39c)$$

$$P_{2\alpha\alpha}(T) = \mathbf{0} \quad (4.39d)$$

bestimmen.

Beweis von Lemma 4.2:

Das Differentialgleichungssystem (4.39) folgt aus Gleichung (4.38). Es werden erneut zuerst die einzelnen Summanden dieser Gleichung bestimmt und anschließend gezeigt, dass deren Summe zu oben genanntem Lemma führt.

Da \mathcal{G}_α weder von α noch von dem Element (P_1, P_2) abhängt (vgl. Gleichung (4.28)), gilt für die ersten beiden Summanden

$$\mathcal{G}_{\alpha\alpha}(\alpha, G(\alpha))[k_\alpha, h_\alpha] = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (4.40)$$

und

$$\mathcal{G}_{\alpha(P_1, P_2)}(\alpha, G(\alpha))[G'(\alpha)[k_\alpha], h_\alpha] = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}. \quad (4.41)$$

Auch für den dritten Summand gilt

$$\mathcal{G}_{(P_1, P_2)\alpha}(\alpha, G(\alpha))[k_\alpha, G'(\alpha)[h_\alpha]] = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad (4.42)$$

da $\mathcal{G}_{(P_1, P_2)}(\alpha, G(\alpha))$ gemäß Gleichung (4.33) keine explizite Abhängigkeit von α besitzt. Somit verbleiben nur die letzten beiden Summanden, sodass sich (4.38) zu

$$\mathcal{G}_{(P_1, P_2)(P_1, P_2)}(\alpha, G(\alpha))[G'(\alpha)[k_\alpha], G'(\alpha)[h_\alpha]] + \mathcal{G}_{(P_1, P_2)}(\alpha, G(\alpha))[G''(\alpha)[k_\alpha, h_\alpha]] = 0 \quad (4.43)$$

vereinfacht.

Zur Berechnung von $\mathcal{G}_{(P_1, P_2)(P_1, P_2)}(\alpha, G(\alpha))$ muss die partielle Fréchet-Ableitung bzgl. (P_1, P_2) zweimal auf $\mathcal{G}(\alpha, G(\alpha))$ angewendet werden. Im Beweis von Lemma 4.1 wurde bereits der einmal abgeleitete Operator $\mathcal{G}_{(P_1, P_2)}(\alpha, G(\alpha))[h_{(P_1, P_2)}]$ benötigt, welcher in Gleichung (4.33) gege-

ben ist. Wendet man analog zu Gleichung (4.18) die partielle Fréchet-Ableitung bzgl. $(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)$ mit

$$G + \varepsilon k_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)} := \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 + \varepsilon \mathbf{K}_1 \\ \mathbf{P}_2 + \varepsilon \mathbf{K}_2 \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

auf diesen Operator an, ergibt sich:

$$\begin{aligned} & \mathcal{G}_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}(\alpha, G(\alpha))[k_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}, h_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}] \\ &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^{-1} \underbrace{[\mathcal{G}_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}(\alpha, G(\alpha) + \varepsilon k_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)})[h_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}] - \mathcal{G}_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}(\alpha, G(\alpha))[h_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}]}_{\text{Alle Terme ohne } \mathbf{P}_1 \text{ bzw. } \mathbf{P}_2 \text{ heben sich auf}} \end{aligned} \quad (4.45)$$

$$\begin{aligned} &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^{-1} \left(\begin{bmatrix} -(\mathbf{P}_1 + \varepsilon \mathbf{K}_1)\mathbf{TH}_1 - \mathbf{H}_1\mathbf{T}(\mathbf{P}_1 + \varepsilon \mathbf{K}_1) - \mathbf{H}_1\mathbf{T}(\mathbf{P}_2 + \varepsilon \mathbf{K}_2) - (\mathbf{P}_1 + \varepsilon \mathbf{K}_1)\mathbf{TH}_2 \\ -(\mathbf{P}_2 + \varepsilon \mathbf{K}_2)\mathbf{TH}_2 - \mathbf{H}_2\mathbf{T}(\mathbf{P}_2 + \varepsilon \mathbf{K}_2) - \mathbf{H}_2\mathbf{T}(\mathbf{P}_1 + \varepsilon \mathbf{K}_1) - (\mathbf{P}_2 + \varepsilon \mathbf{K}_2)\mathbf{TH}_1 \end{bmatrix} \right. \\ &\quad \left. - \begin{bmatrix} -\mathbf{P}_1\mathbf{TH}_1 - \mathbf{H}_1\mathbf{TP}_1 - \mathbf{H}_1\mathbf{TP}_1 - \mathbf{P}_1\mathbf{TH}_2 \\ -\mathbf{P}_2\mathbf{TH}_2 - \mathbf{H}_2\mathbf{TP}_2 - \mathbf{H}_2\mathbf{TP}_2 - \mathbf{P}_2\mathbf{TH}_1 \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (4.46)$$

$$= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \varepsilon^{-1} \left(\begin{bmatrix} -\varepsilon \mathbf{K}_1\mathbf{TH}_1 - \varepsilon \mathbf{H}_1\mathbf{TK}_1 - \varepsilon \mathbf{H}_1\mathbf{TK}_2 - \varepsilon \mathbf{K}_1\mathbf{TH}_2 \\ -\varepsilon \mathbf{K}_2\mathbf{TH}_2 - \varepsilon \mathbf{H}_2\mathbf{TK}_2 - \varepsilon \mathbf{H}_2\mathbf{TK}_1 - \varepsilon \mathbf{K}_2\mathbf{TH}_1 \end{bmatrix} \right) \quad (4.47)$$

$$= \begin{bmatrix} -\mathbf{K}_1\mathbf{TH}_1 - \mathbf{H}_1\mathbf{TK}_1 - \mathbf{H}_1\mathbf{TK}_2 - \mathbf{K}_1\mathbf{TH}_2 \\ -\mathbf{K}_2\mathbf{TH}_2 - \mathbf{H}_2\mathbf{TK}_2 - \mathbf{H}_2\mathbf{TK}_1 - \mathbf{K}_2\mathbf{TH}_1 \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

In Gleichung (4.43) wird dieser Operator in der Art verwendet, dass für das Argument $k_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}$ der Wert $G'(\alpha)[k_\alpha]$ und für das Argument $h_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}$ der Wert $G'(\alpha)[h_\alpha]$ genutzt wird. Für diesen Fall erhält man:

$$\begin{aligned} & \mathcal{G}_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}(\alpha, G(\alpha))[G'(\alpha)[k_\alpha], G'(\alpha)[h_\alpha]] \\ &= \begin{bmatrix} -2\mathbf{P}_{1\alpha}\mathbf{TP}_{1\alpha} - 2\mathbf{P}_{1\alpha}\mathbf{TP}_{2\alpha} \\ -2\mathbf{P}_{2\alpha}\mathbf{TP}_{2\alpha} - 2\mathbf{P}_{2\alpha}\mathbf{TP}_{1\alpha} \end{bmatrix} k_\alpha h_\alpha \end{aligned} \quad (4.49)$$

Der letzte Term $\mathcal{G}_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}(\alpha, G(\alpha))[G''(\alpha)[k_\alpha, h_\alpha]]$ beschreibt genau den in (4.33) bereits berechneten Operator, diesmal jedoch angewendet auf $G''(\alpha)[k_\alpha, h_\alpha]$ und ergibt sich somit zu

$$\begin{aligned} & \mathcal{G}_{(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2)}(\alpha, G(\alpha))[G''(\alpha)[k_\alpha, h_\alpha]] \\ &= \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{P}}_{1\alpha\alpha} - \mathbf{D}_1\mathbf{P}_{1\alpha\alpha} - \mathbf{P}_{1\alpha\alpha}\mathbf{C} - \mathbf{P}_1\mathbf{TP}_{2\alpha\alpha} \\ \dot{\mathbf{P}}_{2\alpha\alpha} - \mathbf{D}_2\mathbf{P}_{2\alpha\alpha} - \mathbf{P}_{2\alpha\alpha}\mathbf{C} - \mathbf{P}_2\mathbf{TP}_{1\alpha\alpha} \end{bmatrix} k_\alpha h_\alpha, \end{aligned} \quad (4.50)$$

wobei wieder die Kurzschreibweisen aus den Gleichungen (4.24c) und (4.24d) verwendet werden. Die Summe der beiden Terme (4.49) und (4.50) muss für alle k_α und h_α gleich Null sein,

d.h. $\mathbf{P}_{1\alpha}$ lässt sich als Teil der Lösung des in Lemma 4.2 beschriebenen Differentialgleichungssystems bestehend aus (4.39a) und (4.39b) berechnen. Die zur Lösung notwendigen Endwerte ergeben sich unmittelbar durch Differentiation der Gleichungen (4.24e) und (4.24f) nach α . \square

Mit diesem Differentialgleichungssystem steht nun eine Berechnungsvorschrift für $\mathbf{P}_{1\alpha}$ zur Verfügung, welche zunächst in Gleichung (4.37) eingesetzt und deren Ergebnis dann zur Berechnung von $E''(\alpha)$ nach Gleichung (4.6) verwendet werden kann.

Folglich müssen für die Adaption mit dem Newton-Verfahren unter Anwendung der Lösung mit dem Hamilton-Ansatz neben dem Differentialgleichungssystem zur initialen Lösung des Differentialspiels (4.8) für jede der Ableitungen jeweils ein weiteres Differentialgleichungssystem entsprechend (4.24) bzw. (4.39) gelöst werden. Alternativ kann zur Schätzung des zur Aktion von Spieler 1 passenden Transitionsparameters auch der Batch-Ansatz verwendet werden. Die hierzu notwendigen Schritte zeigt der nächste Abschnitt.

4.2.2 Berechnung des Schätzwerts basierend auf dem Batch-Ansatz

Wird der Batch-Ansatz verwendet, um das Differentialspiel mit der Bedingung der idealen Transition (vgl. Definition 3.6) zu lösen, ergibt sich

$$\begin{bmatrix} \vec{u}_1^* \\ \vec{u}_2^* \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \vec{H}^\top \alpha \vec{Q} \vec{H} + \vec{R} & \vec{H}^\top \alpha \vec{Q} \vec{H} \\ \vec{H}^\top (1 - \alpha) \vec{Q} \vec{H} & \vec{H}^\top (1 - \alpha) \vec{Q} \vec{H} + \vec{R} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \vec{H}^\top \alpha \vec{Q} (\vec{\Phi}_{\mathbf{x}_0} - \vec{x}) \\ \vec{H}^\top (1 - \alpha) \vec{Q} (\vec{\Phi}_{\mathbf{x}_0} - \vec{x}) \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

mit

$$\vec{Q} = \begin{bmatrix} \tau \mathbf{Q}^* & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \tau \mathbf{Q}^* & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{S}^* \end{bmatrix}$$

als Spezialfall von Gleichung (3.32).

Es ist theoretisch möglich, diese Gleichung direkt nach α umzustellen und so eine explizite Funktion des Transitionsparameters in Abhängigkeit der gemessenen Stellgröße des ersten Partners zu erhalten. Entsprechende Verfahren wurden in der Masterarbeit [Liu18] untersucht, mit dem Ergebnis, dass diese nur begrenzt in der Praxis einsetzbar sind, da die in den Verfahren notwendige Invertierung von schlecht konditionierten Matrizen numerische Probleme erzeugt. Stattdessen wird auch für diesen Lösungsansatz eine iterative Berechnung von α mit Hilfe des, zu Beginn des Abschnitts vorgestellten, Newton-Verfahrens empfohlen.

Die zur Berechnung von (4.5) bzw. (4.6) benötigte Stellgröße $\mathbf{u}_1^*(\alpha)$ findet sich als erster Eintrag des Vektors $\vec{\mathbf{u}}_1^*$ wieder. Da durch die Diskretisierung ein expliziter Zusammenhang von \mathbf{u}_1^* und α gegeben ist, lassen sich die erste und zweite Ableitung $\frac{d\mathbf{u}_1^*(\alpha)}{d\alpha}$ bzw. $\frac{d^2\mathbf{u}_1^*(\alpha)}{(d\alpha)^2}$ hier direkt, d.h. ohne Anwendung des Satzes über implizite Funktionen, berechnen. Auch die Fréchet-Ableitung wird in diesem Fall nicht benötigt. Stattdessen wird der gesamte Vektor ein- bzw. zweimal mit den Rechenregeln für die Differentiation von Vektoren und Matrizen nach einem Skalar, in diesem Fall nach α , abgeleitet und im Anschluss jeweils der erste Eintrag dieser Vektoren für die Berechnung von (4.5) und (4.6) genutzt. Für die erste Ableitung von (4.51) ergibt sich:

Lemma 4.3 (Erste Ableitung des Stellgrößenvektors nach α)

Die erste Ableitung des Stellgrößenvektors $\begin{bmatrix} \vec{\mathbf{u}}_1^* \\ \vec{\mathbf{u}}_2^* \end{bmatrix}$ nach α berechnet sich zu

$$\frac{\partial \begin{bmatrix} \vec{\mathbf{u}}_1^* \\ \vec{\mathbf{u}}_2^* \end{bmatrix}}{\partial \alpha} = \vec{\mathbf{M}}^{-1} \frac{\partial \vec{\mathbf{M}}}{\partial \alpha} \vec{\mathbf{M}}^{-1} \vec{\mathbf{m}} - \vec{\mathbf{M}}^{-1} \frac{\partial \vec{\mathbf{m}}}{\partial \alpha} \quad (4.52a)$$

mit

$$\vec{\mathbf{M}} = \begin{bmatrix} \vec{\mathbf{H}}^\top \alpha \vec{\mathbf{Q}} \vec{\mathbf{H}} + \vec{\mathbf{R}} & \vec{\mathbf{H}}^\top \alpha \vec{\mathbf{Q}} \vec{\mathbf{H}} \\ \vec{\mathbf{H}}^\top (1 - \alpha) \vec{\mathbf{Q}} \vec{\mathbf{H}} & \vec{\mathbf{H}}^\top (1 - \alpha) \vec{\mathbf{Q}} \vec{\mathbf{H}} + \vec{\mathbf{R}} \end{bmatrix}, \quad (4.52b)$$

$$\vec{\mathbf{m}} = \begin{bmatrix} \vec{\mathbf{H}}^\top \alpha \vec{\mathbf{Q}} (\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 - \vec{\mathbf{x}}) \\ \vec{\mathbf{H}}^\top (1 - \alpha) \vec{\mathbf{Q}} (\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 - \vec{\mathbf{x}}) \end{bmatrix}, \quad (4.52c)$$

$$\frac{\partial \vec{\mathbf{M}}}{\partial \alpha} = \begin{bmatrix} \vec{\mathbf{H}}^\top \vec{\mathbf{Q}} \vec{\mathbf{H}} & \vec{\mathbf{H}}^\top \vec{\mathbf{Q}} \vec{\mathbf{H}} \\ -\vec{\mathbf{H}}^\top \vec{\mathbf{Q}} \vec{\mathbf{H}} & -\vec{\mathbf{H}}^\top \vec{\mathbf{Q}} \vec{\mathbf{H}} \end{bmatrix} \quad (4.52d)$$

und

$$\frac{\partial \vec{\mathbf{m}}}{\partial \alpha} = \begin{bmatrix} \vec{\mathbf{H}}^\top \vec{\mathbf{Q}} (\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 - \vec{\mathbf{x}}) \\ -\vec{\mathbf{H}}^\top \vec{\mathbf{Q}} (\vec{\Phi} \mathbf{x}_0 - \vec{\mathbf{x}}) \end{bmatrix}. \quad (4.52e)$$

Die Invertierbarkeit von $\vec{\mathbf{M}}$ ist dabei bereits Voraussetzung für die Berechnung des Stellgrößenvektors nach Gleichung (4.51).

Beweis von Lemma 4.3:

Unter Verwendung der Notation (4.52b) und (4.52c) kann Gleichung (4.51) umgeschrieben werden zu

$$\begin{bmatrix} \vec{u}_1^* \\ \vec{u}_2^* \end{bmatrix} = -\vec{M}^{-1} \vec{m}. \quad (4.53)$$

Für die Ableitung dieser Gleichung nach α mit Hilfe der Produktregel ergibt sich

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} \begin{bmatrix} \vec{u}_1^* \\ \vec{u}_2^* \end{bmatrix} = -\frac{\partial(\vec{M}^{-1})}{\partial \alpha} \vec{m} - \vec{M}^{-1} \frac{\partial \vec{m}}{\partial \alpha}. \quad (4.54)$$

Eine Vorschrift zur Berechnung von $\frac{\partial(\vec{M}^{-1})}{\partial \alpha}$ erhält man, indem man die Gleichung

$$\vec{M} \vec{M}^{-1} = \mathbf{I} \quad (4.55)$$

ebenfalls durch Anwendung der Produktregel nach α ableitet. Das Ergebnis hiervon lautet:

$$\frac{\partial \vec{M}}{\partial \alpha} \vec{M}^{-1} + \vec{M} \frac{\partial(\vec{M}^{-1})}{\partial \alpha} = \mathbf{0} \quad (4.56)$$

Durch Umstellen von (4.56) nach $\frac{\partial(\vec{M}^{-1})}{\partial \alpha}$ und Einsetzen in (4.54) folgt schließlich Gleichung (4.52a). Um den Beweis zu vervollständigen, fehlen noch die Berechnungsvorschriften für $\frac{\partial \vec{M}}{\partial \alpha}$ und $\frac{\partial \vec{m}}{\partial \alpha}$.

Laut [Gen17, S. 190 f.] ergibt sich die Ableitung einer Matrix oder eines Vektors nach einem Skalar durch die Ableitung jedes Elements der Struktur in derselben Struktur. Angewendet auf die Elemente der Matrix \vec{M} bzw. des Vektors \vec{m} aus (4.52b) bzw. (4.52c) ergeben sich so die Gleichungen (4.52d) und (4.52e). \square

Zur Berechnung der zweiten Ableitung der Fehlerfunktion (4.6) muss auch (4.52a) ein weiteres Mal abgeleitet werden.

Lemma 4.4 (Zweite Ableitung des Stellgrößenvektors nach α)

Die zweite Ableitung des Stellgrößenvektors $\begin{bmatrix} \vec{u}_1^* \\ \vec{u}_2^* \end{bmatrix}$ nach α berechnet sich zu

$$\frac{\partial^2 \begin{bmatrix} \vec{u}_1^* \\ \vec{u}_2^* \end{bmatrix}}{\partial \alpha^2} = 2\vec{M}^{-1} \frac{\partial \vec{M}}{\partial \alpha} \vec{M}^{-1} \left(\frac{\partial \vec{m}}{\partial \alpha} - \frac{\partial \vec{M}}{\partial \alpha} \vec{M}^{-1} \vec{m} \right), \quad (4.57)$$

wobei \vec{M} , \vec{m} , $\frac{\partial \vec{M}}{\partial \alpha}$ und $\frac{\partial \vec{m}}{\partial \alpha}$ in den entsprechenden Gleichungen (4.52b), (4.52c), (4.52d) und (4.52e) gegeben sind.

Beweis von Lemma 4.4:

Die Gleichung (4.57) ergibt sich unmittelbar, indem erneut die Produktregel sowie die Berechnungsvorschrift zur Bestimmung der Ableitung einer inversen Matrix gemäß (4.56) auf Gleichung (4.52a) angewendet werden. \square

Jeweils die ersten Einträge von (4.52a) und (4.57) können dann zur Berechnung von (4.5) und (4.6) verwendet und so α gemäß (4.4) adaptiert werden.

Damit wurde sowohl für die Lösung des Differentialspiels mit dem Hamilton-Ansatz als auch für die Lösung über den Batch-Ansatz eine Möglichkeit gefunden, wie der unbekannte Transitionsparameter aus der Aktion des Partners geschätzt werden kann. Unter Verwendung dieser Schätzung kann die Automation im Anschluss so an den Partner adaptiert werden, dass alle Transitionen ideal verlaufen.

Auch wenn die Berechnungen für die Adaption mit dem Batch-Ansatz auf den ersten Blick einfacher erscheinen als bei der Adaption mit dem Hamilton-Ansatz, erzeugen die Multiplikationen der über den Prädiktionshorizont dargestellten Matrizen einen hohen Rechenaufwand. Dies zeigt auch der nachfolgende Abschnitt, in dem die beiden Verfahren in einer Simulation miteinander verglichen werden.

4.3 Simulation zur Adaption an einen Partner in einem Beispielsystem

Die nachfolgende Simulation zeigt die Fähigkeit des in den vorherigen Abschnitten präsentierten Adaptionsverfahrens, den Transitionsparameter des Kooperationspartners zu ermitteln. Nachfolgend wird zunächst das Simulationsszenario beschrieben und zwei Varianten vorgestellt, nach denen die Messgröße generiert wird. Die beiden Varianten unterscheiden sich darin, in wie weit die in der Herleitung des Adaptionsalgorithmus getroffenen Annahmen erfüllt sind. Im Anschluss werden die Simulationsergebnisse, getrennt nach der Methode für die Messwerterzeugung, gezeigt und jeweils die Adaptionsmethoden basierend auf dem Hamilton- und dem Batch-Ansatz miteinander verglichen.

Simulationsszenario

Als System wird hier ebenfalls das Feder-Dämpfer-System aus Abschnitt 3.4 verwendet. Das Szenario ist so gestaltet, dass Spieler 1 die Stellgröße vorgibt, während Spieler 2 aus diesem Wert den aktuellen Transitionsparameter schätzt. Der so ermittelte Transitionsparameter wird auf Werte zwischen 0 und 1 begrenzt und damit sichergestellt, dass Verhalten, welches der Modellierung entgegensteht ($\alpha_1 < 0$) bzw. deren Leistung übertrifft ($\alpha_1 > 1$), auf keine Reaktion ($\alpha_1 = 0$) bzw. Verhalten, wie in der alleinigen Durchführung der Aufgabe ($\alpha_1 = 1$), abgebildet wird. Spieler 2 wählt daraufhin durch Anpassung seines Gütemaßes die passende Aktion für eine ideale Transition. Als Ausgangspunkt für die Adaptionsverfahren muss folglich zuerst die Stellgröße des ersten Spielers als fiktiver Messwert generiert werden. Zur Erzeugung wird ein Differentialspiel mit dem Systemmodell gemäß Gleichung (3.59) und Gütemaßen gemäß Gleichung (3.60) verwendet. Das Differentialspiel wird dabei mit dem jeweils gleichen Verfahren gelöst, das auch für die Adaption verwendet wird.

Wie in der Simulation aus Abschnitt 3.4 erwartet Spieler 1 drei Transitionen: Eine erste Übergabe mit linearem Abfall des Transitionsparameters über 1 s, eine zweite Übergabe mit einem Plateau bei $\alpha = 0,3$ und eine letzte Übergabe, deren Transitionsverlauf identisch zur Ersten ist. Für die Generierung des Messwerts wird angenommen, dass der Transitionsparameter des Mitspielers entgegengesetzt verläuft. Erfüllt der adaptierende Spieler diese Vorgabe sind die resultierenden Transitionen folglich ideal (vgl. Definition 3.6). Der Verlauf der Transitionsparameter für die Generierung des fiktiven Messwerts ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

Die Referenzposition liegt während der ersten beiden Transitionen bei 1 m, für die dritte Transition bei 0 m. Die Parameter des Systems und der Gütemaße werden identisch zur vorherigen Simulation in Abschnitt 3.4 gewählt und sind in der dort angegebenen Tabelle 3.1 aufgeführt. Die Optimierung wird ebenfalls wie zuvor über einen gleitenden Horizont der Länge 1 s bei

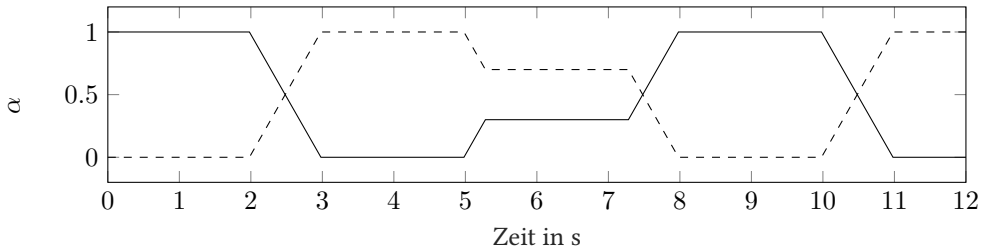


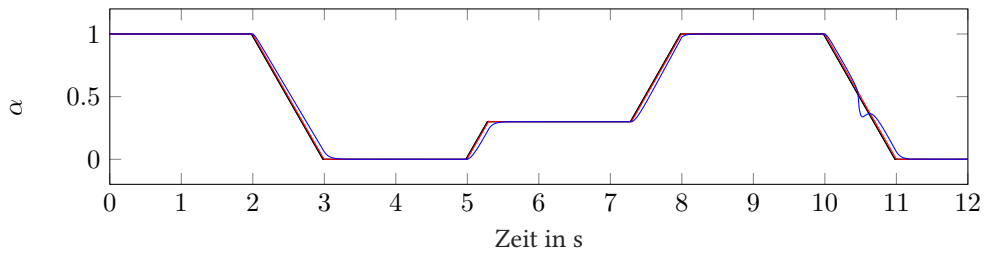
Abbildung 4.2: Transitionsparameterverlauf für Spieler 1 (durchgezogene Linie) und Spieler 2 (gestrichelte Linie) im Differentialspiel zur Generierung der vorgegebenen Aktion für das Simulationsszenario

einer Diskretisierungszeit von 20 ms in MATLAB/Simulink R2016a auf demselben Computersystem (Intel Core i7-6600U; 2,81 GHz; 12 GB RAM) durchgeführt.

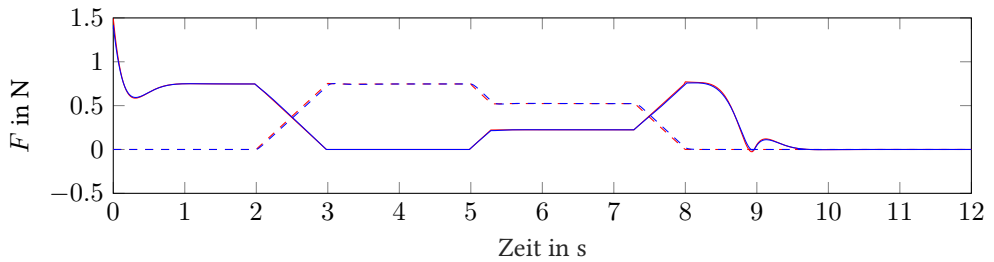
Dieses Szenario wird sowohl für das auf dem Hamilton-Ansatz basierende als auch für das auf dem Batch-Ansatz basierende Adaptionsverfahren zweimal simuliert. Die beiden Durchgänge unterscheiden sich in der Art und Weise, wie aus den Transitionsparameterverläufen die Stellgröße von Spieler 1 erzeugt wird. In der ersten Variante werden die momentanen Werte der Transitionsparameter für den gesamten Horizont der gegenwärtigen Optimierung verwendet. Der fiktive Messwert wird somit durch einem konstanten Transitionsparameter erzeugt. Dies entspricht der Annahme, die auch für die Schätzung getroffen wurde (vgl. Abschnitt 4.1). Erst einen Abtastschritt später wird der Wert aktualisiert und für den nächsten Optimierungshorizont verwendet. In der zweiten Variante wird stattdessen der zukünftige Verlauf von α korrekt vorhergesagt und somit die exakten Werte für die Messwerterzeugung verwendet. Die Ergebnisse der beiden Varianten werden in den folgenden Abschnitten nacheinander gezeigt.

Simulationsergebnisse bei Generierung des Messwerts mit konstantem Transitionsparameter über dem Optimierungshorizont

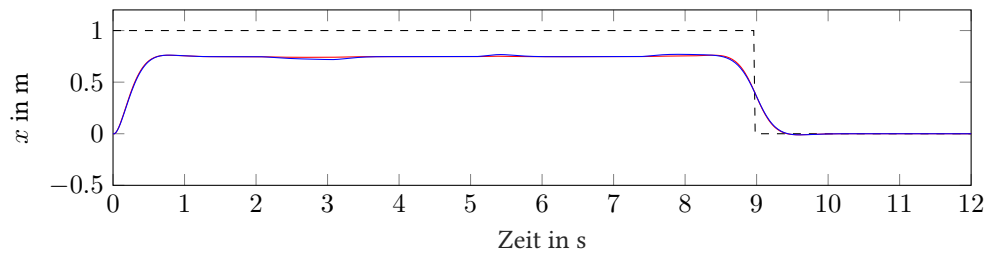
Abbildung 4.3 zeigt das Ergebnis der Simulation für die Variante mit konstantem Transitionsparameter über dem Optimierungshorizont. Es ist zu erkennen, dass das Adaptionsverfahren mit dem Hamilton-Ansatz den vorgegebenen Transitionsparameterverlauf nahezu identisch nachbildet. Der Betrag des Fehlers in α beträgt im Mittel nur 0,004 bei einem Maximalwert von 0,023. Damit gelingt es, den Verlauf für den zweiten Spieler so zu wählen, dass nahezu ideale Transitionen entstehen. Die optimalen stationären Positionen, die für eine ideale Transition erzielt werden sollten, betragen 0,75 m für die ersten beiden Transitionen und 0 m für die dritte Transition. Während der Übergabeprozesse beträgt die Abweichung der Istposition zu den zugehörigen optimalen Positionen maximal 0,01 m. Wird der Batch-Ansatz zur Durchführung der Adaption verwendet, ist die Schätzung von α geringfügig schlechter. Der Betrag des Fehlers liegt im Schnitt bei 0,016 mit einem Maximalwert von 0,127 während der dritten Übergabe.



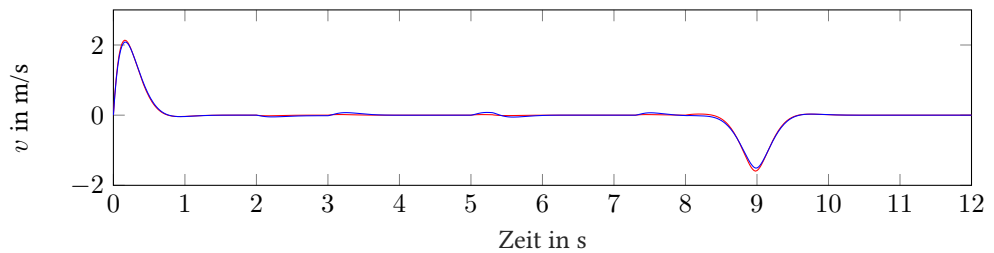
(a) Geschätzter Transitionsparameterverlauf im Vergleich zur Vorgabe (in schwarz, nahezu vollständig verdeckt)



(b) Stellgrößenverlauf für Spieler 1 (durchgezogene Linie) und Spieler 2 (gestrichelte Linie)



(c) Verlauf der Position (durchgezogene Linie) und der Referenzposition (gestrichelte Linie)



(d) Verlauf der Geschwindigkeit

Abbildung 4.3: Simulation des Beispielszenarios unter Verwendung der Adaption basierend auf dem Hamilton- (rot) und dem Batch-Ansatz (blau) bei Erzeugung der Messgröße mit konstantem Transitionsparameter über dem Optimierungshorizont

Die Abweichungen sind auf numerische Ungenauigkeiten in der Berechnung der Diskretisierung des Systems und der Inversion der Matrix \vec{M} aus Gleichung (4.52b) zurückzuführen. Die Qualität der Schätzung ist ausreichend, um auch für diesen Fall kaum Abweichungen von der optimalen Position zu erhalten (maximale Abweichung 0,03 m).

Wie schon beim Vergleich der Ansätze zur Lösung des Differentialspiels liegt der Hauptunterschied der Verfahren in der Rechenzeit. Mit dem Hamilton-Verfahren dauert die Berechnung eines Adaptionsschritts 0,94 ms und damit weniger als ein Fünftel der Zeit, die ein Schritt mit dem Batch-Ansatz (5,38 ms) benötigt.

Simulationsergebnisse bei Generierung des Messwerts mit zeitvariantem Transitionsparameter über dem Optimierungshorizont

In der zweiten Variante wird statt eines über dem Optimierungshorizont konstanten Transitionsparameters ein zeitvarianter Verlauf zur Messwerterzeugung verwendet. Dadurch entspricht die Art der Erzeugung nicht mehr dem Modell im Adaptionalgorithmus. Abbildung 4.4 zeigt die geschätzten Transitionsparameter sowie die Trajektorien der Stell- und Zustandsgrößen, wenn die Stellgröße von Spieler 1 auf diese Weise erzeugt wird.

Diese Methode liefert für das simulierte Szenario ebenfalls für beide Adaptionsverfahren qualitativ vergleichbare Ergebnisse. Der mittlere Betrag des Fehlers zwischen geschätztem und vorgegebenen Transitionsparameter liegt mit 0,058 für den Hamilton- und 0,053 für den Batch-Ansatz höher als bei der ersten Variante. Insbesondere die maximale Differenz zur Vorgabe ist mit einem Wert von 0,580 (Hamilton-Ansatz) bzw. 0,600 (Batch-Ansatz) sehr hoch. Betrachtet man die ersten beiden Übergaben, so fällt auf, dass die geschätzten Werte des Transitionsparameters α dem Verlauf des zur Erzeugung der Stellgröße des vorgegebenden Partners u_1 verwendeten Transitionsparameters vorauslaufen. Die Ursache hierfür liegt im zeitvarianten Verlauf von α , welcher für die Generierung der Stellgröße u_1 genutzt wird. Das Adaptionsverfahren nimmt hingegen einen konstanten Wert von α über dem Optimierungshorizont an. Wie bereits in der Simulation aus Abschnitt 3.4 beschrieben, hat die Änderung von α in der Zukunft zur Folge, dass sich die aktuelle Stellgröße bereits früher verändert, um das für den Gesamtverlauf optimale Ergebnis zu erzielen. Soll diese aktuelle Stellgröße stattdessen durch ein α erzeugt werden, welches über dem Horizont konstant ist, muss die Änderung von u_1 zum aktuellen Zeitpunkt bei gleichem Zustand unmittelbar eine Veränderung von α zur Folge haben. Es wird also gesucht, welches konstante α dieselbe aktuelle Stellgröße erzeugt, wie der zeitvariante Übergabeverlauf über dem Optimierungshorizont. Nur wenn das α des ersten Partners über den gesamten Horizont gleich ist (wie vor und am Ende einer Transition oder bei dem Plateau der zweiten Übergabe) ist das geschätzte α identisch zur Vorgabe. Hierbei ist hervorzuheben, dass die Größe α des Partners, der die Transition vorgibt, ein Modellparameter und keine physikalisch messbare Größe ist. Die Abweichung zwischen dem vorgegeben

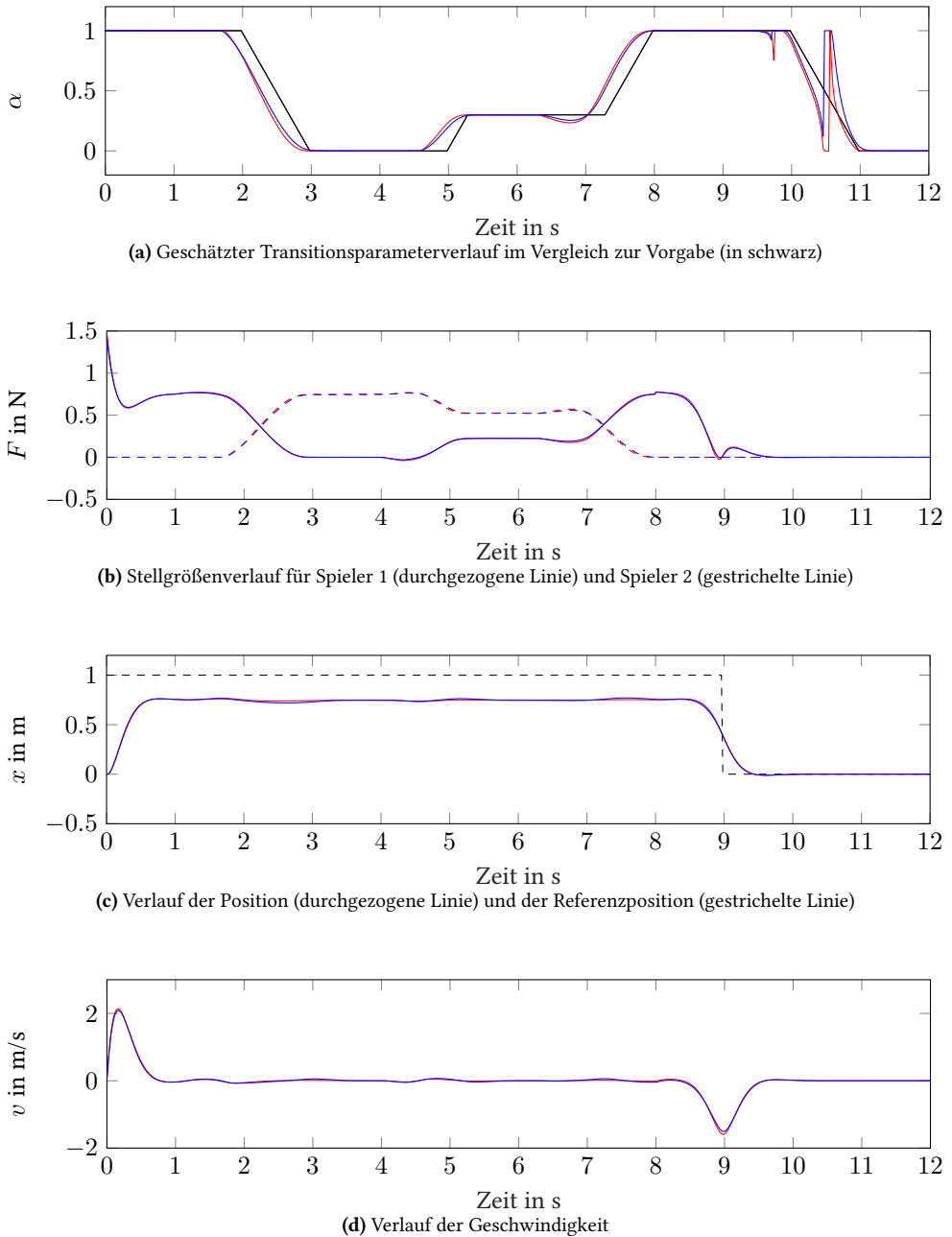


Abbildung 4.4: Simulation des Beispielszenarios unter Verwendung der Adaption basierend auf dem Hamilton- (rot) und dem Batch-Ansatz (blau) bei Erzeugung der Messgröße mit zeitvariantem Transitionsparameter über dem Optimierungshorizont

und geschätzten Verlauf von α ist dahingehend von reduzierter Relevanz, solange der adaptive Partner die vom initiierten Partner erwartete Stellgröße aufbringt. Die Positionstrajektorie zeigt, dass dies für die gesamte Simulationsdauer ähnlich gut wie bei der vorherigen Variante zur Generierung des fiktiven Messwerts funktioniert. Mit dem Hamilton-Ansatz beträgt die maximale Abweichung 0,02 m und mit dem Batch-Ansatz 0,03 m.

Eine Besonderheit ergibt sich bei der Betrachtung der dritten Übergabe. Da die Referenz hier identisch zur Ruhelage des Systems ist, besteht die optimale Aktion beider Spieler daraus als Stellgröße den Wert Null aufzubringen, sobald diese Ruhelage erreicht ist. Dies gilt unabhängig vom Wert des Transitionsparameters, sodass sich einerseits fehlerhafte Werte nicht auf die Stellgrößen auswirken, andererseits aus der Stellgröße keine Rückschlüsse auf α gezogen werden können. Mathematisch betrachtet, führt das zu $\mathbf{e} = \mathbf{e}' = \mathbf{e}'' = 0$, wodurch die Update-Richtung aus Gleichung (4.4) nicht mehr definiert ist. Wie in Abbildung 4.4 gezeigt, ergeben sich durch numerische Ungenauigkeiten in der Berechnung trotzdem Schätzwerte für α , wobei diese zum Teil deutlich von der Vorgabe abweichen. Trotz des großen Fehlers in der Schätzung bleiben die Spieler im Zielzustand, da es bedeutungslos ist, welchen Anteil die Partner an einer optimalen, gemeinsamen Stellgröße von 0 N haben.

Da sich die Simulationsdurchgänge nur hinsichtlich des künstlich erzeugten Messwerts, nicht jedoch bezüglich des verwendeten Adaptionalgorithmus unterscheiden, ist die Berechnungszeit der Adaptionsverfahren identisch zu den Ergebnissen bei Vorgabe mit konstantem Transitionsparameter.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die in diesem Kapitel vorgestellten Adaptionsverfahren praktisch umsetzbar sind und es hiermit möglich ist, die Vorgabe eines Partners so zu ergänzen, dass jegliche Transitionen ideal im Sinne von Definition 3.5 verlaufen. Damit wurde eine Methode gefunden, wie die aktuelle Übernahmefähigkeit des menschlichen Partners aus dessen Handlung abgeleitet werden kann. Daraufhin ist es möglich, die Automation so anzupassen, dass sie den Menschen adäquat unterstützt und optimal mit diesem kooperiert. Im nächsten Kapitel werden die neuen Modellierungs- und Adaptionsverfahren aus diesem und dem vorherigen Kapitel anhand der Interaktion mit menschlichen Partnern evaluiert.

5 Experimentelle Validierung

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 3 und 4 vorgestellten Verfahren praktisch angewendet, um sie im Zusammenspiel mit menschlichen Kooperationspartnern analysieren und bewerten zu können. Dazu wurden drei Experimente konzipiert und durchgeführt. Im ersten Experiment wird die Übergabe einer abstrahierten Lenkaufgabe mit Hilfe der differentialspielbasierten Modellierung aus Kapitel 3 mit anderen Übergabemethoden verglichen. Der Übertrag auf die Anwendung im hochautomatisierten Fahren und der Vergleich der kooperativen Transition mit der konventionellen, direkten Transition erfolgt in einem zweiten Experiment. Darauf aufbauend wird in einem dritten Experiment untersucht, ob eine mit dem Verfahren aus Kapitel 4 individuell angepasste Transition Vorteile gegenüber einem starr vorgegebenen Übergabeverlauf aufweist. In den nachfolgenden Abschnitten werden jeweils das Design der einzelnen Versuche präsentiert sowie die Ergebnisse gezeigt und interpretiert, bevor eine abschließende Gesamtbewertung vorgenommen wird. Zur besseren Unterscheidung der Kooperationspartner wird in allen nachfolgenden Beschreibungen der Index A für automationsbezogene Parameter und Variablen sowie der Index M für die Größen des Menschen verwendet.

5.1 Vergleich von Übergabekonzepten

Es soll zunächst experimentell die Frage beantwortet werden, ob graduelle Transitionen Vorteile gegenüber direkten Wechseln bei der Ausführung der Tätigkeit besitzen. Dafür wurde am Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme (IRS) ein Versuch aufgebaut, bei dem sich Mensch und Automation mit der Erfüllung der Aufgabe abwechseln und so verschiedene Übergabekonzepte untersucht werden können. Als Aufgabe wurde eine stark abstrahierte Fahraufgabe verwendet, welche auf das Folgen einer Lenkradwinkeltrajektorie reduziert wurde. Diese Reduktion besitzt die Vorteile, dass einerseits Assoziationen zu realen Fahrten und somit unbekannte Störeinflüsse vermieden werden können und andererseits das Ziel der Aufgabe eindeutig vorgegeben werden kann. Teilpakete des Experimentaufbaus wurden in Rahmen der Bachelorarbeiten [Ayl16], [Har17] und [Wör17] bearbeitet. Die Durchführung des Experiments war Bestandteil der Bachelorarbeit [Haa18]. Das komplette Experiment und seine Ergebnisse wurden in [LHFH18] veröffentlicht.

5.1.1 Versuchsbeschreibung

Die Beschreibung des Versuchs gliedert sich in fünf Teile. Im ersten Teil wird zunächst der Versuchsaufbau vorgestellt. Daraufhin wird die Umsetzung eines Regelungsmoduls gezeigt, mit dem sich verschiedene Übergabekonzepte realisieren lassen. Die Auswahl der getesteten Übergabekonzepte erfolgt im nächsten Teil. Die im Experiment verwendeten Testszenarien und der Ablauf des Experiments sind Gegenstand des vierten Abschnitts. Im letzten Teil werden die Bewertungskriterien für die Übergabekonzepte festgelegt und dazugehörige Hypothesen aufgestellt.

Versuchsaufbau

Als Eingabegerät für den Lenkradwinkel steht dem Versuchsteilnehmer ein Force-Feedback Lenkrad des Typs SENSO-Wheel SD-LC mit einer Auflösung von $0,009^\circ$ und einem Nennmoment von 7,5 Nm zur Verfügung [SEN10]. Die Aufzeichnung der Lenkradsignale sowie die Berechnung der Sollmomente erfolgen auf einem dSpace ds1006 Prozessorboard. Die aktuelle Lenkradposition wird dem Nutzer als grüner Punkt auf einem Bildschirm dargestellt. Der Punkt befindet sich im unteren Viertel der Anzeige und kann über den Lenkradwinkel auf einer horizontalen Linie bewegt werden. Der Solllenkradwinkel $\bar{\delta}$ wird durch eine schwarze Linie angezeigt, welche sich mit der konstanten Geschwindigkeit von 0,144 m/s vertikal unter der Positionsmarkierung fortbewegt. Dadurch entsteht der Eindruck einer Fahrt des Punktes nach oben. Übergaben werden durch ein gelbes Warndreieck in der oberen Mitte des Bildschirms angezeigt, welches die verbleibenden Sekunden bis zum Abschluss der Übergabe beinhaltet. Die Anzeige wird von einem Warnton begleitet, der sekundlich wiederholt wird. Zudem gibt ein Symbol in der linken unteren Ecke Auskunft darüber, ob gerade die Automation (Symbol A) oder der Mensch (Symbol M) für die Durchführung der Aufgabe zuständig ist. Das grafische Interface und dessen Anbindung an die Lenkradsignale wurden im Rahmen der Bachelorarbeit [Ayl16] erstellt.

In den Phasen, in denen die Automation die Lenkung übernimmt, werden die Versuchsteilnehmer abgelenkt, um den Verlust des für die Lenkaufgabe nötigen Situationsbewusstseins zu erzeugen. Hierfür wurde eine visuell, motorisch und kognitiv fordernde Nebenaufgabe gesucht. Besonders involvierend sind hier Spiele, vor allem dann, wenn sie eine hohe Motivation bieten und schwer unterbrechbar sind [KVV16]. Weiterhin sollte die Nebenaufgabe schnell verständlich und leicht zu erlernen sein. Um diese Anforderungen zu erfüllen, wurde deshalb im Rahmen der Bachelorarbeit [Har17] ein Memory-Spiel programmiert, bei dem sieben Paare von identischen Symbolen auf einem Touchpad gefunden werden müssen. Sind alle Paare ermittelt, werden diese wieder verdeckt gemischt und das Spiel wird fortgesetzt. Das Display zeigt die Anzahl bisher gefundener Paare in der Mitte an. Die Bedienung erfolgt mit Hilfe eines

Eingabestifts. Hierdurch wird der Wechsel der Tätigkeit zusätzlich erschwert, da vor der Übernahme der Lenkung zunächst der Stift abgelegt werden muss. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 5.1 dargestellt.



Abbildung 5.1: Versuchsaufbau des Experiments zum Vergleich von Übergabekonzepten

Verwendeter Regelalgorithmus

Der Einfluss der Momente von Mensch und Automation u_M bzw. u_A auf den Lenkradwinkel δ kann mit der folgenden Zustandsraumgleichung modelliert werden:

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{c}{I} & -\frac{d}{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I} \end{bmatrix} u_A + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I} \end{bmatrix} u_M \quad (5.1)$$

Die Parameter des Modells sind das Trägheitsmoment des Lenkrads I sowie die Konstanten einer virtuell eingefügten Feder c bzw. eines virtuell eingefügten Dämpfers d , mit denen sich die Dynamik des SENSO-Wheels konfigurieren lässt. Dieses Modell bildet die Grundlage für den Reglerentwurf.

Die Automation wurde mit Hilfe eines Regelungsmoduls umgesetzt, welches erlaubt, über drei Parameter diverse Transitionskonzepte abzubilden. Kern des Moduls ist ein Zweispieler LQ-Differentialspiel nach Definition 3.6, wobei die Anforderung für eine ideale Transition nach Gleichung (3.58e) fallen gelassen wird und sowohl α_A als auch α_M nach Belieben vorgegeben

werden können. Zum einen lässt sich damit über α_A der Beteiligungsgrad der Automation einstellen, zum anderen kann über α_M vorgegeben werden, welche Beteiligung die Automation für den Menschen annimmt und so bei der Berechnung der optimalen Stellgröße berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt mit dem Batch-Ansatz aus Abschnitt 3.2.2, wobei die Methode sich auf die klassische Anwendung des Batch-Ansatzes für die optimale Regelung reduziert, falls α_M durchgehend 0 bleibt und keine Beteiligung des Menschen im Regler berücksichtigt wird (s. [BBM17]). Die so ermittelte optimale Stellgröße der Automation u_A^* kann weiter modifiziert werden. Hierfür wird der Faktor κ als neuer Parameter eingeführt, mit dem der Wert gemäß

$$u_A = \kappa u_A^*, \kappa \in [0, 1] \quad (5.2)$$

skaliert werden kann. Dadurch wird es möglich, direkt auf die Stellgröße Einfluss zu nehmen und so die Automation beispielsweise durch einen Wechsel von κ von 1 auf 0 in einem Zeitschritt zu deaktivieren.

Für die Berechnung des Lenkmoments der Automation wird das System mit einer Abtastzeit von 0,025 s diskretisiert. Der Prädiktionshorizont wurde zu 1,5 s gewählt und beinhaltet damit bei der gewählten Geschwindigkeit denselben Streckenabschnitt, den der Mensch auf dem Bildschirm als Vorschau angezeigt bekommt. Die Modellparameter c und d wurden entsprechend der Konfiguration des SENSO-Wheels gewählt, das Trägheitsmoment I des Lenkrads mittels des Least-Squares-Verfahren wie in [Lud11] beschrieben geschätzt. Die Zustandsgewichtungsmatrizen Q^* und S^* werden als identische Diagonalmatrizen der Form $\text{diag}(q_\delta, q_{\dot{\delta}})$ ausgelegt. Die Wahl der Gewichte der Gütemaßmatrizen erfolgt heuristisch in der Art, dass die Automation die Aufgabe alleine erfüllen kann. Die Gewichte des im Differentialspiel benötigten Modells des Menschen werden gemäß Definition 3.6 identisch gewählt. Die Zahlenwerte der Gütemaß- und Systemparameter sind in Tabelle 5.1 angegeben.

Tabelle 5.1: Gütemaß- und Modellparameter für das Experiment zum Vergleich der Übergabekonzepte

Parameter	Wert	Einheit
I	0,04	Nm s ² /rad
c	2,29	Nm/rad
d	0,57	Nm s/rad
q_δ	35	1/rad ²
$q_{\dot{\delta}}$	0	s ² /rad ²
R	1	1/N ²

Übergabekonzepte

In diesem Abschnitt werden die für das Experiment genutzten Übergabekonzepte und die zugrunde liegenden Verläufe der Parameter α_A , α_M und κ behandelt. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Übergabekonzepten zu gewährleisten, wurden diese so parametrisiert, dass die Zeiträume der Transitionsphasen einheitlich sind. Vor Beginn einer Transitionsphase ist das Verhalten der Automation für alle Konzepte identisch und spätestens am Ende dieser Phase liefert die Automation keinen Momentenbeitrag mehr für das Lenkrad. Da die Zeit bis zur Übernahme des Lenkrads durch den Probanden mit dem gegebenen Versuchsaufbau nicht unmittelbar messbar ist, wurde in einem Vorversuch im Rahmen der Bachelorarbeit von [Wör17] die durchschnittliche Zeit bis zur ersten Lenkreaktion ermittelt. Für die zehn Versuchsteilnehmer ergab sich eine mittlere Reaktionszeit von 1,835 s, weshalb die Zeit für die Präparationsphase auf 2 s festgelegt wurde. Für die Transitionsphase wurden weitere 3 s gewählt, sodass die Übergabe spätestens 5 s nach der Ankündigung abgeschlossen ist.

Es wurden fünf verschiedene Umsetzungen für die Übergabe der Aufgabe miteinander verglichen. In zwei Umsetzungen wird die Automation direkt, d.h. in einem Schritt, abgeschaltet, wobei sich die beiden Varianten wie folgt im Zeitpunkt der Abschaltung unterscheiden:

- Frühestmöglich Abschalten (AF)
- Spätestmöglich Abschalten (AS)

In den anderen Übergabekonzepten erfolgt die Abschaltung graduell. Die verwendeten Methoden lauten:

- Skalierung des Reglerausgangs (GS)
- Reduktion der Beteiligung eines Optimalreglers (GO)
- Wechsel der Rollen im Differentialspiel (GD)

Alle Transitionen beginnen bei einer vollständig aktiven Automation, was durch die Parametrierung $\alpha_A = 1$, $\alpha_M = 0$ und $\kappa = 1$ sichergestellt ist. Durch Veränderung eines oder mehrerer dieser Werte werden die oben genannten Übergabemethoden realisiert. Die Abschaltung der Automation für die Konzepte AF und AS erfolgt durch einen direkten Wechsel des Parameters κ von 1 auf 0 zu Beginn bzw. am Ende der Transitionsphase. Auch für das Konzept GS erfolgt das Abschalten über κ , wobei der Parameter hier über die gesamten Transitionsphase hinweg linear auf 0 abfällt. Im vierten Verfahren GO wird hingegen α_A zur Umsetzung der graduellen Abschaltung verwendet. Aufgrund der Prädiktionsfähigkeit des Optimalreglers muss der Wert zu Beginn der Transitionsphase noch für einen Optimierungshorizont unverändert bleiben, damit die Transition nicht bereits früher vorhergesehen wird. Erst danach fällt α_A linear auf 0 ab. Die letzte Übergabemethode GD verwendet als einzige zusätzlich den Parameter α_M , wodurch ein Differentialspiel entsteht. Der Verlauf von α_A ist identisch zum Verfahren GO und

α_M verläuft gegenläufig dazu. Auf diese Art wird über das Modell des menschlichen Verhaltens dessen Aktion für die Ermittlung der optimalen Stellgröße der Automation berücksichtigt mit dem Ziel eine ideale Transition zu erzeugen. Abbildung 5.2 verdeutlicht, welche Parameter für die verschiedenen Transitionsmethoden genutzt werden und gibt deren Verlauf an. Die nicht explizit angegebenen Parameter behalten jeweils ihren Initialwert von 1 für α_A und κ bzw. 0 für α_M bei.

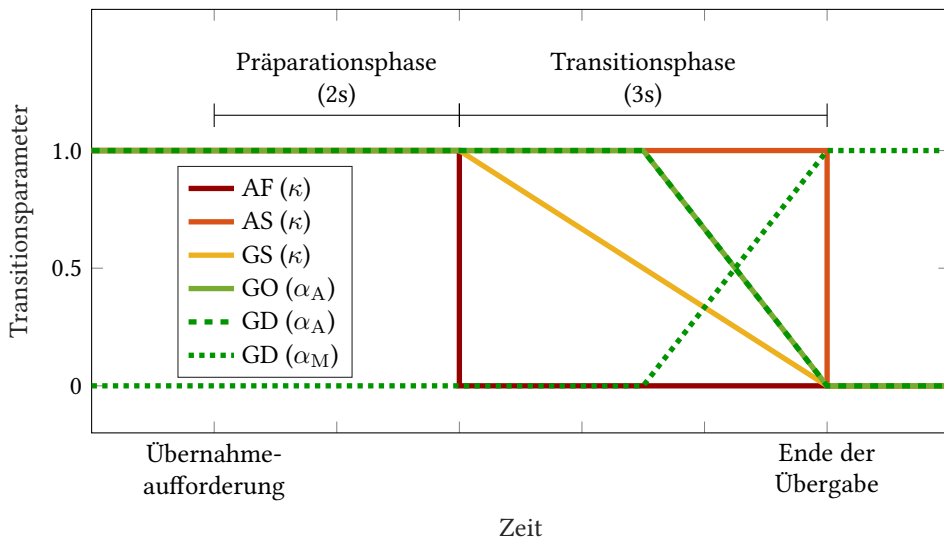


Abbildung 5.2: Verlauf der zur Umsetzung der Übergabe genutzten Parameter κ , α_A und α_M für alle im Experiment untersuchten Transitionsmethoden

Versuchsdurchführung

Für den Vergleich der fünf Übergabemethoden wurden zwei Referenzszenarien betrachtet. Da keine Abhängigkeit des Ergebnisses von der Richtung des Manövers zu erwarten ist, wird im Folgenden nicht zwischen Manövern nach rechts und nach links unterschieden. In Szenario „Halten“ liegt die Referenz während der gesamten Übergabe bei einem konstanten Wert von $\pm 90^\circ$, die Versuchsperson muss also das Lenkrad entgegen der Rückstellkraft der Feder festhalten. Im Szenario „Anstieg“ beginnt die Übergabe bei 0° . Bis 1 s nach Beginn der Transitionsphase ändert sich der Solllenkradwinkel nicht. Danach steigt er betragsmäßig über 1 s bis auf $\pm 90^\circ$ an und verbleibt dort. Hier unterscheidet sich folglich der Zustand am Ende der Übergabe im Vergleich zur Ausgangssituation. Der Verlauf des Solllenkradwinkels der beiden Szenarien ist grafisch in Abbildung 5.3 veranschaulicht. Die Übergaben vom Probanden zurück an die Automation erfolgen stets bei einer Referenzvorgabe von 0° und erfordern somit kein Moment während der Übergabe. In den Phasen, in denen Mensch oder Automation die Lenkung allei-

ne übernehmen, wechselt die Solltrajektorie unregelmäßig zwischen Abschnitten mit -90° , 0° und 90° hin und her. Der Sollwert für die Lenkwinkelgeschwindigkeit wird durchgehend zu 0 gewählt.

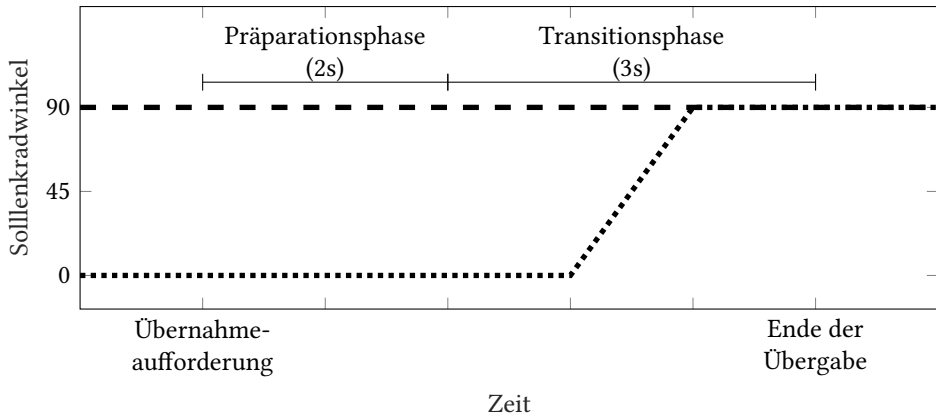


Abbildung 5.3: Solllenkwinkel im Szenario „Halten“ (gestrichelt) und im Szenario „Anstieg“ (gepunktet)

Das Experiment beginnt für jeden Probanden mit einem zweiminütigen Testlauf, bei dem er sich mit dem Versuchsaufbau vertraut machen kann. Anschließend erfolgen die fünf Versuchsdurchläufe mit den verschiedenen Übergabemethoden in zufälliger Reihenfolge. Jeder dieser Durchgänge dauert vier Minuten und enthält jeweils eine Übergabe der Kategorie „Halten“ und eine der Kategorie „Anstieg“. Auch hier sind Zeitpunkte und Reihenfolge der Szenarien randomisiert. Die Transitionen der Aufgabe zurück an die Automation sind in diesem Experiment trivial und werden nicht ausgewertet.

Bewertungskriterien

Um die Frage zu beantworten, welches der im Experiment verwendeten Übergabekonzepte die besten Ergebnisse liefert, werden sowohl objektive als auch subjektive Kriterien angewendet. Zur objektiven Bewertung werden die während der Versuchsdurchführung aufgezeichneten Messgrößen verwendet. Diese sind einerseits der vom SENSO-Wheel bereit gestellte Lenkwinkel δ und die Lenkwinkelgeschwindigkeit $\dot{\delta}$, andererseits das Lenkmoment der Automation u_A als Sollwert am Reglerausgang. Der Grad der Aufgabenerfüllung wird anhand des Fehlers $\delta - \bar{\delta}$ im Zeitintervall von 1 s vor Beginn der Transitionsphase bis 1,5 s nach Ende dieser Phase beurteilt, was somit dem Zeitraum von 1 bis 6,5 s nach der ersten Übernahmeaufforderung entspricht. Als Kenngröße K_δ wird der mittlere absolute Fehler

$$K_\delta = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |\delta - \bar{\delta}| \quad (5.3)$$

über alle Messwerte in diesem Zeitintervall berechnet.

Es wird die Hypothese formuliert, dass der mittlere Fehler über alle Versuchspersonen μ_K entsprechend der Reihenfolge der vorgestellten Konzepte abnimmt und somit

$$\mu_{K,AF} > \mu_{K,AS} > \mu_{K,GS} > \mu_{K,GO} > \mu_{K,GD} \quad (5.4)$$

gilt. Zum Test wird diese Hypothese in paarweise Vergleiche aller Kombinationsmöglichkeiten zerlegt, welche im Anschluss mit einseitigen Zweistichproben-*t*-Tests für gepaarte Stichproben geprüft werden [MS19]. Für je zwei Werte $\mu_{K,1}$ und $\mu_{K,2}$ wird die Nullhypothese

$$H_0: \mu_{K,1} \leq \mu_{K,2} \quad (5.5)$$

aufgestellt. Mit dem Testverfahren wird anschließend geprüft, ob und ggf. mit welchem Signifikanzniveau diese Hypothese abgelehnt und damit die Alternativhypothese $\mu_{K,2} > \mu_{K,1}$ als Bestandteil von Gleichung (5.4) angenommen werden kann. Der Unterschied zwischen den Mittelwerten zweier Transitionsmethoden wird als statistisch signifikant, sehr signifikant bzw. hochsignifikant betrachtet, wenn die Nullhypothese mit einem Signifikanzniveau von 5 %, 1 % bzw. 0,1 % abgelehnt werden kann [BD06].

Um neben den objektiven Kriterien auch eine subjektive Einschätzung der Versuchsteilnehmer zu erhalten, wurden zudem zwei Fragen ausgewertet, welche die Probanden nach jedem Versuchsdurchgang beantworteten. Die Fragen lauten:

- Wie gut konnten Sie der vorgegebenen Linie während der Übergabe folgen?
- Wie empfanden Sie das Lenkgefühl während des Übergabevorgangs?

Die Beantwortung erfolgt jeweils durch Ankreuzen auf einer fünfstufigen Skala mit den Stufen von sehr gut bis sehr schlecht für die erste bzw. angenehm bis unangenehm für die zweite Frage.

5.1.2 Ergebnisse

Insgesamt nahmen 41 Versuchspersonen (6 weiblich, 35 männlich) im Alter zwischen 21 und 57 Jahren (Mittelwert 26,63; Standardabweichung 7,08) an dem Versuch teil. Sechs Probanden wurden aus der Datenmenge ausgeschlossen, da Sie mindestens eine Aufforderung zur Übernahme verpasst oder ignoriert und die Aufgabe daraufhin erst sehr spät angenommen haben. Die verbleibenden 35 Personen lieferten mit jeweils einer Übergabe pro Szenario unter Nutzung fünf verschiedener Übergabekonzepte eine Datenbasis von 350 Übergabesituationen. Die

Vorstellung der Ergebnisse erfolgt in drei Teilen. Zunächst werden die Trajektorien der Lenkradwinkel und Automationsmomente für die verschiedenen Transitionskonzepte und Szenarien gezeigt. Aus der Lenkradwinkeltrajektorie kann der mittlere absolute Fehler zur Vorgabe ermittelt werden. Die Angabe dieser Kennzahl und der statistische Vergleich der Übergabemethoden erfolgt im zweiten Teil. Den Abschluss der Ergebnisse bildet die Auswertung der an die Versuchsteilnehmer gestellten Fragen.

Lenkradwinkeltrajektorien

Die Übergabesituationen werden getrennt nach den Szenarien betrachtet. Zur gemeinsamen Darstellung der Ergebnisse für alle Probanden werden die Signale der Manöver in Richtung des Referenzwerts -90° an der Nullachse gespiegelt und so alle Manöver in die gleiche Richtung von 90° dargestellt. Abbildung 5.4 zeigt die Lenkwinkelverläufe der 35 Probanden für das Szenario „Halten“, in dem der Lenkwinkel durchgehend bei 90° liegen soll.

Zu Beginn des Ausschnitts, also 1 s nach der ersten Aufforderung an die Versuchsperson die Aufgabe zu übernehmen, führt die Automation die Positionierung des Lenkrads noch alleine und in allen Fällen identisch durch. Mit den Parametern aus Tabelle 5.1 ergibt sich ein stationärer Lenkradwinkel von ca. 76° als Kompromiss zwischen Abweichung zum Referenzwinkel von 90° und dem Stellaufwand, um der Feder des Systems mit Ruhelage 0° entgegenzuwirken. Im Gegensatz dazu bringen die Probanden nach Übernahme des Lenkrads das zusätzliche Lenkmoment auf, um das Lenkrad auf den Referenzwinkel zu bewegen und dort zu halten. Der Startzeitpunkt für den Übergang ist hierbei nicht identisch zum vordefinierten Beginn der Transitionsphase 2 s nach der Übernahmeaufforderung, sondern variiert zwischen den Teilnehmern. Die ersten Reaktionen erfolgen bereits eine halbe Sekunde vorher, während bei vereinzelt Probanden mehr als 4 s vergehen, bis der Lenkradwinkel in Richtung des Sollwerts von 90° geführt wird. Der Erfüllungsgrad der Aufgabe während dieses Übergangs von Automation zum Menschen wird anhand der Abweichung vom Referenzwert beurteilt. Die Lenkradwinkeltrajektorien zeigen, dass sich die verschiedenen Übergabekonzepte in diesem Szenario diesbezüglich sichtbar voneinander unterscheiden.

Die deutlichsten Abweichungen ergeben sich für das Konzept AF, bei dem das Assistenzmoment sofort zu Beginn der Transitionsphase abgeschaltet wird. Mehr als die Hälfte der Versuchsteilnehmer können den Wegfall nicht sofort kompensieren. Durch die Eigendynamik des Systems bewegt sich das Lenkrad solange auf die stabile Ruhelage bei 0° zu, bis die Probanden das nötige Lenkmoment aufbringen. Bis dahin vergrößert sich der Abstand zum Sollwert. Teilweise reagieren die Versuchspersonen erst nach Erreichen der Nulllage. Auch für die Probanden, die bereits vor Beginn der Transitionsphase mit der Übernahme der Aufgabe begonnen haben, ist ein Einbruch des Lenkradwinkels im Zeitraum zwischen 0,2 s und 0,3 s nach Beginn der Transitionsphase zu erkennen. Dies trifft auch für das Konzept AS zu, jedoch erfolgt hier

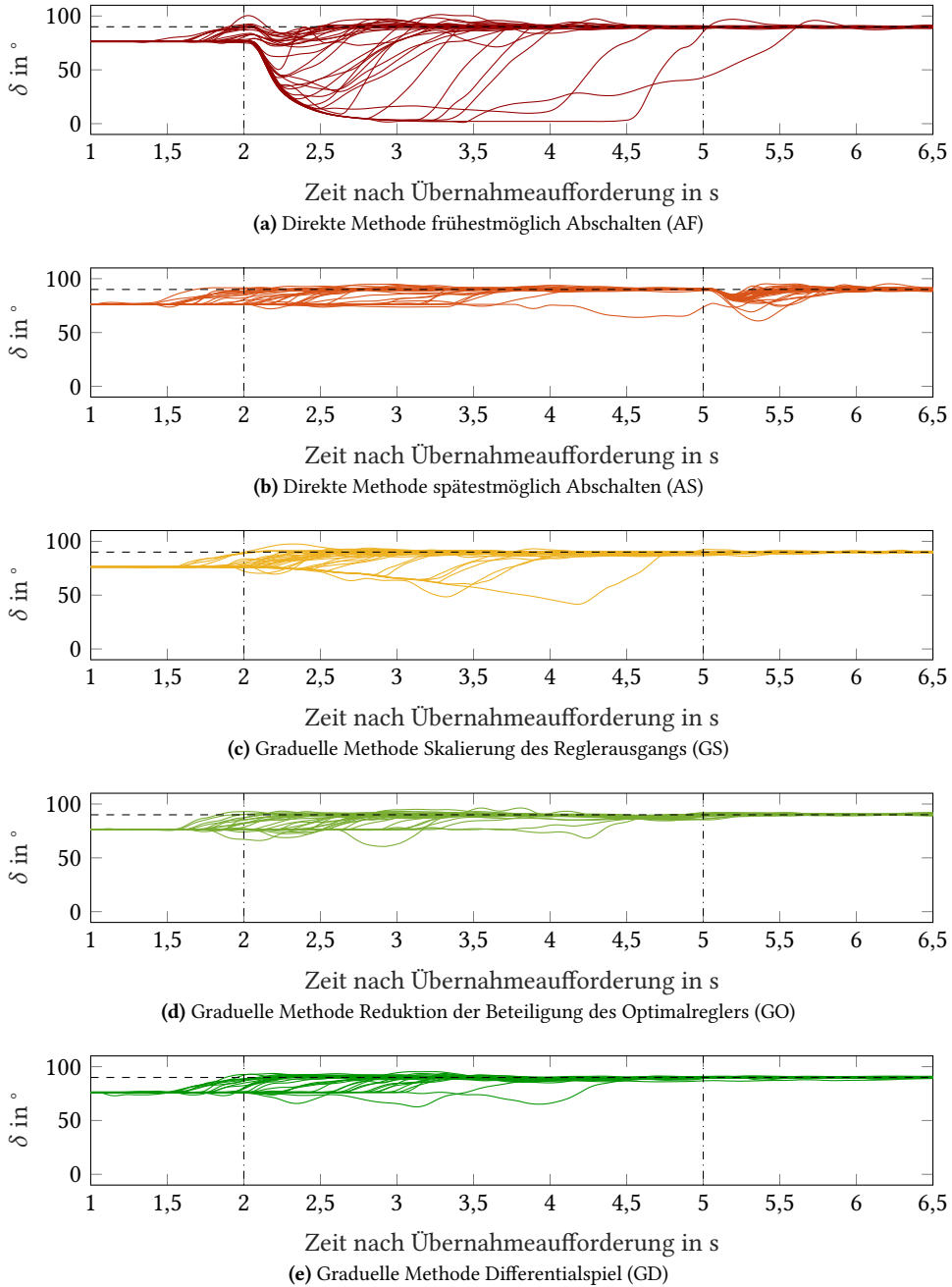


Abbildung 5.4: Lenkradwinkelverläufe aller Probanden im Szenario „Halten“, aufgeteilt nach Übergabemethode. Die Referenz (gestrichelte Linie) beträgt im gesamten Szenario 90° und die Transitionsphase liegt im Intervall von 2 s bis 5 s nach dem Signal zur Übernahme.

das Abschalten am Ende der Transitionsphase, also 5 s nach der Übernahmeaufforderung. Da die Automation bis dahin aktiv bleibt, vergrößert sich die Differenz zum Sollwert im Gegensatz zur Variante AF auch dann nicht, wenn die Versuchsteilnehmer erst im Laufe der Transitionsphase mit der Aufgabe beginnen. Wird die Skalierung des Reglerausgangs (GS) zur Erzeugung einer graduellen Übergabe genutzt, zeigen die Trajektorien, dass sich der Abstand zum Solllenkwinkel erhöht, bis die Probanden eingreifen und die Referenzposition einstellen. Da jedoch noch unterstützendes Moment verbleibt, erfolgt der Abfall nicht so schnell wie in Variante AF. Bei den Konzepten GO und GD ist dies nicht erkennbar. Die Ursache hierfür zeigt sich bei Betrachtung der in Abbildung 5.5 dargestellten Lenkmomente der Automation. Im Gegensatz zum sprunghaften Abschalten der Übergabekonzepte AF und AS nimmt das Automationsmoment zwar bei allen anderen Verfahren graduell ab, die Varianten unterscheiden sich jedoch in der Form der Reduktion. Durch die lineare Skalierung über die gesamte Transitionsphase hinweg verringert sich das Moment der Automation bei Konzept GS bereits sehr früh, während die Methoden, die den Transitionsparameter innerhalb des Optimierungsproblems berücksichtigen, eine längere Zeit ein hohes Moment bereit stellen, welches am Ende der Transitionsphase steiler abfällt. Wird hierbei durch die Verwendung eines Differentialspiels die erwartete Übernahme durch den Menschen mit modelliert, erfolgt dieser Abfall früher, als wenn der Regler unter der Annahme operiert, allein für die Lösung der Aufgabe zuständig zu sein.

Im zweiten betrachteten Szenario „Anstieg“ findet die Übernahmeaufforderung bei einem Sollwert von 0° statt. Erst 3 s später soll der Lenkradwinkel innerhalb von 1 s auf 90° geführt und dort gehalten werden. Die resultierenden Lenkradwinkeltrajektorien für alle Übergabekonzepte bei diesem Szenario sind in Abbildung 5.6 zu sehen.

Da in diesem Szenario zu Beginn der Transitionsphase keine Stellgröße notwendig ist, wirkt sich das direkte Abschalten der Methode AF zu diesem Zeitpunkt nicht unmittelbar auf den Lenkradwinkel aus. Erst sobald sich die Referenz von der Ruhelage entfernt, muss ein Moment aufgebracht werden, um dieser zu folgen. Bis auf wenige Ausnahmen gelingt es den Versuchspersonen auch ohne Unterstützung, dem ab 3 s nach der Übernahmeaufforderung ansteigenden Sollwert unmittelbar nachzugehen. Die Trajektorien weisen jedoch eine deutlich größere Streuung um die Zielvorgabe auf als bei den anderen Konzepten, bei denen die Teilnehmer bei dem Manöver noch durch die Automation unterstützt werden. Da am Ende der Transitionsphase der Sollwert wieder bei 90° liegt, führt das sprunghafte Abschalten zu diesem Zeitpunkt bei der Methode AS zu einem vergleichbaren Einbruch des Lenkradwinkels wie im Szenario „Halten“. Ansonsten zeigen die Lenkradwinkeltrajektorien der Übergabekonzepte mit Unterstützung bei Durchführung des Manövers einen qualitativ ähnlichen Verlauf. Unterschiede können jedoch bei Betrachtung der in Abbildung 5.7 dargestellten Momenttrajektorien der Automation gefunden werden.

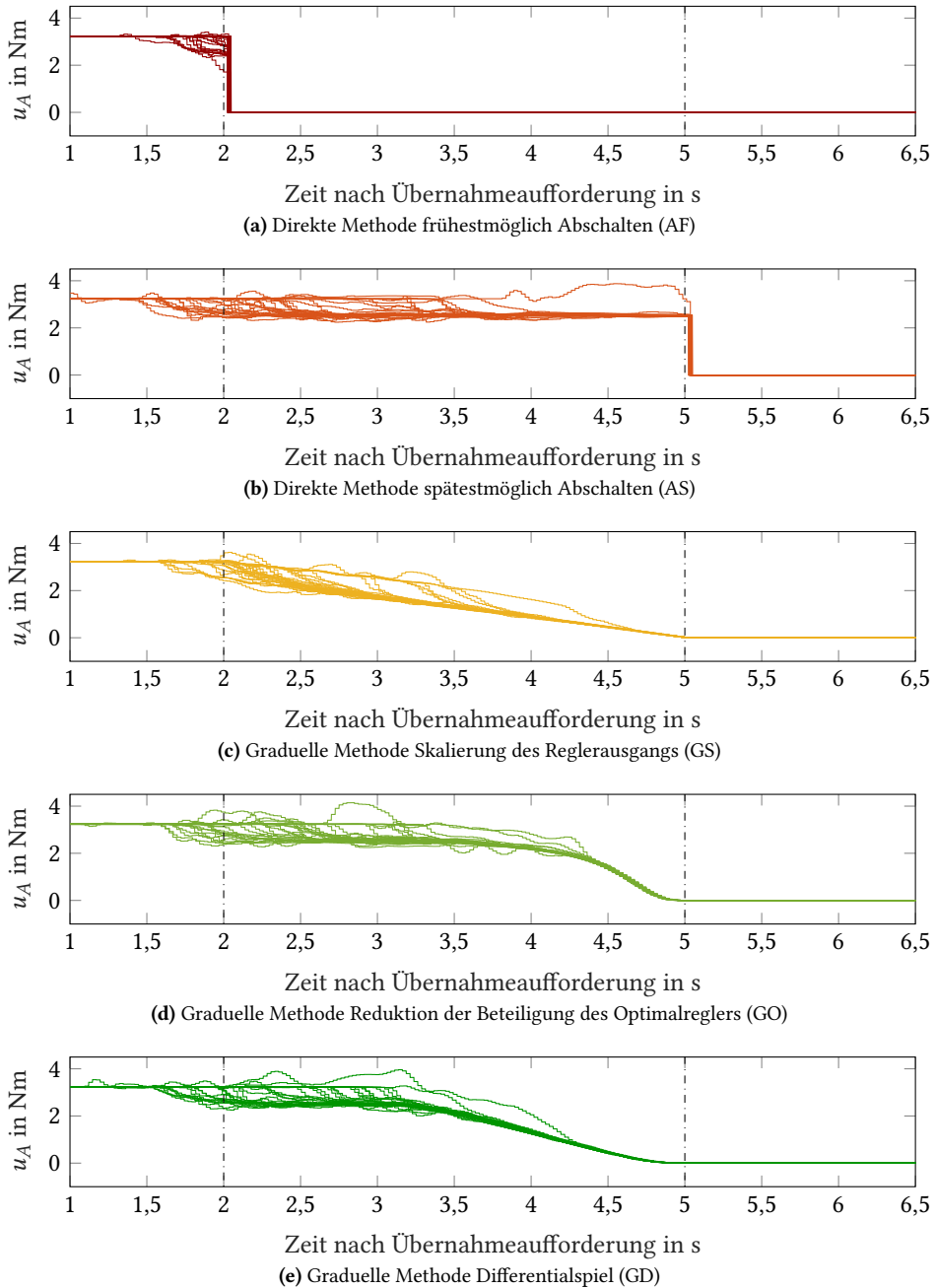


Abbildung 5.5: Lenkmomentverläufe der Automation für alle Probanden im Szenario „Halten“, aufgeteilt nach Übergabemethode. Die Transitionsphase liegt im Intervall von 2 s bis 5 s nach dem Signal zur Übernahme.

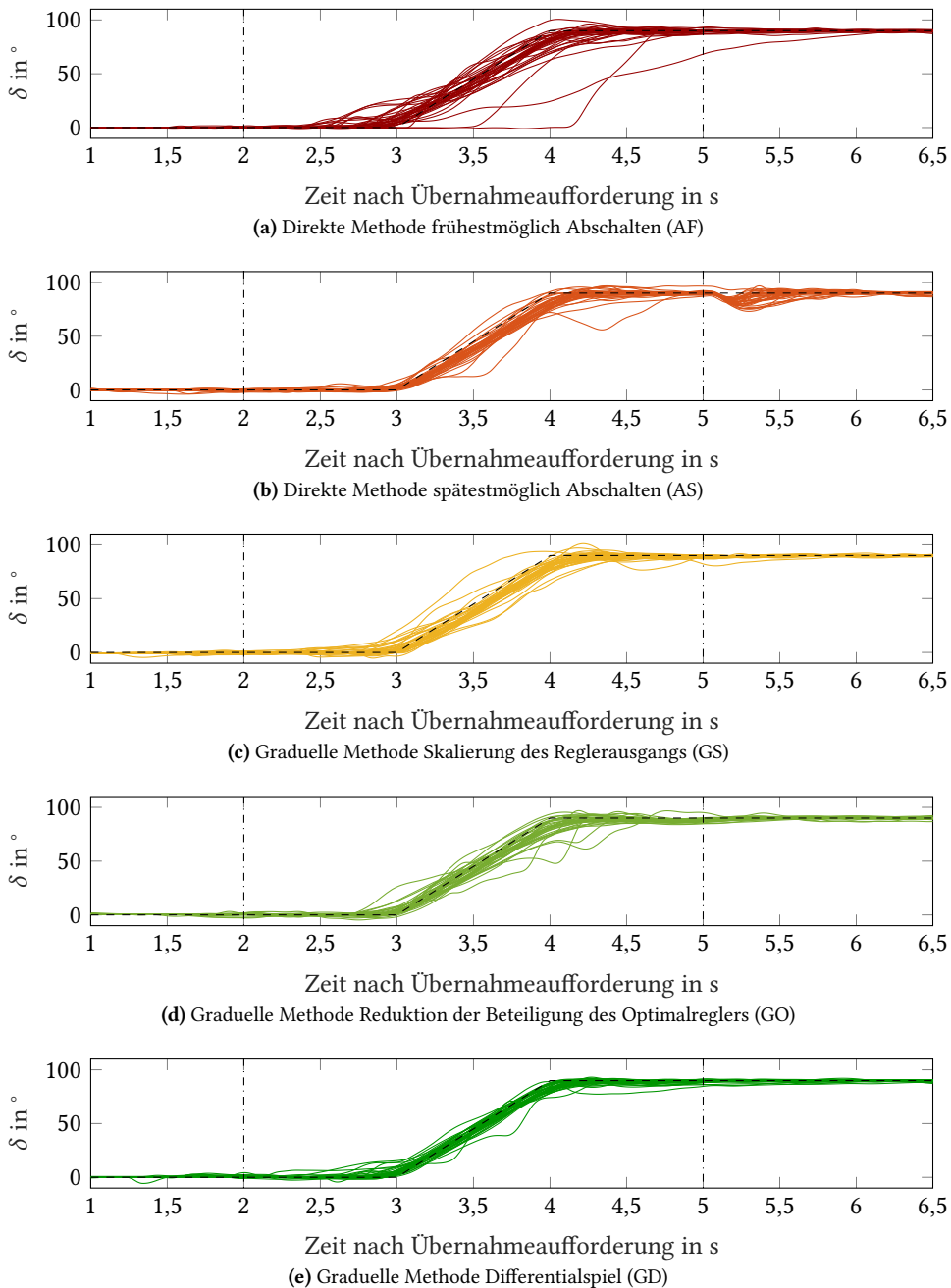


Abbildung 5.6: Lenkradwinkelverläufe aller Probanden im Szenario „Anstieg“, aufgeteilt nach Übergabemethode. Die Referenz (gestrichelte Linie) steigt im Szenario von 0° auf 90° an und die Transitionsphase liegt im Intervall von 2 s bis 5 s nach dem Signal zur Übernahme.

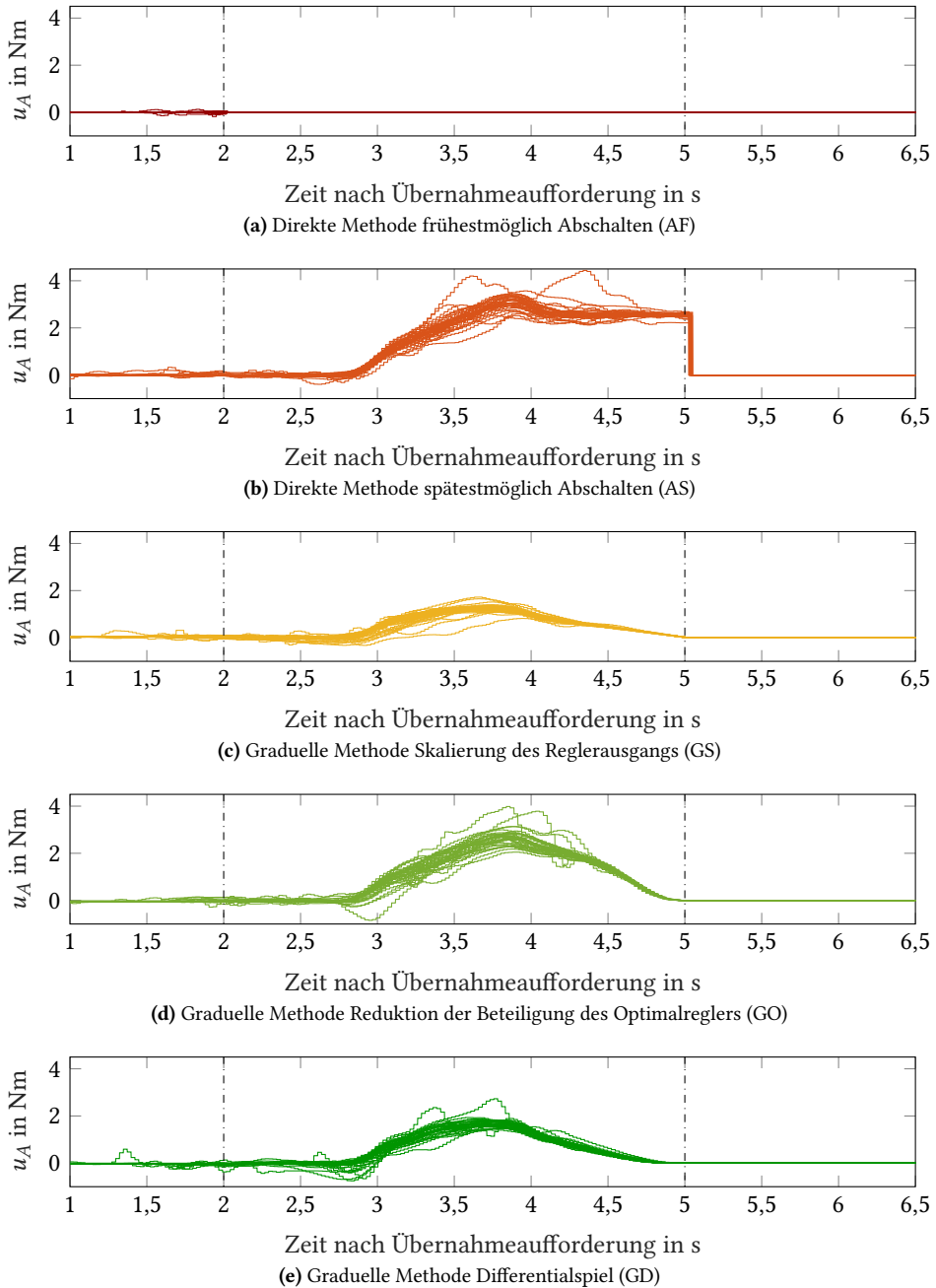


Abbildung 5.7: Lenkmomentverläufe der Automation für alle Probanden im Szenario „Anstieg“, aufgeteilt nach Übergabemethode. Die Transitionsphase liegt im Intervall von 2 s bis 5 s nach dem Signal zur Übernahme.

Die Übergabemethode AS, bei der der Regler über die gesamte Transitionsphase aktiv bleibt, erzeugt mit über 2,5 Nm für alle Probanden das höchste Moment der Automation während des Transitionsprozesses. Zu Beginn ist der Verlauf des unterstützenden Moments vergleichbar mit dem der Variante GO, welche immer noch Werte über 2 Nm erzielt. Durch die Reduktion des Transitionsparameters fällt der Maximalwert jedoch geringer aus. Außerdem wird bei GO in der zweiten Hälfte der Transitionsphase das Moment wieder verringert und nicht sprunghaft am Ende auf 0 Nm gesetzt wie bei AS. Die Trajektorien des Automationsmoments für die Methode GD zeigen einen analogen Verlauf, wobei das maximale Moment hier mehrheitlich unter 2 Nm liegt. Mit Ausnahme der sofortabschaltenden Variante AF erzeugt die Übergabemethode GS die geringste Unterstützung, da durch die gleichmäßige Skalierung des Reglerausgangs bereits früher das Moment reduziert wird und so durchgehend unter 1,8 Nm bleibt.

Statistischer Vergleich

Um die Qualität der Übergabe quantitativ zu erfassen, wird für jeden Versuchsteilnehmer der mittlere absolute Lenkwinkelfehler während des Übergabezeitraums gemäß Gleichung (5.3) berechnet und mit Hilfe des einseitigen t -Tests für gepaarte Stichproben miteinander verglichen. Die exakten Werte von K_δ für die einzelnen Probanden in beiden Szenarien sind genauso wie eine vollständige Angabe aller p -Werte der durchgeführten t -Tests den entsprechenden Tabellen in Anhang A.1 zu entnehmen.

Die mittleren Werte über alle Probanden sowie die p -Werte für die Paarungen, bei denen sich statistisch signifikante Unterschiede ergeben, sind für das „Halten“-Szenario in Abbildung 5.8 dargestellt. Die mit Abstand höchste Abweichung ergibt sich in diesem Fall für das Konzept AF. Der Mittelwert von K_δ über alle Probanden liegt mit $11,27^\circ$ mehr als doppelt so hoch als der Wert für das Konzept GS, welches mit $5,13^\circ$ den zweithöchsten Mittelwert aufweist. Es folgen die Konzepte AS und GO mit $4,80^\circ$ bzw. $4,66^\circ$. Den kleinsten Fehler im Mittel erzeugt das differentialspielbasierte Übergabekonzept GD mit einem Wert von $4,31^\circ$. Die paarweisen statistischen Tests bestätigen den aus den Lenkradwinkeltrajektorien gewonnenen Eindruck, dass das frühe, abrupte Abschalten der Automation im Szenario „Halten“ im Mittel zu höheren Abweichungen von der Referenz führt als alle anderen Methoden zur Transition der Aufgabe. Mit p -Werten zwischen 0,0002 und 0,0004 ist der Unterschied zu den anderen Varianten statistisch hochsignifikant. Der Vergleich der graduellen Übergabekonzepte GS, GO und GD sowohl untereinander als auch mit der Variante AS, die die Automation am Ende der Transitionsphase abrupt abschaltet, ergibt, dass die Unterschiede in diesem Fall für das Szenario „Halten“ nicht statistisch signifikant sind.

Bis auf den Tausch der Platzierung von AS und GS weisen die Übergabekonzepte für das Szenario „Anstieg“ dieselbe Reihenfolge auf (vgl. Abbildung 5.9). Die Mittelwerte von K_δ über alle Probanden reichen von $1,66^\circ$ für GD bis $3,30^\circ$ für AS. Die Werte für die anderen Konzepte

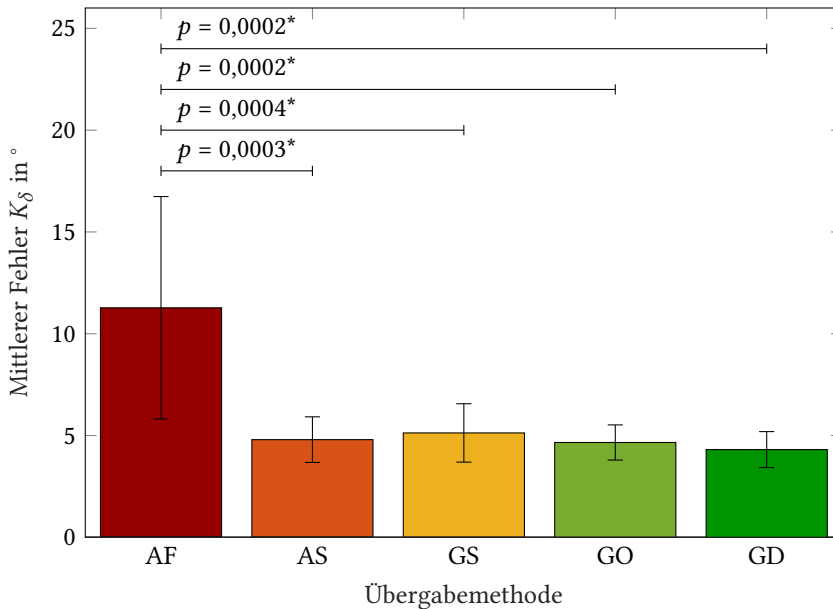


Abbildung 5.8: Statistischer Vergleich des Lenkwinkelfehlers zwischen allen Übergabekonzepten für das Szenario „Halten“. Statistisch signifikante Unterschiede (*: $p < 0.05$) sind explizit angegeben.

verteilen sich annähernd gleichmäßig dazwischen und betragen $2,63^\circ$ (AS), $2,49^\circ$ (GS) und $2,20^\circ$ (GO). Durch die Identität von Solllenkgradwinkel und Ruhelage des Systems zu Beginn des Szenarios liegen die Mittelwerte in diesem Fall deutlich niedriger als im Szenario „Halten“. Relativ zueinander betrachtet unterscheiden sich die Methoden in diesem Szenario zum Teil dennoch voneinander. Dies zeigt sich anhand der Ergebnisse der paarweisen t -Tests. So ist zum einen die Reduktion des Lenkwinkelfehlers der Variante GO gegenüber beiden direkt-abschaltenden Übergabekonzepten statistisch signifikant ($p = 0,0276$ für den Vergleich mit AF, $p = 0,0166$ für den Vergleich mit AS). Wird dagegen ein Differentialspiel zur Realisierung der graduellen Übergabe der Aufgabe verwendet, bestätigen die paarweisen t -Tests mit den anderen Methoden sogar in allen Fällen einen signifikanten Unterschied. Die entsprechenden t -Tests liefern für den Vergleich von GD mit AF ($p = 0,0039$) und GO ($p = 0,0027$) ein sehr signifikantes und für den Vergleich mit AS ($p < 0,0001$) und GS ($p < 0,0001$) sogar ein hochsignifikantes Ergebnis. Anders als im Szenario „Halten“ ist die statistische Signifikanz der Verbesserung von AS und GS gegenüber AF hier nicht mehr gegeben. Alle anderen Kombinationen weisen ebenfalls keinen statistisch signifikanten Unterschied auf.

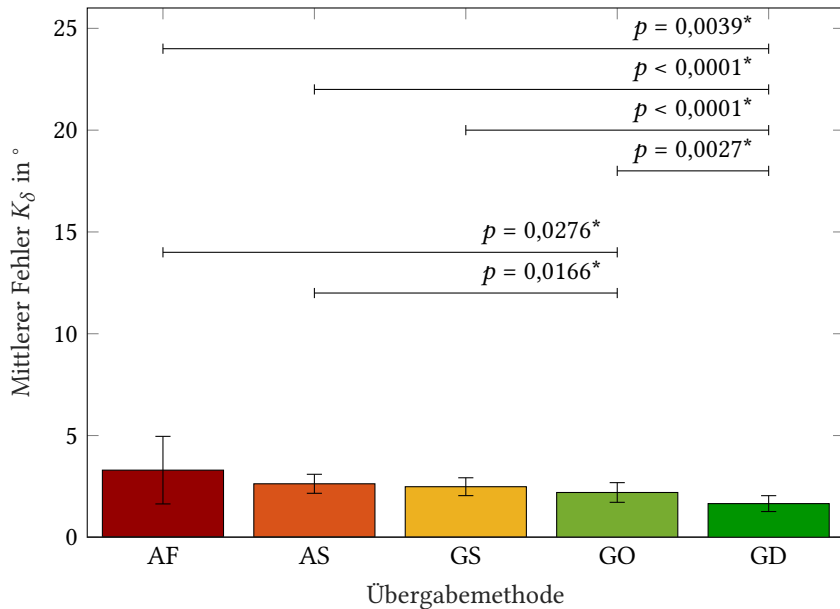


Abbildung 5.9: Statistischer Vergleich des Lenkwinkelfehlers zwischen allen Übergabekonzepten für das Szenario „Anstieg“. Statistisch signifikante Unterschiede ($*$: $p < 0.05$) sind explizit angegeben.

Auswertung der Fragen

Neben den objektiven Bewertungskriterien wurden die Angaben der Probanden auf die Fragen nach ihrer Einschätzung der Leistung beim Folgen der Referenzlinie und ihrer Bewertung des Lenkgefühls während der Übergabe ausgewertet. Da die Probanden den Fragebogen erst am Ende eines Durchgangs ausgefüllt haben, wurde in der Frage nicht zwischen den Szenarien unterschieden. Die Abbildungen 5.10 und 5.11 zeigen den Durchschnitt und die Standardabweichung der Bewertungen der getesteten Übergabekonzepte über alle Versuchsteilnehmer. Eine Tabelle mit den Einzelbewertungen befindet sich in Anhang A.1.

Interessanterweise unterscheidet sich die Einschätzung der Probanden hinsichtlich der Frage, wie gut sie mit dem entsprechenden Konzept der Vorgabe folgen konnten, von den tatsächlichen Ergebnissen. So wird das Konzept AF, welches keine Unterstützung während der Transitionsphase bietet und in beiden Testszenarien die höchsten mittleren absoluten Fehler produzierte, besser bewertet als die Methode AS, welche objektiv den mittleren bzw. vorletzten Platz belegt. AS erhält dagegen von den Versuchsteilnehmern die schlechteste Bewertung. Weiterhin wird die Leistung bei Variante GO, die in beiden Szenarien zur zweitkleinsten Abweichung zur Referenz führt, schlechter bewertet als bei GS (viert- bzw. drittkleinste Abweichung) und landet so hinter GS auf dem dritten Rang. Einzig bei der am besten eingeschätzten Variante

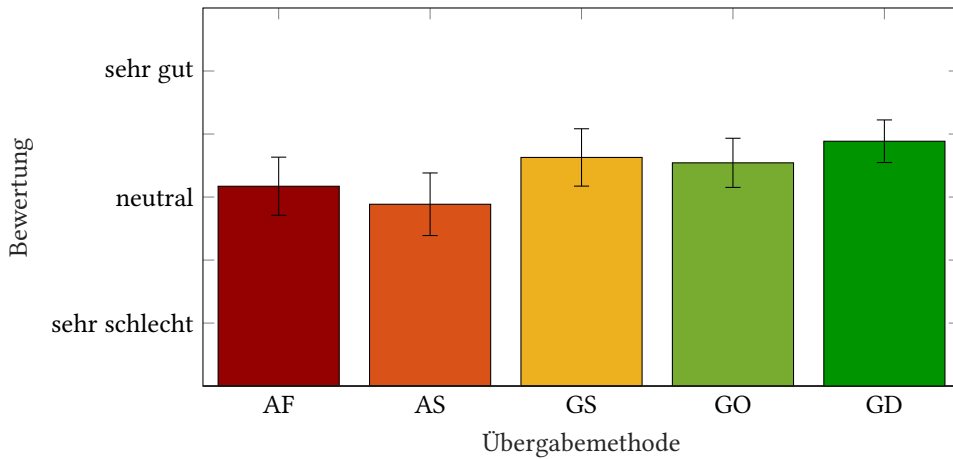


Abbildung 5.10: Auswertung der Frage „Wie gut konnten Sie der vorgegebenen Linie während der Übergabe folgen?“, aufgeteilt nach Übergabemethode

GD stimmen die Angaben der Probanden mit den Messungen überein. Insgesamt reicht die Einschätzung der Konzepte von knapp unter neutral bis knapp unter gut, wobei die Varianten bei denen das Automationsmoment sprunghaft reduziert wird, eher mit neutral und die graduellen Methoden eher mit gut beurteilt werden.

Die Reihenfolge der Übergabekonzepte ist bei der Bewertung des Lenkgefühls identisch zu der Bewertung der Trajektorienfolgeleistung, jedoch erhöht sich der Abstand des am schlechtesten bewerteten Konzepts AS zu den anderen Methoden. Das abrupte Abschalten am Ende der Transitionsphase führt dazu, dass die Probanden das Lenkgefühl als unangenehm angeben. Das Abschalten zu Beginn der Transitionsphase wird dagegen mit neutral beurteilt, wobei dieser Vorgang im Szenario „Anstieg“ auch nicht spürbar ist, da zu Beginn der Phase ohnehin kein Automationsmoment auf das Lenkrad aufgebracht wird. Eine graduelle Abnahme des Moments der Automation wird dagegen von den Versuchsteilnehmern als positiv wahrgenommen und das Lenkgefühl mit 3,74 bis 4,06 von fünf Punkten auf der Bewertungsskala für all diese Methoden als angenehm empfunden.

5.1.3 Interpretation und Zusammenfassung

In diesem Experiment wurden fünf Übergabekonzepte in zwei Testszenarien anhand einer einfachen Trajektorienfolgeaufgabe miteinander verglichen. Die Auswertung der 35 Versuchsteilnehmer zeigt, dass die frühestmögliche Abschaltung der Automation im Vergleich zu Methoden, welche durch Reduktion eines Transitionsparameters innerhalb des Regelalgorithmus die Automation graduell abschalten, zu deutlich höheren Abständen zur Referenzvorgabe führt.

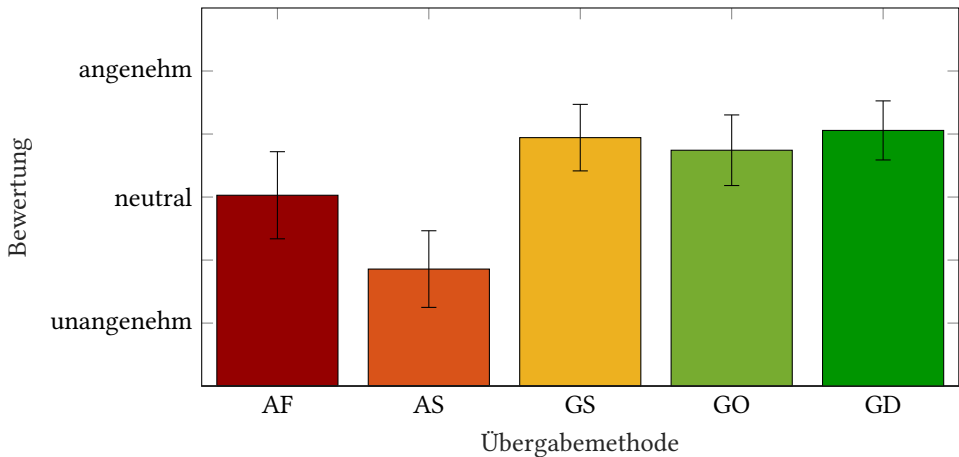


Abbildung 5.11: Auswertung der Frage „Wie empfanden Sie das Lenkgefühl während des Übergabevorgangs?“, aufgeteilt nach Übergabemethode

Die Unterschiede sind hierbei statistisch signifikant (Vergleich mit Methode GO im Szenario „Anstieg“) bzw. hochsignifikant (Vergleich mit Methode GO im Szenario „Halten“ und mit Methode GD in beiden Szenarien). Ist am Ende der Präparationsphase unmittelbar ein Lenkmoment nötig, um der Referenz zu folgen, liefern sogar alle Varianten, die den Fahrer in der Transitionsphase noch durch ein Moment der Automation unterstützen, einen geringeren Fehler als ein sofortiger Wechsel zur rein manuellen Kontrolle (Unterschied jeweils hochsignifikant). Für diese Varianten untereinander kann hingegen kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Die niedrigste Abweichung zum Sollwert liefert für beide Testszenarien die Umsetzung der Übergabe mit Hilfe eines Differentialspiels gemäß der Beschreibung aus Abschnitt 3.3. Die Verbesserung durch dieses Konzept ist im Falle des Szenarios „Anstieg“ statistisch hochsignifikant gegenüber allen getesteten Alternativen.

Um die Frage zu klären, warum dieses Konzept bessere Ergebnisse liefert, müssen die Automationsmomente der verschiedenen Methoden betrachtet werden. Der Vergleich der Trajektorien zeigt in beiden Szenarien, dass die Methoden GO und GD zu Beginn der Transitionsphase einen annähernd identischen Verlauf zu den Trajektorie bei AS aufweisen. Das ist gleichbedeutend mit der Beibehaltung des Automatisierungsgrads, der vor der Übernahmeaufforderung vorliegt. Die Konzepte AF und GS erfordern dagegen durch sofortiges Abschalten bzw. eine stärkere Reduktion der Unterstützung von Beginn an eine Reaktion des übernehmenden Menschen ein. In der zweiten Hälfte der Transitionsphase ist zu erkennen, dass das unterstützende Moment bei Methode GD früher reduziert wird bzw. nicht so hoch ansteigt wie bei GO und AS, bei denen das Moment erst sehr spät und damit verbunden auch deutlich steiler bzw. sogar sprunghaft abfällt. In der Transitionsphase muss also ein Kompromiss zwischen der Her-

anführung des Übernehmenden an die neue Tätigkeit und einer rechtzeitigen Vorbereitung der vollständigen Übergabe der Kontrolle gefunden werden. Die Ergebnisse des Experiments indizieren, dass für einen guten Erfüllungsgrad der Aufgabe der menschliche Partner zunächst mit voller Unterstützung an die Aufgabe herangeführt, das assistierende Moment jedoch anschließend besser früher und dafür über einen längeren Zeitraum allmählich reduziert werden sollte. Das differentialspielbasierte Übergabekonzept modelliert diese Anforderung gut und führt somit zu den besten Ergebnissen.

Es ist anzumerken, dass es durch Anpassung des Skalierungsparameters κ bzw. des Transitionsparameters α auch möglich wäre, den Verlauf des Automationsmoments der Übergabemethoden GS und GO so zu gestalten, dass dieser identisch zum Verlauf für das Konzept GD bei gegebener Parametrierung ist. Den zusätzlichen Aufwand, einen solchen Verlauf zu ermitteln, kann jedoch durch die Modellierung der Interaktion zwischen Automation mit Hilfe eines Differentialspiels eingespart werden, da dieses Konzept inhärent den Kompromiss zwischen Ausführung der Aufgabe und Abgabe derselben an den menschlichen Partner sucht. Dabei ermöglicht diese Modellierung zusätzlich eine leichtverständliche Interpretierbarkeit des Verlaufs des verwendeten Transitionsparameters als aktuelle Aufteilung der Aufgabe zwischen den Partnern.

Die Befragung der Versuchsteilnehmer zeigt, dass die verbesserte Leistung beim Folgen der Referenz im Falle der differentialspielbasierten Übergabe auch korrekt wahrgenommen wird und dieses Konzept den höchsten Wert erreicht. Zudem wird das Konzept auch in der Kategorie Lenkgefühl am besten bewertet. Auch in der subjektiven Wahrnehmung der Probanden scheint das Übergabekonzept GD folglich den Zielkonflikt zwischen Unterstützung und Abgabe der Aufgabe am besten zu lösen. Die graduellen Übergabekonzepte erzielen jedoch auch generell bessere Benotungen als die direkt abschaltenden Konzepte. Insbesondere das Lenkgefühl wird bei den Methoden mit abrupter Abschaltung kritisch betrachtet, was potenziell an der als unkomfortabel empfundenen, großen Änderung des haptisch wahrgenommenen Moments liegt. Das späte Abschalten erhält hierbei nochmal erheblich schlechtere Bewertungen als das frühe Abschalten. Ein Erklärungsansatz hierfür lautet, dass der Momentensprung bei frühestmöglichem Abschalten im Szenario „Anstieg“ überhaupt nicht auftritt oder im Testszenario „Halten“ von einem Teil der Probanden zumindest nicht wahrgenommen wird, da sie zu diesem Zeitpunkt die Hände noch nicht am Bedienelement haben. Die identische Rangfolge der Konzepte in der Bewertung der Fähigkeit, der Spur zu folgen, deutet auf eine falsche Einschätzung der Probanden hin, dass eine unkomfortable Übergabe auch eine schlechtere Leistung beim Nachfahren der Solltrajektorie zur Folge haben muss. Hohe Abweichungen zu Beginn der Transition, wie sie in den Konzepten AF und GS entstehen, könnten in der stressigen Übernahmesituation weniger bewusst wahrgenommen werden als Abweichungen am Ende, wenn der Versuchsteilnehmer wieder voll auf die Lenkaufgabe fokussiert ist.

Das Experiment zeigt zudem, dass eine a-priori und für alle Versuchspersonen identische Festlegung des Startzeitpunkts der Transition nicht praxistauglich ist. Der vordefinierte Übergang von Präparations- zu Transitionsphase exakt 2 s nach der Übernahmeaufforderung führt zum einen dazu, dass Probanden, die bereits früher übernahmebereit waren, noch die volle Unterstützung erhalten, obwohl die Transition prinzipiell schon beginnen könnte. Zum anderen beginnt die Transitionsphase für einige Versuchspersonen ungeachtet der Tatsache, dass diese sich noch nicht von der Nebenaufgabe abgewandt und die Hände an das Lenkrad genommen haben. Die Auswirkungen dieser offensichtlich zu früh startenden Transition sind deutlich im Szenario „Halten“ zu erkennen. Hier muss die Reduktion des Moments der Automation unmittelbar durch den Menschen kompensiert werden, was besonders bei einem schnellen Abfall zu hohen Abweichungen vom Sollverlauf führt, wenn der Proband dazu noch nicht in der Lage ist. Aus diesem Grund sollte beim Design von Transitionen darauf geachtet werden, dass die Aufgabe frühestens dann an den Menschen übergeben wird, wenn dieser physisch dazu bereit ist. Mit Hilfe von Sensoren, welche zur Laufzeit erkennen, ob die Versuchsperson bereits die Hände am Lenkrad hat, könnte das Ende der Präparationsphase exakt bestimmt werden. Eine entsprechende Sensorik am Bedienelement wurde deshalb für die nachfolgenden Experimente eingesetzt, um den Startzeitpunkt der Transition korrekt zu wählen.

Insgesamt zeigt das Experiment bereits bei dem sehr einfachen Versuchsaufbau sowohl in den objektiven wie auch den subjektiven Bewertungskriterien die Vorteile von haptischer Unterstützung während der Übergabe. Insbesondere die Modellierung der Mensch-Maschine-Interaktion mit Hilfe eines zeitvarianten Differentialspiels liefert vielversprechende Ergebnisse. Daher sollte geprüft werden, ob sich dieser Ansatz auf komplexere Aufgaben, wie z.B. die Übernahme eines Fahrzeugs nach einer hochautomatisierten Fahrt, übertragen lässt und sich die Vorteile auch hierfür bestätigen lassen. Um diese Fragestellung zu untersuchen, wurde das nachfolgende Experiment konzipiert.

5.2 Vergleich von direkter und kooperativer Übergabe der Fahrzeugquerführung

Nachdem das erste Experiment gezeigt hat, dass eine differentialspielbasierte Modellierung der Interaktion zwischen den Kooperationspartnern eine performante und komfortable Übergabe einer einfachen Aufgabe von der Automation an den Menschen ermöglicht, wird dieses Konzept in einem zweiten Experiment auf die deutlich anspruchsvollere Aufgabe der Fahrzeugquerführung übertragen. Das Experiment soll die kritische Situation abbilden, in der ein auf eine fahrfremde Tätigkeit fokussierter Fahrer eines hochautomatisiert fahrenden Fahrzeugs an einer Systemgrenze zur Fahrzeugübernahme aufgefordert wird und anschließend schnell

und sicher reagieren muss, um eine Kollision zu vermeiden. Basierend auf den Messungen dieses Experiments wird analysiert, ob und ggf. in welchem Umfang eine kooperative Übergabe im Vergleich zum konventionellen, direkten Abschalten der Automation auch hier Verbesserungen erzielen kann.

5.2.1 Versuchsbeschreibung

Da die Konzepte in einer kritischen Fahrsituation miteinander verglichen werden sollen, jedoch eine Gefährdung der Versuchsteilnehmer und ggf. weiterer Personen ausgeschlossen werden müssen, kann das Experiment nicht im öffentlichen Straßenverkehr stattfinden. Eine Versuchsdurchführung auf einem Testgelände vermittelt den Probanden zwar ein realistisches Fahrgefühl, ein immersives Bild eines realitätsnahen Übergabeszenarios nach einer längeren hochautomatisierten Fahrt ist dort jedoch nur mit erheblichem zeitlichen und finanziellen Aufwand umsetzbar. Aus diesen Gründen wurde ein Fahrsimulator als Plattform für dieses Experiment gewählt, welcher reproduzierbar authentische Szenarien vermitteln kann und dabei die Sicherheit der Versuchspersonen gewährleistet. Die Vorstellung des Experiments erfolgt anhand der Elemente Versuchsaufbau, Regelalgorithmus, Fahrscenario, Übergabekonfigurationen, Versuchsablauf und Bewertungskriterien, die nachfolgend einzeln im Detail beschrieben werden.

Versuchsaufbau

Als Versuchsstand für das Experiment wurde der in Abbildung 5.12 dargestellte, statische Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie (LFE) an der Technischen Universität München genutzt. Kern des Simulators ist eine Karosserie der 6er Reihe des Herstellers BMW. Hierdurch entsprechen das Interieur, die Möglichkeiten der Umgebungswahrnehmung und die räumlichen Verhältnisse innerhalb der Fahrgastzelle denen einer realen Fahrt in einem solchen Fahrzeug. Der Fahrzeuginnenraum unterscheidet sich vom Serienfahrzeug durch den Einbau von zwei frei programmierbaren Displays, welche die Rolle von Kombiinstrument und zentralem Infotainment-Display übernehmen sowie der Installation von drei Infrarotkameras zur Fahrerbeobachtung mit Hilfe eines SmartEye Eye-Tracking-Systems. Analog zum ersten Experiment wird auch in diesem Versuchsaufbau der Aktor eines SensoWheel SD-LC verwendet, um sowohl ein realistisches Lenkgefühl zu erzeugen als auch die Lenkmomente der Automation bereit zu stellen. Für die Detektion der Hände des Fahrers wird die im Originalenlenkrad verbauten Sensorik genutzt. Die Darstellung der Fahrzeugumgebung erfolgt mit Hilfe eines aus sechs Projektoren bestehenden Projektionssystems. Drei Projektoren bilden die Frontsicht, indem sie jeweils einen Teil der 26 m² großen, polygonförmigen Leinwand beleuchten und so ein Sichtfeld von ca. 180° aus Sicht der Fahrerperspektive erlauben. Die übrigen Projektoren erzeugen jeweils auf drei getrennten Leinwänden die Sicht nach hinten, die vom Fahrersitz über

die beiden Seiten- und den Innenspiegel eingesehen werden kann. Abbildung 5.13 zeigt den schematischen Aufbau des Projektionssystems.

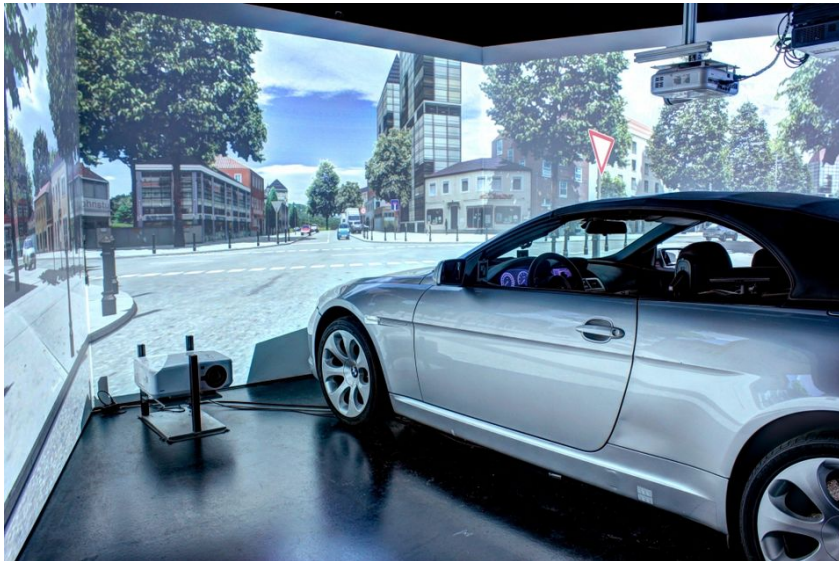


Abbildung 5.12: Statischer Fahrsimulator des Lehrstuhls für Ergonomie an der Technischen Universität München ©TUM

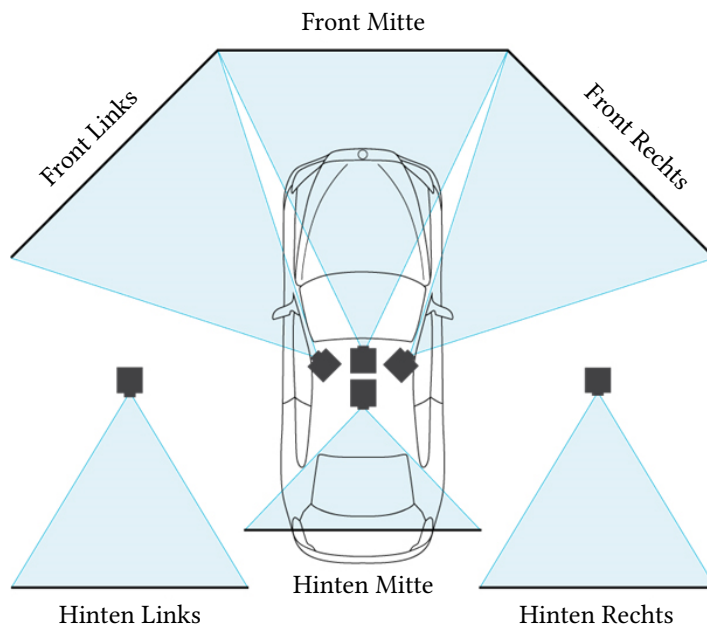


Abbildung 5.13: Projektionssystem des Fahrsimulators ©TUM



(a) Zustände der Automation:
Inaktiv-nicht verfügbar, inaktiv-verfügbar, aktiv

(b) Übernahmeaufforderung

Abbildung 5.14: Icons zur Anzeige des Zustands der Automation und der Übergabeaufforderung

Die Berechnung der Fahrzeugdynamik, der Visualisierung, des 3-D-Sounds und der Datenverarbeitung erfolgt mit der Fahrsimulationssoftware SILAB Version 5.0 auf einem aus elf Rechnern bestehenden Netzwerk. Einzig der Querführungsregler für die kooperative Übergabe wird auf einem separaten PC in MATLAB Simulink Version R2016a berechnet, der für den Datenaustausch via UDP an das Netzwerk angebunden ist.

Die hochautomatisierte Fahrfunktion kann über eine Taste am Lenkrad aktiviert werden, falls sich das Fahrzeug in einem Bereich befindet, in dem eine Nutzung zulässig ist. Der aktuelle Systemzustand (Inaktiv-nicht Verfügbar, Inaktiv-Verfügbar, Aktiv) wird auf dem Kombiinstrument angezeigt. Eine Aufforderung des Systems an den Fahrer, die Fahrzeugführung zu übernehmen, erfolgt gemäß den Richtlinien aus [CRBM07] einerseits akustisch über einen wiederholten Piepton (70 dB, 2600 Hz), andererseits über ein weiteres Symbol im Kombiinstrument. Die visuelle Komponente des Human-Machine-Interfaces (HMI) ist der Masterarbeit [Fis16] entnommen und die entsprechenden Icons zur Anzeige des Systemzustands sowie der Übernahmeaufforderung sind in Abbildung 5.14 wiedergegeben.

Um auch das angestrebte Nutzungsverhalten realistisch abzubilden, wird eine Aufgabe bereitgestellt, mit der sich die Probanden während der hochautomatisierten Fahrt beschäftigen und so vom Fahrgeschehen abgelenkt werden sollen. Hierfür wurde der Surrogate Reference Task (SuRT) [ISO12] gewählt, bei dem aus einer Menge von kleinen Kreisen der Kreis gefunden werden muss, der etwas größer als die Übrigen ist. Die Aufgabe wurde auf einem separaten Tablet angezeigt, welches die Probanden während der Erledigung in den Händen halten konnten. Der SuRT ist so realisiert, dass mit einer Wischbewegung zunächst die Seite, in der sich der größere Kreis befindet, ausgewählt und die Auswahl anschließend mit einem Tippen bestätigt werden muss. Daraufhin beginnt der nächste Durchgang mit einer neuen Anordnung der Kreise. Die Versuchspersonen werden hierdurch also visuell, motorisch und kognitiv beansprucht. Dies ist vergleichbar mit der Nutzung von mobilen Endgeräten, was einen realistischen Anwendungsfall für die Verwendung einer hochautomatisierten Fahrfunktion darstellt.

Abbildung 5.15 zeigt einen Screenshot der SuRT-App, bei dem bereits eine Auswahl für die rechte Bildschirmseite getroffen wurde, die Bestätigung aber noch aussteht.

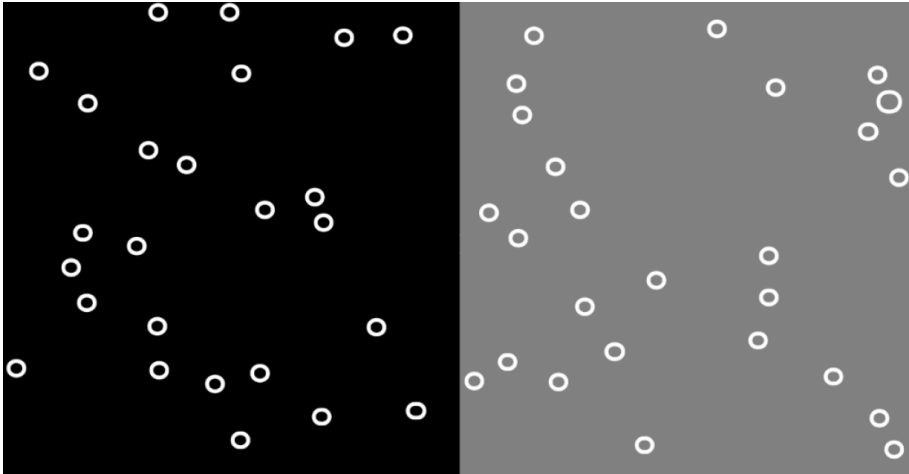


Abbildung 5.15: Screenshot der SuRT-App, bei der aktuell die rechte Seite vorausgewählt wurde (Hintergrund ändert sich von schwarz zu grau); der größere Kreis befindet sich oben rechts

Verwendeter Regelalgorithmus

Der Querführungsregler wurde auf Basis des Hamilton-Ansatzes, wie in Abschnitt 3.2.1 vorgestellt, programmiert⁵. Zur Modellierung des Einflusses des Lenkradwinkels auf die Fahrzeugbewegung wird das, bereits 1940 erstmalig veröffentlichte, lineare Einspurmodell verwendet [RS40]. Die bis heute hohe Relevanz und weite Verbreitung dieses Modells zeigt sich durch die Erläuterung in der Fahrdynamik-Literatur, wie beispielsweise in [MW13], [KN05] oder [EG17], auf die auch für die Herleitung der Gleichungen verwiesen wird. In [Tra12] wird gezeigt, dass die Modellgenauigkeit für ein Szenario, wie es hier verwendet wird, ausreicht und die Verbesserung durch komplexere Modelle, wie das nichtlineare Einspurmodell und das Zweispurmodell, die daraus resultierende Erhöhung der Berechnungszeit für diese Anwendung nicht rechtfertigen.

Die folgende Systemgleichung beschreibt den resultierenden Zusammenhang zwischen den Systemzuständen Schwimmwinkel β und Gierrate $\dot{\psi}$ und dem Lenkradwinkel δ in Abhängigkeit von der Fahrzeugmasse m , der Geschwindigkeit v , der Lenkübersetzung i_L , dem Trägheitsmoment des Fahrzeugs um die Hochachse I_F , den Schräglaufsteifigkeiten vorne C_v und hinten C_h sowie den Abständen der Achsen zum Schwerpunkt l_v bzw. l_h :

⁵ Alternativ, jedoch mit höherem Rechenaufwand, kann der Querführungsregler auch über den Batch-Ansatz (vgl. Abschnitt 3.2.2) realisiert werden, was in der Bachelorarbeit [Ott18] umgesetzt wurde.

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-C_v - C_h}{mv} & \frac{C_h l_h - C_v l_v - mv^2}{mv^2} \\ \frac{C_h l_h - C_v l_v}{I_F} & \frac{-C_v l_v^2 - C_h l_h^2}{I_F v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{C_v}{mv l_L} \\ \frac{C_v l_v}{I_F l_L} \end{bmatrix} \delta \quad (5.6)$$

Unter der Annahme kleiner Winkel ergibt sich zudem die Änderung der Position y entlang der Fahrzeugquerachse aus

$$\dot{y} = v\beta + v\psi. \quad (5.7)$$

Zur Veranschaulichung sind die geometrischen Zusammenhänge in Abbildung 5.16 skizziert.

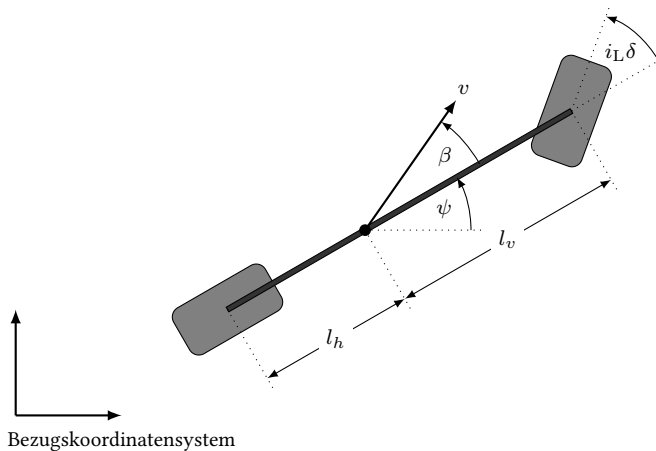


Abbildung 5.16: Geometrische Zusammenhänge des linearen Einspurmodells

Die Dynamik des Lenkstrangs wird hier wie im ersten Experiment durch eine lineare Feder und einen linearen Dämpfer modelliert, sodass für ein Lenksystem mit Trägheitsmoment I_L , Dämpfung d und Steifigkeit c analog zu Gleichung (5.1) der Zusammenhang zwischen dem Lenkradwinkel δ und den Lenkmomenten der Automation u_A sowie des Menschen u_M durch das Zustandsraummodell

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{c}{I_L} & -\frac{d}{I_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I_L} \end{bmatrix} u_A + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{I_L} \end{bmatrix} u_M \quad (5.8)$$

beschrieben werden kann.

Ergänzt um den Gierwinkel ψ als weiterer Zustand lassen sich die Gleichungen (5.6), (5.7) und (5.8) zu einem einzigen Zustandsraummodell mit den Lenkmomenten als Eingangsgrößen zusammenfassen:

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\psi} \\ \dot{y} \\ \dot{\delta} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-C_v - C_h}{mv} & \frac{C_h l_h - mv^2 - C_v l_v}{mv^2} & 0 & 0 & \frac{C_v}{mv i_s} & 0 \\ \frac{C_h l_h - C_v l_v}{I_F} & \frac{-C_v l_v^2 - C_h l_h^2}{I_F v} & 0 & 0 & \frac{C_v l_v}{I_F i_s} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v & 0 & v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-c}{L} & \frac{-d}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \psi \\ \psi \\ y \\ \delta \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u_A + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{bmatrix} u_M \quad (5.9)$$

Dieses Modell wird als Nebenbedingungsgleichung (3.58c) der Optimierung verwendet.

Neben dem Systemmodell benötigt der Regler zudem eine Referenztrajektorie \bar{x} . Eine Methode zur Generierung dieser Sollwerttrajektorie wurde im Rahmen der Bachelorarbeit [Sch17] umgesetzt und soll hier kurz vorgestellt werden. Grundlage der Trajektorie bildet der Verlauf der Straße, dessen Koordinaten aus der Fahrsimulationssoftware ausgelesen werden können. Über eine Verschiebung der Straßenverlauftrajektorie senkrecht zur Fahrbahn kann die Spur ausgewählt werden, auf der das Fahrzeug fahren soll. Ein Spurwechsel kann mit Hilfe eines Triggersignals eingeleitet werden, beispielsweise um ein vorausfahrendes Fahrzeug zu übernehmen. Dafür wird die Trajektorie entlang der Straße mit Hilfe einer Sigmoidfunktion entsprechend der Methode aus [Stä08] modifiziert und nach Abschluss des Spurwechsels der Offset der Straßenverlauftrajektorie an die neue Spur angepasst. Da Gleichung (5.9) die Bewegung im lokalen Fahrzeugkoordinatensystem beschreibt, wird die ggf. modifizierte Trajektorie anschließend vom globalen in dieses lokale Koordinatensystem transformiert und kann so in Form von Referenzwerten in ψ und y angegeben werden. Im letzten Schritt wird die ortsabhängige Solltrajektorie auf Basis der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit entsprechend der Diskretisierungszeit des Reglers abgetastet und ggf. interpoliert, wodurch man die erforderliche, zeitabhängige Darstellung von \bar{x} erhält.

Die Parametrierung des Reglers ergibt sich wie folgt. Die Einspurmodellparameter i_L , l_v , l_h , m und I_F können direkt aus den Fahrzeugdaten der Simulationssoftware abgelesen werden, während die Schräglaufsteifigkeiten C_v und C_h experimentell mit der Methode aus [Tad12] bestimmt werden. Die Wahl der Modellparameter der Lenkung verläuft analog zum ersten Experiment (vgl. Abschnitt 5.1.1). Die Gütemaße der beiden Spieler (3.58a) bzw. (3.58b) werden hinsichtlich \mathbf{R} normiert. Für die Bestimmung des optimalen Lenkmoments werden nur der Gierwinkel ψ , die Gierrate $\dot{\psi}$ und die Querposition y berücksichtigt, weshalb die Zustandsgewichtungsmatrix der Gütemaße zu $\mathbf{Q}^* = \text{diag}(0, q_{\dot{\psi}}, q_{\psi}, q_y, 0, 0, 0)$ gewählt wird. Die Matrix zur Bestrafung des Endzustands \mathbf{S}^* wird identisch zu \mathbf{Q}^* parametrierung. Die verwendeten Zahlenwerte für alle Modell- und Gütemaßparameter sind Tabelle 5.2 zu entnehmen.

Tabelle 5.2: Gütemaß- und Modellparameter für das Experiment zum Vergleich von direkter und kooperativer Übergabe der Fahrzeugquerführung

Parameter	Wert	Einheit
I_L	0,09	Nm s ² /rad
c	1,15	Nm/rad
d	0,29	Nm s/rad
i_L	17,7	-
l_v	1,418	m
l_h	1,412	m
C_v	90000	N/rad
C_h	160000	N/rad
m	1835	kg
I_F	2100	Nm s ² /rad
$q_{\dot{\psi}}$	40	s ² /rad ²
q_{ψ}	70	1/rad ²
q_y	4	1/m ²
R	1	1/N ²

Die Optimierung erfolgt über einen gleitenden Horizont der Länge 1,5 s. Zu Beginn jedes Optimierungsdurchgangs werden die Soll- und Ist-Zustände in das lokale Koordinatensystem mit dem Ursprung im Fahrzeugschwerpunkt und den Achsen entlang bzw. senkrecht zur Fahrzeuglängsachse transformiert, um die Gültigkeit der linearen Beschreibung der Fahrzeugkinematik zu bewahren. Die Diskretisierungszeit für die numerische Lösung des Differentialgleichungssystems (4.8) wird identisch zur Abtastzeit der Fahrsimulation zu 16 ms gewählt. Der Betrag der so berechneten Stellgröße der Automation wird abschließend auf 2 Nm begrenzt, bevor es als Sollmoment an den Aktor kommuniziert wird. Dies stellt sicher, dass der Eingriff der Automation stets von den Versuchspersonen übersteuert werden kann.

Eine am LfE programmierte Längsregelung vervollständigt die hochautomatisierte Fahrfunktion. Mit Hilfe eines PID-Reglers wird ein Adaptive Cruise Control System nachgebildet. Wird kein Objekt vor dem Fahrzeug erkannt, regelt das System auf die zulässige Sollgeschwindigkeit, andernfalls auf die Geschwindigkeit, für die eine konstante Zeitlücke von 2 s bis zur Kollision mit dem vorausfahrenden Fahrzeug besteht. Mit den damit zur Verfügung stehenden Längs- und Querregelungen sind die Voraussetzungen für eine Fahrfunktion geschaffen, die hochautomatisiertes Fahren ermöglicht.

Fahrszenario

Der Vergleich von Übernahmesituationen bei einem Fahrzeug mit und ohne kooperativen Transitionsprozess ist Teil eines größeren Experiments im Rahmen des vom Bundesministe-

rium für Bildung und Forschung geförderten Projekts „Personalisierte, adaptive, kooperative Systeme für automatisierte Fahrzeuge“ (PAKoS)⁶. Innerhalb des Gesamtexperiments werden drei wesentliche Komponenten der Nutzung einer hochautomatisierten Fahrfunktion nachgebildet:

- Erstes Einschalten der Funktion
- Freiwillige Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer
- Übernahme der Fahraufgabe nach Aufforderung durch das System

Da hiervon nur der letzte Punkt Gegenstand dieser Dissertation ist, wird nachfolgend zwar der Ablauf des gesamten Experiments vorgestellt, die Ergebnisse zu den ersten beiden Komponenten jedoch in dieser Arbeit nicht weiter ausgewertet und analysiert.

Die Komponenten wurden in ein entsprechendes Streckenszenario eingebettet, welches jeweils mit unterschiedlichen Konfigurationen wiederholt wurde. Abbildung 5.17 veranschaulicht den Streckenaufbau grafisch.

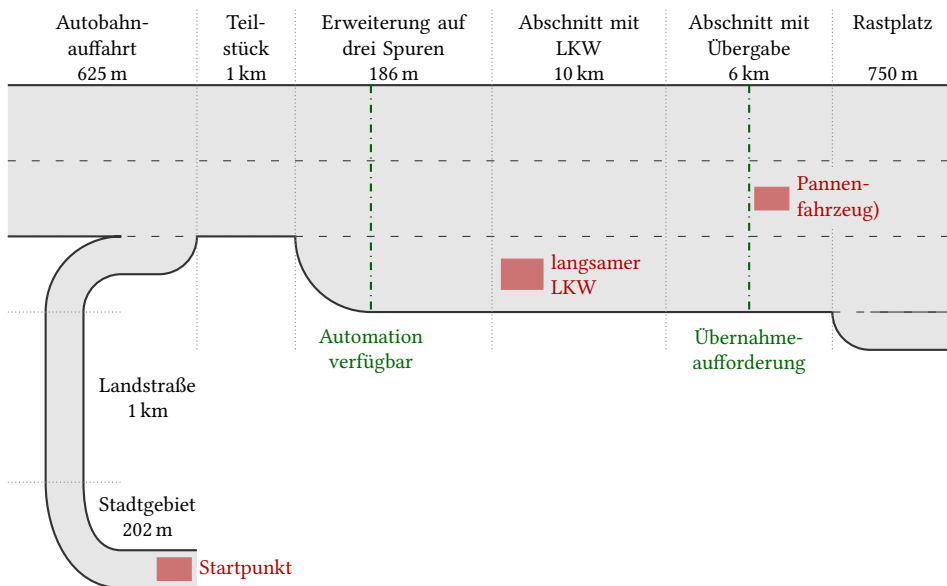


Abbildung 5.17: Schematische Darstellung der Abfolge der Streckenkomponenten

Das Szenario beginnt immer in einer Stadtumgebung und führt nach 202 m auf eine 1 km lange zweispurige Landstraße. Am Ende dieser Straße folgt eine Auffahrt auf eine Autobahn (Länge der Auffahrt 625 m, Länge des Autobahn-teilstücks 1 km) mit zwei Spuren pro Fahrtrichtung. Die Breite jeder Spur der Autobahn beträgt im gesamten Szenario 4 m, die Schutzplanken

⁶ Für detaillierte Informationen zum Gesamtprojekt siehe www.technik-zum-menschen-bringen.de/projekte/pakos

sind 0,5 m von den äußeren Fahrspuren entfernt. Außerdem beträgt die Geschwindigkeitsbegrenzung durchgehend 120 km/h. Im nächsten Abschnitt der Länge 186 m erweitert sich die Fahrbahn auf drei Spuren. Damit beginnt ein 10 km langes Autobahnteilstück, auf dem die hochautomatisierte Fahrfunktion verfügbar ist. Die Funktion lässt sich nur auf dem rechten Fahrstreifen aktivieren, nutzt im Anschluss daran jedoch abhängig von der Verkehrssituation alle Fahrbahnen. Die Probanden sollen die Funktion in diesem Bereich selbstständig einschalten bzw. werden spätestens nach zwei Minuten vom Versuchsleiter dazu aufgefordert. Auf diesem Abschnitt befindet sich nach 3 km ein LKW auf der rechten Spur. Aufgrund der hohen Verkehrsdichte auf der Mittelspur initiiert die Automation keinen Spurwechsel, sondern folgt dem LKW mit der reduzierten Geschwindigkeit von 80 km/h. Hier sollen die Probanden von sich aus die Fahraufgabe übernehmen und den Spurwechsel selbst durchführen. Auch hier erfolgt nach zwei Minuten eine Aufforderung durch den Versuchsleiter, falls die Probanden nicht wie gewünscht reagieren, um den geplanten Ablauf für die verbleibende Strecke zu garantieren. Ebenso werden die Probanden im Anschluss zur erneuten Aktivierung der hochautomatisierten Fahrfunktion aufgerufen, falls sie das nicht selbstständig tun. Als nächstes folgt das Teilstück mit der Übernahmeaufforderung (Länge 6 km). Da dies der für diese Arbeit relevante Streckenabschnitt ist, erfolgt die Beschreibung hier ausführlicher als für die anderen Bereiche.

Auf den ersten 5 km führt die Automation selbstständig mehrere Spurwechsel zwischen allen drei Fahrspuren durch, um andere Verkehrsteilnehmer zu überholen. Am Ende dieser Passage befindet sich das Fahrzeug auf der mittleren Spur eines geraden Streckenstücks, wobei die rechte Spur in diesem Bereich durch andere Verkehrsteilnehmer oder Objekte blockiert ist. Zudem ist die Sicht nach vorne durch ein vorausfahrendes Fahrzeug eingeschränkt, sodass das stehende Pannenfahrzeug der Breite 1,957 m, dessen Mittelpunkt sich 450 m entfernt ebenfalls auf der Mittelspur befindet, verdeckt ist. Kurz darauf weicht das vorausfahrende Fahrzeug diesem Hindernis aus und gibt damit die Sicht auf das stehende Fahrzeug frei. Sobald sich das zuvor verdeckende Fahrzeug auf der linken Spur befindet, fordert das System den Fahrer zur Übernahme der Fahrzeugführung auf. Der Mittelpunkt des Ego-Fahrzeugs befindet sich zu diesem Zeitpunkt 200 m vom Hindernis entfernt auf der Position 5250 m des Teilstücks. Im Falle der Beibehaltung der Ausgangsgeschwindigkeit von 120 km/h ergibt sich somit unter Berücksichtigung der räumlichen Ausdehnung der Fahrzeuge eine Zeitdauer von 5,86 s, bis das eigene Fahrzeug auf das Pannenfahrzeug auffahren würde. Die tatsächliche Zeitdauer wird jedoch durch das Ausrollen des Fahrzeugs sowie ggf. weitere Bremsingriffe durch die Versuchsperson erhöht. Abbildung 5.18 zeigt die geometrischen Verhältnisse zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung für ein beispielhaftes Übergabeszenario.

Nach dem Übernahmezenario steht die Automationsfunktion nicht mehr zur Verfügung. Die Probanden werden nach dem entsprechenden Teilstück über Verkehrsschilder dazu angehalten, am folgenden Rastplatz, der weitere 750 m entfernt ist, die Autobahn zu verlassen. Mit dem Anhalten auf diesem Rastplatz endet die Fahrt. Die Strecke besitzt somit eine Gesamtlän-



Abbildung 5.18: Umgebungssituation zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung. Ein Pannenfahrzeug steht 200 m entfernt auf der mittleren Spur. Die rechte Spur ist in diesem Fall durch LKWs blockiert.

ge von knapp 20 km und man benötigt je nach Fahrstil bzw. Zeit, welche die Probanden hinter dem LKW verbleiben, 10 –15 min, um das gesamte Szenario von der Stadt bis zum Rastplatz zu absolvieren.

Übergabekonfigurationen

Als unabhängige Variable des Experiments wird die Konfiguration der Transition während des Übernahmeszenarios verwendet. Die nachfolgenden drei Konfigurationen werden getestet:

- Direkte Übergabe
- Kooperative Übergabe
- Kooperative Übergabe mit personalisiertem HMI

Bei der direkten Übergabe erfolgt die Abschaltung des Querreglers zeitgleich mit der Übernahmeaufforderung. Da die Aufforderung jedoch auf einem geraden Fahrbahnabschnitt erfolgt, hält das Fahrzeug die Spur, bis der Proband ein Lenkmanöver vornimmt.

Die kooperative Übergabe verläuft dagegen analog zum differentialspielbasierten Konzept aus dem ersten Experiment (vgl. Abschnitt 5.1.1). Das bedeutet die Funktion bleibt während der Präparationsphase aktiv. Sobald die Hände zuverlässig am Lenkrad detektiert werden, beginnt die Transitionsphase, deren Länge zu 4 s gewählt wurde. Auch hier verbleibt der Transitionsparameter für die Dauer eines Prädiktionshorizonts auf dem Wert 1 und wird anschließend über die verbleibende Zeit linear auf 0 reduziert. In der dritten Variante wird den Probanden statt den Anzeigen aus Abbildung 5.14 personalisierte Symbole zur Verfügung gestellt. Weiterhin erhalten sie mit der Sprachansage „Wenn möglich, links ausweichen!“ eine Handlungsempfehlung. Für die Personalisierung des HMIs werden die Versuchspersonen vorab anhand eines Fragebogens klassifiziert und ihnen ein entsprechendes Anzeigekonzept dargeboten. Da sich das Konzept von der regelungstechnischen Umsetzung nicht von der Variante mit dem im vorherigen Unterabschnitt vorgestellten HMI unterscheidet, wird in dieser Arbeit auf diese Konfiguration nicht weiter eingegangen und nur die direkte mit der kooperativen Transition verglichen. Die Längsregelung schaltet in allen Varianten mit der Übernahmeaufforderung ab und das Fahrzeug rollt aus.

Versuchsdurchführung

Die Durchführung des Versuchs erfolgte im Rahmen der Masterarbeit [Kus19]. Das komplette Szenario wurde von jedem Probanden in jeder Übergabekonfiguration einmal durchlaufen. Vor Beginn der drei Versuchsdurchgänge wurden die Probanden über den Versuchsablauf informiert. Sie wurden angehalten, sich möglichst identisch zu einer realen Fahrt zu verhalten und auf die Einhaltung der Straßenverkehrsordnung hingewiesen. Weiterhin wurden sie darüber aufgeklärt, dass sie nach der Übernahmeaufforderung der einzig verantwortliche Fahrer sind, das System jedoch versucht, sofern möglich, unterstützend einzugreifen. Zusätzlich wurden die Versuchspersonen gebeten, die Nebenaufgabe zu erfüllen, wenn die Situation es zulässt, d.h. nur wenn die Automation aktiv ist. Nachdem geprüft wurde, ob die Teilnehmer die wichtigsten Aussagen wiedergeben konnten, hatten sie die Gelegenheit den Fahrsimulator im Rahmen einer Eingewöhnungsfahrt kennenzulernen. Hierbei konnten sie Sitz- und Spiegelposition passend einstellen, die Reaktion des Fahrzeugs auf Lenk-, Beschleunigungs- und Verzögerungseingaben testen und sich mit der Bedienung der Automation vertraut machen. Außerdem wurde auf einem geraden Streckenabschnitt der Ablauf einer Übernahmeaufforderung demonstriert, die jedoch keinen aus der Fahrsituation erkenntlichen Grund besitzt.

Um Lerneffekten zwischen den Versuchsdurchläufen entgegen zu wirken, wurden mehrere Maßnahmen getroffen. So wurde nach dem ersten Versuchsdurchgang eine weitere Fahrt

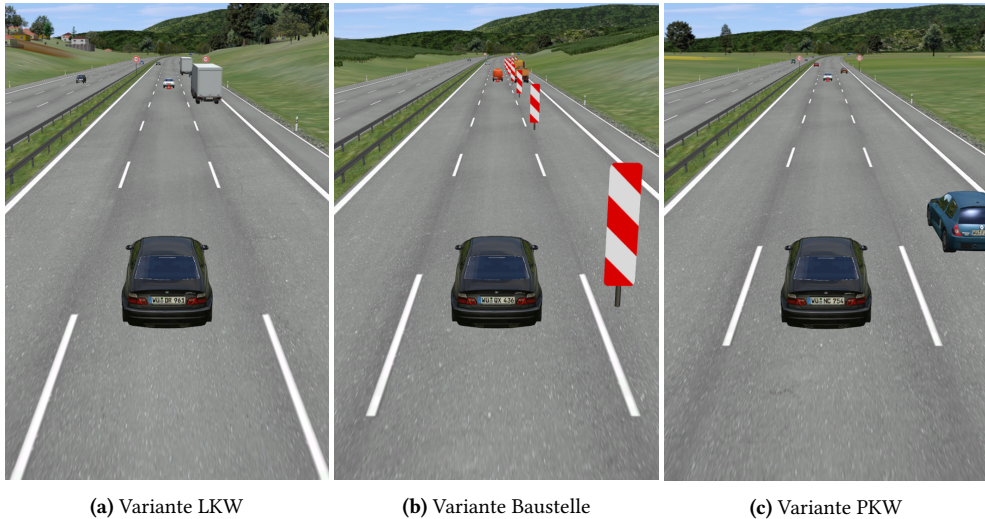


Abbildung 5.19: Variationen des Übernahmeszenarios

eingefügt, die nicht ausgewertet wurde, sondern nur zur Schaffung von Unvorhersehbarkeit diente. In dieser zusätzlichen Zwischenfahrt gibt es keinen zweiten Abschnitt der Länge 10 km für eine freiwillige Übernahme des Fahrzeugs und auch der Abschnitt mit der Übernahmeaufforderung wird auf 2,5 km verkürzt. Da in diesem Fall zuvor keine Fahrstreifenwechsel durchgeführt werden, befindet sich das stehende Hindernis bei dieser Fahrt auf der rechten Spur auf Streckenkilometer 2200 dieses Teilstücks. Auf diese Art wird mit der bisherigen Reihenfolge der Ereignisse gebrochen und der Fahrer deutlich früher als in der regulären Versuchsfahrt zur Übernahme aufgefordert. Auch diese Fahrt endet mit dem Halten auf dem nachfolgenden Parkplatz.

Die zweite Versuchsfahrt wurde ebenfalls modifiziert. Zwar bleiben hier die Streckenabschnitte identisch, jedoch wird der LKW entfernt, der von der Automation nicht überholt werden kann, wodurch die entsprechende Situation verschwindet.

Als zusätzliche Variation wurden die Objekte und Umgebungstexturen zwischen den einzelnen Fahrten verändert. So kann trotz identischer Streckenführung die Illusion eines anderen Testszenarios erzeugt werden. Abbildung 5.19 zeigt die Variationen in Hindernis, Blockade der rechten Spur und Landschaft zum Zeitpunkt kurz nach der Übernahmeaufforderung.

Der Versuchsablauf für einen Probanden ergibt sich somit wie folgt:

1. Information über den Versuch
2. Eingewöhnungsfahrt
3. Versuchsfahrt

4. Zwischenfahrt
5. Versuchsfahrt ohne freiwillige Übernahme
6. Versuchsfahrt

Für einen fairen Vergleich der beschriebenen Übergabekonfigurationen wurde deren Zuordnung zu den Versuchsfahrten zwischen den Probanden variiert. Die Versuchsteilnehmer wurden durch persönlichen Kontakt, Aushänge in der Maschinenbauakultät der Technischen Universität München oder digitale Aushänge in sozialen Medien rekrutiert. 72 % der Probanden erhielten eine Aufwandsentschädigung von 30 € für die Teilnahme, der Rest nahm unentgeltlich am Experiment teil.

Bewertungskriterien

Die Bewertung der Übernahme-situation erfolgt in dieser Arbeit rein über objektive Kriterien. Dafür werden die von der Simulationssoftware aufgezeichneten Fahrzeugsignale genutzt. Die Signale werden hierbei in einem Zeitintervall von 12 s betrachtet, beginnend mit der Ausgabe der Übernahmeaufforderung. Innerhalb dieser Zeitspanne wird, ausgehend von der Fahrzeugtrajektorie, der Geschwindigkeit und der Beschleunigung des Fahrzeugs zum einen das Risiko einer Kollision abgeschätzt, zum anderen der fahrdynamische Fahrzeugzustand bewertet. Hierfür wurden vier Kenngrößen definiert, die nachfolgend vorgestellt werden.

Das Kollisionsrisiko wird separat für die Längs- und Querbewegung des Fahrzeugs bewertet. Da sich Kraftfahrzeuge üblicherweise primär in Längsrichtung bewegen, wird in diesem Fall die aktuelle Geschwindigkeit mitberücksichtigt. Als Maß für das Risiko einer Kollision mit dem Pannenfahrzeug wird deshalb zu jedem Zeitpunkt im betrachteten Intervall die Time-to-Collision zu diesem Hindernis berechnet. Diese Größe beschreibt die Zeitdauer bis zur Kollision zweier Objekte unter der Annahme, dass jeweils die momentane Geschwindigkeit beibehalten wird. Sie ergibt sich aus dem Quotienten des aktuellen Abstands der beiden Objekte und deren Relativgeschwindigkeit [Hay72]. Der aktuelle Abstand berechnet sich aus deren aktuellen Positionen x_{Ego} bzw. x_{H} auf der Strecke. Da sich das Hindernis im Stillstand befindet, entspricht die Relativgeschwindigkeit direkt dem Anteil der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs entlang der Strecke v_x . Die Kennzahl K_τ zur Bewertung des Kollisionsrisikos in Längsrichtung beschreibt den kleinsten Wert der Time-to-Collision im Zeitfenster zwischen Übernahmeaufforderung und dem Passieren der Querposition der linken Kante des Hindernisses mit der vorderen rechten Ecke des Ego-Fahrzeugs gemäß

$$K_\tau = \min \left(\frac{x_{\text{H}} - x_{\text{Ego}}}{v_x} \right). \quad (5.10)$$

Werte kleiner Null für K_τ sind gleichbedeutend mit einer Kollision.

Wenn das Ego-Fahrzeug auf die linke Spur ausweicht, besteht das Risiko einer Kollision mit der Schutzplanke auf der linken und dem Hindernis auf der rechten Seite der Spur. Zur Bewertung dieses Risikos wird eine zweite Kenngröße verwendet. Da die möglichen Kollisionen in diesem Fall quer zur Hauptbewegungsrichtung des Fahrzeugs stattfinden, wird hier der kleinste Abstand zur Schutzplanke d_S bzw. zum Hindernis d_H als Maß verwendet. Für eine sichere Fahrt muss eine Position im Korridor zwischen Fahrbahnbegrenzung und Hindernisfahrzeug gefunden werden, welche die gegensätzlichen Ziele eines großen Sicherheitsabstandes zu den jeweiligen Objekten ausreichend erfüllt. Zur Bewertung des Kollisionsrisikos in Querrichtung wird daher das Minimum der beiden Abstände

$$K_d = \min(d_S, d_H) \quad (5.11)$$

verwendet. So wird ausgeschlossen, dass ein hoher Wert in einer Richtung auf Kosten eines niedrigen Werts in der anderen erzielt wird. Analog zur Kennzahl K_r zählen auch hier Werte kleiner Null als Kollision.

Als dritte Kennzahl wird mit Hilfe der Abstände der Platzbedarf auf der linken Spur beschrieben, d.h. wie viel Raum das Ausweichmanöver auf dieser Spur einnimmt. Die Distanz zwischen den Punkten, bei denen das Fahrzeug den geringsten Abstand zur Schutzplanke bzw. zum Hindernis besitzt, wird über die Kennzahl K_Δ angegeben zu

$$K_\Delta = \Delta_{\max} - d_S - d_H, \quad (5.12)$$

wobei Δ_{\max} den Abstand zwischen Hindernis und Schutzplanke beschreibt. Ein optimales Fahrverhalten zeichnet sich durch einen konstanten Abstand zu beiden potenziellen Kollisionsobjekten aus, wodurch sich ein minimales K_Δ entsprechend der Fahrzeugbreite ergibt. Ein Schlingern zwischen diesen Objekten hingegen erhöht den Wert von K_Δ .

Als letztes wird die Querbeschleunigung des Fahrzeugs a_y zur Bewertung herangezogen. Mit

$$K_a = \max(|a_y|) \quad (5.13)$$

wird der betragsmäßige Maximalwert der Querbeschleunigung im betrachteten Zeitraum als vierte Kenngröße gewählt. Abbildung 5.20 verdeutlicht die Bewertungskriterien anhand einer Skizze.

Für alle vier Kenngrößen wird jeweils die Hypothese aufgestellt, dass durch die kooperative Übergabe (Index k) im Mittel Verbesserungen gegenüber Übergaben mit direkter Abschaltung (Index d) erzielt werden. Dabei sind für K_r und K_d große und für K_Δ und K_a kleine Werte

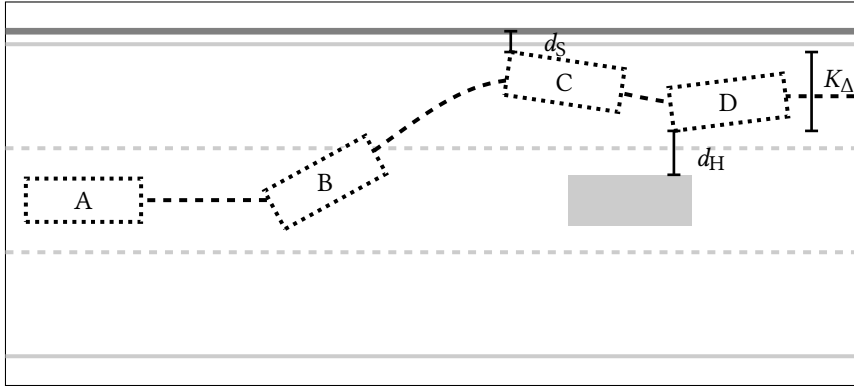


Abbildung 5.20: Kriterien zur Bewertung des Ausweichmanövers. In der Phase zwischen Übernahmeanforderung (Position A) und Passieren des Hindernisses mit der Fahrzeugfront (Position B) wird die minimale Time-to-Collision K_τ berechnet. Weiterhin wird aus dem kleinsten Abstand zur Schutzplanke (Position C) und dem kleinsten Abstand zum Hindernis (Position D) sowohl die minimale Distanz K_d zu einem Kollisionsobjekt als auch der benötigte Platz auf der Spur K_Δ ermittelt. Über die gesamte Trajektorie hinweg wird zudem die maximale Querbeschleunigung K_a berechnet.

für die Mittelwerte μ der Kenngröße über alle Probanden aus Sicht der Fahrdynamik bzw. Fahrsituation besser. Folglich wird geprüft, ob die Nullhypothesen

$$H_0 : \mu_{K_\tau, d} \geq \mu_{K_\tau, k} \quad (5.14)$$

$$H_0 : \mu_{K_d, d} \geq \mu_{K_d, k} \quad (5.15)$$

$$H_0 : \mu_{K_\Delta, d} \leq \mu_{K_\Delta, k} \quad (5.16)$$

und

$$H_0 : \mu_{K_a, d} \leq \mu_{K_a, k} \quad (5.17)$$

verworfen werden können. Die Prüfung der Hypothesen erfolgt wie im vorherigen Experiment mit Hilfe von einseitigen Zweistichproben- t -Tests für abhängige Stichproben.

Für eine detailliertere Analyse des kooperativen Übergabekonzepts werden zudem die Verläufe des Transitionsparameters sowie des bereitgestellten, unterstützenden Lenkmoments betrachtet.

5.2.2 Ergebnisse

Für den Vergleich des kooperativen Übergabekonzepts mit der direkten Übergabe nach dem aktuellen Stand der Technik wurden für 37 Personen technisch einwandfreie Datensätze auf-

gezeichnet. Von diesen Datensätzen müssen fünf Versuchspersonen von der Analyse ausgeschlossen werden, weil sie bereits vor Ausgabe der Übernahmeaufforderung die Fahraufgabe übernommen oder sie zu diesem Zeitpunkt entgegen der Versuchsvorgabe nicht an das Fahrzeug abgegeben hatten. Der Datensatz einer weiteren Person wird aufgrund gesundheitlicher Beschwerden verworfen. Folglich verbleiben die Fahrten mit und ohne kooperative Übergabe von 31 Versuchspersonen (13 weiblich, 18 männlich, Alter 18-62 Jahre, Mittelwert 32,90 Jahre, Standardabweichung 11,93 Jahre) als Datengrundlage für die nachfolgende Analyse. Diese erfolgt in drei Teilen. Zuerst werden die beiden Übergabekonzepte anhand der Fahrzeugtrajektorien gegenübergestellt. Dieser qualitativen Beurteilung der Ausweichmanöver folgt im zweiten Teil die quantitative Bewertung durch die Berechnung der Kenngrößen und Durchführung der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Hypothesentests. Im dritten Teil wird der Ablauf des Transitionsprozesses gezeigt und für ausgewählte Versuchspersonen im Detail vorgestellt, wie die kooperative Transitionsphase den Übergabeprozess im Vergleich zur direkten Transition beeinflusst.

Fahrzeugtrajektorien

Abbildung 5.21 zeigt die Fahrzeugschwerpunkttrajektorien der 31 Versuchspersonen bei sofortiger vollständiger Übergabe der Fahrzeugführung mit der Übernahmeaufforderung. Es sei darauf hingewiesen, dass bei der Darstellung der Trajektorien 450 m in Längsrichtung gegenüber 14 m quer zur Fahrbahn gezeigt werden. Durch die ungleiche Skalierung der Achsen ergibt sich eine Verzerrung, welche besonders an der Darstellung des Hindernisfahrzeugs im Vergleich zur verhältnismäßig getreuen Darstellung aus Abbildung 5.20 deutlich wird. Die Trajektorien zeigen eine große Streuung hinsichtlich des Starts des Ausweichmanövers, des Stabilisierungsprozesses auf der linken Spur und der Spurauswahl nach Passieren des Hindernisses. Außerdem hervorzuheben sind die Kollisionen mit der Schutzplanke, welche sich unter Berücksichtigung der Fahrzeuggeometrie für zwei der Probanden ergäben. Dabei ist zu beachten, dass die Fahrsimulationsoftware keine Kollisionsabfrage zwischen dem Ego-Fahrzeug und anderen Objekten durchführt. Das Auftreten einer Kollision wirkt sich somit weder auf das Fahrverhalten aus, noch wird dem Fahrer die Kollision auf eine andere Art angezeigt, d.h. die Fahrer müssen die Kollision nicht zwingend bemerkt haben.

Die Trajektorien der Fahrzeugschwerpunkte für den Fall, dass die Versuchspersonen während des Übernahmeprozesses durch eine kooperative Transition unterstützt werden, zeigt Abbildung 5.22. Da wie zuvor keine Vorgabe für die Spurwahl nach dem Ausweichvorgang gemacht wurde, ergibt sich hier am Ende des betrachteten Zeitraums ebenfalls eine große Varianz zwischen den Probanden. Auch die individuellen Startpunkte des Ausweichmanövers werden beibehalten. Jedoch weisen die Trajektorien auf der linken Spur im Gegensatz zu den Trajektorien im unassistierten Fall eine erkennbare Bündelung auf. Außerdem käme es unter Verwendung

des Konzepts der kooperativen Transition zu keiner Kollision, auch wenn ein Proband einen Kontakt mit der Schutzplanke nur knapp vermeiden konnte.

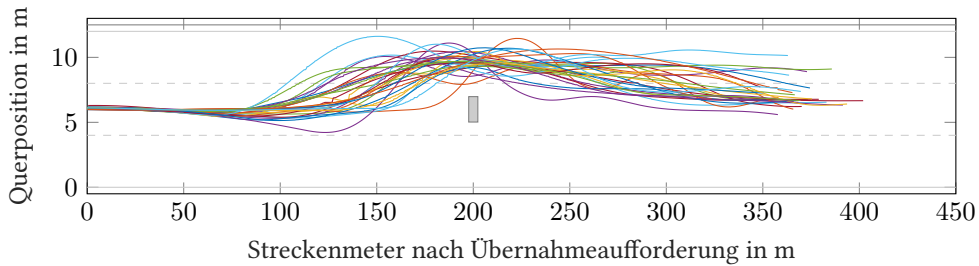


Abbildung 5.21: Fahrzeugschwerpunkttrajektorien aller Probanden für die Versuchsdurchgänge mit der direkten Übergabe

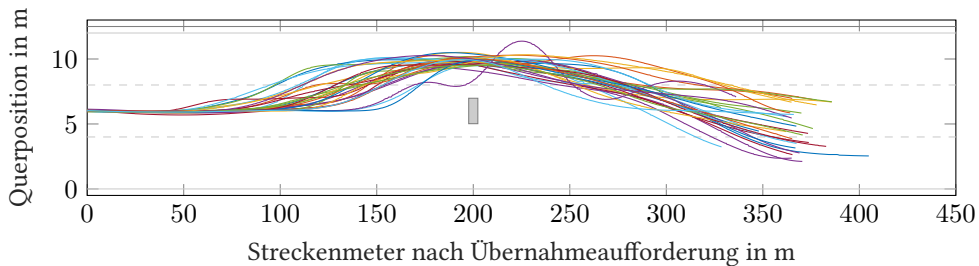


Abbildung 5.22: Fahrzeugschwerpunkttrajektorien aller Probanden für die Versuchsdurchgänge mit der kooperativen Übergabe

Kenngrößen und statistischer Vergleich

Der quantitative Vergleich zwischen den beiden Transitionskonzepten erfolgt anhand der vordefinierten Kenngrößen. In den nachfolgenden Absätzen werden die wichtigsten statistischen Werte für beide Konzepte zusammengefasst. Für detaillierte Werte für jeden einzelnen Probanden sei auf die Tabellen A.4 und A.5 im Anhang A.2 verwiesen.

Die Versuchsdurchgänge mit direkter Abschaltung der Querführungsregelung ergeben eine mittlere minimale Time-to-Collision K_T von 1,783 s bei einer Standardabweichung von 0,798 s. Bei vier Versuchspersonen liegt der Wert unter 1 s, einer der Probanden ist sogar nur 0,161 s von einer Kollision mit dem Hindernisfahrzeug entfernt. Bei Anwendung einer kooperativen Transitionsphase liegt hingegen die mittlere Zeitlücke bei 2,167 s (Standardabweichung 0,675 s) und nur in einem Testdurchlauf unterschreitet ein Proband mit einem K_T von 0,891 s den Wert von 1 s. Der t -Test zur Überprüfung, ob die Erhöhung des Mittelwertes um knapp 0,4 s

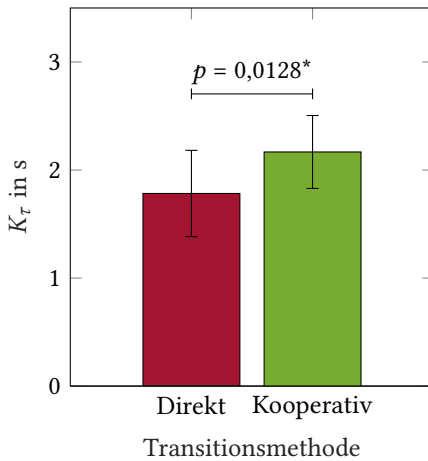


Abbildung 5.23: Statistischer Vergleich der minimalen Zeitlücke zur Kollision K_t zwischen direkter und kooperativer Transition

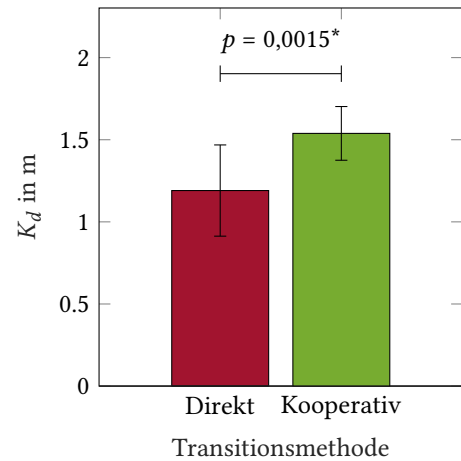


Abbildung 5.24: Statistischer Vergleich des minimalen lateralen Abstands zu anderen Objekten K_d zwischen direkter und kooperativer Transition

durch Einführung der kooperativen Transition statistisch signifikant ist, ergibt einen p -Wert von 0,0128, wodurch die Signifikanz der Erhöhung bestätigt werden kann. Der statistische Vergleich ist in Abbildung 5.23 veranschaulicht.

Auch für den kleinsten lateralen Abstand K_d ergeben sich deutliche Unterschiede, wie Abbildung 5.24 zeigt. So ist der Mittelwert bei Nutzung des sofortigen Übergabekonzepts mit 1,191 m über 30 cm geringer als der Wert von 1,539 m bei der graduellen Übergabe (Standardabweichungen 0,555 m bzw. 0,327 m). Die Anwendung des t -Tests ergibt einen p -Wert von 0,0015, wodurch die Verbesserung als statistisch sehr signifikant bezeichnet werden kann. Wie bereits an den Fahrzeugtrajektorien bemerkt, ergäben sich für die direkte Übergabe bei zwei Versuchspersonen Kollisionen. Die zugehörigen K_d -Werte von $-0,002$ m und $-0,006$ m zeigen, dass die Überschneidung mit der Schutzplanke nur wenige Millimeter beträgt, wobei auf Grund der nicht vorhandenen Rückmeldung über die Kollision in der Simulation keine Aussagen über potenzielle Folgeaktionen getroffen werden können. Die ermittelten Abstände zur Schutzplanke zeigen zudem, dass zwei weitere Probanden die 0,5 m von der Schutzplanke entfernte Fahrbahnbegrenzungslinie überschritten haben, wobei dies in einem Fall bei der direkten Transition ($K_d = 0,323$ m) und für den anderen Fall bei der kooperativen Transition ($K_d = 0,133$ m) geschieht. Auf der rechten Seite überschreiten vier Probanden die rechte Spurbegrenzung im Bereich des stehenden Hindernisses. Hierbei unterschreiten drei Versuchspersonen die 1 m vom Hindernis entfernte Spurmarkierung bei ihrer Fahrt ohne haptische Unterstützung während der Übergabe und eine Person tut dies bei beiden Methoden. Der Minimal-

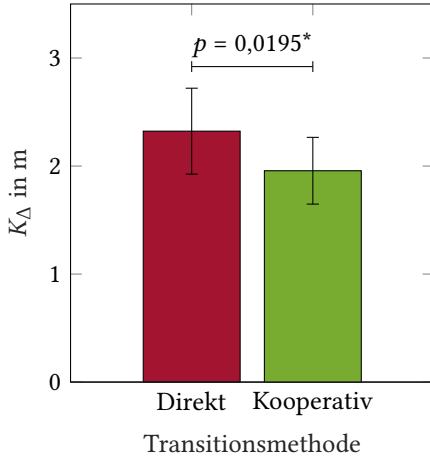


Abbildung 5.25: Statistischer Vergleich des Platzbedarfs auf der Ausweichspur K_{Δ} zwischen direkter und kooperativer Transition

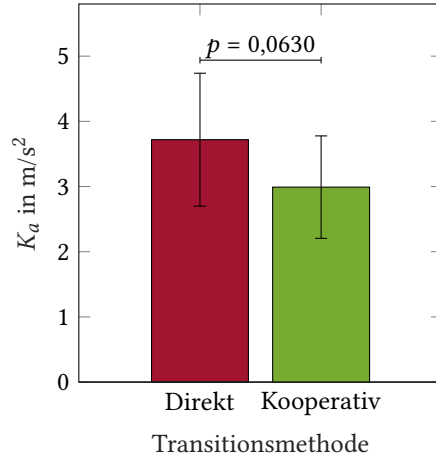


Abbildung 5.26: Statistischer Vergleich der maximalen Querbeschleunigung K_a zwischen direkter und kooperativer Transition

wert des lateralen Abstands zum Hindernis über alle Teilnehmer beträgt nur 0,058 m für die direkte und 0,177 m für die kooperative Transition.

Aus den kleinsten Abständen zu den potenziellen Kollisionsobjekten rechts und links wurde auch der in Querrichtung benötigte Platz K_{Δ} auf der linken Spur berechnet (siehe Abbildung 5.25). Für die direkte Transitionsmethode ergibt sich ein mittlerer Wert für K_{Δ} von 2,323 m bei einer Standardabweichung von 0,795 m. Über die Fahrzeugbreite hinaus benötigen die Probanden bei der direkten Übergabe demnach im Mittel zusätzlich 0,658 m. Die beiden Versuchspersonen, die auch mit der Schutzplanke kollidieren, benötigen für ihr Ausweichmanöver mit 4,446 m und 4,798 m den meisten Raum, da sie trotzdem auf Höhe des Hindernisses eng an diesem vorbeifahren. Mit der kooperativen Transition beträgt K_{Δ} im Mittel 1,957 m (Standardabweichung 0,618 m) und nur der Proband, der sowohl den kleinsten Abstand zur Schutzplanke als auch zum Hindernisfahrzeug generiert hat, überschreitet mit einem Wert von 5,211 m die Spurbreite von 4 m. Der höhere Platzbedarf bei direktem Abschalten der Automation gegenüber der graduellen Methode ist statistisch signifikant ($p = 0,0195$).

Das letzte Bewertungskriterium ist die betragsmäßig maximale Querbeschleunigung K_a während des Übergabeprozesses. Ohne Unterstützung liegen die Werte im Mittel bei 3,718 m/s^2 mit einer vergleichsweise hohen Standardabweichung von 2,015 m/s^2 . Zwei Probanden erreichen mit Werten von 8,833 m/s^2 und 8,939 m/s^2 sogar kritische Werte in der Nähe der Kraftschlussgrenze und nur 19 der 31 Probanden bleiben unterhalb des Wertes von 4 m/s^2 , welcher während einer regulären Fahrt in der Regel nicht überschritten wird [WHLS15, S.24]. Werden die Probanden hingegen im Verlauf der Übergabe haptisch unterstützt, liegt der Mittelwert über

alle Probanden $0,727 \text{ m/s}^2$ niedriger bei $2,991 \text{ m/s}^2$. Auch die Streuung nimmt etwas ab und die Standardabweichung beträgt $1,572 \text{ m/s}^2$. Zudem liegt der maximal erreichte Wert nur bei $8,079 \text{ m/s}^2$ und nur sechs statt zwölf Probanden überschreiten den als Komfortgrenze betrachteten Wert von 4 m/s^2 . Der t -Test liefert einen p -Wert von $0,0630$. Damit ist die Verbesserung in Form einer Reduktion von K_a durch die kooperative Transition statistisch nicht signifikant. Die grafische Darstellung des statistischen Vergleichs ist in Abbildung 5.26 gegeben. Eine abschließende Übersicht über alle statistischen Vergleiche zeigt Tabelle 5.3.

Tabelle 5.3: Übersicht der Ergebnisse des statistischen Vergleichs von direkter und kooperativer Transition

Nullhypothese H_0	p -Wert	Signifikanzniveau
$\mu_{K_\tau,d} \geq \mu_{K_\tau,k}$	0,0128	signifikant
$\mu_{K_d,d} \geq \mu_{K_d,k}$	0,0015	sehr signifikant
$\mu_{K_\Delta,d} \leq \mu_{K_\Delta,k}$	0,0195	signifikant
$\mu_{K_a,d} \leq \mu_{K_a,k}$	0,0630	nicht signifikant

Ablauf des Transitionsprozesses

Um zu erkennen, wie die Kenngrößen durch die kooperative Transition verbessert werden, wird zunächst der Verlauf des Transitionsparameters α betrachtet. Abbildung 5.27 zeigt die zeitliche Veränderung der Transitionsparameter aller Versuchspersonen von Beginn der Transitionsphase durch die Detektion der Hände am Lenkrad bis zum Ende der Transitionsphase. Dort erreicht der Parameter den Wert Null und das System stellt keine Unterstützung mehr bereit. Es ist eine hohe Varianz zwischen den Probanden zu erkennen. Die Zeitdauer, bis die Hände sicher am Lenkrad erkannt werden, beträgt zwischen $1,017 \text{ s}$ und $4,900 \text{ s}$ (Mittelwert $3,283 \text{ s}$, Standardabweichung $1,125 \text{ s}$) und die Transitionsphase endet im Mittel $4,139 \text{ s}$ später. Wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben, sollte α für die Dauer eines Prädiktionshorizonts, also in diesem Fall $1,5 \text{ s}$, den Wert 1 aufweisen und dann über $2,5 \text{ s}$ linear auf 0 abfallen, wodurch sich eine Gesamtdauer der Transitionsphase von 4 s ergäbe. Die leichte Verzögerung ist der imperfekten Synchronisation zwischen Regler und Fahrsimulator geschuldet⁷, bei der einzelne Daten nicht rechtzeitig übertragen und somit die vorherigen Werte weiter verwendet werden. Die lässt sich in Abbildung 5.27 an den kleinen Stufen im linearen Abschnitt des Transitionsverlaufs erkennen. Da dies bei allen Probanden nahezu identisch auftritt (Standardabweichung der Transitionsdauer $0,029 \text{ s}$), wird der Effekt für die Auswertung nicht weiter berücksichtigt.

Die große Varianz in der Lage des Startzeitpunkts der Transitionsphase erschwert einen direkten Vergleich aller Probanden, da sich mit der Zeit und darüber hinaus mit den individuellen Bremsengriffen der Versuchsteilnehmer auch die Verkehrssituation ändert und somit zu einem Zeitpunkt nicht für alle übereinstimmt. Daher erfolgt ein Vergleich exemplarisch

⁷ Die Hardware des Fahrsimulators ist kein Echtzeitsystem.

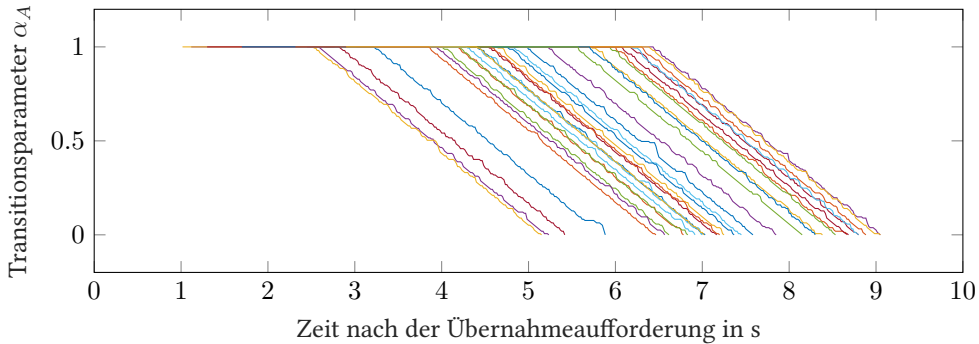


Abbildung 5.27: Verlauf des Transitionsparameters für alle Probanden bei der kooperativen Transition

für Personen, bei denen die Transitionsphase nahezu im identischen Streckenabschnitt liegt. Dafür werden die Probanden mit den Nummern 20, 1 und 31 nacheinander betrachtet. Die Trajektorien dieser Beispielpersonen sind jeweils mit und ohne Unterstützung während der Transitionsphase in den ersten drei Teilabbildungen von Abbildung 5.28 dargestellt. Der Verlauf des assistierenden Moments der Automation während der Transitionsphase findet sich für alle drei Probanden gemeinsam in der vierten Teilabbildung. Die Hände der drei Probanden werden nach 2,883 s, 2,917 s bzw. 2,900 s am Lenkrad erkannt. Durch leichte Unterschiede in der Bremsreaktion wird die Transitionsphase dann 94,4 m, 95,6 m bzw. 94,6 m nach der Übergabeaufforderung initiiert und endet weitere 128,8 m, 126,6 m bzw. 127,0 m danach. Damit liegt das Ende für alle drei Probanden über 20 m hinter dem Hindernis. Aufgrund des geringen Abstands zur Referenz und des reduzierten Transitionsparameters ist das Automationsmoment jedoch schon deutlich früher sehr gering und bereits 15 m vor dem Hindernis kleiner als 0,1 Nm. Obwohl die Transitionsphase für die Probanden zeitlich und räumlich nahezu identisch ist, unterscheidet sich deren Fahrverhalten deutlich.

Betrachtet man die Spurwechseltrajektorie bei Anwendung des kooperativen Transitionskonzepts für Versuchsperson 20, so zeigt sich, dass sie sich zunächst deutlich links der Referenztrajektorie bewegt, dieser aber in der zweiten Hälfte der Übergabe gut folgt. Dies äußert sich auch im Verlauf des unterstützenden Moments. Zu Beginn des Spurwechsels lenkt die Automation mit bis zu 1,6 Nm gegen das vom Fahrer initiierte Ausweichmanöver. Sobald der Fahrer jedoch der Referenz folgt und das Fahrzeug konstant in der Mitte der linken Spur hält, wird das Moment heruntergefahren und dieser nicht weiter beeinflusst. Auch bei der direkten Transition führt der Versuchsteilnehmer einen Spurwechsel durch, der nahe an dem Referenzverlauf liegt. Dies gelingt ihm jedoch nur durch eine deutliche Abbremsung des Fahrzeugs auf 82 km/h, was in der Grafik nur indirekt an der im Bewertungszeitraum von 12 s ca. 50 m geringeren zurückgelegten Strecke zu sehen ist. Bei insgesamt 19 der 31 Versuchspersonen wirkt das Moment

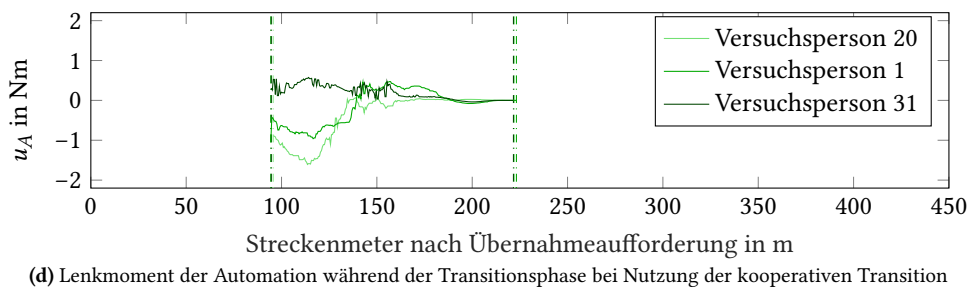
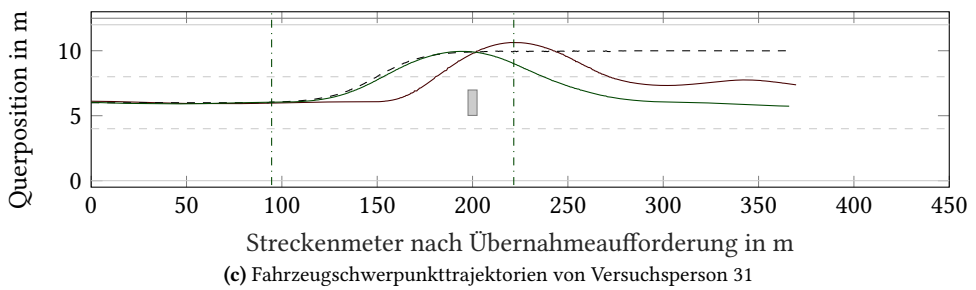
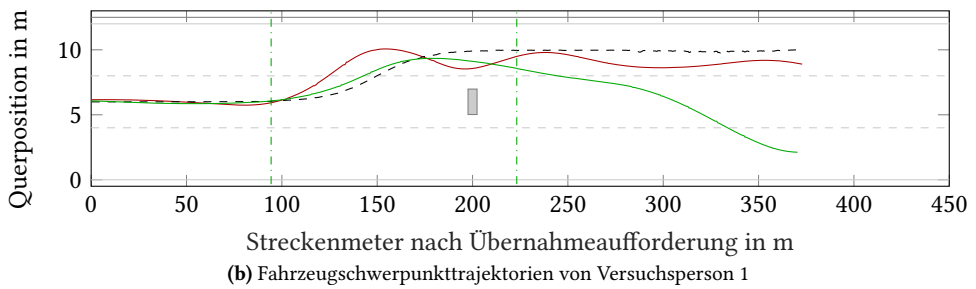
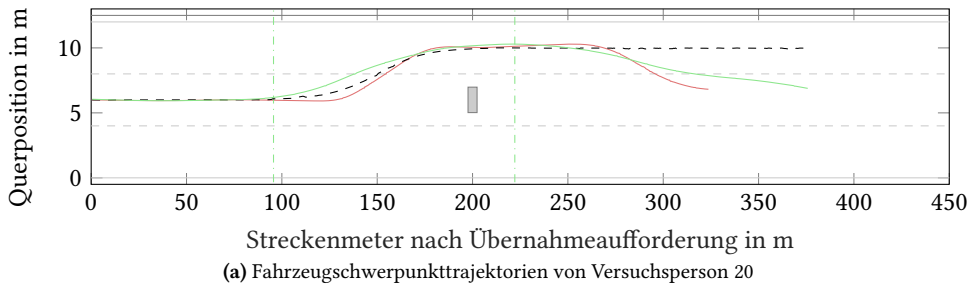


Abbildung 5.28: Übergabesituationen von ausgewählten Probanden für die direkte (rot) und die kooperative (grün) Transition. Die schwarze gestrichelte Linie beschreibt die Referenztrajektorie. Die vertikalen Linien geben jeweils Start und Ende der Transitionsphase an.

der Automation der Spurwechselrichtung entgegen und die Ausweichreaktion der Probanden wird dadurch abgemildert.

So auch im zweiten Beispiel (Versuchsperson 1), bei dem der Wert des entgegengesetzten Lenkmoments jedoch etwas geringer ausfällt und knapp unter 1 Nm bleibt. Dafür erfährt dieser Proband ein Lenkmoment auf Höhe des Hindernisses, welches ihn von diesem weg und zur Mitte der linken Spur führen soll. So wird auch die Gegenbewegung gedämpft. Im Kontrast zum ersten Beispiel gelingt es diesem Fahrer schlechter, das Spurwechselmanöver ohne kooperierende Automation durchzuführen. Die ungedämpften Reaktionen erfordern wiederum stärkere Ausgleichsreaktionen, wodurch eine Schwingung in der Querposition entsteht. Somit wird mehr Platz auf der Zielspur benötigt und der Abstand zu potenziellen Kollisionsobjekten verringert sich.

Die dritte Versuchsperson mit der Nummer 31 steht beispielhaft für einen von 12 Probanden, bei denen das Spurwechselmanöver durch die Automation verstärkt wird. Der Fahrer erhält während des gesamten Manövers ein zusätzliches Lenkmoment nach links, um die Spurwechselreaktion so zu fördern. Mit diesem Moment gelingt es dem Fahrer, der Referenz quasi ideal zu folgen. Ist diese Unterstützung nicht vorhanden, wie beim direkten Transitionskonzept, verlässt die Person die Mittelspur erst viel knapper vor dem Hindernis. Die darauf folgende starke Ausweichreaktion wird zudem erst deutlich links der Mitte der linken Spur wieder abgefangen.

5.2.3 Interpretation und Zusammenfassung

Zusammenfassend weisen die Ergebnisse eine klare Verbesserung der Sicherheit durch Einführung einer Phase der kooperativen Transition, im Vergleich zu einer direkten Übergabe der Fahrzeugkontrolle unmittelbar nach der Übernahmeaufforderung, auf. Alle vier Kenngrößen zeigen eine erhöhte Sicherheit, d.h. größere Abstände und Zeitlücken zu anderen Objekten sowie stabileres Fahrverhalten durch kleinere Querbeschleunigungen und weniger Querbewegung auf der linken Spur, wenn die Übergaben mit dem kooperativen Transitionskonzept erfolgen. Die Erhöhung der Time-to-Collision und die Verringerung des Platzbedarfs auf der Zielspur sind statistisch signifikant, die Steigerung des lateralen Abstands zum Hindernisfahrzeug bzw. zur Schutzplanke sehr signifikant. Bei der maximalen Querbeschleunigung liegt der p -Wert mit 0,0630 geringfügig über dem Signifikanzniveau von 5 % und daher kein signifikanter Unterschied vor. Es ist hierbei jedoch zu beachten, dass das Experiment mit einem statischen Fahr Simulator durchgeführt wurde. Die Beschleunigungen beeinflussen zwar die Simulation, können aber von den Versuchsteilnehmern nicht vestibulär wahrgenommen werden. Wie in [CWV⁺ 11] gezeigt, können Fahrer aus diesem Grund in realen Fahrsituationen ein verändertes Fahrverhalten aufweisen und beispielsweise Manöver weniger dynamisch durchführen.

Aufschluss über die Ursache für die Verbesserung durch die kooperative Transition gibt die Betrachtung des unterstützenden Moments. Bei einem Großteil der Probanden wird deren Ausweichreaktion durch ein Lenkmoment nach rechts abgemildert. Die Trajektorien der Versuchsdurchgänge mit der direkten Übergabe der Fahrzeugkontrolle zeigen die große Gefahr einer Überreaktion, wenn die Probanden das Manöver selbstständig, d.h. ohne dieses Gegenmoment, durchführen. Für die restlichen Versuchsteilnehmer regt die Automation die Fahrer zum Spurwechsel nach links an. Ohne haptische Unterstützung fahren diese lange auf das Hindernis zu, wodurch sich die Kritikalität der Fahrsituation verschärft. Mit der kooperativen Transitionsphase werden sie jedoch bereits früh durch die Automation zu einer Lenkbewegung animiert. Auf diese Art wird die Dynamik des Spurwechsels, analog zum Gegenlenken, ebenfalls vermindert, da die Probanden andernfalls erst kurz vor dem Hindernis ein aggressives Spurwechselmanöver durchführen. Der von der Automation initiierte frühere Spurwechsel trägt so zur höheren Time-to-Collision für diesen Teil der Probanden bei. Unabhängig davon, ob die Versuchspersonen in ihrer Reaktion gebremst oder zu einer Handlung motiviert werden, führt die kooperative Transition zu einer gemäßigeren Einfahrt in die Nebenspur und damit zu einer besseren Kontrollierbarkeit. Die geringere Querbewegung im Korridor zwischen Schutzplanke und Hindernisfahrzeug belegt diese erhöhte Fahrstabilität. Im Gegensatz dazu erfordert das schnelle Anlenken des Spurwechsels auch eine starke Gegenreaktion, um eine Kollision mit der Schutzplanke zu vermeiden. Dies hat wiederum eine Lenkreaktion nach links zur Folge, um das Fahrzeug vor dem Hindernis abzufangen und der Prozess beginnt von vorne. Diese Schwingungen sind deutlich in den Trajektorien bei Verwendung der direkten Transitionsmethode zu erkennen. Dass nicht alle Teilnehmer in der Lage sind, diese Dynamik zu kontrollieren, zeigen die Kollisionen mit der Schutzplanke bei zwei Versuchspersonen. Eine weitere Person entgeht einer Kollision mit dem Hindernis bei der Gegenbewegung nur knapp mit einem Abstand von 6 cm. Insgesamt zeigt der Vergleich der Übergaben mit und ohne Einführung einer haptischen Transitionsphase, dass die neue Funktion den Versuchspersonen unabhängig von deren Verhaltensweise dabei helfen kann, die Übernahme-situation besser zu meistern. Die späten und/oder heftigen Reaktionen der Probanden sind Indikatoren für eine Fehleinschätzung der Lage aufgrund mangelhaften Situationsbewusstseins. Die auf dieser Basis getroffenen suboptimalen Entscheidungen der Probanden lassen sich im Experiment durch den Einsatz einer kooperativen Transitionsphase korrigieren und so die Fahrsicherheit verbessern.

Aus Anwendungssicht noch nicht optimal ist die im Versuch vordefinierte Zeitspanne für die Transitionsphase von 4 s. Die hohe Varianz in der Dauer der Präparationsphase, welche mit dem Erkennen der Hände am Lenkrad endet, überträgt sich so auch auf die Gesamtzeit des Übergabeprozesses. Zudem wird die Zeitdauer durch die Verzögerungen in der Kommunikation zwischen dem Rechner, auf dem die Regelung abläuft, und dem Fahrsimulator um weitere 0,139 s im Mittel verzögert. Zwar erlaubt die Festlegung einer konstanten Transitionsdauer einen fairen Vergleich zwischen den Probanden, da der Transitionsparameter für alle Teilneh-

mer identisch verläuft, die Transitionsphase überschreitet so jedoch bei den meisten Probanden das geplante späteste Abschalten der Assistenzfunktion auf Höhe des Hindernisses. Auch wenn die Unterstützung auf der linken Spur in der Regel durch die Nähe zur Referenztrajektorie und die fortgeschrittene Reduktion des Transitionsparameters gering ist, wird der Verlauf des Transitionsparameters im nachfolgenden Experiment so modifiziert, dass die Transitionsphase garantiert vor Erreichen des Hindernisses abgeschlossen ist.

5.3 Vergleich von kooperativen Übergaben der Fahrzeugquerführung mit zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf

Das vorherige Experiment hat gezeigt, dass die Einführung einer kooperativen Transitionsphase zu Verbesserungen hinsichtlich der sicherheitsrelevanten Kenngrößen führt. Der Übergabevorgang, repräsentiert durch den Transitionsparameter α , verlief dabei für alle Probanden identisch und wurde nicht durch die individuelle Reaktion der Versuchspersonen beeinflusst. In Kapitel 4 wurde ein Verfahren vorgestellt, welches erlaubt, den Transitionsparameter des Menschen aus seiner Lenkaktion zu schätzen, das Modell des Menschen entsprechend anzupassen und ihn darauf basierend angemessen zu unterstützen. Deshalb wurde ein weiteres Experiment durchgeführt, um zu prüfen, inwiefern eine solche individuelle Modelladaption Vorteile gegenüber einer zeitbasiert vorgegebenen Transitionsphase besitzt. Die Beschreibung des Versuchs, die Vorstellung der Ergebnisse und deren Diskussion sind Gegenstand der nachfolgenden Abschnitte.

5.3.1 Versuchsbeschreibung

Der Versuch wurde am selben Simulator und in einem ähnlichen Szenario wie das vorherige Experiment durchgeführt. Aus diesem Grund liegt der Fokus in der nachfolgenden Beschreibung von Versuchsaufbau, Testszenario, Transitionsvarianten, Versuchsdurchführung und Bewertungskriterien auf den Unterschieden zu diesem Experiment. Details zu den anderen, unveränderten Aspekten sind den entsprechenden Abschnitten in der Beschreibung des vorangegangenen Experiments zu entnehmen (Abschnitt 5.2.1).

Anpassungen von Versuchsaufbau und Szenario

Der Versuchsaufbau ist in diesem Experiment nahezu identisch zum vorherigen. Am Projektionssystem und dem Simulationsrechner-Netzwerk wurden ebenso wie an der Simulations-

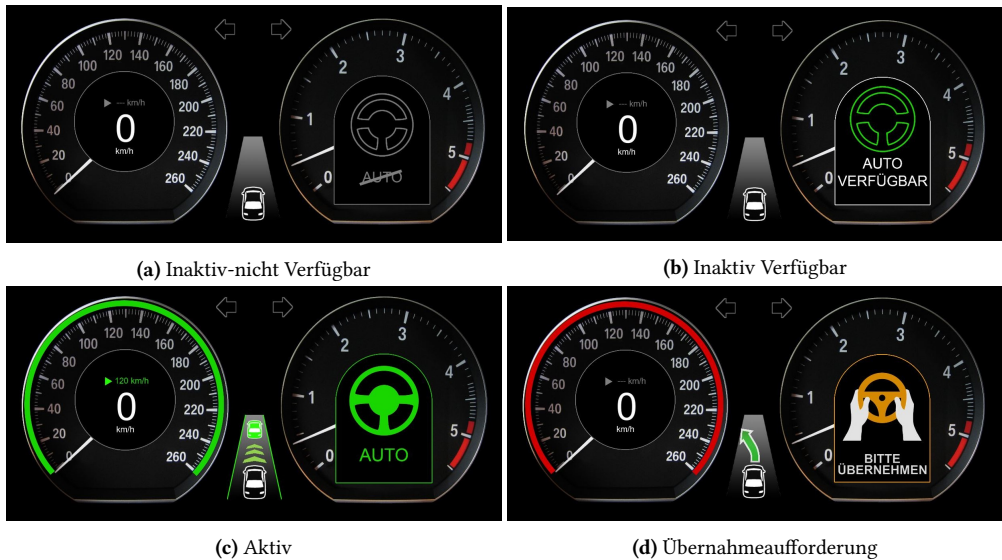


Abbildung 5.29: Überarbeitetes Konzept zur Anzeige des Zustands der Automation

software und der Nebenaufgabe keine Änderungen vorgenommen. Auch die Komponenten Längsregelung, Referenztrajektorienengineering und Systemmodell bleiben im Vergleich zum vorherigen Experiment unverändert.

Änderungen wurden jedoch an der Mensch-Maschine-Schnittstelle durchgeführt. So wurde zum einen die Darstellung der Anzeigen des Systemzustands und der Übernahmeaufforderung ansprechender gestaltet. Das neue Design für die Zustände Inaktiv-nicht Verfügbar, Inaktiv-Verfügbar und Aktiv sowie die Aufforderung zur Übernahme zeigt Abbildung 5.29. Zum anderen wurde dem Lenkrad ein weiteres Bedienelement hinzugefügt. Hier wurden rechts und links jeweils ein Paddle angebracht, welche eine stufenlose Einstellung eines Parameters ermöglicht.

Da der Fokus in diesem Experiment ausschließlich auf der Übernahme-situation liegt, wurde weiterhin das Szenario aus dem vorherigen Experiment leicht modifiziert und der LKW entfernt, der die freiwillige Übernahme induzieren soll. Der entsprechende Streckenabschnitt bleibt jedoch erhalten, sodass die Probanden nun bis zu 15,25 km hochautomatisierte Fahrt bis zur Übernahmeaufforderung zurücklegen. Ohne die Verzögerung durch den langsam fahrenden LKW werden 10 – 13 min benötigt, um das gesamte Szenario zu absolvieren.

Konzepte zur Gestaltung des Transitionsparameterverlaufs

Im Experiment soll der Einfluss verschiedener Konzepte zur Ermittlung des Transitionsparameterverlaufs auf die Übergabesituation untersucht werden. Es werden folgende drei Ausprägungen betrachtet:

- Kooperative Übergabe mit zeitbasierter Vorgabe des Transitionsparameters
- Kooperative Übergabe mit manueller Vorgabe des Transitionsparameters
- Kooperative Übergabe mit automatisierter Adaption des Transitionsparameters

Bei allen Konzepten beginnt die Transition, sobald die Hände des Probanden am Lenkrad erkannt werden (t_{HO}). Das erste Konzept basiert auf der kooperativen Übergabe aus dem zweiten Experiment aus Abschnitt 5.2.1. So folgt der Transitionsparameter wie zuvor einem fest vorgegebenen Verlauf. Jedoch wird jetzt nicht die Dauer der Transitionsphase vorgegeben, sondern der gesamte Übergabeprozess auf $t_E = 6\text{ s}$ beschränkt. Da die anderen Konzepte zu jedem Zeitpunkt nur einen einzigen Wert und keine Trajektorie für α_A vorgeben, wird der Transitionsparameter hier ebenfalls über den Prädiktionshorizont konstant angenommen und nur zwischen zwei Optimierungsschritten verändert, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Der aktuelle Wert von α_A während des Übergabeprozesses ergibt sich in Abhängigkeit von der vergangenen Zeit t seit der Aufforderung zu

$$\alpha_A(t) = \begin{cases} 1 & t < t_{HO} \\ \frac{t_E - t}{t_E - t_{HO}} & t_{HO} \leq t \leq t_E \\ 0 & t > t_E \end{cases}, \quad (5.18)$$

wodurch eine lineare Abnahme von α_A während der Transitionsphase generiert wird. Für den Transitionsparameter im Modell des menschlichen Gütemaßes α_M wird angenommen, dass er im Sinne der idealen Transition entsprechend der Beziehung $\alpha_M = 1 - \alpha_A$ ansteigt.

Der Verlauf der Transitionsparameter des zweiten Konzepts ist identisch zum ersten, es sei denn, die Versuchsperson möchte die Übergabe beschleunigen. Dazu kann der Proband die Paddels am Lenkrad anziehen und so direkt seinen Wert von α_A zwischen 0 und 1 einstellen, wobei sich der Wert anschließend nicht mehr anheben lässt. Liegt der Wert unter dem linearen Verlauf, passt die Automation den Transitionsparameter α_A (und komplementär dazu α_M) entsprechend an. Im Laufe des Experiments hat sich gezeigt, dass nur ein Versuchsteilnehmer von dieser Funktion in der Art Gebrauch gemacht hat, dass es sich auf den Verlauf von α_A bzw. α_M ausgewirkt hat. Daher wird diese Variante im Weiteren nicht mehr berücksichtigt, da sie ansonsten identisch zum ersten Konzept ist.

Das dritte und letzte Konzept beinhaltet das neu entwickelte und in Kapitel 4 vorgestellte Modelladaptionsverfahren, mit dem α_M aus einer Messung des Lenkmoments des Menschen geschätzt und α_A entsprechend angepasst wird. Für die Anwendung mit realen Messdaten werden dabei zwei Modifikationen durchgeführt, um das Verfahren robuster zu gestalten. Analog zur Simulation in Abschnitt 4.3 wird die Schätzung von α_M auf Werte zwischen 0 und 1 begrenzt, um mit der Modellierung kompatible Werte zu garantieren (vgl. Definition 3.6). Weiterhin erfolgt eine Limitierung der Schrittweite der Adaption p auf Werte zwischen 0 und $\frac{1}{30}$. Hierdurch wird einerseits sichergestellt, dass eine einmal angenommene Beteiligung an der Fahraufgabe nicht wieder an die Automation zurückgegeben werden kann, andererseits verhindert die Begrenzung der Adaptionsschrittweite nach oben eine sprunghafte Änderung des Transitionsparameters und damit auch des unterstützenden Moments. Bei der Simulatortaktrate von 60 Hz erzeugt die gewählte maximale Schrittweite eine minimale Transitionsphase von 0,5 s.

Um in alle Fällen eine vollständige Übergabe innerhalb der vorgegebenen Zeit zu garantieren, d.h. $\alpha_A(t_E) = 0$, und zeitgleich jedoch kein sprunghaftes Abschalten am Ende zu erzeugen, wird unabhängig vom Transitionskonzept eine obere Schranke für α_A analog zu Gleichung (5.18) eingeführt. Liegt der Transitionsparameter der Automation in der letzten Sekunde vor Ende der Übergabe oberhalb eines linearen Verlaufs von 1 auf 0 in diesem Zeitraum, so wird der Transitionsparameter auf diesen Wert begrenzt und so die Transition innerhalb der vordefinierten Dauer erzwungen. Die Parameter der Querregelung sind im Vergleich zum Vorgängerexperiment unverändert und können dem entsprechenden Abschnitt unter 5.2.1 entnommen werden. Ebenfalls wie zuvor schaltet die Längsregelung bei allen Konzepten zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung ab.

Versuchsdurchführung

Wie in den anderen Experimenten führt jede Versuchsperson mehrere Versuchsdurchgänge durch, in denen sie das Szenario absolviert und jeweils eine andere Methode zur Bestimmung des Transitionsparameterverlaufs angewendet wird. Die Reihenfolge der Konzepte wurde auch in diesem Experiment randomisiert, um den Einfluss von Lernerfahrungen auf das Ergebnis zu reduzieren. Zudem haben sich die Teilnehmer mit dem Simulator und der Bedienung des Fahrzeugs zu Beginn des Experiments vertraut machen können. Weiterhin wurde wie zuvor die Darstellung der Umgebung und der Verkehrsobjekte variiert und eine Zwischenfahrt eingefügt, die nicht in die Bewertung einfließt, sondern nur dazu dient, den gewohnten Ablauf zu unterbrechen. Die Zwischenfahrt ist bis zum Abschnitt mit der Übernahmeaufforderung unverändert. In diesem Experiment folgt dann jedoch nach einer 1700 m langen Geraden eine 600 m lange Rechtskurve mit einem Kurvenradius von 900 m. In der Mitte dieser Kurve erfolgt die Aufforderung zur Übergabe auf der rechten Spur, sodass der Fahrer ein Moment nach rechts aufbringen muss, um die Spur nicht nach links zu verlassen. Die Zwischenfahrt erfolgt

auch unter Verwendung der automatisierten Adaption. Somit ergibt sich der Versuchsablauf analog zum Experiment zum Vergleich von direkter und kooperativer Transition zu:

1. Information über den Versuch
2. Eingewöhnungsfahrt
3. Versuchsfahrt
4. Zwischenfahrt
5. Versuchsfahrt
6. Versuchsfahrt

Die Teilnehmer wurden erneut über Aushänge an der Universität, Ankündigungen in den sozialen Medien und persönlichen Kontakt angeworben und erhielten jeweils eine Entschädigung von 30 € für den ihnen entstandenen Aufwand.

Bewertungskriterien

Auch die Bewertungskriterien sind weitgehend identisch zu denen des zweiten Experiments (vgl. Abschnitt 5.2.1). So wird das Kollisionsrisiko und der fahrdynamische Zustand während des Manövers ebenfalls anhand der minimalen Time-to-Collision K_τ , des minimalen Abstands zu anderen Objekten K_d , der Breite des benötigten Korridors auf der Zielspur K_Δ sowie der betragsmäßig maximalen Querbeschleunigung K_a beurteilt. Da in diesem Experiment sowohl die zeitbasierte als auch die adaptive kooperative Transition dem Fahrer helfen sollen, einer vordefinierten Referenztrajektorie zu folgen, wird der laterale Abstand zu dieser Trajektorie ebenfalls als Vergleichskriterium verwendet. Als Kennzahl wird hierfür der mittlere absolute Fehler K_y gemäß

$$K_y = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |y - \bar{y}| \quad (5.19)$$

berechnet. Der betrachtete Zeitraum zur Berechnung dieses Fehlers endet, sobald das Ego-Fahrzeug die Streckenposition des Hindernisfahrzeugs erreicht hat. Eine Betrachtung über diesen Zeitpunkt hinaus ist nicht sinnvoll, da die Automation im Anschluss das Folgen der Referenz nicht mehr durch Stelleingriffe unterstützt und die Probanden ihre Zielvorgabe beliebig wählen können. Der Wert der Kennzahl sollte möglichst gering sein, da dann das Fahrzeug die Zielvorgabe einhält.

Für alle Kenngrößen wird jeweils die Hypothese aufgestellt, dass die automatisierte Adaption des Transitionsparameters (Index a) zu besseren Werten führt als die zeitbasierte Vorgabe (Index z). Daraus ergeben sich analog zum vorherigen Experiment die Nullhypothesen der ersten vier Kenngrößen zu

$$H_0 : \mu_{K_r,z} \geq \mu_{K_r,a} \quad (5.20)$$

$$H_0 : \mu_{K_d,z} \geq \mu_{K_d,a} \quad (5.21)$$

$$H_0 : \mu_{K_\Delta,z} \leq \mu_{K_\Delta,a} \quad (5.22)$$

$$H_0 : \mu_{K_a,z} \leq \mu_{K_a,a} \quad (5.23)$$

Diese werden durch die Nullhypothese für die Kennzahl K_y gemäß

$$H_0 : \mu_{K_y,z} \leq \mu_{K_y,a} \quad (5.24)$$

ergänzt. Somit entsteht ein Satz von fünf Nullhypothesen, für die jeweils separat geprüft wird, ob sie abgelehnt werden können. Der Test erfolgt erneut mit Hilfe des einseitigen Zweistichproben- t -Tests für abhängige Stichproben.

Da die Adaption eine Messung des Lenkmoments des Fahrers benötigt, wird dieses neben dem Transitionsparameterverlauf und dem Lenkmoment der Automation ebenfalls zur Analyse und Bewertung der Übergabekonzepte herangezogen.

5.3.2 Ergebnisse

Insgesamt wurden im Rahmen dieses Experiments Datensätze von 35 neuen Versuchsteilnehmern aufgezeichnet. Bei vier dieser Probanden trat in mindestens einem Versuchsdurchgang ein technischer Fehler mit dem Simulatorsystem auf, sodass dies Datensätze dieser Personen komplett von der Bewertung ausgeschlossen werden. Hieraus ergibt sich eine Datenbasis von 31 Personen (6 weiblich, 25 männlich) im Alter von 19 bis 52 Jahren (Mittelwert 24,88 Jahre, Standardabweichung 7,65 Jahre). Die Ergebnisse werden im Rahmen der gleichen Untergliederung wie im vorherigen Experiment präsentiert. Zunächst werden die resultierenden Fahrzeugtrajektorien gezeigt. Auf Basis dieser Trajektorien erfolgen im Anschluss die Berechnung der Kenngrößen und die Tests der Hypothesen. Am Ende des Abschnitts wird der Transitionsprozess für die untersuchten Methoden betrachtet und der Ablauf des Manövers anhand von einzelnen Versuchspersonen direkt gegenübergestellt.

Fahrzeugtrajektorien

Die Fahrzeugschwerpunktrajektorien der gewerteten Versuchsdurchgänge mit der zeitbasierten Vorgabe des Transitionsverlaufs sind in Abbildung 5.30, die mit der automatisierten Adaption in Abbildung 5.31 dargestellt. Es sei erneut auf die Verzerrung durch die Darstellung von 14 m in Querrichtung gegenüber 450 m entlang der Fahrbahn hingewiesen. Im Fall der zeitbasierten Transition führen alle Probanden das Ausweichmanöver erfolgreich ohne Kollision mit dem Hindernis oder der Schutzplanke durch. Bei den Versuchsfahrten mit adaptiertem Transitionsverlauf gelingt das einer Versuchsperson nicht, wobei sich auch in diesem Versuch der Kontakt mit einem anderen Objekt nicht auf die Simulation auswirkt. Betrachtet man die Trajektorien im Bereich vor dem Hindernis genauer, erkennt man zudem, dass die Spurwechsel in der zeitabhängigen Transition etwas früher beginnen und über eine größere Distanz durchgeführt werden. Im Fall der in Abhängigkeit vom Fahrermoment adaptierten Transition erfolgen die Spurwechsel tendenziell später, aber über eine kürzere Distanz. Die Auswirkungen der verschiedenen Transitionsmethoden auf die Kenngrößen zeigt der nächste Abschnitt.

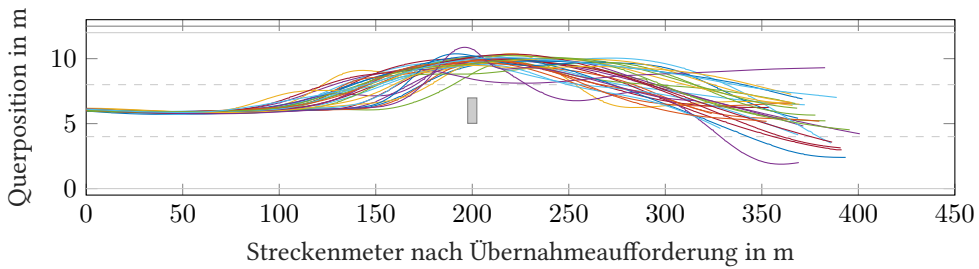


Abbildung 5.30: Fahrzeugschwerpunktrajektorien aller Probanden für die Versuchsdurchgänge mit zeitbasiertem Transitionsverlauf

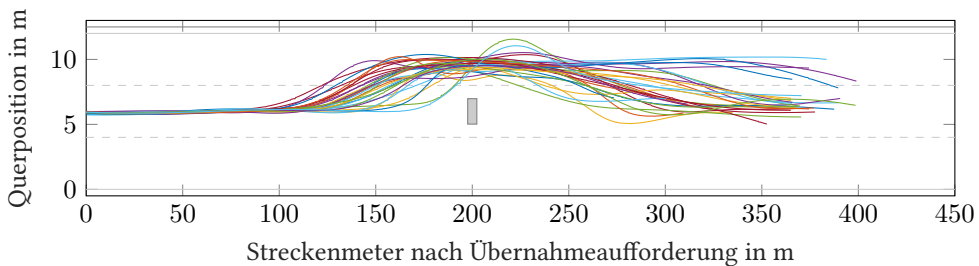


Abbildung 5.31: Fahrzeugschwerpunktrajektorien aller Probanden für die Versuchsdurchgänge mit adaptivem Transitionsverlauf

Kenngrößen und statistischer Vergleich

Wie zuvor erfolgt der quantitative Vergleich der beiden Methoden mit Hilfe der Kenngrößen zur Bewertung des Kollisionsrisikos und des fahrdynamischen Zustands des Fahrzeugs. Die Mittelwerte und Standardabweichungen sowie ausgewählte Einzelergebnisse werden nachfolgend angeben, vollständige Tabellen mit den genauen Ergebnissen jedes Probanden für beide getesteten Konzepte befinden sich in Anhang A.3

Die minimale Time-to-Collision K_T beträgt für die zeitbasierte Transition im Mittel über alle Versuchsteilnehmer 1,676 s bei einer Standardabweichung von 0,537 s. Insgesamt unterschreitet K_T bei fünf Probanden den Wert von 1 s. Der geringste Wert eines Probanden liegt für diese Methode bei 0,336 s. Die Ergebnisse für das Adaptionsverfahren sind nahezu identisch. Der Mittelwert ist mit 1,616 s etwas geringer und die Standardabweichung mit 0,564 s etwas höher. In dieser Konfiguration unterschreiten nur vier Probanden eine Zeitlücke von 1 s, jedoch liegt der Extremwert mit nur 0,273 s niedriger als zuvor. Der geringe Unterschied wirkt sich auch auf den statistischen Test aus. Die Nullhypothese, dass der Mittelwert bei Verwendung der adaptiven Transition geringer als bei Verwendung der zeitbasierten Transition ist, kann nicht abgelehnt werden ($p = 0,5614$). Durch diesen p -Wert können die beiden Verfahren als statistisch gleich angesehen werden. Eine grafische Darstellung des statistischen Vergleichs zeigt Abbildung 5.32.

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung für die zweite Kenngröße, den minimalen Abstand zu anderen Objekten K_d , zeigt Abbildung 5.33. Bei Verwendung des rein zeitabhängigen Transitionsverlaufs ergibt sich ein Mittelwert von 1,496 m (Standardabweichung 0,348 m). Drei Fahrer verlassen mit dieser Methode die linke Spur während des Passierens des Hindernisses. Mit einer Annäherung bis auf 0,534 m zum Hindernis überschreiten sie die 1 m vom Verkehrsobjekt entfernt liegende Spurmarkierung zum Teil deutlich. Wie bei der vorherigen Kenngröße liefern auch hier die Fahrten mit adaptiver Transition mit 1,381 m einen kleineren Wert und die Standardabweichung ist höher (0,427 m). Bei diesem Transitionskonzept verlassen ebenfalls drei Teilnehmer die Zielspur, wobei einer von ihnen auch bei dem anderen Versuchsdurchgang die Spur verließ. Zwei überschreiten die Spurmarkierung in Richtung des Hindernisses (minimaler Abstand 0,528 m), der dritte in Richtung der Schutzplanke, mit der er mit einem Abstandswert von -0,033 m sogar kollidiert. Der t -Test liefert für diese Kenngröße einen Wert von 0,8910 und folglich findet keine statistisch signifikante Erhöhung des Abstands durch die adaptive Transitionsmethode statt.

Die Auswertung von K_Δ gibt Auskunft darüber, inwiefern die Probanden mit einer konstanten Querposition am Hindernis vorbei fahren oder ob sie durch zusätzliche Querbewegungen einen größeren Anteil der Spur benutzen (siehe Abbildung 5.34). Mit einem Mittelwert von 1,992 m bei einer Standardabweichung von 0,315 m ergibt sich ein schmaler Korridor, in dem die Probanden bei zeitbasierter Vorgabe des Transitionsparameters das Hindernis passieren.

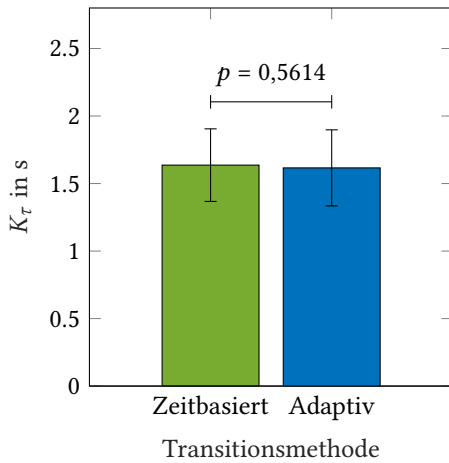


Abbildung 5.32: Statistischer Vergleich der minimalen Zeitlücke zur Kollision K_r zwischen zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf

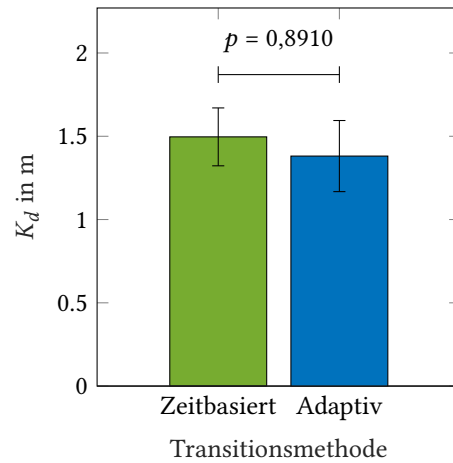


Abbildung 5.33: Statistischer Vergleich des minimalen lateralen Abstands K_d zu anderen Objekten zwischen zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf

Auch für den Fahrer, der für dieses Konzept mit einem Wert von 2,800 m den meisten Platz in Querrichtung benötigt, reicht theoretisch die Spurbreite von 4 m aus. Er orientiert sich jedoch bei diesem Manöver zu weit nach rechts, wodurch er einer der Teilnehmer ist, welche die Begrenzung zur Mittelspur überfahren. Die Versuchsdurchgänge mit der momentenbasierten Adaption der Transition erzielen im Mittel für K_Δ einen Wert von 2,144 m mit einer Standardabweichung von 0,602 m. Den Maximalwert erreicht hier mit 4,143 m der Proband, der über die linke Spur hinausfährt und eine Kollision mit der Schutzplanke hervorruft. Er weicht somit nicht nur weitläufig aus, sondern benötigt auch viel Platz um das Fahrzeug im Korridor zwischen Schutzplanke und Hindernis zu stabilisieren. Mit einem p -Wert von 0,8841 kann, wie für die beiden vorherigen Kenngrößen bereits auch, die Nullhypothese einer Verbesserung, d.h. in diesem Fall einer Verringerung der Kenngröße, durch die zeitbasierte Transition anhand der Stichprobenmittelwerte nicht abgelehnt werden.

Wie Abbildung 5.35 zeigt, liegen auch in der maximalen Querbeschleunigung K_a die Werte für das adaptive Verfahren im Mittel über denen des Verfahrens, bei dem die Transition nicht angepasst wird. Für den adaptiven Verlauf ergibt sich ein Mittelwert von $3,946 \text{ m/s}^2$ bei einer Standardabweichung von $1,805 \text{ m/s}^2$ gegenüber einem Mittelwert von $3,112 \text{ m/s}^2$ beim zeitbasierten Verlauf (Standardabweichung $1,676 \text{ m/s}^2$). Auch wenn die Maximalwerte mit $7,901 \text{ m/s}^2$ für die zeitbasierte Methode und $8,030 \text{ m/s}^2$ für die adaptierte Methode nicht weit auseinanderliegen, überschreiten im ersten Fall sieben Probanden den als Komfortgrenze betrachteten Wert von 4 m/s^2 , wohingegen im zweiten Fall elf Personen eine höhere Querbeschleunigung wäh-

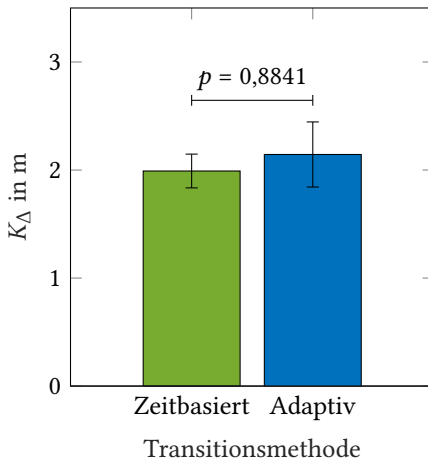


Abbildung 5.34: Statistischer Vergleich des Platzbedarfs auf der Ausweichspur K_{Δ} zwischen zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf

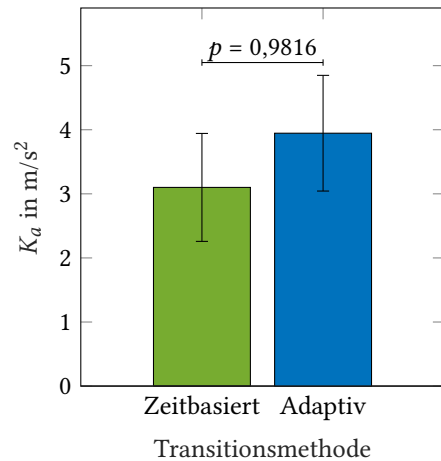


Abbildung 5.35: Statistischer Vergleich der maximalen Querbeschleunigung K_a zwischen zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf

rend des Übergabevorgangs erzeugen. Auch für diese Kenngröße kann die Nullhypothese, dass das zeitbasierte Verfahren bessere, d.h. hier kleinere Werte erzeugt, nicht abgelehnt werden. Der hohe p -Wert von 0,9816 zeigt jedoch, dass die entgegengesetzte Hypothese $\mu_{K_{a,z}} > \mu_{K_{a,a}}$ mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von nur $p = 0,0184$ abgelehnt werden kann. Hierdurch ist die Annahme gerechtfertigt, dass das adaptive Verfahren zu höheren maximalen Querbeschleunigungen führt.

Als letzte Kenngröße wird mit K_y der mittlere absolute Fehler der Querposition zur Referenz betrachtet. Die statistischen Kennzahlen für diese Größe zeigt Abbildung 5.36. Wird die Transition zeitbasiert vorgegeben, beträgt die Distanz zur Referenztrajektorie im Mittel 0,418 m bei einer Standardabweichung von 0,174 m. Der Maximalwert eines Probanden liegt bei 0,708 m. In dieser Kenngröße liefert das adaptive Verfahren im Mittel bessere Werte. Der Mittelwert über alle Probanden beträgt hier nur 0,293 m und ist damit 0,125 m kleiner als für die Versuchsdurchgänge mit zeitbasierter Vorgabe der Transition (Standardabweichung 0,153 m). Auch der maximale Wert für einen Probanden fällt mit 0,616 m geringer aus. Die Anwendung des t -Tests ergibt, dass die Verringerung des Abstands statistisch sehr signifikant ist ($p = 0,0017$). Die Probanden folgen der Vorgabe bei einer Anpassung des Transitionsparameters an das von ihnen gestellte Lenkmoment also besser. Eine Zusammenfassung aller Ergebnisse des statistischen Vergleichs von zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf zeigt Tabelle 5.4.

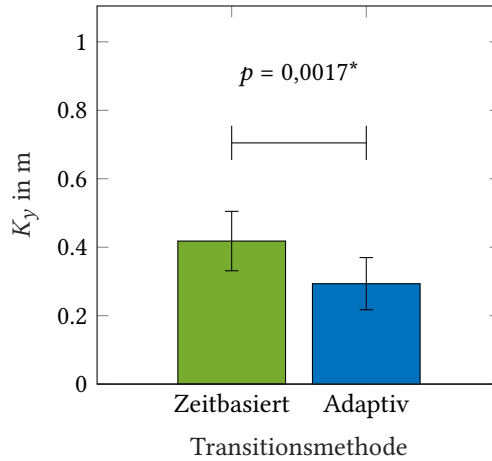


Abbildung 5.36: Statistischer Vergleich der mittleren absoluten Querabweichung zur Referenz K_y zwischen zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf

Tabelle 5.4: Übersicht der Ergebnisse des statistischen Vergleichs von zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf

Nullhypothese H_0	p -Wert	Signifikanzniveau
$\mu_{K_{\tau,z}} \geq \mu_{K_{\tau,a}}$	0,5614	nicht signifikant
$\mu_{K_{d,z}} \geq \mu_{K_{d,a}}$	0,8910	nicht signifikant
$\mu_{K_{\Delta,z}} \leq \mu_{K_{\Delta,a}}$	0,8841	nicht signifikant
$\mu_{K_{a,z}} \leq \mu_{K_{a,a}}$	0,9816	nicht signifikant
$\mu_{K_{y,z}} \leq \mu_{K_{y,a}}$	0,0017	sehr signifikant

Ablauf des Transitionsprozesses

Zur weiterführenden Analyse werden zunächst die Verläufe der Transitionsparameter bei beiden Methoden miteinander verglichen. Abbildung 5.37 zeigt den Parameter α_A während der Transitionsphase für die zeitbasierte Transition. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine große Bandbreite für den Beginn der Transitionsphase besteht. Die Zeitpunkte, zu denen erstmalig eine Hand der Probanden am Lenkrad erkannt wird, variieren von 1,8 s bis 4,3 s. Ab da fällt der Transitionsparameter in der Art linear ab, dass er zum Zeitpunkt 6 s nach der Übernahmeaufforderung den Wert 0 erreicht hat. Die Verzögerung durch die nicht exakte Zeitsynchronisation bleibt wie beim Vorgängereperiment bestehen, was am nicht perfekt linearen Verlauf zu erkennen ist. Im Gegensatz zum ersten Fahrsimulatorexperiment ist der Transitionsparameter wie geplant 6 s nach der Übernahmeaufforderung jetzt für alle Versuchspersonen gleich 0 (bzw. durch die Verzögerung fast 0), sodass die Transitionsphase abgeschlossen ist und kein Moment mehr von der Automation an das Lenkrad gestellt wird. Da kein Proband mehr als 5 s

zur Übernahme der Lenkrads benötigt, musste die Notabschaltung, welche α_A innerhalb der letzten Sekunde vor dem Endzeitpunkt auf 0 überführt, für dieses Transitionsverfahren nicht aktiv werden.

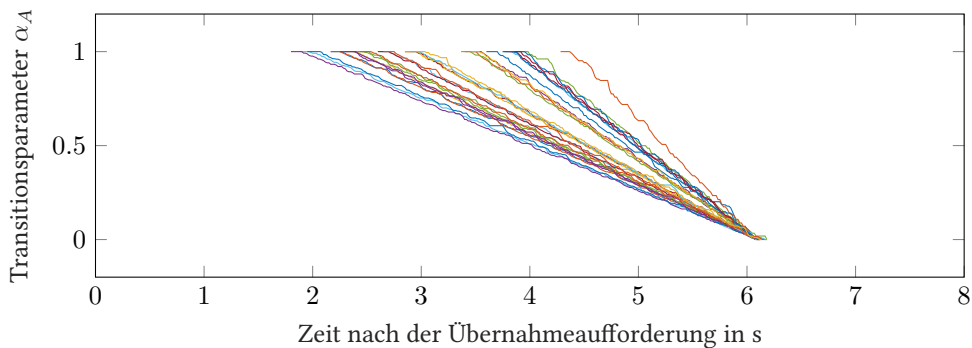


Abbildung 5.37: Verlauf des Transitionsparameters für alle Probanden bei Verwendung der zeitbasierten Transitionsmethode

Erfolgt der Verlauf des Transitionsparameters basierend auf dem Adaptionsverfahren aus Kapitel 4, ergibt sich ein ungleichmäßigerer Verlauf der in Abbildung 5.38 zu sehen ist. Die Transitionsphase beginnt hier zwischen 1,1 s und 4,3 s nach Beginn der Aufforderung, wobei in diesem Fall aus der Hands-On-Erkennung nicht automatisch eine Änderung des Transitionsparameters folgt. Stattdessen sinkt der Parameter erst, wenn die Lenkreaktion des Menschen zum Modell mit dem entsprechenden Transitionsparameter passt. An den Kurven ist erkennbar, dass das Absinken von α_A stufenweise geschieht. Dabei ist zu beachten, dass nur reduzierende Schritte im Algorithmus zugelassen wurden. Nur bei vier Probanden wird der Transitionsparameter alleine durch die Adaption bis auf den Wert 0 abgesenkt. Bei den übrigen Teilnehmern wird die Übergabebegrenzung aktiv, welche 5 s nach der Übernahmeaufforderung einen linearen Abfall über 1 s erzwingt. Bei 17 von diesen erfolgt zuvor zumindest eine teilweise Reduktion durch die Adaption. Für die übrigen zehn wird im gesamten Übergabeprozess keine Lenkreaktion ermittelt, welche eine Reduktion der Unterstützung aus Sicht des Systems rechtfertigt und die Übergabe bis zum Endzeitpunkt einzig durch das Abschaltkonzept erzwungen. Im linearen Verlauf der Abschaltung erkennt man, dass auch für dieses Konzept kleine Verzögerungen in der Kommunikation zwischen Regler und Fahrsimulator auftreten.

Details zur unterschiedlichen Wirkungsweise der untersuchten Methoden lassen sich aus dem direkten Vergleich bei einzelnen Probanden erkennen. Es wurden hierfür zwei Versuchspersonen als Beispiele ausgewählt, bei denen die Transitionsphase für beide Methoden annähernd zeitgleich beginnt.

In Abbildung 5.39 sind die Fahrzeugtrajektorie sowie die Verläufe des Transitionsparameters und der Stellgrößen von Mensch und Automation während der Transitionsphase für beide Ver-

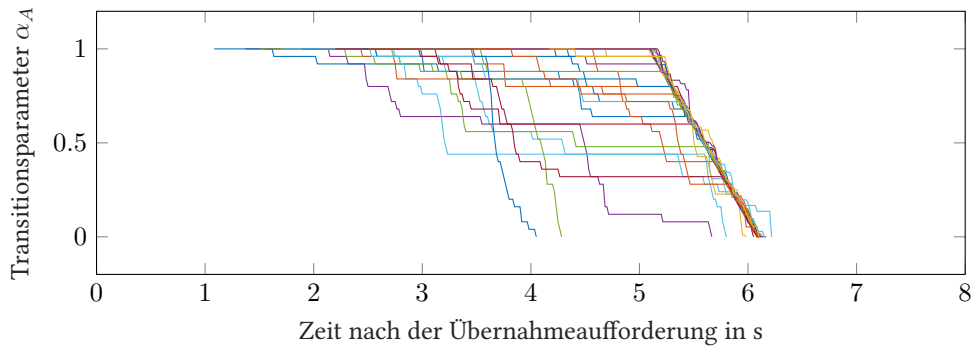
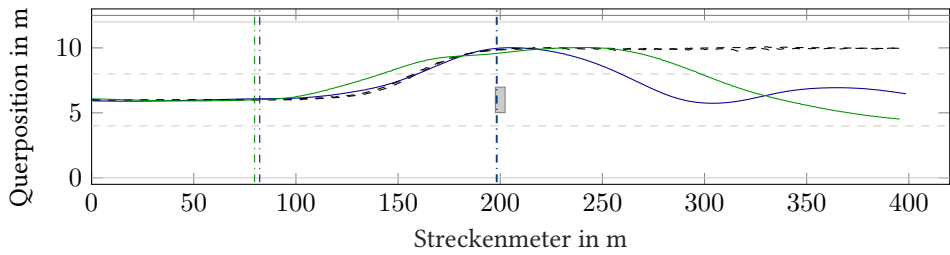


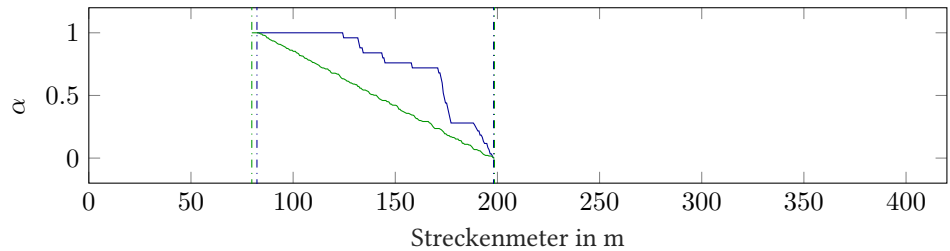
Abbildung 5.38: Verlauf des Transitionsparameters für alle Probanden bei Verwendung der adaptiven Transitionsmethode

suchsdurchgänge von Versuchsperson 30 dargestellt. Die Transitionsphase beginnt in beiden Fällen ca. 80 m nach der Übernahmeaufforderung. Bei der Fahrt mit dem zeitbasiert vorgegebenen Transitionsverlauf lenkt die Versuchsperson stark nach links, um den Spurwechsel durchzuführen. Damit weicht sie von dem für sie modellierten Verhalten deutlich ab. Der Regler reagiert, indem er ein entgegengesetztes Moment aufbringt, um das Fahrzeug auf die vorgegebene Solltrajektorie zu bringen. Durch das höhere Lenkmoment des Menschen wird die Automation überstimmt und der Spurwechsel auf einem Pfad links der Referenz durchgeführt. Durch Abnahme des Transitionsparameters über der Zeit und die Annäherung an die Referenztrajektorie reduziert sich auch das Moment der Automation. Auch beim Versuchsdurchgang mit der adaptierten Transitionsphase wird dem menschlichen Lenkmanöver nach links durch ein Gegenmoment der Automation entgegen gewirkt. Anders als zuvor, überstimmt der Fahrer diesmal die Automation nicht, sondern lässt sich auf die Referenztrajektorie führen. Sobald er nicht mehr von der Zielvorgabe weg, sondern auf diese zu lenkt, vermindert die Adaption den Transitionsparameter. Auf diese Art erreicht α einen Wert von 0,28, bevor der verbleibende Teil über die Übergabegrenzung auf 0 reduziert wird. Insgesamt führt diese Versuchsperson mit beiden Verfahren ein sicheres Ausweichmanöver durch, wobei sie sich bei der ersten Variante zwar weiter von der Referenz entfernt ist ($K_y = 0,325$ m gegenüber 0,117 m), durch die flachere Trajektorie jedoch auch geringere Querbeschleunigungen erreicht ($2,103$ m/s² im Vergleich zu $3,351$ m/s²).

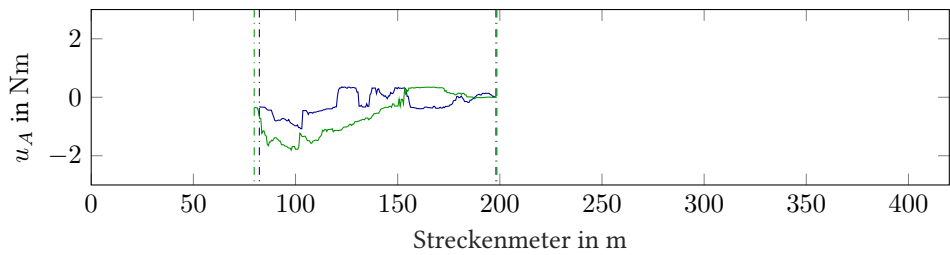
Wie an den Verläufen der Transitionsparameter in Abbildung 5.38 zu erkennen ist, gibt es zehn Probanden, die keinen Adaptionsvorgang auslösen. Ein Beispiel hierfür ist Testperson 24. Fahrzeugtrajektorien, Transitionsparameter und Stellgrößen von Mensch und Automation sind für die beiden Fahrten dieser Versuchsperson in Abbildung 5.40 dargestellt. Wie im vorherigen Beispiel lenkt auch diese Person bei Verwendung des vorgegebenen Transitionsverlaufs umgehend nach der Übernahme nach links, um den Spurwechsel einzuleiten. Ebenfalls



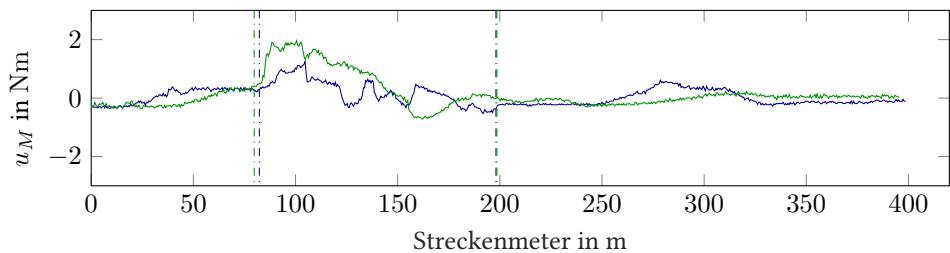
(a) Fahrzeugschwerpunkt- (farbig) und Referenztrajektorien (schwarz gestrichelt)



(b) Transitionsverläufe



(c) Lenkmomente der Automation während der Transitionsphase



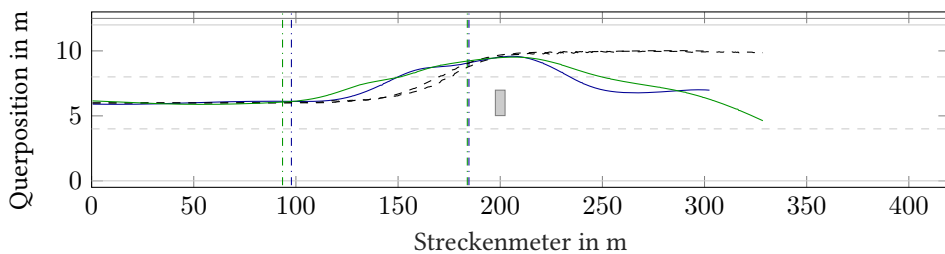
(d) Lenkmomente des Probanden

Abbildung 5.39: Übergabesituation von Versuchsperson 30 für den zeitbasierten (grün) und den adaptiven (blau) Transitionsverlauf. Die vertikalen Linien geben Start und Ende der jeweiligen Transitionsphase an.

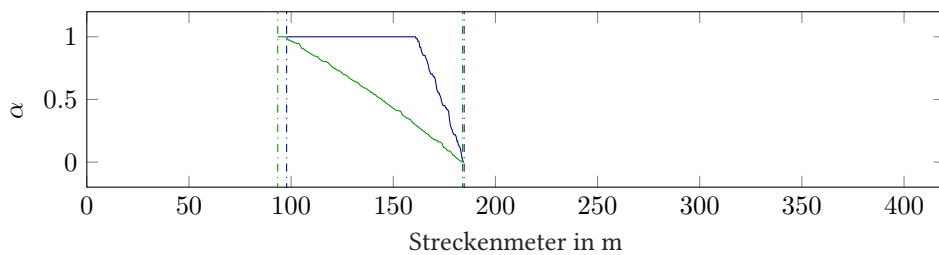
wie zuvor hält die Automation dagegen, da die Referenzvorgabe einen späteren Spurwechsel vorsieht. Da die Versuchsperson hier ein höheres Lenkmoment aufbringt, erhöht sich auch die Gegenkraft, welche erst durch die Beschränkung auf maximal 2 Nm begrenzt wird. Erst mit Annäherung an die Referenz und der Reduktion des Transitionsparameters über der Zeit sinkt die Stellgröße der Automation, sodass der Fahrer auch mit geringerem Kraftaufwand den Spurwechsel auf dem von ihm beabsichtigten Pfad durchführen kann. Im Gegensatz zum vorherigen Beispiel zeigt diese Person bei Verwendung der adaptiven Transitionsphase ein ähnliches Verhalten wie beim vorgegebenen Übergabeverlauf. Auch hier stellt der Proband ein Lenkmoment, welches das Fahrzeug früh nach links und so von der Solltrajektorie weg bewegt. Der Regler reagiert analog zum anderen Konzept und versucht, das Fahrzeug wieder in Richtung der Referenz zu manövrieren. Der Transitionsparameter wird während des gesamten Übergabeprozesses nicht durch die Adaption gesenkt, weil die Aktion des Fahrers nicht zu einer Annäherung an die Zielvorgabe führt. Da sich in diesem Beispiel der Versuchsteilnehmer als ebenso unnachgiebig wie die Automation erweist, arbeiten beide über einen langen Zeitraum gegeneinander, wobei sich der menschliche Partner aufgrund die Stellgrößenbeschränkung des Reglers letztendlich durchsetzt. Erst 161 m nach der Übernahmeaufforderung führt die Übergabebegrenzung, die nach 5 s aktiv wird, zum graduellen Abschalten der Automation. Zusammen mit der Annäherung an die Referenz wird u_A verringert und auch der Fahrer kann seinen Stellaufwand verkleinern. Die Kenngrößen dieses Probanden passen zu den Testergebnissen. In allen Kategorien außer dem mittleren Abstand zur Referenz erweisen sich die Ergebnisse für die zeitabhängige Transition als besser. Die Verbesserungen für K_τ , K_d und K_Δ sind jedoch nur marginal, während die maximale Querbeschleunigung K_a über 1 m/s^2 geringer ist als im Fall der auf dem Fahrermoment basierenden Adaption. Die Leistung im Folgen der Referenz fällt hier nur geringfügig besser aus, jedoch ließen sich andere Probanden, wie beispielsweise der Proband aus dem vorherigen Absatz, eher von der Automation leiten und sich so besser auf die Solltrajektorie führen.

Abschließend werden noch zwei Besonderheiten bei Versuchsdurchgängen mit Nutzung des adaptiven Verfahrens gezeigt. Hierzu wird einerseits Versuchsperson 19 als ein repräsentativer Proband aus der Gruppe der Versuchspersonen, die deutlich vor Ablauf der maximalen Übergabezeit die Fahrzeugführung vollständig übertragen bekommen haben, ausgewählt. Andererseits wird ein genauerer Blick auf den einzigen Versuchsteilnehmer geworfen, der trotz kooperativer Transitionsphase eine Kollision mit der Schutzplanke nicht vermeiden konnte (Proband 2). Die Verläufe von Querpositionen, Transitionsparametern und Stellgrößen für die beiden Versuchsdurchgänge werden gemeinsam in Abbildung 5.41 dargestellt.

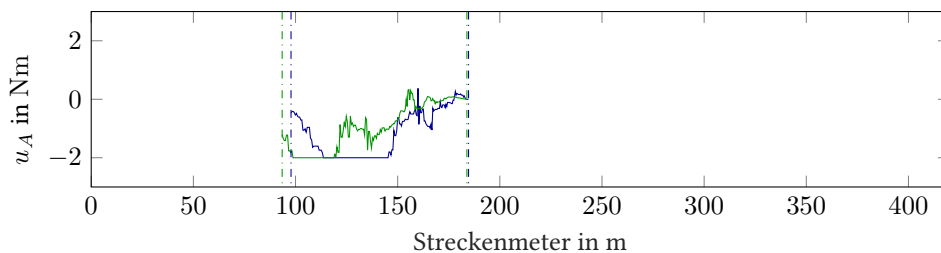
An der Fahrzeugtrajektorie ist zu erkennen, dass der Proband 19 der Referenztrajektorie sehr gut folgt und im mittleren Bereich des Spurwechsels diese nahezu ideal abfährt. Dieses Verhalten kann vom Modell nur durch einen hohen Transitionsparameter für den Menschen erklärt werden, woraufhin die Automation im Sinne der Einhaltung der idealen Transition ihren Transitionsparameter schnell reduziert und somit bereits ab der Hälfte des Spurwechselmanövers



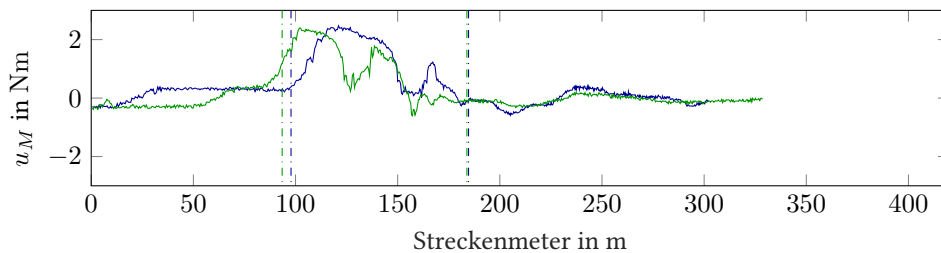
(a) Fahrzeugschwerpunkt- (farbig) und Referenztrajektorien (schwarz gestrichelt)



(b) Transitionsverläufe



(c) Lenkmomente der Automation während der Transitionsphase



(d) Lenkmomente des Probanden

Abbildung 5.40: Übergabesituation von Versuchsperson 24 für den zeitabhängigen (grün) und den adaptiven (blau) Transitionsverlauf. Die vertikalen Linien geben Start und Ende der jeweiligen Transitionsphase an.

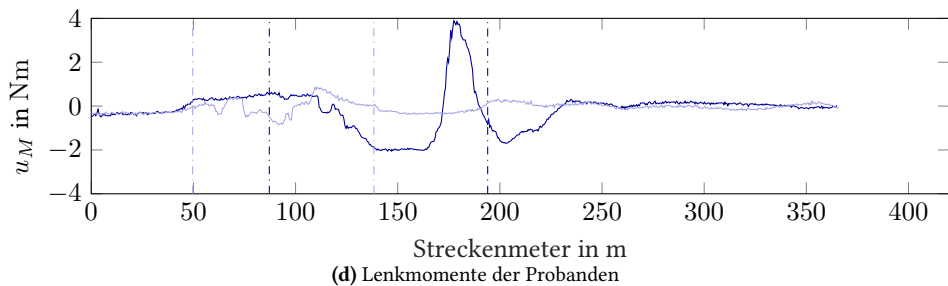
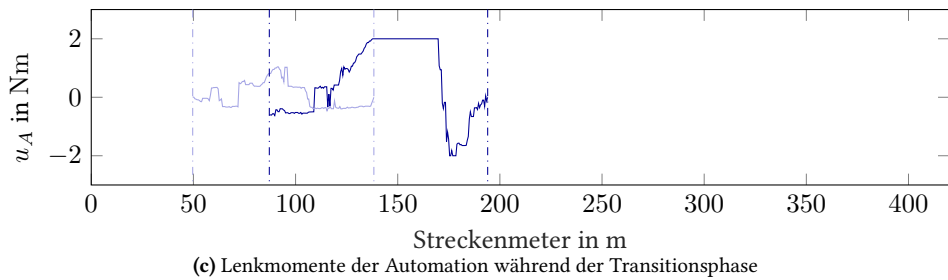
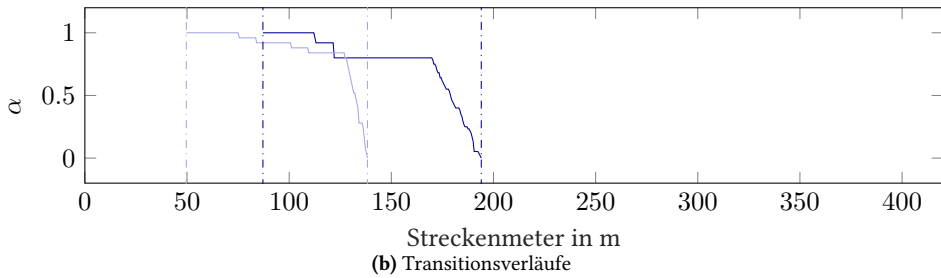
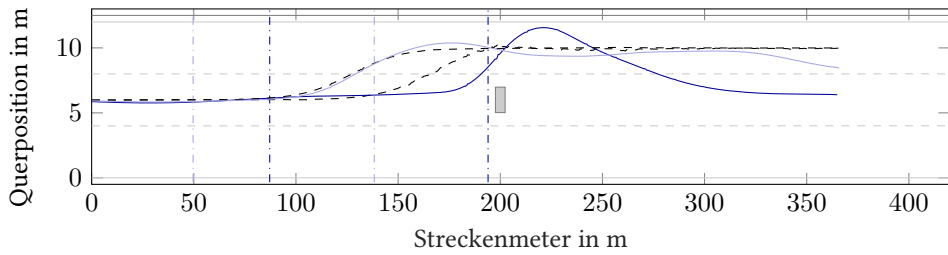


Abbildung 5.41: Besonderheiten der Adaption in den Übergabesituationen von Versuchsperson 2 (dunkelblau) und Versuchsperson 19 (hellblau). Die vertikalen Linien geben Start und Ende der jeweiligen Transitionsphase an.

kein Moment mehr auf das Lenkrad aufbringt. Da ein erneuter Anstieg von α im System nicht zugelassen wurde, musste der Proband den Spurwechsel alleine beenden und erzeugt hierbei einen leichten Überschwinger beim Stabilisieren auf der linken Spur. Der zweite Proband zeigt das andere Extrem. Er folgt dem von der Automation vorgeschlagenen Spurwechsel lange Zeit nicht und hält das Lenkrad gerade, indem er dem maximalen Moment des Systems von 2 Nm mit einem betragsmäßig identischen Moment entgegenwirkt. Erst in dem Bereich, in dem der Transitionsparameter bereits zwangsweise reduziert wird, um eine Übergabe 6 s nach der Aufforderung sicher zu stellen, lenkt der Proband scharf nach links und fährt knapp vor dem Hindernis auf die linke Spur. Der Regler versucht dieses Manöver noch durch ein entgegengesetztes Moment abzumildern, gelangt jedoch auch in diese Richtung in die Begrenzung bei -2 Nm und schaltet kurz darauf graduell ab, da die maximale Übergabezeit erreicht ist. Der Fahrer ist anschließend nicht in der Lage, den von ihm stark initiierten Spurwechsel rechtzeitig auf der Zielspur abzufangen und kollidiert daher mit der Schutzplanke.

5.3.3 Interpretation und Zusammenfassung

Fasst man die Ergebnisse des Experiments zusammen, ergibt sich auf dem ersten Blick ein widersprüchliches Bild. So erzielt die Adaption des Transitionsparameters geringere Abweichungen von der Referenztrajektorie, verursacht jedoch gleichzeitig höhere Werte für die maximale Querbeschleunigung während des Ausweichmanövers im Vergleich mit der rein zeitbasierten Transition. Für die Kenngrößen minimale Zeitlücke zur Kollision K_τ , minimaler lateraler Abstand K_d und dem benötigten Raum auf der Ausweichspur K_Δ ergibt die Stichprobe im Mittel ebenfalls leicht schlechtere Werte für das Adaptionsverfahren, wobei die jeweiligen Unterschiede statistisch nicht signifikant sind. Insgesamt erfüllt das assistierende System bei Nutzung der Adaption die Aufgabe der Referenz zu folgen besser, erzeugt jedoch in allen anderen objektiven Kriterien zur Bewertung des Spurwechsels schlechtere Ergebnisse.

Die Betrachtung der gewählten Ausweichtrajektorien erklärt den vermeintlichen Widerspruch. Verläuft die Transition zeitbasiert, beginnen die Versuchspersonen früher damit, das Fahrzeug nach links zu führen. Damit arbeiten sie zwar gegen das System, dessen Gegenmoment nimmt jedoch aufgrund des vorgegebenen Transitionsverlaufs über die Zeit ab. Wird der Transitionsparameter alternativ über die Adaption aus dem aktuellen Lenkmoment des Fahrers bestimmt, findet im Falle eines Abweichens von der Referenztrajektorie keine Anpassung statt. Das Manöver entgegen der Zielvorgabe wird als fehlende Übernahmebereitschaft des Fahrers interpretiert und somit keine Kontrolle von der Automation abgegeben. Um das System trotzdem zu überstimmen, muss vom Menschen folglich über eine längere Zeit ein größeres Moment aufgebracht werden. Durch das höhere Moment der Automation bei Abweichungen von der Referenz werden die Probanden stärker an die Vorgabe herangeführt und setzen ihren initial beabsichtigten Spurwechselverlauf weniger deutlich durch. Da der Referenzspurwechsel später, dafür aber über einer kürzeren Distanz verläuft, wird das Fahrzeug, im Vergleich zu einem

früher begonnenen, flacheren Spurwechsel, bei Abfahren der Vorgabe auch höheren Querbeschleunigungen ausgesetzt. Die steilere Einfahrt in die Zielspur erschwert es dem Fahrer zudem, das Fahrzeug auf der neuen Spur zu stabilisieren, wodurch die geringeren Abstände zur Schutzplanke bzw. zum Hindernis und der leicht erhöhte, zum Stabilisieren benötigte, Platz erklärbar sind. Der exakte Wunschspurwechselverlauf der Versuchsteilnehmer bleibt jedoch unklar, da auch die Variante mit vorgegebenem Verlauf vom Moment des Assistenzsystems beeinflusst ist. Es sei außerdem erneut darauf hingewiesen, dass das Experiment an einem statischen Fahrsimulator durchgeführt wurde und sich die aus den Manövern ergebenden Beschleunigungen nur auf die Simulation auswirken, aber für den Probanden nicht spürbar sind. Die Wahrnehmung der Beschleunigungen im realen Fahrzeug könnte die Wahl der Solltrajektorie beeinflussen. Der Vergleich mit den Trajektorien der unassistierten Versuchsdurchgänge des ersten Experiments legt die Einschätzung nahe, dass die Probanden lediglich eine starke Ausweichreaktion zeigen und somit hier erst durch das Assistenzmoment auf eine flachere und besser kontrollierbare Trajektorie geführt werden. Mit der adaptiven Transitionsmethode wird dagegen das Folgen der Referenzvorgabe stärker durchgesetzt. Hierdurch wird das Spurwechselmanöver etwas verzögert und der Fahrer hat mehr Zeit, die Situation zu erfassen, bevor eine möglicherweise überstürzte Aktion umgesetzt wird.

Dass die Versuchspersonen nicht der Solltrajektorie des Reglers folgen, zeigt sich auch am Verlauf des Transitionsparameters, welcher bei einem Großteil der Teilnehmer nicht oder nur geringfügig durch die Adaption beeinflusst wird. Eine erweiterte Sollwertgenerierung, welche die Zieltrajektorie an die verbleibende Zeit anpasst, anstatt einen festen Verlauf zu erzwingen, könnte hier sowohl den Adaptionsverlauf als auch die Kenngrößen verbessern. Idealerweise würden die Präferenzen des Fahrers erkannt bzw. aus vorherigen Manövern erlernt und daraus der Sollwertverlauf individuell auf diesen zugeschnitten. Das Experiment zeigt auch, dass der Grad, mit dem ein Folgen der Referenz durchgesetzt wird, stark vom Vertrauen in die Qualität der Referenz abhängen sollte. Ist sich das System mit der Notwendigkeit der Einhaltung der Vorgabe sicher, ist es vorteilhaft die Aufgabe nur dann zu übergeben, wenn der Mensch ebenfalls der Vorgabe folgt. Andernfalls führt die Automation auf einen suboptimalen Pfad. Für den menschlichen Partner wäre in diesem Fall ein fest vorgegebener, gradueller Übergangsverlauf sinnvoller, da er so seine eigenen Interessen leichter durchsetzen kann. Dass die Anleitung des Menschen über haptische Interaktion nicht uneingeschränkt funktioniert, zeigt der Proband mit der Nummer 2, der sich trotz dauerhaft hohen Moments in Ausweichrichtung über die Automation hinwegsetzt und weiter auf das Hindernis zufährt. Die Intensität, mit der die Automation ihre Absicht über den haptischen Kanal kommuniziert, könnte zwar leicht erhöht werden, eine Steigerung des maximalen Moments geht jedoch auch mit dem Risiko des Verlusts der Übersteuerbarkeit oder einem möglicherweise noch höheren Gradienten des unterstützenden Moments beim Abschalten einher. Das Experiment zeigt weiterhin, dass mit der adaptiven Transitionsmethode die Fahraufgabe bereits deutlich vor Erreichen des Zeitpunktes, an dem die Automation spätestens deaktiviert sein muss, vollständig übergeben werden kann,

wenn der Fahrer zu Beginn der Referenz ausreichend gut folgt. Für diese Probanden kann so der Übergabeprozess schneller abgeschlossen werden.

Insgesamt ergibt der Vergleich der rein zeitbasierten Transition und einer adaptiven Transition anhand einer aktionsbasierten Schätzung des Übergabeparameters, dass nur ein geringer Unterschied zwischen den Konzepten besteht und beide für eine sichere Übergabe der Fahrzeugführung gut geeignet sind. Die geringen Abstände zur vorgegebenen Trajektorie für das adaptive Transitionsverfahren zeigen dessen hohes Potenzial, den Menschen in eine vordefinierte Richtung zu führen. Je nach Wahl der Referenztrajektorie kann dieses Verfahren somit überlegen sein.

5.4 Gesamtergebnis und Bewertung

Die drei Experimente zeigen die Vorteile einer haptischen Unterstützung des Menschen bei der Übernahme einer Aufgabe von einer Automation. Der Vergleich verschiedener gradueller Transitionskonzepte mit Methoden, welche die Aufgabe in einem Schritt vollständig übergeben, zeigt im ersten Experiment, dass der Erfüllungsgrad der Aufgabe während der Transition bei den graduellen Konzepten höher ist. Erfolgte das direkte Abschalten sehr früh, reduzierte sich der Erfüllungsgrad stark, was eine noch nicht vorhandene Übernahmebereitschaft der Probanden indiziert. Aber auch wenn die Funktion erst spät im Verlauf des Übernahmeprozesses in einem Schritt deaktiviert wurde, konnten die Versuchspersonen den Wegfall des Anteils der Automation an der Aufgabe nicht instantan kompensieren. Im Gegensatz dazu werden die Probanden bei den graduellen Konzepten langsam an die neue Aufgabe herangeführt und währenddessen weiterhin, jedoch mit der Zeit immer geringer, durch die Automation unterstützt. Diese Unterschiede erklären neben der verbesserten Leistung auch die bessere subjektive Bewertung durch die Versuchsteilnehmer für diese Konzepte. Das in dieser Arbeit vorgestellte Übergabekonzept basierend auf zeitvarianten Differentialspielen lieferte die besten Ergebnisse, weshalb die Methode als Grundlage für die kooperative Transition in den weiteren Experimenten verwendet wurde.

Während die Aufgabe im ersten Experiment in eine vereinfachte Experimentalumgebung eingebettet und die optimale Lösung eindeutig definiert war, zeigt das zweite Experiment, dass die verbesserte Leistung auch bei realen Anwendungen und damit komplexeren Systemen und Szenarien erwartet werden kann. Im Experiment wurde eine Übernahmesituation am Ende einer hochautomatisierten Fahrt abgebildet. Die Probanden werden unerwartet zur Übernahme der Fahrzeugführung aufgefordert und müssen nach links ausweichen, um eine Kollision mit einem sich vor ihnen befindenden Hindernis zu vermeiden. Diese anspruchsvolle Fahrsituation lässt sich nicht mehr anhand einer einzigen klar definierten Größe bewerten. Stattdessen

werden die vier Kenngrößen minimale Zeitlücke bis zur Kollision in Längsrichtung, minimaler seitlicher Abstand zu anderen Objekten, Ausmaß der Querbewegung auf der Ausweichspur und maximale Querbewegung definiert. Diese Kenngrößen werden zur Bewertung der Sicherheit und des potenziellen Unfallrisikos während des Ausweichmanövers herangezogen.

Das Experiment zeigt in allen vier Kenngrößen verbesserte Werte für den Fall, dass die Transition kooperativ erfolgt. Außer für die maximale Querbewegung sind die Verbesserungen statistisch signifikant. Durch die haptische Interaktion während der kooperativen Transition werden sowohl Fahrer, die verspätet reagieren, zum Ausweichmanöver animiert als auch Überreaktionen durch entsprechende Gegenmomente abgemildert. Die kritische Fahrsituation kann so deutlich entschärft werden und ist für alle Versuchsteilnehmer sicher durchführbar. Ohne Unterstützung treffen die Probanden die Entscheidung zum Spurwechsel teilweise später als wenn sie bereits durch ein Moment dazu angeleitet werden. Zudem überschätzt ein Großteil die zum Ausweichen notwendige Aktion, wodurch das Stabilisieren des Fahrzeugs auf der neuen Spur erschwert wird und dies zwei Probanden nicht ohne Kollision mit der Schutzplanke gelingt. Diese Verhaltensweisen können als Folge eines mangelnden Situationsbewusstseins unmittelbar nach der Übernahmeaufforderung interpretiert werden.

Die Ergebnisse für die Anwendung im hochautomatisierten Fahren stimmen insofern mit denen der Experimente aus den in Kapitel 2 vorgestellten Quellen überein, dass eine Übernahmeaufforderung 6 s vor der potenziellen Kollision in einer kritischen Fahrsituation als unzureichend betrachtet werden muss, falls die Übergabe direkt erfolgt. Zwar gelingt es allen Versuchspersonen rechtzeitig zu reagieren, jedoch können sechs von 31 Probanden den Spurwechsel bei direkter Transition nicht sicher durchführen. Bei ihnen befindet sich das Fahrzeug auf Höhe des Hindernisses noch teilweise auf der Ausgangsspur oder es ist über die Zielspur hinaus gefahren. Eine frühere Warnung kann hier Abhilfe schaffen, da die Probanden so mehr Zeit haben sich auf die Übergabe vorzubereiten. Dies stellt jedoch wiederum höhere Anforderungen an die Sensorik für die Detektion der zur Übernahme führenden Situation. Mit der Unterstützung durch eine kooperative Transitionsphase verbessert sich bei fünf dieser sechs Probanden die Fahrzeugtrajektorie und die geringen Abstände zu den Kollisionsobjekten werden vermieden. Bis auf eine einzige Ausnahme sind so alle Probanden in der Lage, das Fahrzeug im Rahmen des knappen Zeitbudgets rechtzeitig in die Zielspur zu manövrieren und dort zu stabilisieren. Die kooperative Transitionsphase kann somit auch bei geringen Übernahmezeiten einen sicheren Wechsel der Fahrzeugkontrolle zurück an den Menschen realisieren und somit hochautomatisiertes Fahren gegebenenfalls erst ermöglichen.

Auch wenn die Ergebnisse der Experimente 2 und 3 aufgrund kleiner Modifikationen am Versuchsdesign sowie einer anderen Menge an Versuchspersonen nicht unmittelbar miteinander vergleichbar sind, lassen sich die Ergebnisse für die kooperative Transition qualitativ mit den beiden Transitionsmethoden aus dem dritten Experiment wiederholen. Unabhängig von der gewählten kooperativen Transitionsmethode zeigen die Spurwechseltrajektorien auch hier

Verbesserungen im Vergleich zu den unassistierten Fahrten aus dem zweiten Experiment. Einzig ein Fahrer, der sich der Unterstützung bis kurz vor dem Ende der Transitionsphase widersetzt und dann doch noch einen schnellen Spurwechsel durchführt, kann das Szenario nicht unfallfrei beenden.

Untereinander zeigt der Vergleich von einem rein zeitbasierten Übergabeverlauf mit einer adaptiven Transition, deren Verlauf an die Stellgröße des Menschen angepasst wird, im betrachteten Szenario ein ähnliches Verhalten der beiden Verfahren. Die detaillierte Analyse ergibt jedoch den Unterschied, dass das System mit der Adaption die Probanden dazu bewegen kann, der vorgeschlagenen Referenztrajektorie besser zu folgen. Im Fall einer zeitbasierten Transition können die Versuchspersonen dagegen einfacher alternativen Trajektorien nachgehen und wählen im Testfall einen Verlauf mit geringerer Querbeschleunigung. Grundsätzlich ist der Fahrer bei entsprechender Beschränkung des assistierenden Moments jederzeit in der Lage, die Automation zu übersteuern und seinen eigenen Willen auch entgegen der Vorgabe durchzusetzen. Dennoch muss für eine sinnvolle Anpassung der Transition, abhängig von der Eigeninitiative des Fahrers der Referenz der Automation zu folgen, die Vorgabe auch zur Absicht des Fahrers passen. Wird die Solltrajektorie entsprechend gewählt, kann die Eigenschaft der adaptiven Transition, die Spurfolgeleistung des Systems zu verbessern, optimal zu Komfort und Sicherheit während der Transition beitragen.

Insgesamt zeigen die Experimente klar, dass der bisherige Stand der Technik, eine Aufgabe von der Automation abrupt an den Menschen zu übergeben, nicht sinnvoll ist. Stattdessen liefert das vorgestellte Konzept der kooperativen Transition auf Basis eines Differentialspiels eine Möglichkeit, diese Übergabe deutlich sicherer zu gestalten. Durch eine individuelle Adaption des Transitionsparameters kann die Einhaltung der Zielvorgabe noch weiter verbessert werden.

6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Frage, wie ein Transfer einer Aufgabe zwischen Mensch und Maschine gestaltet werden kann, um die Qualität bzw. Sicherheit während des gesamten Übergabeprozesses zu gewährleisten. Trotz gegenläufiger wissenschaftlicher Erkenntnisse erfolgen bisherige praktische Umsetzungen häufig unter der Prämisse, der Mensch könne die Aufgabe sofort vollständig und sicher übernehmen. Hierdurch wird ein sofortiges Abschalten der Automation gerechtfertigt. Dies ist insbesondere dann nicht korrekt, wenn der Mensch unerwartet zur Übernahme aufgefordert wird und er die aktuelle Situation erst erfassen und verarbeiten muss.

Um den Menschen in diesen Transitionsprozessen zu unterstützen, wird in dieser Arbeit eine Übergabe auf der Grundlage des Konzepts Haptic Shared Control vorgeschlagen. Hierbei erfolgt der Wechsel der Kontrolle über die Aufgabe in einer Transitionsphase, in der die beiden Partner gemeinsam mit dem System interagieren und über Kräfte bzw. Momente an der Stelleinrichtung wechselseitig miteinander kommunizieren. Bestehende Methoden, die dieses Prinzip auf Mensch-Maschine-Interaktionen mit wechselnden Rollen anwenden, sind zumeist heuristisch und/oder auf sehr eingeschränkte Anwendungsfelder ausgelegt. Weiterhin fehlen aussagekräftige Ergebnisse aus Experimenten, in denen die Verfahren tatsächlich in der Interaktion mit Menschen evaluiert werden.

Um diese Forschungslücke zu schließen, wurde im Rahmen dieser Arbeit erstmalig ein Ansatz entwickelt, in dem die Interaktion zwischen Mensch und Maschine systematisch modelliert und im Reglerentwurf zur Gestaltung der Übergabe berücksichtigt wird. Dazu werden die beiden Kooperationspartner als Optimalregler mit zeitvarianten Gütemaßen betrachtet und deren Zusammenarbeit über das spieltheoretische Konzept der Differentialspiele abgebildet. Das Ziel für die innerhalb dieses Frameworks modellierten Übergabeprozesse ist es, den Regler jederzeit so zu parametrieren, dass dieser optimal mit dem Menschen kooperiert und diesen gerade soweit unterstützt, wie zur reibungslosen Erfüllung der Aufgabe notwendig ist. Hierfür wurden zwei Varianten zur Bestimmung des Transitionsverlaufs verfolgt: In der ersten Variante wird der Verlauf a priori modelliert und die Parameterwahl im Betrieb abhängig vom aktuellen Zeitpunkt im Übergabeprozess getroffen. Im Gegensatz dazu wird in der zweiten Variante die Übernahmebereitschaft des Menschen zur Laufzeit ermittelt. Dazu wird die aktuelle Handlung erfasst und mit der erwarteten Reaktion aus dem Modell verglichen. Abhängig von der

Abweichung wird das Modell entsprechend adaptiert und die so geschätzte Leistungsfähigkeit des Menschen verwendet, um den passenden Grad der Unterstützung zu bestimmen. Die funktionelle Wirkungsweise konnte für beide Varianten erfolgreich in der Simulation bestätigt werden.

Um die kooperativen Übergabemethoden valide zu bewerten, müssen reale Übergabesituationen mit Menschen betrachtet werden. Hierzu wurden für diese Arbeit drei Experimente konzipiert und durchgeführt, welche erstmalig eine wissenschaftlich seriöse Analyse von Transitionen via Haptic-Shared-Control erlauben. Im ersten Experiment konnte gezeigt werden, dass selbst für eine sehr einfache Aufgabe die Qualität der Übergabe bei einer unerwarteten Übernahmeaufforderung durch Ansätze mit einer Haptic-Shared-Control-basierten Transitionsphase erhöht werden kann. Der neue Differentialspielansatz erzielt dabei von allen Konzepten die besten Ergebnisse. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für die weitergehende Untersuchung der Eignung für Übernahme-situationen im hochautomatisierten Fahren.

Die Validierung für diesen Anwendungsfall erfolgte in den beiden weiteren Experimenten, in denen das realistischere und deutlich komplexere Szenario der Übernahmeaufforderung einer hochautomatisierten Fahrfunktion an einer Systemgrenze im Fahr-Simulator umgesetzt wurde. Im Vergleich von einer sofortigen und einer kooperativen Transition, welcher die Grundlage des zweiten Experiments bildet, können die Ergebnisse des ersten Versuchs bestätigt werden. Die kooperative Transition gestaltet das erforderliche Ausweichmanöver sicherer, da die Fahrer mit Unterstützung in der Lage sind, größere Abstände und Zeitlücken zu den anderen Objekten einzuhalten und das Fahrzeug mit geringerer Querbewegung auf der Zielspur zu stabilisieren. Müssen die Teilnehmer die Fahraufgabe sofort vollständig übernehmen, fehlt ihnen das nötige Situationsbewusstsein, was sich in späten und heftigen Reaktionen äußert, die für manche Probanden zur Kollision geführt hätten. Mit der direkten Übergabe ist es somit nicht möglich die Transition innerhalb des knappen Zeitrahmens sicher durchzuführen. Aus diesem Grund kann die kooperative Transitionsphase einen wichtigen Baustein für die Einführung hochautomatisierter Fahrfunktionen darstellen.

Im dritten Experiment wurden die beiden in dieser Arbeit vorgestellten Varianten zur Bestimmung des Transitionsverlaufs ebenfalls anhand eines Ausweichszenarios im Fahr-Simulator miteinander verglichen. Die Versuchspersonen können in beiden Fällen die Situation handhaben und dem Hindernis sicher ausweichen. Die Ergebnisse zeigen weiterhin, dass die Versuchspersonen über das adaptive Verfahren stärker in Richtung der Referenzvorgabe der Automation geführt werden und so die Leistung im Folgen der Solltrajektorie weiter verbessert werden kann.

Insgesamt belegen die Resultate der drei Experimente, dass der vorgestellte Ansatz der kooperativen Transition nicht nur zur theoretischen Beschreibung des Übergabeprozesses geeignet ist, sondern auch in der Praxis einen realen Mehrwert erzielt. Die in dieser Arbeit entwickelten,

neuartigen Verfahren bilden die Möglichkeit einer systematischen Modellierung der Interaktion und einer entsprechenden Auslegung der Unterstützung durch die Automation, welche zu performanten und sicheren Transitionen von Aufgaben zwischen Mensch und Maschine führt. Durch das universelle Konzept sind die entwickelten Methoden neben dem hier gezeigten Einsatz beim hochautomatisierten Fahren auch für die Anwendung auf anderen Gebieten der Mensch-Maschine-Interaktion, wie beispielsweise der Zusammenarbeit im Kontext von Mensch-Roboter-Systemen, geeignet.

A Weiterführende Daten zu den Ergebnissen der Experimente

Dieser Anhang enthält die exakten Zahlenwerte der Kenngrößen für die einzelnen Probanden aus den Experimenten in Kapitel 5. Weiterhin enthält Abschnitt A.1 auch die genauen subjektiven Bewertungen der Versuchspersonen sowie die vollständigen Ergebnisse der statistischen Vergleiche aller Übergabekonzepte aus dem ersten Experiment. Die Gliederung dieses Anhangs erfolgt nach den Experimenten.

A.1 Daten zum Vergleich von Übergabekonzepten

Die mittlere absolute Abweichung vom Referenzwinkel K_δ ist für alle 35 Probanden, aufgeteilt nach Szenario und Übergabekonzept, in Tabelle A.1 eingetragen. Die Angaben der Versuchspersonen hinsichtlich ihrer Einschätzung der Leistung im Folgen des Referenzwinkels sowie der Bewertung des Lenkgefühls enthält Tabelle A.2. Eine Übersicht über die Ergebnisse der t -Tests aller paarweisen Vergleiche der fünf untersuchten Übergabekonzepte ist in Tabelle A.3 gegeben.

Tabelle A.1: Mittlerer absoluter Referenzwinkelfehler K_δ beim Experiment zum Vergleich der Übergabekonzepte für alle Versuchspersonen (VP) in beiden Szenarien und den fünf Übergabekonzepten sowie jeweils Mittelwert μ und Standardabweichung σ über alle Probanden. Alle Angaben sind in $^\circ$.

VP	Szenario „Halten“					Szenario „Anstieg“				
	AF	AS	GS	GO	GD	AF	AS	GS	GO	GD
1	22,24	7,03	9,83	6,21	9,42	6,70	2,91	2,29	1,68	1,71
2	43,00	7,34	3,55	4,30	5,74	15,20	2,24	2,40	3,97	1,75
3	12,46	9,89	3,75	5,54	6,13	1,37	2,52	2,62	2,10	3,15
4	2,82	2,53	3,67	6,42	2,24	1,70	2,59	2,47	2,34	0,94
5	9,33	4,36	4,89	5,21	4,87	2,15	1,43	4,53	1,80	1,38
6	32,40	6,36	4,17	9,30	5,94	3,62	1,75	5,07	3,58	3,46
7	10,67	5,89	4,10	4,45	3,83	4,85	1,90	2,97	3,22	2,65
8	14,77	6,53	3,56	5,60	5,38	5,44	2,11	2,42	1,52	1,78
9	3,44	3,57	6,10	5,13	5,42	1,51	2,17	2,72	3,54	1,54
10	4,76	3,82	3,74	3,02	4,00	2,73	3,21	2,32	3,05	1,39
11	7,32	4,22	8,49	4,52	3,38	3,50	1,83	2,39	1,81	2,09
12	43,37	6,65	9,04	7,60	5,42	2,62	2,78	2,29	4,72	0,86
13	26,09	4,54	16,34	8,54	4,42	1,58	4,21	4,67	2,57	0,97
14	3,74	2,51	4,06	2,59	2,47	2,54	2,20	2,39	2,30	1,36
15	11,31	3,58	3,61	3,24	5,22	1,12	2,43	1,33	1,59	0,84
16	11,80	3,65	3,58	4,90	3,22	3,16	2,70	2,37	1,87	1,69
17	2,95	2,62	3,60	3,57	2,42	2,06	2,51	2,45	2,31	1,67
18	11,81	12,80	4,22	5,18	3,22	3,54	5,57	1,98	2,47	1,48
19	6,56	3,61	4,88	6,64	5,84	2,28	2,06	2,22	1,64	1,42
20	3,50	5,28	4,60	3,71	3,79	2,84	5,12	3,80	2,58	2,53
21	12,67	5,81	6,85	4,21	4,77	1,79	2,30	1,98	1,27	1,63
22	5,52	3,98	5,04	4,83	3,92	2,04	1,99	2,52	0,95	0,90
23	2,64	3,20	2,48	2,69	4,18	1,35	3,61	1,47	1,49	1,55
24	3,99	6,23	3,17	3,48	2,86	1,06	2,93	1,78	1,86	0,99
25	4,06	2,81	3,25	2,22	2,56	4,37	2,46	2,88	1,56	1,84
26	17,88	4,36	10,95	6,12	5,18	1,96	2,00	3,11	1,92	2,21
27	2,92	3,64	4,85	2,98	2,67	1,20	1,60	1,36	1,73	0,89
28	2,44	1,81	2,24	2,15	2,49	1,41	2,97	2,12	1,69	1,02
29	11,82	4,63	4,77	4,64	3,95	1,99	2,12	1,83	0,99	0,83
30	4,25	4,10	4,76	3,08	9,38	1,64	3,41	2,75	1,89	2,17
31	6,46	7,15	4,06	5,17	3,24	1,69	2,44	2,29	1,23	4,06
32	3,30	3,44	3,17	5,36	2,91	4,89	1,21	1,87	1,46	1,18
33	4,53	2,55	3,05	4,84	5,51	15,71	2,94	2,09	4,62	2,15
34	24,29	4,31	8,02	2,91	2,31	2,50	2,22	1,14	2,76	1,18
35	3,50	3,16	3,05	2,72	2,59	1,43	3,62	2,19	1,05	0,76
μ	11,27	4,80	5,13	4,66	4,31	3,30	2,63	2,49	2,20	1,66
σ	10,93	2,24	2,87	1,73	1,77	3,32	0,93	0,88	0,97	0,78

Tabelle A.2: Subjektive Bewertung der Leistungen bei der Aufgabenerfüllung und des Gefühls am Lenkrad aller Versuchspersonen (VP) für alle fünf Übergabekonzepte sowie jeweils Mittelwert μ und Standardabweichung σ über alle Probanden. Die Bewertungsskala reicht von 1 (sehr schlecht bzw. unangenehm) bis 5 (sehr gut bzw. angenehm).

VP	Einschätzung der Leistung					Bewertung des Lenkgefühls				
	AF	AS	GS	GO	GD	AF	AS	GS	GO	GD
1	5	4	5	5	5	5	4	5	5	5
2	3	3	2	3	3	5	1	3	2	4
3	1	2	4	3	4	2	1	2	2	4
4	3	4	3	4	4	4	1	4	4	3
5	3	2	3	3	4	2	1	4	2	3
6	4	5	4	4	3	3	4	4	4	2
7	2	4	2	3	4	2	1	5	4	5
8	2	2	4	2	3	5	1	5	4	5
9	4	2	4	3	4	2	2	4	4	4
10	4	4	5	4	4	4	4	5	4	4
11	3	2	2	4	4	2	1	4	2	4
12	4	2	4	3	4	3	2	5	3	5
13	4	3	4	4	4	5	1	5	5	5
14	3	2	4	4	5	2	1	3	4	4
15	4	4	4	3	3	2	1	4	4	4
16	4	4	4	3	3	2	1	4	3	4
17	3	4	4	4	3	1	1	5	5	4
18	3	4	3	4	5	2	3	4	5	5
19	2	2	4	2	3	3	2	4	5	5
20	4	3	3	4	4	3	3	2	3	3
21	4	2	3	5	4	4	2	4	5	4
22	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5
23	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4
24	2	3	4	4	4	2	4	3	4	4
25	3	2	3	4	4	2	1	2	2	2
26	2	2	1	4	4	1	1	3	5	4
27	4	4	4	2	4	5	2	4	2	2
28	3	2	4	4	4	4	2	5	4	5
29	4	4	4	4	3	5	1	5	5	5
30	2	2	3	3	5	1	1	5	2	5
31	2	3	4	4	3	2	1	3	4	4
32	4	1	5	4	5	5	1	5	2	5
33	4	2	5	2	4	4	1	5	5	3
34	3	2	4	4	5	3	2	2	4	5
35	2	3	4	4	4	1	1	2	4	3
μ	3,17	2,89	3,63	3,54	3,89	3,03	1,86	3,94	3,74	4,06
σ	0,92	0,99	0,91	0,78	0,68	1,39	1,22	1,06	1,12	0,94

Tabelle A.3: Detaillierte Ergebnisse der paarweisen t -Tests für alle Kombinationen der Übergabekonzepte in beiden Szenarien

Szenario	Nullhypothese H_0	p -Wert	Signifikanzniveau
Halten	$\mu_{AF} \leq \mu_{AS}$	0,0003	hoch signifikant
Halten	$\mu_{AF} \leq \mu_{GS}$	0,0004	hoch signifikant
Halten	$\mu_{AF} \leq \mu_{GO}$	0,0002	hoch signifikant
Halten	$\mu_{AF} \leq \mu_{GD}$	0,0002	hoch signifikant
Halten	$\mu_{AS} \leq \mu_{GS}$	0,7119	nicht signifikant
Halten	$\mu_{AS} \leq \mu_{GO}$	0,3610	nicht signifikant
Halten	$\mu_{AS} \leq \mu_{GD}$	0,1211	nicht signifikant
Halten	$\mu_{GS} \leq \mu_{GO}$	0,1363	nicht signifikant
Halten	$\mu_{GS} \leq \mu_{GD}$	0,0551	nicht signifikant
Halten	$\mu_{GO} \leq \mu_{GD}$	0,1493	nicht signifikant
Anstieg	$\mu_{AF} \leq \mu_{AS}$	0,1320	nicht signifikant
Anstieg	$\mu_{AF} \leq \mu_{GS}$	0,0855	nicht signifikant
Anstieg	$\mu_{AF} \leq \mu_{GO}$	0,0166	signifikant
Anstieg	$\mu_{AF} \leq \mu_{GD}$	0,0027	sehr signifikant
Anstieg	$\mu_{AS} \leq \mu_{GS}$	0,2504	nicht signifikant
Anstieg	$\mu_{AS} \leq \mu_{GO}$	0,0276	signifikant
Anstieg	$\mu_{AS} \leq \mu_{GD}$	<0,0001	hoch signifikant
Anstieg	$\mu_{GS} \leq \mu_{GO}$	0,0758	nicht signifikant
Anstieg	$\mu_{GS} \leq \mu_{GD}$	<0,0001	hoch signifikant
Anstieg	$\mu_{GO} \leq \mu_{GD}$	0,0039	sehr signifikant

A.2 Daten zum Vergleich von direkter und kooperativer Übergabe der Fahrzeugquerführung

Die nachfolgenden Tabellen A.4 und A.5 zeigen die Kennzahlen K_τ , K_d , K_Δ und K_a zur Bewertung der Fahrsituation für jeden gültigen Teilnehmer des Experiments zum Vergleich von direkter und kooperativer Transition der Fahraufgabe. Die Berechnung der Kennzahlen erfolgt entsprechend ihrer Definition in Abschnitt 5.2.1. Der kleinste Abstand zu einem anderen Objekt ist hierbei aufgeteilt in den kleinsten Abstand zur Schutzplanke d_S und den kleinsten Abstand zum Hindernis d_H . Die Größe K_d ergibt sich aus dem Minimum der beiden Werte.

Tabelle A.4: Kennzahlen aller Versuchspersonen (VP) aus dem Experiment zum Vergleich von direkter und kooperativer Übergabe der Fahrzeugquerführung für den Versuchsdurchgang mit direkter Transition sowie jeweils Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Minimal- und Maximalwert über alle Probanden. Die Kennzahl K_d ergibt sich aus dem Minimum des kleinsten Abstands zur Schutzplanke d_S und dem kleinsten Abstand zum Hindernis d_H , die hier getrennt aufgetragen sind.

VP	K_τ in s	K_d in m		K_Δ in m	K_a in m/s^2
		d_S	d_H		
1	2,411	1,544	0,662	3,315	5,377
2	1,423	1,540	2,079	1,903	4,668
3	2,474	1,450	1,548	2,523	4,043
4	2,162	1,156	2,259	2,106	2,613
5	2,075	2,083	1,744	1,695	1,421
6	0,161	-0,006	0,730	4,798	8,833
7	2,033	1,885	1,478	2,158	4,511
8	1,610	1,184	2,504	1,834	3,030
9	2,851	1,929	1,907	1,685	3,158
10	1,979	1,640	1,943	1,938	2,356
11	1,382	2,296	1,386	1,839	2,730
12	0,962	2,401	1,365	1,755	3,684
13	2,131	2,044	0,058	3,420	5,801
14	0,966	1,094	2,541	1,886	6,998
15	1,265	0,323	2,106	3,093	8,939
16	4,366	2,011	1,681	1,829	2,009
17	3,051	-0,002	1,077	4,446	4,008
18	1,764	2,074	1,742	1,706	2,183
19	1,044	0,933	2,298	2,291	2,634
20	1,993	1,362	2,201	1,959	3,073
21	1,568	1,709	2,009	1,804	2,618
22	2,020	1,895	0,845	2,781	4,173
23	1,665	2,328	1,496	1,698	1,759
24	1,634	0,546	2,143	2,833	6,925
25	1,707	1,674	1,824	2,023	3,046
26	1,501	0,891	2,800	1,831	2,627
27	1,157	1,013	1,826	2,683	0,910
28	0,902	2,121	1,568	1,832	3,332
29	2,435	1,683	1,965	1,873	1,949
30	1,977	1,962	1,838	1,722	1,313
31	0,608	0,986	1,788	2,747	4,554
μ	1,783	1,191		2,323	3,718
σ	0,798	0,555		0,795	2,015
min	0,161	-0,006		1,685	0,910
max	4,366	1,906		4,798	8,939

Tabelle A.5: Kennzahlen aller Versuchspersonen (VP) aus dem Experiment zum Vergleich von direkter und kooperativer Übergabe der Fahrzeugquerführung für den Versuchsdurchgang mit kooperativer Transition sowie jeweils Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Minimal- und Maximalwert über alle Probanden. Die Kennzahl K_d ergibt sich aus dem Minimum des kleinsten Abstands zur Schutzplanke d_S und dem kleinsten Abstand zum Hindernis d_H , die hier getrennt aufgetragen sind.

VP	K_τ in s	K_d in m		K_Δ in m	K_a in m/s ²
		d_S	d_H		
1	1,855	2,299	1,260	1,963	2,713
2	1,926	1,611	1,923	1,987	1,659
3	3,402	1,629	1,978	1,914	3,071
4	1,616	1,846	1,800	1,876	4,990
5	3,210	1,720	1,947	1,854	2,546
6	2,644	1,688	2,073	1,760	3,791
7	2,598	1,136	2,603	1,782	1,902
8	1,521	2,082	1,724	1,716	2,139
9	3,257	1,555	2,030	1,936	4,627
10	1,122	2,136	1,642	1,743	2,840
11	2,229	1,860	1,965	1,697	1,521
12	2,630	1,928	1,918	1,676	1,604
13	1,772	1,360	1,949	2,213	4,857
14	2,127	1,868	1,936	1,717	3,419
15	1,452	1,689	1,981	1,851	1,538
16	2,492	1,451	2,297	1,773	6,109
17	2,919	1,529	2,113	1,879	2,289
18	1,792	1,747	1,680	2,095	3,604
19	1,994	1,159	2,537	1,825	2,402
20	2,013	1,360	2,329	1,833	1,570
21	2,125	1,671	1,905	1,946	2,958
22	1,158	0,133	0,177	5,211	8,079
23	1,948	2,024	1,629	1,868	1,717
24	3,327	1,573	2,226	1,723	1,855
25	2,297	2,100	1,707	1,715	3,139
26	0,891	1,689	2,022	1,810	5,357
27	1,530	1,576	2,211	1,735	2,715
28	2,828	1,316	2,160	2,046	2,343
29	2,817	1,384	2,116	2,022	1,707
30	2,167	2,139	1,699	1,684	1,234
31	1,527	1,681	2,038	1,803	2,424
μ	2,167	1,539		1,957	2,991
σ	0,675	0,327		0,618	1,572
min	0,891	0,133		1,676	1,234
max	3,402	1,918		5,211	8,079

A.3 Daten zum Vergleich von kooperativen Übergaben der Fahrzeugquerführung mit zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf

Die Kennzahlen zur Bewertung der Fahrsituation für jeden gültigen Teilnehmer des Experiments zum Vergleich von zeitbasiertem und adaptivem Verlauf der Transition werden in den Tabellen A.6 und A.7 gezeigt. Die Bewertungskriterien des vorherigen Experiments (vgl. Anhang A.2) werden dafür um die Kennzahl K_y ergänzt, welche im Abschnitt 5.3.1 definiert ist.

Tabelle A.6: Kennzahlen aller Versuchspersonen (VP) aus dem Experiment zum Vergleich von kooperativen Übergaben der Fahrzeugquerführung mit zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf für den Versuchsdurchgang mit zeitbasiertem Transitionsverlauf sowie jeweils Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Minimal- und Maximalwert über alle Probanden. Die Kennzahl K_d ergibt sich aus dem Minimum des kleinsten Abstands zur Schutzplanke d_S und dem kleinsten Abstand zum Hindernis d_H , die hier getrennt aufgetragen sind.

VP	K_T in s	K_d in m		K_Δ in m	K_a in m/s ²	K_y in m
		d_S	d_H			
1	2,256	1,842	1,900	1,780	1,487	0,392
2	1,886	1,722	2,095	1,705	1,469	0,164
3	1,639	2,032	1,750	1,740	1,768	0,231
4	1,250	1,720	1,841	1,961	3,246	0,468
5	0,863	1,823	1,578	2,121	2,744	0,464
6	1,797	2,021	1,815	1,686	3,337	0,181
7	2,504	1,215	1,816	2,491	5,851	0,708
8	1,104	1,643	1,924	1,954	3,103	0,539
9	0,336	1,842	0,879	2,800	4,406	0,265
10	2,159	1,610	1,960	1,951	1,974	0,383
11	2,138	1,673	2,137	1,712	2,456	0,042
12	2,063	1,448	2,348	1,726	2,227	0,429
13	0,868	1,954	1,763	1,805	3,778	0,387
14	0,725	1,365	1,796	2,360	3,329	0,419
15	0,970	1,483	2,130	1,909	6,735	0,686
16	1,577	1,925	0,991	2,605	3,109	0,538
17	1,277	1,761	1,837	1,924	5,880	0,607
18	1,647	1,665	2,132	1,724	1,456	0,141
19	2,006	1,837	1,708	1,976	1,903	0,365
20	2,235	1,732	2,000	1,790	4,975	0,399
21	1,711	1,679	1,732	2,111	2,896	0,530
22	1,771	2,322	0,534	2,665	4,090	0,267
23	1,770	1,422	2,276	1,823	1,229	0,412
24	1,863	2,130	1,648	1,744	2,218	0,430
25	2,463	1,307	2,249	1,966	1,884	0,446
26	1,952	1,270	2,332	1,920	2,506	0,221
27	1,845	1,823	1,976	1,722	3,070	0,546
28	1,339	2,169	1,653	1,699	2,333	0,686
29	0,995	0,551	2,559	2,412	7,901	0,617
30	1,878	1,618	1,754	2,150	2,103	0,325
31	1,839	1,578	2,116	1,828	1,001	0,671
μ	1,636	1,496		1,992	3,112	0,418
σ	0,537	0,348		0,315	1,676	0,174
min	0,336	0,534		1,686	1,001	0,042
max	2,504	1,842		2,800	7,901	0,708

Tabelle A.7: Kennzahlen aller Versuchspersonen(VP) aus dem Experiment zum Vergleich von kooperativen Übergaben der Fahrzeugquerführung mit zeitbasiertem und adaptivem Transitionsverlauf für den Versuchsdurchgang mit adaptivem Transitionsverlauf sowie jeweils Mittelwert μ , Standardabweichung σ , Minimal- und Maximalwert über alle Probanden. Die Kennzahl K_d ergibt sich aus dem Minimum des kleinsten Abstands zur Schutzplanke d_S und dem kleinsten Abstand zum Hindernis d_H , die hier getrennt aufgetragen sind.

VP	K_τ in s	K_d in m		K_Δ in m	K_a in m/s ²	K_y in m
		d_S	d_H			
1	1,789	1,787	2,038	1,696	2,373	0,174
2	0,312	-0,033	1,412	4,143	7,967	0,528
3	0,963	1,598	1,756	2,168	3,330	0,087
4	2,190	1,262	1,904	2,356	2,796	0,261
5	1,347	1,589	1,995	1,938	3,204	0,273
6	1,542	1,748	1,776	1,997	3,197	0,177
7	1,386	2,447	0,528	2,547	8,030	0,523
8	1,871	1,873	1,722	1,926	2,825	0,199
9	1,284	2,179	1,224	2,119	4,312	0,574
10	1,413	1,483	1,602	2,437	2,720	0,463
11	2,806	1,504	2,326	1,691	2,114	0,073
12	1,653	2,347	1,202	1,972	4,140	0,177
13	2,022	1,714	2,084	1,724	1,853	0,144
14	0,703	2,255	1,414	1,853	4,674	0,442
15	2,445	1,111	2,091	2,319	6,351	0,316
16	1,749	1,498	2,180	1,844	2,772	0,229
17	1,079	1,901	1,231	2,389	6,640	0,616
18	1,988	1,969	1,865	1,688	2,219	0,310
19	2,273	1,252	1,939	2,330	3,177	0,176
20	2,142	1,299	1,196	3,026	7,399	0,298
21	1,715	2,451	1,396	1,675	3,616	0,336
22	1,701	2,137	0,839	2,545	3,352	0,472
23	1,577	1,938	1,631	1,952	4,618	0,212
24	1,745	2,052	1,662	1,808	3,307	0,400
25	2,044	1,675	2,134	1,713	3,342	0,497
26	1,406	2,145	1,703	1,674	3,008	0,267
27	2,097	1,645	2,008	1,868	4,598	0,131
28	1,492	2,250	1,569	1,703	2,431	0,219
29	1,783	2,150	1,665	1,706	1,797	0,214
30	1,302	1,627	2,128	1,767	3,351	0,117
31	0,273	0,508	1,124	3,890	6,819	0,191
μ	1,616	1,381	2,144	3,946	0,293	
σ	0,564	0,427	0,602	1,805	0,153	
min	0,273	-0,033	1,674	1,797	0,073	
max	2,806	1,863	4,143	8,030	0,616	

Literaturverzeichnis

Eigene Veröffentlichungen und Tagungsbeiträge

- [FKM⁺20] FLAD, M.; KARG, P.; MARTIN, M.; ROITBERG, A.; MAZEWITSCH, M.; KENAR, E.; AHRENS, L.; FLECKEN, B.; KALB, L.; KARAKAYA, B.; LUDWIG, J.; PRUKSCH, A.; STIEFELHAGEN, R.; HOHMANN, S.: *Smart Automotive Mobility - Reliable Technology for the Mobile Human*, Kapitel Personalisation and Control Transition between Automation and Driver in Highly Automated Cars (Springer), 2020, Veröffentlichung ausstehend
- [FLH18] FLAD, M.; LUDWIG, J.; HOHMANN, S.: Differential-game-based driver assistance system for fuel-optimal driving, in: *The Twelfth International Conference Game Theory and Management*, 12 (Saint Petersburg, Russia), 2018, S. 43
- [FLR⁺20] FLAD, M.; LUDWIG, J.; ROITBERG, A.; KARG, P.; STIEFELHAGEN, R.; HOHMANN, S.: *Schlussbericht des Karlsruher Instituts für Technologie für das BMBF-Forschungsvorhaben Personalisierte, adaptive, kooperative Systeme für automatisierte Fahrzeuge*, Technischer Bericht, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2020, Veröffentlichung ausstehend
- [KGHL17] KÖNIG, A.; GUTBROD, M.; HOHMANN, S.; LUDWIG, J.: Bridging the gap between open loop tests and statistical validation for highly automated driving, in: *SAE International Journal of Transportation Safety*, 5, Nr. 1, 2017, S. 81–87
- [KLBH14] KASPAR, S.; LUDWIG, J.; BÜNTE, T.; HOHMANN, S.: Robust torque vectoring control, in: *Proceedings of the 19th IFAC World Congress*, Band 47 (Cape Town, South Africa), 2014, S. 12023–12028
- [LDFH14] LUDWIG, J.; DIEHM, G.; FLAD, M.; HOHMANN, S.: Optimal interaction structure of human drivers cooperation: A pilot study, in: *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (San Diego, USA), 2014, S. 3593–3598
- [LGFH17] LUDWIG, J.; GOTE, C.; FLAD, M.; HOHMANN, S.: Cooperative dynamic vehicle control allocation using time-variant differential games, in: *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (Banff, Canada), 2017, S. 117–122

- [LHFH18] LUDWIG, J.; HAAS, A.; FLAD, M.; HOHMANN, S.: A comparison of concepts for control transitions from automation to human, in: *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (Miyazaki, Japan), 2018, S. 3201–3206
- [LMH⁺18] LUDWIG, J.; MARTIN, M.; HORNE, M.; FLAD, M.; VOIT, M.; STIEFELHAGEN, R.; HOHMANN, S.: Driver observation and shared vehicle control supporting the driver on the way back into the control loop, in: *at - Automatisierungstechnik*, 66, Nr. 2, 2018, S. 146–159
- [MLR⁺19] MARTIN, M.; LUDWIG, J.; ROITBERG, A.; FLAD, M.; VOIT, M.; HOHMANN, S.; STIEFELHAGEN, R.: Innenraumbeobachtung für die kooperative Übergabe zwischen hochautomatisierten Fahrzeugen und Fahrer, in: *10. VDI-Tagung Mensch-Maschine-Mobilität*, Band 10 (Braunschweig, Deutschland), 2019
- [MSK⁺15] MATTHIESEN, S.; SCHMIDT, S.; KLINGLER, S.; PINNER, T.; EISENMANN, M.; LUDWIG, J.; HOHMANN, S.; ALBERS, A.: Supporting validation activities and self-reflection processes in interdisciplinary design teams, in: *Proceedings of the 17th International Conference on Engineering and Product Design Education (E&PDE15)*, Band 17 (Loughborough, UK), 2015, S. 418–423
- [MSLH15] MATTHIESEN, S.; SCHMIDT, S.; LUDWIG, J.; HOHMANN, S.: Iteratives Vorgehen in räumlich getrennten mechatronischen Entwicklungsteams - Das Wechselspiel von Synthese und testbasierter Analyse, in: *Fachtagung Mechatronik* (Dortmund, Deutschland), 2015, S. 137–142

Betreute studentische Arbeiten

- [Ayl16] AYLLÓN WRIEDT, C.C.: *Aufbau eines Versuchs zur Analyse der kooperativen Lenkradwinkelbestimmung*, Bachelorarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016
- [Geb18] GEBHARD, M.: *Optimale Kooperation durch Modelladaption in Differentialspielen*, Masterarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2018
- [Got16] GOTE, C.: *Development and comparison of adaption functions for advanced driver assistant systems in takeover scenarios by means of differential games*, Masterarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016
- [Haa18] HAAS, A.: *Parametrierung und Vergleich von Konzepten zur Handlungsübergabe zwischen Mensch und Maschine*, Bachelorarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2018
- [Har17] HARR, V.: *Ermittlung des Fahrerfokus unter Verwendung eines Eye-Tracking-Systems*, Bachelorarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017
- [Kel16] KELLIL, M.S.: *Entwurf und Implementierung eines Lenkmodells für einen Fahr Simulator*, Bachelorarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2016
- [Liu18] LIU, H.: *Online estimation of human readiness to takeover*, Masterarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2018
- [Ott18] OTT, F.: *Implementierung eines kooperativen Querführungsassistenzsystems für Übergaben zwischen Fahrer und Fahrzeug*, Bachelorarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2018
- [Sch17] SCHNEIDER, J.: *Implementierung einer manöver- und streckenbasierten Sollwertgenerierung für Fahrerassistenzsysteme*, Bachelorarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017
- [Wör17] WÖRNER, M.: *Implementierung und Vergleich von Algorithmen für die kooperative Regelung*, Bachelorarbeit, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017

Öffentlich zugängliche Quellen

- [AM10] ABBINK, D.A.; MULDER, M.: Neuromuscular analysis as a guideline in designing shared control, in: *Advances in Haptics* (IntechOpen), 2010
- [AMB12] ABBINK, D.A.; MULDER, M.; BOER, E.R.: Haptic shared control: Smoothly shifting control authority?, in: *Cognition, Technology & Work*, 14, Nr. 1, 2012, S. 19–28
- [ARB⁺15] AEBERHARD, M.; RAUCH, S.; BAHRAM, M.; TANZMEISTER, G.; THOMAS, J.; PILAT, Y.; HOMM, F.; HUBER, W.; KAEMPCHEN, N.: Experience, results and lessons learned from automated driving on Germany's highways, in: *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 7, Nr. 1, 2015, S. 42–57
- [BAHH11] BOESSENKOOL, H.; ABBINK, D.A.; HEEMSKERK, C.J.M.; VAN DER HELM, F.C.T.: Haptic shared control improves tele-operated task performance towards performance in direct control, in: *2011 IEEE World Haptics Conference*, 2011, S. 433–438
- [Bau16] BAUSO, D.: *Game theory with engineering applications* (SIAM, Society for Industrial and Applied Mathematics), 2016
- [BBM17] BORRELLI, F.; BEMPORAD, A.; MORARI, M.: *Predictive control for linear and hybrid systems* (Cambridge University Press, Cambridge), 2017
- [BD06] BORTZ, J.; DÖRING, N.: *Forschungsmethoden und Evaluation: Für Human- und Sozialwissenschaftler*, Springer-Lehrbuch (Springer-Verlag, Heidelberg), 4. Auflage, 2006
- [BO99] BAŞAR, T.; OLSDER, G.: *Dynamic noncooperative game theory*, Classics in applied mathematics; 23 (SIAM, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, Pa.), 2. Auflage, 1999
- [Bre11] BRESSAN, A.: Noncooperative differential games, in: *Milan Journal of Mathematics*, 79, Nr. 2, 2011, S. 357–427
- [BS14] BRANDENBURG, S.; SKOTTKE, E.: Switching from manual to automated driving and reverse: Are drivers behaving more risky after highly automated driving?, in: *17th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2014, S. 2978–2983
- [BSMM08] BRONSTEIN, I.N.; SEMENDJAEV, K.A.; MUSIOL, G.; MÜHLIG, H. (Hg.): *Taschenbuch der Mathematik* (Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main), 7. Auflage, 2008
- [BW16] BARTHOLOMAE, F.; WIENS, M.: *Spieltheorie: Ein anwendungsorientiertes Lehrbuch*, SpringerLink (Springer, Wiesbaden), 2016

- [CRBM07] CAMPBELL, J.; RICHARD, C.; BROWN, J.; MCCALLUM, M.: *Crash warning system interfaces: Human factors insights and lessons learned*, Technischer Bericht, National Highway Traffic Safety Administration, 2007
- [CWV⁺11] CORREIA GRÁCIO, B.J.; WENTINK, M.; VALENTE PAIS, A.R.; VAN PAASSEN, M.M.; MULDER, M.: Driver behavior comparison between static and dynamic simulation for advanced driving maneuvers, in: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 20, Nr. 2, 2011, S. 143–161
- [DFTB12] DAMBÖCK, D.; FARID, M.; TÖNERT, L.; BENGLER, K.: Übernahmezeiten beim hochautomatisierten Fahren, in: *Tagung Fahrerassistenz München*, 15, 2012, S. 16
- [EB10] ENES, A.; BOOK, W.: Blended shared control of Zermelo’s navigation problem, in: *American Control Conference (ACC)*, 2010, S. 4307 – 4312
- [EG17] ERSOY, M.; GIES, S. (Hg.): *Fahrwerkhandbuch: Grundlagen – Fahrdynamik – Fahrverhalten – Komponenten – Elektronische Systeme – Fahrerassistenz – Autonomes Fahren – Perspektiven* (Springer-Verlag), 2017
- [EK95a] ENDSLEY, M.; KIRIS, E.: The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation, in: *Human Factors*, 37, Nr. 2, 1995, S. 381–394
- [End88] ENDSLEY, M.: Situation awareness global assessment technique (SAGAT), in: *Proceedings of the IEEE 1988 National Aerospace and Electronics Conference* (Dayton, USA), 1988, S. 789–795
- [Eng05] ENGWERDA, J.C.: *LQ dynamic optimization and differential games* (John Wiley & Sons), 2005
- [ES97] ENDSLEY, M.; STRAUCH, B.: Automation and situation awareness: The accident at Cali, Columbia, in: *Proceedings of the Ninth International Symposium on Aviation Psychology*, 1997, S. 877–881
- [FHH⁺12] FLEMISCH, F.; HEESSEN, M.; HESSE, T.; KELSCH, J.; SCHIEBEN, A.; BELLER, J.: Towards a dynamic balance between humans and automation: Authority, ability, responsibility and control in shared and cooperative control situations, in: *Cognition, Technology & Work*, 14, Nr. 1, 2012, S. 3–18
- [Fis16] FISCHER, F.: *Einfluss von fahrfremden Tätigkeiten auf die Fahrer Verfügbarkeit beim hochautomatisierten Fahren*, Masterarbeit, Technische Universität München, 2016
- [FKL⁺08] FLEMISCH, F.; KELSCH, J.; LÖPER, C.; SCHIEBEN, A.; SCHINDLER, J.; HEESSEN, M.: Cooperative control and active interfaces for vehicle assistance and automation, in: *FISITA World Automotive Congress*, 2008

- [Fla16] FLAD, M.: *Kooperative Regelungskonzepte auf Basis der Spieltheorie und deren Anwendung für die Fahrerassistenz*, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2016
- [Föl94] FÖLLINGER, O.: *Optimale Steuerung und Regelung*, Methoden der Regelungs- und Automatisierungstechnik (Oldenbourg, München), 3. Auflage, 1994
- [FOSH14] FLAD, M.; OTTEN, J.; SCHWAB, S.; HOHMANN, S.: Steering driver assistance system: A systematic cooperative shared control design approach, in: *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, 2014, S. 3585–3592
- [GDLB13] GOLD, C.; DAMBÖCK, D.; LORENZ, L.; BENGLER, K.: “Take over!” How long does it take to get the driver back into the loop?, in: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Band 57, 2013, S. 1938–1942
- [Gen17] GENTLE, J.E.: *Matrix algebra: theory, computations and applications in statistics* (Springer Verlag, Hrsg.: DeVaux, R.; Fienberg, S.; Ingram, O.), 2. Auflage, 2017
- [GG05] GRIFFITHS, P.G.; GILLESPIE, R.B.: Sharing control between humans and automation using haptic interface: primary and secondary task performance benefits, in: *Human factors*, 47, Nr. 3, 2005, S. 574–590
- [GWS08] GOODRICH, K.; WILLIAMS, R.; SCHUTTE, P.: Piloted evaluation of the h-mode, a variable autonomy control system, in motion-based simulation, in: *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit*, 2008, S. 6554–6569
- [Hay72] HAYWARD, J.C.: Near miss determination through use of a scale of danger, in: *Highway Research Record*, , Nr. 384, 1972, S. 24–34
- [HI06] HOLLER, M.; ILLING, G.: *Einführung in die Spieltheorie* (Springer), 6. Auflage, 2006
- [HSB12] HATZ, K.; SCHLODER, J.P.; BOCK, H.G.: Estimating parameters in optimal control problems, in: *SIAM Journal on Scientific Computing*, 34, Nr. 3, 2012, S. A1707–A1728
- [IFH19] INGA, J.; FLAD, M.; HOHMANN, S.: Validation of a human cooperative steering behavior model based on differential games, in: *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*, 2019
- [Isa54a] ISAACS, R.: *Differential games I: Introduction*, Technischer Bericht, RAND Corporation, Santa Monica, USA, 1954
- [Isa54b] ISAACS, R.: *Differential games II: The definition and formulation*, Technischer Bericht, RAND Corporation, Santa Monica, USA, 1954

- [Isa54c] ISAACS, R.: *Differential games III: The basic principles of the solution process*, Technischer Bericht, RAND Corporation, Santa Monica, USA, 1954
- [Isa55] ISAACS, R.: *Differential games VI: Mainly examples*, Technischer Bericht, RAND Corporation, Santa Monica, USA, 1955
- [ISO12] *Road vehicles – Ergonomic aspects of transport information and control systems – Calibration tasks for methods which assess driver demand due to the use of in-vehicle systems*, Technische Spezifikation ISO/TS 14198:2012(E), International Organization for Standardization, Geneva, CH, 2012
- [JAB13] JOHNSON, M.; AGHASADEGHI, N.; BRETTL, T.: Inverse optimal control for deterministic continuous-time nonlinear systems, in: *52nd IEEE Conference on Decision and Control (IEEE)*, 2013, S. 2906–2913
- [Kir04] KIRK, D.E.: *Optimal control theory: An introduction* (Courier Corporation), 2004
- [KKB18] KARAKAYA, B.; KALB, L.; BENGLER, K.: Cooperative approach to overcome automation effects during the transition phase of conditional automated vehicles, in: *12. Workshop Fahrerassistenzsysteme und automatisiertes Fahren (FAS)*, 12, 2018
- [KN05] KIENCKE, U.; NIELSEN, L.: *Automotive control systems: For engine, driveline, and vehicle* (Springer), 2. Auflage, 2005
- [Kol98] KOLLOCK, P.: Social dilemmas: The anatomy of cooperation, in: *Annual Review of Sociology*, 24, Nr. 1, 1998, S. 183–214
- [KSB13a] KUCUKYILMAZ, A.; SEZGIN, T.M.; BASDOGAN, C.: Intention recognition for dynamic role exchange in haptic collaboration, in: *IEEE Transactions on Haptics*, 6, Nr. 1, 2013, S. 58–68
- [Kus19] KUSCH, F.: *Evaluierung von Interaktionskonzepten für hochautomatisierte Fahrzeuge in einer Fahrsimulatorstudie*, Masterarbeit, Technische Universität München, 2019
- [KVV16] KÜHN, M.; VOGELPOHL, T.; VOLLRATH, M.: Was heißt sichere Übergabe? Bewertung der Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung mittels Simulatorstudie, in: *VDI/VW-Gemeinschaftstagung Fahrerassistenz und automatisiertes Fahren*, VDI-Bericht Nr. 2288, 2016
- [KWM16] KAUSTUBH, M.; WILLEMSSEN, D.; MAZO, M.: The modeling of transfer of steering between automated vehicle and human driver using hybrid control framework, in: *Intelligent Vehicles Symposium (IV) (IEEE)*, 2016, S. 808–814

- [LCZ⁺18] LV, C.; CAO, D.; ZHAO, Y.; AUGER, D.; SULLMAN, M.; WANG, H.; DUTKA, L.; SKRYPCHUK, L.; MOUZAKITIS, A.: Analysis of autopilot disengagements occurring during autonomous vehicle testing, in: *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 5, Nr. 1, 2018, S. 58–68
- [LHC⁺16] LU, Z.; HAPPEE, R.; CABRALL, C.; KYRIAKIDIS, M.; DE WINTER, J.: Human factors of transitions in automated driving: A general framework and literature survey, in: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 43, 2016, S. 183–198
- [LK12] LEVINE, S.; KOLTUN, V.: Continuous inverse optimal control with locally optimal examples, in: *Proceedings of the 29th International Conference on Machine Learning (ICML-12)*, 29, 2012, S. 41–48
- [LTC⁺15] LI, Y.; TEE, K.P.; CHAN, W.L.; YAN, R.; CHUA, Y.; LIMBU, D.K.: Continuous role adaptation for human–robot shared control, in: *IEEE Transactions on Robotics*, 31, Nr. 3, 2015, S. 672–681
- [Lud11] LUDWIG, J.: *Aufbau eines Versuchs zur Untersuchung kooperativer Fahrzeugquerführung*, Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2011
- [Lun14] LUNZE, J.: *Regelungstechnik 2 : Mehrgrößensysteme, Digitale Regelung*, Springer-Lehrbuch (Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg), 8. Auflage, 2014
- [LW15] LU, Z.; DE WINTER, J.: A review and framework of control authority transitions in automated driving, in: *Procedia Manufacturing*, 3, 2015, S. 2510–2517
- [LWC⁺18] LV, C.; WANG, H.; CAO, D.; ZHAO, Y.; SULLMAN, M.; AUGER, D.J.; BRIGHTON, J.; MATTHIAS, R.; SKRYPCHUK, L.; MOUZAKITIS, A.: A novel control framework of haptic take-over system for automated vehicles, in: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) (IEEE)*, 2018, S. 1596–1601
- [MCP16] MASKE, H.; CHOWDHARY, G.; PAGILLA, P.: Intent aware shared control in off-nominal situations, in: *IEEE International Conference on Decision and Control (CDC)*, 2016, S. 5171 – 5176
- [Meh07] MEHLMANN, A.: *Strategische Spiele für Einsteiger* (Friedrich Vieweg & Sohn), 2007
- [MJL⁺14] MERAT, N.; JAMSON, A.H.; LAI, F.C.; DALY, M.; CARSTEN, O.M.: Transition to manual: Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle, in: *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 27, 2014, S. 274–282
- [MS19] MESSER, M.; SCHNEIDER, G.: *Statistik: Theorie und Praxis im Dialog* (Springer-Verlag), 2019

- [MTL10] MOMBAUR, K.; TRUONG, A.; LAUMOND, J.: From human to humanoid locomotion—an inverse optimal control approach, in: *Autonomous Robots*, 28, Nr. 3, 2010, S. 369–383
- [MW13] MITSCHKE, M.; WALLENTOWIZ, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge* (Springer-Verlag), 2013
- [Nas51] NASH, J.: Non-cooperative games, in: *Annals of Mathematics*, 1951, S. 286–295
- [NC13] NA, X.; COLE, D.J.: Linear quadratic game and non-cooperative predictive methods for potential application to modelling driver–AFS interactive steering control, in: *Vehicle System Dynamics*, 51, Nr. 2, 2013, S. 165–198
- [Neu28] VON NEUMANN, J.: Zur Theorie der Gesellschaftsspiele, in: *Mathematische Annalen*, 100, Nr. 1, 1928, S. 295–320
- [NMN14a] NAUJOKS, F.; MAI, C.; NEUKUM, A.: The effect of urgency of take-over requests during highly automated driving under distraction conditions, in: *Advances in Human Aspects of Transportation*, , Nr. Part I, 2014, S. 431
- [NW06] NOCEDAL, J.; WRIGHT, S.: *Numerical optimization* (Springer Science & Business Media), 2. Auflage, 2006
- [OKSB10] OGUZ, S.O.; KUCUKYILMAZ, A.; SEZGIN, T.M.; BASDOGAN, C.: Haptic negotiation and role exchange for collaboration in virtual environments, in: *Haptics Symposium*, 2010, S. 371–378
- [PCC⁺15] PRIESS, M.C.; CONWAY, R.; CHOI, J.; POPOVICH, J.M.; RADCLIFFE, C.: Solutions to the inverse LQR problem with application to biological systems analysis, in: *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23, Nr. 2, 2015, S. 770–777
- [PGPB11] PASSENBERG, C.; GROTEN, R.; PEER, A.; BUSS, M.: Towards real-time haptic assistance adaptation optimizing task performance and human effort, in: *IEEE World Haptics Conference (IEEE)*, 2011, S. 155–160
- [PHM⁺15] PETERMANN-STOCK, I.; HACKENBERG, L.; MUHR, T.; JOSTEN, J.; ECKSTEIN, L.: "Bitte übernehmen Sie das Fahren!": Ein multimodaler Vergleich von Übernahmestrategien, in: *16. Braunschweiger Symposium für Automatisierungssysteme, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel (AAET)*, Band 16 (Braunschweig, Deutschland), 2015
- [PHMM13] PETERMANN-STOCK, I.; HACKENBERG, L.; MUHR, T.; MERGL, C.: Wie lange braucht der Fahrer – Eine Analyse zu Übernahmezeiten aus verschiedenen Nebentätigkeiten während einer hochautomatisierten Staufahrt, in: *6. Tagung Fahrerassistenzsysteme. Der Weg zum automatischen Fahren*, Band 6, 2013

- [PLB15] PAPAGEORGIOU, M.; LEIBOLD, M.; BUSS, M.: *Optimierung: Statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung*, SpringerLink (Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg), 4. Auflage, 2015
- [RGL⁺14] RADLMAYR, J.; GOLD, C.; LORENZ, L.; FARID, M.; BENGLER, K.: How traffic situations and non-driving related tasks affect the take-over quality in highly automated driving, in: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Band 58 (Sage Publications Sage CA, Los Angeles, USA), 2014, S. 2063–2067
- [RHN⁺16] RUSSELL, H.E.; HARBOTT, L.K.; NISKY, I.; PAN, S.; OKAMURA, A.M.; GERDES, J.C.: Motor learning affects car-to-driver handover in automated vehicles, in: *Science Robotics*, 1, Nr. 1, 2016
- [RS40] RIEKERT, P.; SCHUNCK, T.E.: Zur Fahrmechanik des gummbereiften Kraftfahrzeugs, in: *Ingenieur-Archiv*, 11, Nr. 3, 1940, S. 210–224
- [SAE16] SAE INTERNATIONAL: Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles, in: *SAE International*, (J3016), 2016
- [SCJ08] SHEN, D.; CRUZ JR, J.B.: Adaptive state feedback Nash strategies for linear quadratic discrete-time games, in: *IFAC Proceedings Volumes*, 41, Nr. 2, 2008, S. 15433–15438
- [SEN10] SENSODRIVE GMBH: *Betriebsanleitung Version 4.0 SENSO-Wheel*, 2010
- [SH69a] STARR, A.; HO, Y.: Further properties of nonzero-sum differential games, in: *Journal of Optimization Theory and Applications*, 3, Nr. 4, 1969, S. 207–219
- [SH69b] STARR, A.; HO, Y.: Nonzero-sum differential games, in: *Journal of Optimization Theory and Applications*, 3, Nr. 3, 1969, S. 184–206
- [Stä08] STÄHLIN, U.: *Eingriffsentscheidung für ein Fahrerssistenzsystem zur Unfallvermeidung*, Dissertation, Institut für Automatisierungstechnik, TU Darmstadt, 2008
- [SWS17] SAITO, T.; WADA, T.; SONODA, K.: Control transferring between automated and manual driving using shared control, in: *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications Adjunct (ACM)*, 2017, S. 115–119
- [SWS18] SAITO, T.; WADA, T.; SONODA, K.: Control authority transfer method for automated-to-manual driving via shared authority mode, in: *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 3, Nr. 2, 2018, S. 198–207
- [Tad12] TADDAY, S.: *Fahrdynamik Optimierung eines Elektrofahrzeugs mit Hilfe von Torque Vectoring*, Diplomarbeit, Hochschule für angewandte Wissenschaften München, 2012

- [TAT11] TAMADDONI, S.H.; AHMADIAN, M.; TAHERI, S.: Optimal vehicle stability control design based on preview game theory concept, in: *American Control Conference (ACC)*, 2011, S. 5249–5254
- [TJ02] TODOROV, E.; JORDAN, M.I.: Optimal feedback control as a theory of motor coordination, in: *Nature Neuroscience*, 5, Nr. 11, 2002, S. 1226–1235
- [Tra12] TRAUTMANN, C.: *Entwurf eines optimalen Reglers für die Querführung eines Fahrzeuges auf Basis von realen Lenkbewegungen*, Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie, 2012
- [VVK⁺16] VOGELPOHL, T.; VOLLRATH, M.; KÜHN, M.; HUMMEL, T.; GEHLERT, T.: Übergabe von hochautomatisiertem Fahren zu manueller Steuerung Teil 1, in: *GDV: Forschungsbericht*, Nr. 39, 2016
- [Way18] WAYMO: *Waymo safety report – On the road to fully self-driving*, Technischer Bericht, Waymo, 2018
- [WHLS15] WINNER, H.; HAKULI, S.; LOTZ, F.; SINGER, C.: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort* (Springer-Vieweg, Wiesbaden), 3. Auflage, 2015
- [Win15] WINTER, S.: *Grundzüge der Spieltheorie* (Springer), 2015
- [WK17] WADA, T.; KONDO, R.: Shared authority mode: Connecting automated and manual driving for smooth authority transfer, in: *Proceedings of FAST-zero*, 2017
- [WRW⁺19] WOOD, M.; ROBBEL, P.; WITTMAN, D.; LIU, S.; WANG, Y.; KNOBEL, C.; BOYMANNS, D.; SYGUDA, S.; WILTSCHKO, T.; GARBACIK, N.; O'BRIEN, M.; DANNEBAUM, U.; WEAST, J.; DORNIEDEN, B.; ET AL.: *Safety first for automated driving*, White paper, Aptiv, Audi, Baidu, Continental, Daimler, Fiat Chrysler, HERE, Infineon, Intel und VW, 2019
- [WSOS16] WADA, T.; SONODA, K.; OKASAKA, T.; SAITO, T.: Authority transfer method from automated to manual driving via haptic shared control, in: *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)* (IEEE), 2016, S. 2659–2664
- [YSH07] YOUNG, M.S.; STANTON, N.A.; HARRIS, D.: Driving automation: Learning from aviation about design philosophies, in: *International Journal of Vehicle Design (IJVD)*, 45, Nr. 3, 2007, S. 323 – 338
- [Zei91] ZEIDLER, E.: *Applied functional analysis: Main principles and their application* (Springer Verlag, Hrsg.: Marsden, J. and Sirovich, L.), 1991

- Band 01** Diehm, Gunter
Identifikation des menschlichen Bewegungsverhaltens
auf der Basis von Primitiven.
ISBN 978-3-7315-0608-9
- Band 02** Flad, Michael
Kooperative Regelungskonzepte auf Basis der Spieltheorie
und deren Anwendung auf Fahrerassistenzsysteme.
ISBN 978-3-7315-0610-2
- Band 03** Eckert, Marius
Modellbasierte Identifikation fraktionaler Systeme
und ihre Anwendung auf die Lithium-Ionen-Zelle.
ISBN 978-3-7315-0690-4
- Band 04** Krebs, Stefan
Intervallbeobachter für lineare parametervariante Systeme
und deren Anwendung auf die Asynchronmaschine.
ISBN 978-3-7315-0857-1
- Band 05** Kaspar, Stephan
Fahrodynamikuntersuchungen eines Elektrofahrzeugs
mit Einzelrad-Hinterradantrieb.
ISBN 978-3-7315-0916-5
- Band 06** Sauter, Patrick S.
Modellierung und zentrale prädiktive Regelung
von multimodalen Energieverteilnetzen.
ISBN 978-3-7315-0963-9
- Band 07** Kupper, Martin
Verteilte Zustandsschätzung fraktionaler Systeme und
ihre Anwendung auf Lithium-Ionen-Batteriesysteme.
ISBN 978-3-7315-0971-4

- Band 08** Merkert, Lennart
**Optimal Scheduling of Combined Heat and Power Generation
Considering Heating Grid Dynamics.**
ISBN 978-3-7315-1056-7
- Band 09** Ludwig, Julian
**Automatisierte kooperative Transition einer Regelungsaufgabe
zwischen Mensch und Maschine am Beispiel des hochautomati-
sierten Fahrens.**
ISBN 978-3-7315-1069-7

Immer mehr Aufgaben können automatisiert und dadurch dem Menschen abgenommen werden. Herausfordernd sind dabei Situationen, in denen Menschen die Aufgabe unerwartet wieder übernehmen müssen, da ihre Leistungsfähigkeit durch mangelndes Situationsbewusstsein eingeschränkt sein kann. Ein aktuell relevantes Feld sind Übergaben im Kontext des hochautomatisierten Fahrens, da hier sicher gestellt werden muss, dass diese ohne eine Gefährdung des Fahrers und/oder anderer Verkehrsteilnehmer erfolgen.

Um die Qualität bzw. Sicherheit während des gesamten Übergabeprozesses zu gewährleisten, wird in dieser Arbeit ein auf Haptic-Shared-Control basierendes Konzept vorgeschlagen, welches den Menschen durch haptische Interaktion am Stellglied unterstützt. Die hier verwendete Beschreibung der Mensch-Maschine-Interaktion mit Hilfe von zeitvarianten Differentialspielen erlaubt die Ableitung von Anforderungen für eine optimale Unterstützung und darauf aufbauend einen modellbasierten Reglerentwurf. Weiterhin wurde in dieser Arbeit eine Methodik entwickelt, um die aktuelle Bereitschaft des Menschen zur Laufzeit zu schätzen und den Transitionsprozess entsprechend anzupassen.

Der Vergleich mit Methoden aus dem Stand der Technik belegt, dass die in dieser Arbeit entwickelten, neuartigen Verfahren eine entsprechende Auslegung der Unterstützung durch die Automation ermöglichen, welche zu performanteren und sichereren Transitionen von Aufgaben zwischen Mensch und Maschine führen. Für die hier im Fokus stehende Anwendung der Übernahme der Fahraufgabe nach einer hochautomatisierten Fahrt äußert sich dies in kontrollierteren Fahrmanövern und höheren Sicherheitsabständen.