

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Verena Nitsch
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank O. Flemisch
Prof. Dr. phil. Dipl.-Ing. Martin Frenz
Prof. Dr.-Ing. Susanne Mütze-Niewöhner
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Christopher M. Schlick †

Marcel Caspar Attila Baltzer

Interaktionsmuster der Kooperativen Bewegungsführung von Fahrzeugen

Interaktionsmuster der Kooperativen Bewegungsführung von Fahrzeugen

**Interaction Patterns for Cooperative Guidance and Control of
Vehicles**

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Marcel Caspar Attila Baltzer

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Ole Flemisch
Univ.-Prof. Dr. Jörn Hurtienne

Tag der mündlichen Prüfung: 23.11.2020

Industrial Engineering and Ergonomics

Band 39

Marcel Caspar Attila Baltzer

**Interaktionsmuster der Kooperativen
Bewegungsführung von Fahrzeugen**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2020)

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8059-9

ISSN 1865-4665

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Zusammenfassung

Die Dissertation richtet sich nach dem Vorgehen der systemergonomischen Gestaltung. Ausgangspunkt ist der Transfer von kooperativer Bewegung von der Mensch-zu-Mensch-Interaktion hin zur Mensch-zu-hochautomatisiertes Fahrzeug-Interaktion. Dazu wird zunächst eine Übersicht zum Konzept der kooperativen Bewegung gegeben.

Danach wird der Nutzungsraum (Use Space) strukturiert. Ein Nutzungsraum beinhaltet verschiedene Unterdimensionen, die die Nutzung des zu gestaltenden Systems klassifizieren, z.B. Straßentyp (Autobahn, Landstraße o.ä.), das Fahrmanöver oder den Zustand der Automation oder des Fahrers.

Anschließend wird der Gestaltungsraum (Design Space) strukturiert. Dieser beinhaltet eine Übersicht über nutzbare Interaktionsressourcen sowie nutzbare Interaktionsmedien, um einen Raum möglicher Gestaltungsoptionen aufzuspannen.

Nach Strukturierung von Use Space und Design Space wird die Architektur der Interaktionsmediation vorgestellt. Sie ist fundamentaler Bestandteil der betrachteten kooperativen Fahrzeugführung und harmonisiert die Aktivitäten von Automation und Mensch. Sollten Konflikte zwischen Mensch und Automation auftreten, z.B. durch unterschiedliche Beobachtungen, Interpretationen und Aktivitäten, versucht der Interaktionsmediator die richtige Balance zu finden und kooperatives Verhalten zu fördern. Dazu nutzt der Interaktionsmediator Interaktionsmuster.

Basierend auf natürlichen Beispielen, wird das Konzept der Interaktionsmuster, die bereits in der Architektur und in der objektorientierten Programmierung als Gestaltungsmuster Einsatz finden, vorgestellt. Dabei wird außerdem die Nutzung von Image Schemata für die intuitive Verknüpfung von erlebter Interaktion hin zu einem Wahrnehmungszustand vorgeschlagen. Aus den vorgestellten Konzepten wird das Konzept der Interaktionsmuster der kooperativen Bewegungsführung abgeleitet.

Im nächsten Schritt werden verschiedene Interaktionsmuster der kooperativen Bewegungsführung formalisiert und zu einem Interaktionsmusterkatalog zusammengefasst.

Abgeschlossen wird die Schrift mit der Untersuchung eines Kollisionsvermeidungsmusters, u.a. bzgl. Workload, User Experience und Sicherheit.

Abstract

This dissertation follows the approach of balanced Human Systems Integration. Starting point is the transfer of cooperative movements found in human-to-human interaction towards human-to-highly automated vehicle interaction. Therefore, an overview of the concept of cooperative movement is presented.

Afterwards, the Use Space is structured. A Use Space consists of different subdimensions that classify the usage of the system that is to be designed, e.g. type of road (Autobahn, highway etc.), the driving manoeuvre or the state of the automation or driver.

The next step is to structure the Design Space. It consists of an overview of the usable interaction resources as well as the usable interaction media, which opens up the space of design options for the system under development.

After structuring the Use-Space and the Design-Space, an interaction mediation is presented. It represents a fundamental part of cooperative vehicle guidance and control and harmonises the activities of the human operator and the automation. If conflicts between the human operator and automation arise, e.g. due to different observations, interpretations or action implementations, the interaction mediator tries to find the right balance and facilitates cooperative behaviour. To do so, the interaction mediator uses interaction patterns.

In a following step, based on examples taken from nature, the concept of interaction patterns, which is already commonly used in architecture and object-oriented programming, is introduced. Furthermore, the application of image schemas for intuitive linking of experienced interaction towards an internal state of perception is proposed. Consequently, from previously discussed concepts, the concept of interaction patterns for cooperative movement is deducted.

In the next step, different interaction patterns are formalised and summarised into an interaction pattern catalogue.

The evaluation of a collision avoidance pattern, concerning workload, user experience and safety, completes the thesis.

Ein besonderer Dank gebührt meinem Doktorvater und Mentor Prof. Dr.-Ing. Frank Flemisch für die inspirierenden Diskussionen zur kooperativen Bewegungsführung, Interaktionsmustern und Image Schemata. Die vielen gewährten Freiheiten und die vielen spannenden Themengebiete ermöglichten es mir erst, dieses Promotionsvorhaben sowohl organisatorisch als auch inhaltlich mit Leben zu füllen. Auch meinem Kollegen Daniel López möchte ich für die jahrelange Unterstützung, die vielen Diskussion zu Interaktionsmustern und der entsprechenden Verfeinerung des Konzepts danken. Ein weiterer besonderer Dank gebührt meinen ehemaligen Kollegen vom IAW und meinen Kollegen am FKIE, die einem immer wieder verdeutlichen, dass Forschung nicht nur Arbeit ist, sondern auch mit vielen fröhlichen Momenten gespickt sein kann.

Über die fachliche Unterstützung hinaus möchte ich meiner Familie danken. Insbesondere danke ich meinen Eltern, Dr. Margot und Franz-Josef Baltzer für die stete Unterstützung, Diskussion und Verifizierung meiner Beobachtungen zu Interaktionsmustern mit der Realität. Auch möchte ich ihnen dafür danken, dass sie mich Zeit meines Lebens ermutigt und unterstützt haben, meinen Weg zu gehen und fortzusetzen. Außerdem gebührt ein ganz besonderer Dank meiner Ehefrau Annette Schmitz-Baltzer: für das Verständnis, den vorbehaltlosen Rückhalt und die vielen kleinen Anstöße, die zur Finalisierung dieser Schrift führten. Ihnen allen möchte ich dieses Buch widmen.

Vorwort

Lesen Sie dieses Buch nicht! Ich selbst habe es nur gelesen, weil ich musste. Das Leben ist viel zu kurz, um dieses Buch zu lesen!

Diese vernichtende Kritik von Marcel Reich-Ranicki - zumindest die Älteren unter uns kennen ihn noch als wortgewaltigen Literaturkritiker - im Literarischen Quartett Dezember 1999, galt zum Glück nicht der vor Ihnen liegenden Arbeit, und 2021, nach Gutenberg et al., bürge ich als Lektor für den Autor und für diese Arbeit, dass dies das letzte Zitat in diesem Buch sein wird, das nicht ordentlich gekennzeichnet ist. Aber vielleicht können Sie mir nachfühlen, dass mich diese Kritik bereits als jungen Wissenschaftler traf, als gelte sie mir. Auch als erfahrener Wissenschaftler und erst recht als Mentor junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bringt mich dieser Ausbruch von Herrn Reich-Ranicki jedes Mal wieder zum Nachdenken. Lesen Sie diese Dissertation nicht, der Autor, Marcel Baltzer, hat sie nur geschrieben, weil er musste? Wenn das Leben des einen schon viel zu kurz ist, um ein Buch zu lesen, um wieviel ist es dann für den anderen zu kurz, so ein Buch zu schreiben?

Wenn Sie dieses Vorwort lesen, liegt eine mögliche Antwort auf diese für jeden Autor und jeden Leser existentielle Frage vor Ihnen. Gehören Sie zu der zunehmenden Anzahl von Lesern, die sich damit nicht nur Zeit vertreiben, sondern konkrete Antworten auf konkrete Fragen suchen? Sind Sie daran interessiert, wie es hinter dem Horizont heutiger Mensch-Technik Systeme weitergehen könnte? Sind Sie vielleicht sogar selbst im Bereich der Mensch-Technik Interaktion, Automation oder Assistenzsysteme tätig? Dann sind Sie hier genau richtig. Das vor Ihnen liegende Buch behandelt oberflächlich betrachtet die Interaktion mit automatisierten Kraftfahrzeugen, aber bei näherem Hinsehen erkennt man, dass es um etwas viel Fundamentaleres, um eines der Grundfragen unserer Zeit geht:

Wenn unsere Computer immer leistungsfähiger und im Sinne einer *Künstlichen Intelligenz* immer intelligenter werden, wie müssen wir diese Systeme und die Interaktion mit ihnen gestalten, damit wir effizient und angenehm mit ihnen umgehen können, und vor allem, damit wir insgesamt die Kontrolle darüber behalten können? Besonders kritisch ist diese Frage in sicherheitskritischen, komplexen Domänen, wo die sichere und schnelle Interaktion mit der Automation über Leben und Tod entscheidet. Herr Baltzer adressiert diese Fragen in einer extrem sicherheitskritischen Domäne: der Fahrzeugführung, die praktisch jeden betreffen wird, der sich in irgendeiner Form im Straßenver-

kehr bewegt. Statt einem allgemeinen Hype hin zum sogenannten *Autonomen Fahren* nachzulaufen, in der Menschen nur noch Passagiere sind, skizziert er eine deutlich menschenfreundlichere Lösung der kooperativen Bewegungsführung. Er gestaltet partizipativ mit Nutzern allgemeingültige Kooperations- und Interaktionsmuster, implementiert diese in Hard- und Software, untersucht sie in kritischen Simulatorstudien und bringt eine Auswahl davon bis in ein reales Versuchsfahrzeug eines Fahrzeugherstellers.

Die Arbeit zeichnet sich vor allem durch die weite Spanne der Überlegungen aus, angefangen von der Theorie der Kooperation und von Interaktionsmustern über Simulatorstudien hin zu realen Fahrzeugen. Die Balance zwischen menschlichen, technischen und organisatorischen Faktoren, zwischen Breite und Tiefe, zwischen Theorie und Anwendung ist vorbildlich.

Man merkt, dass der Autor das vor Ihnen liegende Buch nicht geschrieben hat, weil er musste, sondern weil er es wollte und konnte. Ich selbst habe es mit Spannung und Freude gelesen, und empfehle dies auch Ihnen. Als Fachbuch wird es vielleicht weniger Leser als ein Roman haben, aber sehr wahrscheinlich Leser, die mit dem Wissen dieses Buches entscheidende Weichen stellen für unser aller, hoffentlich langes Leben. Das Leben ist niemals zu kurz, ein gutes Buch zu schreiben oder zu lesen, und ein solches liegt vor Ihnen. Nun sind Sie am Zug.

Viele Einsichten und viel Vergnügen wünscht Ihnen

Frank Ole Flemisch

Vorveröffentlichte Teilergebnisse

- Altendorf, E., Baltzer, M., Heesen, M., Kienle, M., Weissgerber, T. & Flemisch, F. (2016). H-Mode - A Haptic-Multimodal Interaction Concept for Cooperative Guidance and Control of Partially and Highly Automated Vehicles. In H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz & C. Singer (Hrsg.), *Handbook of Driver Assistance Systems*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12352-3_60.
- Baltzer, M., Altendorf, E., Meier, S. & Flemisch, F. (2014). Mediating the interaction between human and automation during the arbitration processes in cooperative guidance and control of highly automated vehicles: Basic concept and first study. N. Stanton, S. Landry, G. D. Bucchianico & A. Vallicelli (Hrsg.), *Advances in Human Aspects of Transportation Part I*. AHFE Conference.
- Baltzer, M. & Mertens, A. (2014). Technische Unterstützung für gesellschaftsfähiges Altern. *Zeitschrift für Epileptologie*, 27(4), 276–278. <https://doi.org/10.1007/s10309-014-0382-2>.
- Baltzer, M. C. A., Lopez, D., Kienle, M. & Flemisch, F. (2015). Dynamic distribution of control via grip force sensitive devices in cooperative guidance and control. 11. *Berliner Werkstatt Mensch-Maschine-Systeme*, 89–95.
- Baltzer, M. C. A., Krasni, A., Boehmsdorff, P., Linder, T., Heesen, M. & Flemisch, F. (2015). Towards virtually transparent vehicles: First results of a simulator study and a field trial. *AVT-256 Specialists' Meeting on Augmented Reality for Improved Situational Awareness and Survivability of Combat Vehicles*.
- Baltzer, M. C. A., Rudolph, C., López, D. & Flemisch, F. (2016). Cooperative Guidance and Control in Highly Automated Convoys - StrAsRob. N. A. Stanton, S. Landry, G. D. Bucchianico & A. Vallicelli (Hrsg.), *Advances in Human Aspects of Transportation: Proceedings of the AHFE 2016 International Conference on Human Factors in Transportation, July 27-31, 2016, Orlando, Florida, USA* (S. 547–560). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41682-3_46.
- Baltzer, M. C. A., Lopez, D., Flemisch, F., Wesel, G. & Flemisch, F. (2017). Interaction patterns for cooperative guidance and control: Automation mode transition in highly automated truck convoys. *2017 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/smc.2017.8122719>.
- Baltzer, M., Mertens, A., Brandl, C., Altendorf, E. & Flemisch, F. (2017). Architektur des Lebens - Das Alter. M. Kaufmann & H. Stefan (Hrsg.). Peter Lang. <https://doi.org/10.3726/b11744>.
- Baltzer, M. C. A., Lassen, C., López, D. & Flemisch, F. (2018). Behaviour Adaptation Using Interaction Patterns with Augmented Reality Elements. *Augmented Cognition: Intelligent Technologies* (S. 9–23). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91470-1_2.
- Baltzer, M. C. A., López, D. & Flemisch, F. (2019). Towards an interaction pattern language for human machine cooperation and cooperative movement. *Cognition, Technology & Work*, 21(4), 593–606. <https://doi.org/10.1007/s10111-019-00561-8>.
- Baltzer, M., Bielecki, K., Flemisch, F. & Adrat, M. (2019). Kooperative Automation und Fernsteuerbarkeit von landgestützten Waffensystemen. *Wehrwissenschaftliche Forschung - Jahresbericht 2018*.

-
- Baltzer, M. C., Bloch, M., Wasser, J. & Flemisch, F. (2020). Human-vehicle interaction with a metaphor based collision avoidance interaction pattern. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 15360–15367. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2350>.
- Geyer, S., Baltzer, M., Franz, B., Hakuli, S., Kauer, M., Kienle, M., Meier, S., Weißgerber, T., Bengler, K., Bruder, R., Flemisch, F. & Winner, H. (2014). Concept and development of a unified ontology for generating test and use-case catalogues for assisted and automated vehicle guidance. *IET Intelligent Transport Systems*, 8(3), 183–189. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2012.0188>.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung und Vorgehensweise	4
2	Kooperative Bewegung	7
2.1	Autonomie	12
2.2	Kontrollverteilung	13
2.3	Nachvollziehbarkeit	18
2.4	Kompatibilität	19
2.5	Konfliktmanagement	22
2.6	Adaptivität und Adaptierbarkeit	26
2.7	Konzepte kooperativer Bewegung	27
2.7.1	Shared Control	28
2.7.2	H-Mode	28
2.7.3	StrAsRob	33
3	Nutzungsraum (Use Space)	35
3.1	Strukturierung des Nutzungsraums	35
3.2	Ontologie des Nutzungsraums	37
3.2.1	Ego-Fahrzeug	38
3.2.2	Szenerie	38
3.2.3	Szene	40
3.2.4	Situation	41
3.2.5	Szenario	43
3.2.6	Fahrauftrag	44
3.2.7	Route	44
4	Gestaltungsraum (Design Space)	45
4.1	Strukturierung des Gestaltungsraums	45
4.2	Sinnesmodalitäten des Menschen	45
4.2.1	Das optische System	48
4.2.2	Das akustische System	51
4.2.3	Das haptische System	53
4.2.4	Multimodale Implikationen der Gestaltung	56
4.3	Technische Messung	57
4.3.1	Optische Sensorik	57

4.3.2	Akustische Sensorik	58
4.3.3	Taktile Sensorik	59
4.3.4	Elektromagnetische Sensorik	62
4.4	Informationsdarstellung	63
5	Architektur der Interaktionsmediation	65
5.1	Mode Selection And Arbitration Unit	70
5.2	Manoeuvre Selection And Arbitration Unit	74
5.3	Trajectory Adaption And Arbitration Unit	76
5.4	Control Arbitration Unit	78
6	Muster als gemeinsame Sprache	81
6.1	Image Schemata	82
6.2	Entwurfsmuster	84
6.3	Muster in der Gestaltung von Mensch-Computer Schnittstellen	86
6.4	Interaktionsmustersprache für die kooperative Fahrzeugführung	87
7	Interaktionsmuster der Kooperativen Bewegungsführung	93
7.1	Inform-Warn-Intervene	94
7.1.1	Problembeschreibung	94
7.1.2	Lösung	95
7.1.3	Beispielimplementierung	97
7.1.4	Konsequenzen	98
7.2	Mode Transition	99
7.2.1	Problembeschreibung	99
7.2.2	Lösung	100
7.2.3	Beispielimplementierung	103
7.2.4	Konsequenzen	112
7.3	Handover	113
7.3.1	Problembeschreibung	113
7.3.2	Lösung	113
7.3.3	Beispielimplementierung	115
7.3.4	Konsequenzen	117
7.4	Change of course	118
7.4.1	Problembeschreibung	118
7.4.2	Lösung	118
7.4.3	Beispielimplementierung	121
7.4.4	Konsequenzen	126
7.5	Collision Avoidance	127
7.5.1	Problembeschreibung	127

7.5.2	Lösung	127
7.5.3	Beispielimplementierung	130
7.5.4	Konsequenzen	137
8	Validierung	139
8.1	Motivation	139
8.2	Theoretischer Rahmen	140
8.3	Interaktionsmuster: Collision Avoidance	140
8.4	Methodik	141
8.4.1	Teilnehmer	141
8.4.2	Versuchsaufbau	141
8.4.3	Stimuli-Design	146
8.4.4	Versuchsplan	149
8.4.5	Versuchsablauf	150
8.5	Ergebnisse	150
8.5.1	Deskriptive Statistik	150
8.5.2	Inferenzstatistik	150
8.6	Diskussion der Ergebnisse	165
8.6.1	Simulatorkrankheit (SSQ)	165
8.6.2	User Experience (UEQ)	165
8.6.3	Empfundene Belastung durch die Fahraufgaben (NASA-TLX)	166
8.6.4	Sonstige Fragen	167
8.6.5	Sicherheit (TTC)	168
8.6.6	Präferenz der Versuchsbedingung	169
8.6.7	Kommentare der Probanden	169
8.6.8	Limitierungen und Zusammenfassung	172
9	Fazit und Ausblick	175
	Literaturverzeichnis	179
	Abbildungsverzeichnis	195
	Tabellenverzeichnis	201
	Quellcodeverzeichnis	203
	Abkürzungsverzeichnis	205
	Einheitenverzeichnis	211

A Fragebögen	213
A.1 KFF X19-01 (15. Juli - 7. August 2019)	213